

Vasile Mircea Popa

Sarcini dezechilibrate în electrotehnică

Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu
Sibiu, 2014

Unbalanced Loads in Electrotechnics

Îngrijire editorială: autorul
Traducere prefață: autorul
Tehnoredactare: arh. Silviu Ioan Popa

PREFAȚĂ

Cea mai mare parte a energiei electrice produse în lume în momentul de față este în regim trifazat. Acest sistem a fost introdus de Nikola Tesla în 1887. Se știe că producerea, transportul și utilizarea energiei electrice în sistem trifazat este mai economică decât în sistem monofazat. Sistemul trifazat folosește mai puțin material pentru conductoarele de transport a energiei electrice decât sistemul monofazat, bifazat sau sistemul de curent continuu, la aceeași tensiune.

Sistemul electric funcționează în mod normal în regim trifazat simetric și sinusoidal. Cu toate acestea, există anumite situații care pot produce regimuri de funcționare nesimetrice. Funcționarea circuitelor electrice trifazate în regimuri nesimetrice a fost studiată încă de la începuturile utilizării energiei electrice în sistem trifazat. Au fost obținute rezultate fundamentale, ajunse astăzi clasice. Astfel, Stokvis a studiat regimurile nesimetrice și dezechilibrate începând cu anul 1915. În 1918, Dr.C.L. Fortescue a scris o lucrare intitulată “Metoda coordonatelor simetrice aplicată la rezolvarea rețelelor polifazate”. Ulterior, prin contribuția adusă de diverși cercetători, teoria componentelor simetrice s-a dezvoltat și s-a perfecționat.

În lucrarea de față am abordat o serie de aspecte din domeniul sistemelor nesimetrice și al receptoarelor dezechilibrate, mai puțin tratate în literatura de specialitate. Am încercat să aduc unele sistematizări, completări și interpretări proprii acestui subiect și de asemenea, contribuții originale care sunt prezentate explicit în lucrare.

Această carte este de fapt o colecție de articole, care au fost publicate anterior în diverse reviste și volume. Acest lucru constituie un avantaj pentru cititor, deoarece fiecare capitol al cărții are în acest fel un caracter independent și poate fi citit direct. Pe de altă parte, din acest motiv apar inevitabil unele repetări. Totuși, pentru un cititor interesat de conținutul cărții, cea mai bună variantă este citirea cărții în ordinea firească a articolelor, așa cum sunt ele așezate în carte.

Conținutul cărții este organizat pe un capitol de articole (conținând 16 articole), un capitol de lucrări practice, anexă, lista lucrărilor elaborate de autor și bibliografie.

La început se prezintă impedanțele generalizate în electrotehnică, receptorul dezechilibrat generalizat, receptorul dezechilibrat real, receptorul extrem dezechilibrat generalizat și receptorul echilibrat real.

Se prezintă apoi studiul analitic al punții de diode alimentate nesimetric, utilizarea unui program de calculator în acest scop, studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni, aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric, și se introduce un coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate.

Urmează un capitol aplicativ conținând lucrări practice (de laborator).

Ca anexă a cărții este prezentat un tabel care indică unde au mai fost publicate articolele.

Cartea conține și o lista a lucrărilor științifice elaborate de autor între anii 1972 și 2014.

La sfârșitul cărții este prezentată bibliografia.

Cartea poate interesa pe studenți, pe inginerii specializați în teoria circuitelor electrice, precum și pe toți cei pasionați de electrotehnica teoretică și aplicată în general, de teoria circuitelor electrice în special.

Conținutul lucrării poate fi fără îndoială îmbunătățit și completat. Voi fi recunoscător pentru orice observație sau sugestie în acest sens, venită de la cititori.

Sibiu, 1 martie 2014

Autorul.

FOREWORD

Most of the electrical power generated in the world today is three-phase. Three-phase power was first conceived by Nikola Tesla, in 1887. It is found that generation, transmission and utilization of three phase power is more economical than generation of single phase power. A three-phase system uses less conductor material to transmit electric power than equivalent single-phase, two-phase, or direct-current systems at the same voltage.

The electrical power system normally operates in a symmetrical three-phase sinusoidal steady state mode. However, there are certain situations that can cause non-symmetrical operations. The work of three-phased electrical circuits in non-symmetrical situations was studied since the early use of electrical energy in three-phased system. Fundamental results were obtained, considered classical today. Stokvis has studied the unbalanced and non-symmetrical situations as early as 1915. In 1918, Dr.C.L. Fortescue wrote a paper entitled "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks". Subsequently, by the contribution of various researchers, the symmetrical components theory was developed and enhanced.

In this paper I approach a number of issues in the field of non-symmetrical systems and of unbalanced loads, treated less in specialized literature. I tried to bring some systematization, addenda and personal interpretations to this subject and also original contributions which are explicitly presented in paper.

This book is in fact a collection of articles, which were previously published in various scientific journals and other publications. As such, this is a benefit to the reader because each chapter in the book is fairly independent of the others and as such it can be read directly. On the other hand, this approach inevitably leads to some repetitions in the text. However, for a reader really interested in the book, the best option is to read its content in the natural order of the articles, as they appear in the book.

The contents of the book is organized into a chapter of papers (containing 16 items), a chapter of practical works, annex, list of works elaborated by the author and bibliography.

At first it presents the generalized impedances in electrotechnics, the generalized unbalanced load, the real unbalanced load, the generalized extremely unbalanced load and the real balanced load.

In the following it presents the analytical study of unsymmetrically fed three-phase diode bridge, using a computer program for this purpose, study of diode-bridge fed by particular non-symmetrical voltage systems, experimental and synthetic aspects regarding unsymmetrically fed threee-phase diode bridge and insert a non-symmetry global coefficient of three-phase systems.

Follows a chapter containing practical works (laboratory works).

A table showing where articles have previously been published is included as an annex.

The book also contains a list of scientific papers elaborated by the author between 1972 and 2014.

The bibliography is attached at the end of the book.

This book will be of particular interest to students, to engineers specializing in the theory of electrical circuits, and generally to all other readers captivated by the theoretical and applied electrotechnics generally, by the electrical circuits theory particulary.

Certainly, the contents of this book can be improved and enriched in the future. As such, I will be grateful for any comments or suggestions received from the readers.

Sibiu, 1 March 2014

The author.

CUPRINS

Prefață	3
Prefață (în limba engleză)	4
Cuprins	5
Cuprins (în limba engleză)	6
SARCINI DEZECHILIBRATE	7
On Generalized Loads in Electrotechnics	9
The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load	13
Studiul receptorului trifazat cu coeficienți de dezechilibru reali	21
A Synthesis Regarding the Study of a Real Unbalanced Load	27
The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations	31
Analiza cazurilor limită ale receptorului dezechilibrat real	35
Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric	41
Studiul punții de diode alimentată nesimetric	47
Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni	49
Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric	53
Coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate	59
Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors	69
Metodă analitică pentru studiul punții de diode având o sarcină complexă	71
Aspecte comparative privind puntea de diode având o sarcină complexă	81
Analiza puterilor complexe ale unui receptor trifazat	89
Analiza puterilor active ale unui receptor trifazat	95
LUCRĂRI PRACTICE	101
Lucrări de laborator	103
ANEXĂ	135
Tabel care indică unde au mai fost publicate articolele	137
LISTĂ LUCRĂRI	139
Lista lucrărilor publicate	141
Bibliografie	173

CONTENTS

Foreword (in Romanian)	3
Foreword (in English)	4
Contents (in Romanian)	5
Contents (in English)	6
UNBALANCED LOADS	7
On Generalized Loads in Electrotechnics	9
The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load	13
The Study of the Three-Phased Load with Real Unbalanced Coefficients	21
A Synthesis Regarding the Study of a Real Unbalanced Load	27
The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations	31
Real Unbalanced Load Limit Cases Analysis	35
The Analytical Study of Unsymmetrically Fed Three-Phase Diode Bridge	41
The Study of Non-Symmetric Feed Diode-Bridge	47
Study of Diode-Bridge Fed by Particular Non-Symmetrical Voltage Systems	49
Experimental and Synthetic Aspects Regarding Unsymmetrically Fed Three-Phase Diode Bridge	53
Non-Symmetry Global Coefficient of Three-Phase Systems	59
Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors	69
Analytical Method for the Study of the Diode-Bridge with a Complex Load	71
Comparative Aspects Regarding the Diode-Bridge with a Complex Load	81
The Complex Powers Analysis of a Three-Phase Load	89
The Active Powers Analysis of a Three-Phase Load	95
PRACTICAL WORKS	101
Laboratory works	103
ANNEX	135
Table showing where the articles have been previously published	137
LIST OF WORKS	139
List of published works	141
Bibliography	173

SARCINI DEZECHILIBRATE

ON GENERALIZED LOADS IN ELECTROTECHNICS

Vasile Mircea Popa

„Lucian Blaga” University of Sibiu, „Hermann Oberth” Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronic Engineering

E-mail: vasile_mircea.popa@ulbsibiu.ro

Abstract: This paper presents the generalized loads in electrotechnics and a new classification of three-phase loads: unbalanced loads, balanced loads and extremely unbalanced loads. It is considered the impedances with negative real part, in other words generalized impedances. Also, taking into consideration the calculation symmetrical components of impedances, a three-phase impedance system may be divided into two parts: a balanced part and an unbalanced part. We have a clear representation in impedance's complex plane. The bibliography can be found at the end of the paper.

Key words: three-phased load, real unbalanced load, generalized impedance, symmetrical components, calculation symmetrical components of impedances.

1. Introduction

The work of three-phased electrical circuits in non-symmetrical situations was studied since the early use of electrical energy in three-phased system. Fundamental results were obtained, considered classical today. Stokvis has studied the unbalanced and non-symmetrical situations as early as 1915. The Stokvis-Fortescue theorem was published in 1918. Subsequently, by the contribution of various researchers, the symmetrical components theory was developed and enhanced [1],[2].

The Romanian school of electrotechnics has notable contributions in this area, starting with scientist C. Budeanu since the interwar period. A new perspective was shown by professor A. Țugulea in some papers published in recent years [3]. In a near direction are also situated the papers of researcher E. Pavel [1], [2].

In this paper I approach a number of issues in the field of non-symmetrical systems and of unbalanced loads, treated less in specialized literature. I tried to bring some systematization, and personal interpretations to this subject.

2. A new approach

We define generalized impedance as an impedance with a negative real part (equivalent resistance) [1], [2], [4], [5]. We shall consider the star equivalent of a three-phase load:

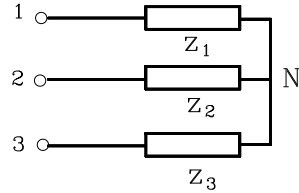


Fig. 1 The star equivalent diagram of a three-phase load

Using the calculation symmetrical components of the impedances, we can write:

$$\begin{cases} z_1 = z_h + z_d + z_i \\ z_2 = z_h + a^2 z_d + a z_i \\ z_3 = z_h + a z_d + a^2 z_i \end{cases} \quad (1)$$

The (1) relation is an extension of Stokvis – Fortescue theorem for impedance three-phase system. The real part of the impedances has to be non-negative in an equivalent load scheme (for real loads).

The balanced part of the three-phase impedance system is made up of a homopolar component for each phase:

$$z_{1E} = z_h; z_{2E} = z_h; z_{3E} = z_h \quad (2)$$

The unbalanced part of the three-phase impedance system will have the following impedances on each phase:

$$\begin{cases} z_{1D} = z_d + z_i \\ z_{2D} = a^2 z_d + a z_i \\ z_{3D} = a z_d + a^2 z_i \end{cases} \quad (3)$$

Consequently, we shall write for each phase:

$$\begin{cases} z_1 = z_{1E} + z_{1D} \\ z_2 = z_{2E} + z_{2D} \\ z_3 = z_{3E} + z_{3D} \end{cases} \quad (4)$$

Under this relationship, we can draw the following equivalence diagram of

the load in fig. 2, outlining the balanced and unbalanced parts:

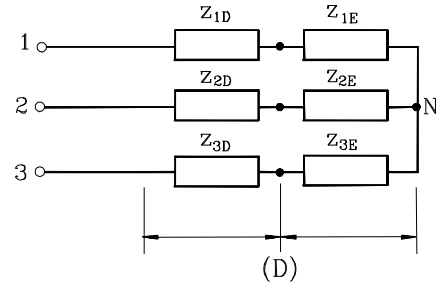


Fig. 2 The balanced and unbalanced (extremely unbalanced) part of a three-phase load

We call a real three-phase load a load made up of three impedances with a real positive part for each. If $z_1 \neq z_2 \neq z_3$, the load is called unbalanced.

Taking into consideration the representation in impedance's complex plane, we have the following situation:

a) real three-phase load:

$$\text{Re}(z_1) \geq 0$$

$$\text{Re}(z_2) \geq 0$$

$$\text{Re}(z_3) \geq 0$$

b) generalized three-phase load:

$$\text{Re}(z_1) < 0, \text{ or}$$

$$\text{Re}(z_2) < 0, \text{ or}$$

$$\text{Re}(z_3) < 0$$

c) unbalanced load:

$$z_1 \neq z_2 \neq z_3$$

d) balanced load:

$$z_1 = z_2 = z_3$$

e) generalized extremely unbalanced load:

$$z_1 + z_2 + z_3 = 0.$$

The classical classification of the three-phase loads is in balanced loads and unbalanced loads. A new approach about this problem considers the impedances with negative real part, in other words, generalized impedances.

In this way, the loads are generally unbalanced; the particular (extreme) cases are the balanced loads and the extremely unbalanced loads. [4],[5] (Fig. 3).

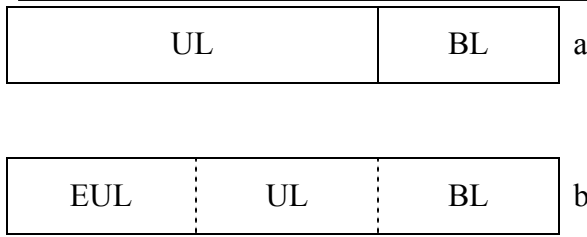


Fig.3 Classification of three-phased loads: classical (a) and proposed (b).

where:

UL = unbalanced load

BL = balanced load

EUL = extremely unbalanced load

We have also the representations in impedances complex plane.

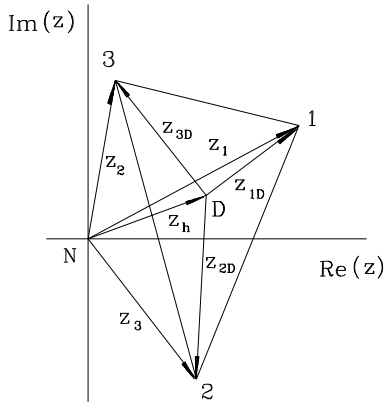


Fig.4 Real unbalanced load

The 123 triangle correspond to the unbalanced three-phase load. The D point is the triangle's weight center. Always we have the relations:

$$z_{1D} + z_{2D} + z_{3D} = 0 \quad (5)$$

Other cases of three-phased loads are presented below.

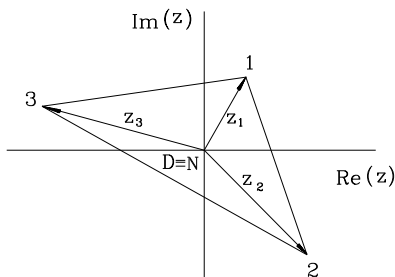


Fig.5 Generalized extremely unbalanced load, $z_h = 0, z_d \neq 0, z_i \neq 0$

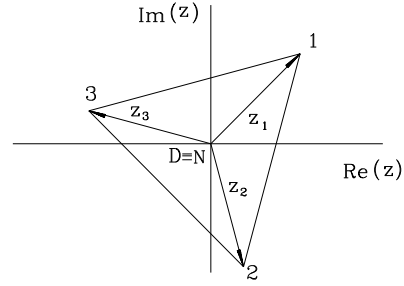


Fig.6 Generalized extremely unbalanced load, $z_h = 0, z_d \neq 0, z_i = 0$

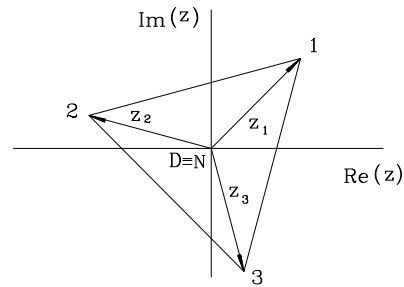


Fig.7 Generalized extremely unbalanced load, $z_h = 0, z_d = 0, z_i \neq 0$

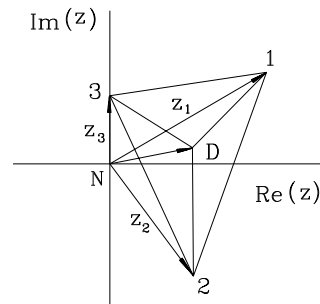


Fig.8 Real unbalanced load, $z_3 =$ inductance

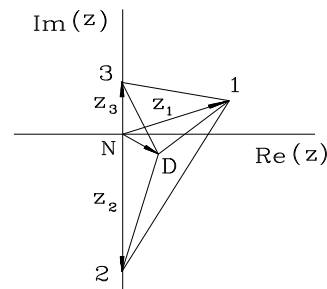


Fig.9 Real unbalanced load, $z_2 =$ capacitance, $z_3 =$ inductance

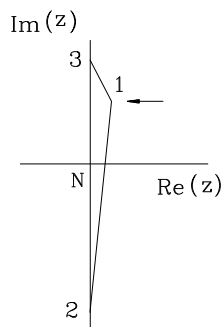
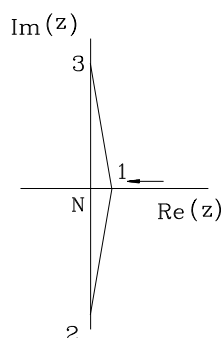


Fig.10 Real extremely unbalanced load

Fig.11 Real extremely unbalanced load
(particular case)

3. Conclusions

In this paper is presented a new view point about the unbalanced three-phased loads. The analysis of the unbalanced three-phased circuit diagrams has been undertaken particularly within the frame of the special computation of short-circuit currents and of grid unsymmetrical faults. The present work deals with the issue of unbalanced receiver and consumer equivalent diagrams, with emphasis on the importance of impedance calculation symmetrical components.

The impedance system schemes may be divided into balanced impedance computational schemes and unbalanced impedance computational schemes.

This new view point about the three-phase loads has possible applications in consumer operating regime computation.

4. References

- [1] Pavel, E. - *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERG, Vol.VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag.194-220
- [2] Pavel, E. - *Noi aspecte ale teoriei receptoarelor trifazate statice dezechilibrate*; Energetica, Vol.37, Nr.11, noiembrie 1989, pag.481-492
- [3] Țugulea, A. - *Considerații privind efectele energetice în regimuri armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.3, martie 1986, pag.121-129
- [4] Popa, V. M.. – *On an Analysis for the Unbalanced Loads*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 93-94
- [5] Popa, V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1999
- [6] Popa, V. M. – *Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2-nd International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, Romania, volume, pag. 91-94.
- [7] Popa, V. M. - *The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load*, Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1, pag. 144-151

THE ENERGETICAL STUDY OF THE UNBALANCED THREE-PHASED LOAD

Vasile Mircea POPA

*“Lucian Blaga” University of Sibiu, Faculty of Engineering; Sibiu – Emil Cioran Street, no. 4;
Phone +40.(0)269.216062, ext. 481; fax: +40.(0)269.212716; E-mail: vasile_mircea.popa@ulbsibiu.ro*

Abstract: The industrial eco-reconstruction involves the decrease of the energetical consumption and the quality rise of the electrical power supplied to the consumers. A very important issue is represented by the analysis of the unbalanced three-phased consumers. The presence of these consumers determines the apparition of the non-symmetrical systems involving currents and voltages as well as the extra-loss within the supply wire.

In the present work, an energetical study of the unbalanced three-phased load is completed by general means. The unbalanced three-phased load is split in two parts, more exactly the balanced part and the extreme unbalanced one. The voltages and currents general equations are written as well as the equations for the balanced part, for the unbalanced one and for the neutral wire. Afterwards, the complex powers absorbed by the three parts are calculated for the direct, inverse and homopolar sequences. Then the diagram of the complex powers is deduced for the real unbalanced load. A synthesis of the study is accomplished, using the unbalance coefficients of the impedances. The extreme cases of functioning are as well studied (from the point of view of the neutral wire impedance). As much as the real unbalance coefficients are concerned, the energetical study is thoroughly approached, obtaining 3D representations of the active powers' ratio which are absorbed by the unbalanced and the balanced parts.

The work's conclusions show that unbalanced loads represent powers and energies sources for homopolar and inverse components, which are absorbed by the balanced loads. The result is represented by the increase of the network's technological consume. Therefore, the unbalance compensation of the three-phased consumers is imposed.

The bibliography can be found at the end of the work.

Key words: real unbalanced load, generalized impedance, symmetrical components, powers circulation, energetical diagrams.

1. Introduction

We define generalized impedance as an impedance with a negative [1], [2], [3], [4] real part (equivalent resistance). We shall consider the star equivalent of a three-phase load:

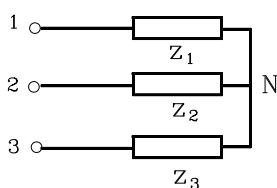


Fig. 1 The star equivalent diagram of a three-phase load

Using the symmetrical calculation components of the impedances, we can write:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_h + Z_d + Z_i \\ Z_2 = Z_h + a^2 Z_d + a Z_i \\ Z_3 = Z_h + a Z_d + a^2 Z_i \end{cases} \quad (1)$$

The balanced part of the three-phase impedance system is made up of a homopolar component for each phase:

$$Z_{1E} = Z_h; Z_{2E} = Z_h; Z_{3E} = Z_h \quad (2)$$

The unbalanced part of the three-phase impedance system will have the following impedances on each phase:

$$\begin{cases} z_{1D} = z_d + z_i \\ z_{2D} = a^2 z_d + a z_i \\ z_{3D} = a z_d + a^2 z_i \end{cases} \quad (3)$$

Consequently, we shall write for each phase:

$$\begin{cases} z_1 = z_{1E} + z_{1D} \\ z_2 = z_{2E} + z_{2D} \\ z_3 = z_{3E} + z_{3D} \end{cases} \quad (4)$$

Under this relationship, we can draw the following equivalence diagram of the load in fig. 2, outlining the balanced and unbalanced parts:

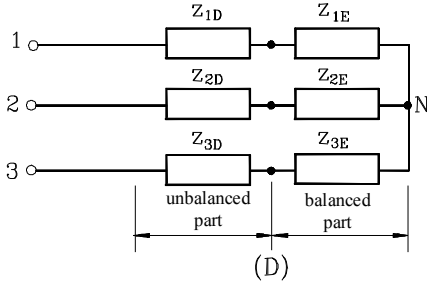


Fig. 2 The balanced and unbalanced (extremely unbalanced) part of a three-phase load

We call a real three-phase load a load made up of three impedances with a real positive part for each. If $z_1 \neq z_2 \neq z_3$, the load is called unbalanced.

2. The equation of voltages and currents

In the following we shall consider the three-phase load in fig. 1, in star connection with neutral wire also taking into consideration the impedance of the z_N neutral wire. (fig. 3)

The \underline{U}_{10} , \underline{U}_{20} , \underline{U}_{30} system of feeding phase

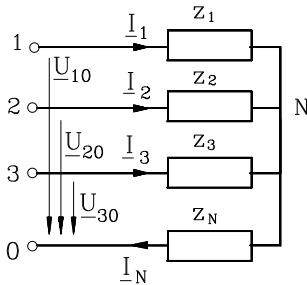


Fig. 3 A three-phase load in star connection with z_N impedance of the neutral wire

voltages is generally non-symmetrical. We also consider the load to be generally unbalanced.

Applying Ohm's Law on each phase, Kirchhoff I Theorem in the N node as well as the Stokvis-Fortescue voltage and currents systems theorem, we get after computation the following matrix equation:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_h + 3z_N & z_i & z_d \\ z_d & z_h & z_i \\ z_i & z_d & z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

For the expression of the symmetrical components of the currents we invert the relation (5).

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} z_h^2 - z_d z_i & z_d^2 - z_h z_i \\ z_i^2 - z_h z_d & z_h^2 - z_d z_i + 3z_N z_h \\ z_d^2 - z_h z_i & z_i^2 - z_h z_d - 3z_N z_d \\ z_i^2 - z_h z_d \\ z_d^2 - z_h z_i - 3z_N z_i \\ z_h^2 - z_d z_i + 3z_N z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

where

$$D = z_h^3 + z_d^3 + z_i^3 - 3z_h z_d z_i + 3z_N z_h^2 - 3z_N z_d z_i \quad (7)$$

The complex power given off at the terminals by the network (generator) is:

$$\underline{S}_g = \underline{U}_{10} \underline{I}_1^* + \underline{U}_{20} \underline{I}_2^* + \underline{U}_{30} \underline{I}_3^* \quad (8)$$

which after calculation can be expressed:

$$\underline{S}_g = 3\underline{U}_h \underline{I}_h^* + 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* + 3\underline{U}_i \underline{I}_i^* \quad (9)$$

The complex power received by the three-phase load with the z_1, z_2, z_3 impedances and the impedance of the neutral wire is:

$$\underline{S} = \underline{U}_{1N} \underline{I}_1^* + \underline{U}_{2N} \underline{I}_2^* + \underline{U}_{3N} \underline{I}_3^* + \underline{U}_{NO} \underline{I}_N^* \quad (10)$$

which can be expressed as:

$$\underline{S} = \underline{S}_g \quad (11)$$

and it follows:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_h \underline{I}_h^* + 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* + 3\underline{U}_i \underline{I}_i^* \quad (12)$$

The complex power used up in the impedance of the neutral wire is:

$$\underline{S}_N = \underline{U}_{NO} \underline{I}_N^* = 9z_N \underline{I}_h^2 \quad (13)$$

From the (6) relation we notice that generally the symmetrical components of currents depend on all symmetrical components of currents (if $z_h \neq 0$; $z_d \neq 0$; $z_i \neq 0$). A number of particular cases can be evidenced considering situations when some of the following parameters are zero: $\underline{U}_h, \underline{U}_d, \underline{U}_i, z_h, z_d, z_i, z_N$ [1], [4].

An important particular case is when the system of tension connections has only a direct symmetrical component. The user is connected to a symmetrical

three-phase generator with star connection with zero internal impedances (with infinite power).

In this case, equation 6 can be written:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} z_d^2 - z_h z_i \\ z_h^2 - z_d z_i + 3z_N z_h \\ z_i^2 - z_h z_d - 3z_N z_d \end{bmatrix} \quad (14)$$

and the (9) relation becomes:

$$\underline{S}_g = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (15)$$

3. Analysis a real unbalanced load

Suppose that the system of feeding voltages has only a direct symmetrical component.

The (5) matrix equation can be divided into three parts, referring to the balanced part, the unbalanced part and the impedance of the neutral wire.

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_h & 0 & 0 \\ 0 & z_h & 0 \\ 0 & 0 & z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & z_i & z_d \\ z_d & 0 & z_i \\ z_i & z_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3z_N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (16)$$

We shall also use the equation of currents (14).

For the balanced part we can write:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_E = \begin{bmatrix} z_h & 0 & 0 \\ 0 & z_h & 0 \\ 0 & 0 & z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_E = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} z_h z_d^2 - z_h^2 z_i \\ z_h^3 - z_h z_d z_i + 3z_N z_h^2 \\ z_h z_i^2 - z_h^2 z_d - 3z_N z_h z_d \end{bmatrix} \quad (18)$$

For the unbalanced part we can write:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_D = \begin{bmatrix} 0 & z_i & z_d \\ z_d & 0 & z_i \\ z_i & z_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_D = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} z_h^2 z_i - z_h z_d^2 + 3z_N z_h z_i - 3z_N z_d^2 \\ z_d^3 + z_i^3 - 2z_h z_d z_i - 3z_N z_d z_i \\ z_h^2 z_d - z_h z_i^2 + 3z_N z_h z_d \end{bmatrix} \quad (20)$$

For the neutral wire we can write:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_N = \begin{bmatrix} 3z_N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_N = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} 3z_N z_d^2 - 3z_N z_h z_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

It will immediately be noticed that:

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{hE} + \underline{U}_{hD} + \underline{U}_{hN} = 0 \quad (23)$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{dE} + \underline{U}_{dD} + \underline{U}_{dN}, \text{ with } \underline{U}_{dN} = 0 \quad (24)$$

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{iE} + \underline{U}_{iD} + \underline{U}_{iN} = 0, \text{ with } \underline{U}_{iN} = 0 \quad (25)$$

Hence it results:

$$\underline{U}_{hE} = -\underline{U}_{hD} - \underline{U}_{hN} \quad (26)$$

$$\underline{U}_{dE} + \underline{U}_{dD} = \underline{U}_d \quad (27)$$

$$\underline{U}_{iE} = -\underline{U}_{iD} \quad (28)$$

To continue, we shall analyze the absorbed power of the real unbalanced load (RUL).

The powers for the balanced part are:

$$\underline{S}_{hE} = 3\underline{U}_{hE} \underline{I}_h^* = 3 \frac{z_h z_d^2 - z_h^2 z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (29)$$

$$\underline{S}_{dE} = 3\underline{U}_{dE} \underline{I}_d^* = 3 \frac{z_h^3 - z_h z_d z_i + 3z_N z_h^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (30)$$

$$\underline{S}_{iE} = 3\underline{U}_{iE} \underline{I}_i^* = 3 \frac{z_h z_i^2 - z_h^2 z_d - 3z_N z_h z_d}{D} \underline{U}_d \underline{I}_i^* \quad (31)$$

The powers for the unbalanced part are:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{hD} &= 3\underline{U}_{hD} \underline{I}_h^* = \\ &= 3 \frac{z_h^2 z_i - z_h z_d^2 + 3z_N z_h z_i - 3z_N z_d^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \underline{S}_{dD} &= 3\underline{U}_{dD} \underline{I}_d^* = \\ &= 3 \frac{z_d^3 + z_i^3 - 2z_h z_d z_i - 3z_N z_d z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_d^* \end{aligned} \quad (33)$$

$$\underline{S}_{iD} = 3\underline{U}_{iD} \underline{I}_i^* = 3 \frac{z_h^2 z_d - z_h z_i^2 + 3z_N z_h z_d}{D} \underline{U}_d \underline{I}_i^* \quad (34)$$

The powers for the impedance of the neutral wire are:

$$\underline{S}_{hN} = 3\underline{U}_{hN} \underline{I}_h^* = 3 \frac{3z_N z_d^2 - 3z_N z_h z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (35)$$

$$\underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_{dN} \underline{I}_d^* = 0 \quad (36)$$

$$\underline{S}_{iN} = 3\underline{U}_{iN} \underline{I}_i^* = 0 \quad (37)$$

It will be noticed that:

$$\underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hN} = -\underline{S}_{hD} \quad (38)$$

$$\underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g \quad (39)$$

$$\underline{S}_{iE} = -\underline{S}_{iD} \quad (40)$$

The total absorbed power of the receiver in question is:

$$\underline{S} = \underline{S}_E + \underline{S}_D + \underline{S}_N \quad (41)$$

$$\underline{S}_E = \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{iE} \quad (42)$$

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD} \quad (43)$$

$$\underline{S}_N = \underline{S}_{hN} + \underline{S}_{dN} + \underline{S}_{iN} \quad (44)$$

It results that:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_d = \underline{S}_g \quad (45)$$

We can also write:

$$\underline{S} = \underline{S}_h + \underline{S}_d + \underline{S}_i \quad (46)$$

$$\underline{S}_h = \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{hN} = 0 \quad (47)$$

$$\underline{S}_d = \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (48)$$

$$\underline{S}_i = \underline{S}_{iE} + \underline{S}_{iD} + \underline{S}_{iN} = 0 \quad (49)$$

All these powers can be arranged in a matrix where the sums of the sides and columns are imposed:

\underline{S}	\underline{S}_E	\underline{S}_D	\underline{S}_N
\underline{S}_h	\underline{S}_{hE}	\underline{S}_{hD}	\underline{S}_{hN}
\underline{S}_d	\underline{S}_{dE}	\underline{S}_{dD}	\underline{S}_{dN}
\underline{S}_i	\underline{S}_{iE}	\underline{S}_{iD}	\underline{S}_{iN}

4. The diagram of the complex powers

The separation of the complex powers on the two parts of the real unbalanced load as well as on the impedance of the neutral wire shows a circulation of internal power between these zones. The balanced part uses both direct power (\underline{S}_{dE}) and the homopolar and reversed powers (\underline{S}_{hE} and \underline{S}_{iE}).

The impedance of the neutral wire uses only the \underline{S}_{hN} homopolar power. The load being only connected to a symmetrical generator which feeds power only to the direct component, we deduce that the homopolar and reversed powers are only received through the unbalanced part of the load.

The unbalanced part uses the power:

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD} = \underline{S} - \underline{S}_{hE} - \underline{S}_{dE} - \underline{S}_{iE} - \underline{S}_{hN} \quad (50)$$

We can say that the unbalanced part of the load acts as a converter of power of the symmetrical components [1], [2], [3], [4].

Considering that in the balanced part of the load enters the feeding network supposed to be also balanced, the homopolar power and the inverse power pertaining to this network are effectively a supplementary consumption compared to an equivalent balanced load of the same power. We can draw a diagram of the complex powers, which is a graphic illustration of the above relationships. It follows that the interpretation of this diagram should be nuanced, strictly connected to the relationships of the complex powers. The diagram of the complex powers is the following:

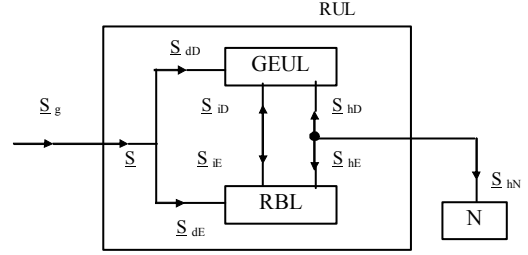


Fig. 4 The diagram of the complex powers for the real unbalanced load (RUL)

The notations are the following:

- GEUL: generalized extremely unbalanced load
- N : impedance of the neutral wire
- RBL : real balanced load
- RUL : real unbalanced load

5. A synthesis using unbalanced coefficients

A characterization of the real unbalanced load may be realized with the help of the unbalanced calculation coefficients of the impedances [1], [3], [4], [5], [6], [7].

The unbalanced coefficient of the direct component is by definition: $k_d = z_d/z_h$ (51)

The unbalanced coefficient of the inverse component is by definition: $k_i = z_i/z_h$ (52)

The coefficient of report of the impedance of the neutral wire is: $k_N = z_N/z_h$ (53)

The coefficients k_d , k_i , k_N are, in general, complex numbers. We shall consider the balanced load which contains on each phase the impedance z_h . Obviously, this load is obtained from the real unbalanced load when the unbalanced part disappears (the triangle 123 restrains in point D). [2], [4] The power absorbed by this real

balanced load would be: $\underline{S}_{RBL} = 3 \frac{U_d^2}{Z_h}$ (54)

The results previously obtained in the case of the real unbalanced load ([4], [5]) are presented in the following tables. More precise, we shall present the distribution of voltages and powers on the balanced part, on the unbalanced part and on the impedance of the neutral wire.

The supply is made with a direct system of feeding voltages (\underline{U}_{10} , \underline{U}_{20} , \underline{U}_{30}).

Table 1: The distribution of voltages.

The real unbalanced load (RUL)	Voltages
The balanced part (RBL)	$\underline{U}_{hE} = \underline{U}_d \frac{k_d^2 - k_i}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{dE} = \underline{U}_d \frac{1 - k_d k_i + 3k_n}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{iE} = \underline{U}_d \frac{k_i^2 - k_d - 3k_N k_d}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{U}_{hD} = \underline{U}_d \frac{k_i - k_d^2 + 3k_N k_i - 3k_N k_d^2}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{dD} = \underline{U}_d \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{iD} = \underline{U}_d \frac{k_d - k_i^2 + 3k_N k_d}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{U}_{hN} = \underline{U}_d \frac{3k_N k_d^2 - 3k_N k_i}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{dN} = 0$
	$\underline{U}_{iN} = 0$

It can be observed that if we have $k_d = k_i = 0$ we obtain $\underline{U}_{dE} = \underline{U}_d$, all the other voltages become equal to zero. It is the case of a balanced load, which has on each phase the impedance z_h , feeding with a direct symmetrical system of phase voltages of the network.

The table 2 is obtained regarding the distribution of powers.

In this table by making $k_d = k_i = 0$ is obtained $\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL}$, the case of the balanced load previously mentioned (all other powers are null).

Both in table 1 and table 2 we can make in turn $k_i = 0$ and $k_d = 0$ and we obtain the corresponding expressions of the respective particular cases.

Table 2: The distribution of powers

The real unbalanced load (RUL)	Absorbed powers
The balanced part (RBL)	$\underline{S}_{hE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ 1 - k_d k_i + 3k_N ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_i^2 - k_d - 3k_N k_d ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{S}_{hD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{(1 + 3k_N) k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dD} = \underline{S}_{RBL} \frac{(k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i)(1 - k_d k_i + 3k_N)^*}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{ k_i^2 - k_d - 3k_N k_d ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{S}_{hN} = \underline{S}_{RBL} \frac{3k_N k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dN} = 0$
	$\underline{S}_{iN} = 0$

6. The real unbalance coefficients case

There are particular cases of unbalanced three-phased loads which show interest and which also have the advantage of calculation simplification [1], [8], [9].

One particular case is that in which the unbalance coefficients are real numbers. The symmetrical calculation components are:

$$z_h = ze^{j\alpha}; z_d = k_d ze^{j\alpha}; z_i = k_i ze^{j\alpha}; z_N = k_N ze^{j\alpha} \quad (55)$$

where z , k_d , k_i , k_N are real numbers, $z > 0$.

Being real numbers the k_d , k_i coefficients, the study of the direct corresponding power for the unbalanced parts is simplified.

So we have:

$$\frac{S_{dD}}{S_{dE}} = \frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 - k_d k_i + 3k_N} \quad (56)$$

where the right member is a real number.

Studying the sign of this ratio we can deduce the cases where the unbalanced part acts like a receptor, more precisely like a generator (the sign is plus or minus). For a fixed k_N , the representation in a plan reported to a cartesian system with k_d and k_i axes, allows the delimitation of positive and negative areas.

Next, we suppose that we have $k_N = 1/3$, meaning $z_h = 3z_N$. Then we'll have:

$$\frac{S_{dD}}{S_{dE}} = \frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i}{2 - k_d k_i} \quad (57)$$

The analyse of the sign of this ratio indicates the situations in which the unbalanced part of the receptor receives active power and supplies active power. In work number [2], such an analysis is made for several particular cases regarding the values of unbalance coefficients (2D graphical representations).

We come back to the pre-analysed variation ratio, meaning:

$$\frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 - k_d k_i + 3k_N} \quad (58)$$

The 3D representation of this ratio is useful and meaningful, and also of the corresponding surface for a fixed k_N . The domains from the variables k_d , k_i plan can be noticed, where the ratio is positive or negative, with the corresponding interpretations.

Next, some representations of this type are presented (fig. 5, 6, 7, 8):

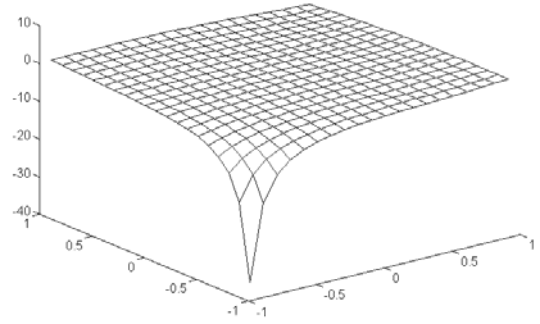


Fig. 5 The 3D graphic for the P_{dD}/P_{dE} variation for $k_N = 0$.

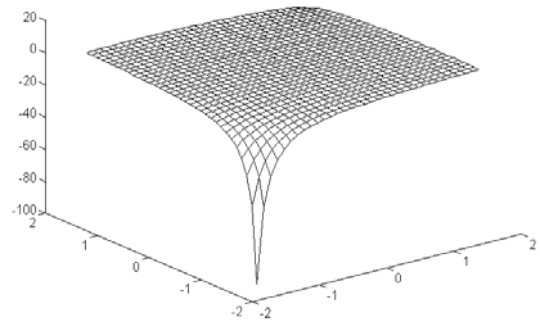


Fig. 6 The 3D graphic for the P_{dD}/P_{dE} variation for $k_N = 2/3$.

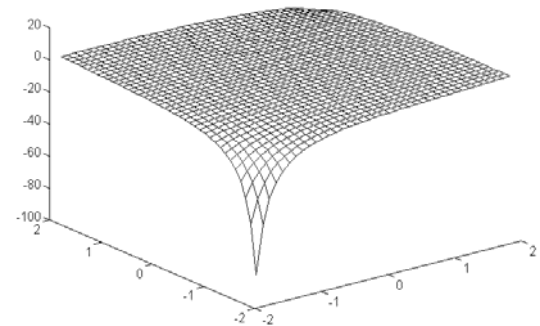


Fig. 7 The 3D graphic for the P_{dD}/P_{dE} variation for $k_N = 1$.

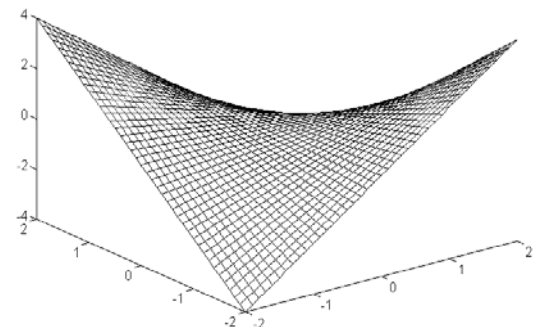


Fig. 8 The 3D graphic for the P_{dD}/P_{dE} variation for $k_N = \infty$.

7. Extreme functioning situations

The extreme cases (from the point of view of the impedance value of the neutral wire) represent the connecting star cases with a neutral wire of practical zero impedance and of the star connection without a neutral wire.

In every of each cases we can use a similar analyze to the one presented previously for the general case of an

z_N impedance [1], [2], [3], [4], [5]. Some conclusions can be draw from the general case. So in the star connecting case with a neutral wire with practically a zero impedance the table with the complex absorbed powers results from Table 2 by letting $z_N = 0$.

In the case of the star connection without a neutral wire, the table with the complex absorbed powers will take the shape shown in table 3:

Table 3: The distribution of powers ($z_N = \infty$)

The real unbalanced load (RUL)	Absorbed powers ($z_N = \infty$)
The balanced part (RBL)	$\underline{S}_{hE} = 0$
	$\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL} \frac{1}{ 1 - k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_d ^2}{ 1 - k_d k_i ^2}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{S}_{hD} = 0$
	$\underline{S}_{dD} = \underline{S}_{RBL} \frac{-k_d k_i}{ 1 - k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{ k_d ^2}{ 1 - k_d k_i ^2}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{S}_{hN} = 0$
	$\underline{S}_{dN} = 0$
	$\underline{S}_{iN} = 0$

8. Conclusions

Regarding tables 1 and 2, we can make a few observations which stress upon some previously shown property.

1. Introducing the generalized impedance notion there can be used systematically the symmetric components of the impedances and can be draw a equivalent of the unbalanced load containing a balanced part and another a extremely unbalanced part.

2. From the voltages and currents equations and from the complex power expressions results the component of voltages and powers on the three sequences (homopolar, direct, inverse) and on the three parts of the load (the balanced part, the extreme unbalanced part and the impedance of the neutral wire). It is shown an internal circulation of powers between these parts of the receiver. In the same time we demonstrate that the extreme unbalanced part acts like an converter of power of the symmetrical components.

3. The voltages and powers check up the relations:

$$\underline{U}_{hE} + \underline{U}_{hD} + \underline{U}_{hN} = 0 \quad (59)$$

$$\underline{U}_{dE} + \underline{U}_{dD} + \underline{U}_{dN} = \underline{U}_d \quad (60)$$

$$\underline{U}_{iE} + \underline{U}_{iD} + \underline{U}_{iN} = 0 \quad (61)$$

$$\underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{hN} = 0 \quad (62)$$

$$\underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{dN} = 3 \underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g \quad (63)$$

$$\underline{S}_{iE} + \underline{S}_{iD} + \underline{S}_{iN} = 0 \quad (64)$$

Because S_{RBL} has its real part positive, from the table 2 immediately results that the active inverse power corresponding to the extremely unbalanced part is negative, so it is a power generated by the extremely unbalanced load. The active powers corresponding to the homopolar and direct may be positive or negative.

4. Regarding the balanced part, the active powers are positive on all the other three components.

5. For the impedance of the neutral wire the active power corresponding to the homopolar component may be positive or negative (eventually null). If k_N is reduced to a real strict positive number, this power is positive (in this case z_N and z_h have the same argument). If z_N is a pure resistance also the active power corresponding to the homopolar component is positive.

6. The using of the unbalanced coefficients k_d , k_i , k_N permits a systematization of the results previously obtained. If we refer to the circulation of the active power, we understand that the active inverse power of the extreme unbalanced part is always negative so it is a power generated by the extreme unbalanced part of

the load. The balanced part of a load or a balanced load absorbs always active power on all three components. But we illustrate the two situations with objective physical existence.

7. In the case of the coefficient of unbalanced real there are must make a detail study of the internal circulation of the active powers.

8. The former general conclusions remain valid for the extreme functioning situations.

Considering the internal circulation of the active powers, the two situations with physical existence can be represented (fig. 9, the case a and b).

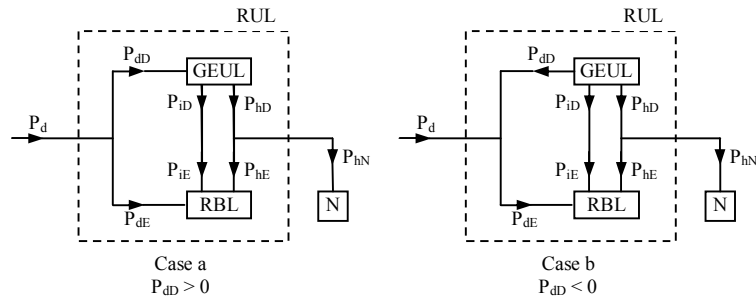


Fig. 9 The diagram of the active powers for the real unbalanced load.

In the figure 9 it was noted: GEUL = generalized extremely unbalanced load; RBL = real balanced load; N = impedance of the neutral wire; RUL = real unbalanced load.

9. As an observation we notice that using the exposed method, an energetical study can be made, taking into consideration the impedances of the line between the generator and the load. The conclusion is that the unbalanced loads are power and energy sources of homopolar and inverse components which are absorbed by the balanced loads, as well as by the supply networks which can be considered as also being balanced. The consequence of these circulations of symmetrical component powers is the rise of technological consume of the networks, which are added to the negative influences over the balanced consumers' run. Therefore, it is known that the three-phased asynchronous engines run in non-symmetrical cases is followed by the decrease of efficiency and in general the working performances, due to the apparition of the inverse spinning magnetic field.

Therefore, the compensation of the three-phased consumers' unbalance is imposed. This compensation has some great technical and economical advantages, representing a complex problem under theoretical and practical aspect. In general, the problem must be solved in connection with the necessity of compensation and that of superior harmonics, and of course, of the improvement of the power factor.

9. References

[1] E. Pavel – “Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate”, ENER, Vol. VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag. 194-220

[2] V. M. Popa – “A New Approach to be Characterized the Unbalanced Three-Phase Loads”, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. XIV (2), Sibiu, 1995, pag. 91-93

[3] V. M. Popa – “On an Analysis for the Unbalanced Loads”, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 93-94

[4] V. M. Popa – “Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații”, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1998

[5] V. M. Popa – “Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load”, Proceedings of the 2-nd International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, România, volume, pag. 91-94.

[6] V. M. Popa, “A Synthesis Regarding the Study of the Real Unbalanced Load”, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, Hunedoara, 2000, pag. 9-12

[7] V. M. Popa, “The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations”, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, Hunedoara, 2000, pag. 13-16

[8] V. M. Popa – “The Complex Analysis of the Real Unbalanced Load”, Analele Universității Româno-Germane din Sibiu, Secțiunea Tehnică, 2000, www.roger-univ.ro

[9] V. M. Popa – “Analiza receptorului dezechilibrat real cu coeficienți de dezechilibru reali”, A patra Conferință națională „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 21-23 mai 2004, vol. V, pag. 151-156.

STUDIUL RECEPTORULUI TRIFAZAT CU COEFICIENȚI DE DEZECHILIBRU REALI

Vasile Mircea POPA

REZUMAT

În lucrare se prezintă unele aspecte privind receptorul trifazat în varianta obișnuită de receptor dezechilibrat real. Se calculează puterile complexe aferente părții echilibrate și părții extrem dezechilibrate și se introduc coeficienții de dezechilibru de calcul ai impedanțelor. În cazul coeficienților reali se face o analiză energetică a receptorului, însoțită de reprezentări grafice 2D și 3D. În final se prezintă unele concluzii și se indică bibliografia.

Cuvinte cheie: impedanță generalizată, receptor dezechilibrat real, puteri absorbite, coeficienți de dezechilibru ai impedanțelor.

THE STUDY OF THE THREE-PHASED LOAD WITH REAL UNBALANCED COEFFICIENTS

We define a generalized impedance as an impedance with a negative real part (equivalent resistance). We define the real unbalanced load, which has a balanced part and an extremely unbalanced part. Also, make energetical diagrams about the powers circulation and are presented the conclusions.

1. Introducere

În unele lucrări anterioare, arătate în bibliografie, s-a definit impedanța generalizată ca o impedanță cu partea reală negativă [1], [2].

Considerăm un receptor trifazat în conexiune stea, având impedanțele fazelor z_1 , z_2 , z_3 și componentele simetrice de calcul ale impedațelor z_h , z_d , z_i . Partea echilibrată a receptorului este constituită pentru fiecare fază de componenta homopolară: $z_{1E} = z_h$, $z_{2E} = z_h$, $z_{3E} = z_h$. Partea extrem dezechilibrată conține pe fiecare fază următoarele impedanțe: $z_{1D} = z_d + z_i$, $z_{2D} = a^2 z_d + a z_i$, $z_{3D} = a z_d + a^2 z_i$.

Putem desena următoarea schemă echivalentă a receptorului, în care sunt evidențiate partea echilibrată și partea dezechilibrată (fig. 1).

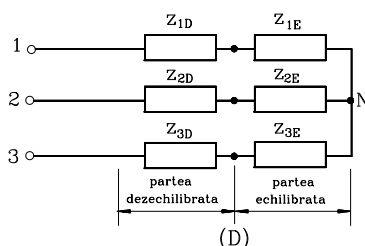


Fig. 1 - Evidențierea părții echilibrate și a părții dezechilibrate (extrem dezechilibrate) pentru un receptor trifazat

Se numește receptor dezechilibrat real (**RDR**) un receptor trifazat format din trei impedanțe, în general de valori complexe diferite între ele și având fiecare partea reală pozitivă.

2. Calculul puterilor absorbite

În cele ce urmează se va considera receptorul trifazat în conexiune stea cu fir neutru, luându-se în considerare și impedanța firului neutru z_N .

Presupunem că sistemul tensiunilor de alimentare are numai componentă simetrică directă. De asemenea, considerăm receptorul în general dezechilibrat.

În continuare, vom analiza puterile absorbite de receptorul dezechilibrat real (RDR) [2], [3].

Puterile pentru partea echilibrată sunt:

$$\underline{S}_{hE} = 3\underline{U}_{hE} \underline{I}_{h}^* = 3 \frac{z_h z_d^2 - z_h^2 z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (1)$$

$$\underline{S}_{dE} = 3\underline{U}_{dE} \underline{I}_d^* = 3 \frac{z_h^3 - z_h z_d z_i + 3z_N z_h^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (2)$$

$$\underline{S}_{iE} = 3\underline{U}_{iE} \underline{I}_i^* = 3 \frac{z_h z_i^2 - z_h^2 z_d - 3z_N z_h z_d}{D} \underline{U}_d \underline{I}_i^* \quad (3)$$

Puterile pentru partea dezechilibrată sunt:

$$\underline{S}_{hD} = 3\underline{U}_{hD} \underline{I}_h^* = 3 \frac{z_h^2 z_i - z_h z_d^2 + 3z_N z_h z_i - 3z_N z_d^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (4)$$

$$\underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_{dD} \underline{I}_d^* = 3 \frac{z_d^3 + z_i^3 - 2z_h z_d z_i - 3z_N z_d z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (5)$$

$$\underline{S}_{iD} = 3\underline{U}_{iD} \underline{I}_i^* = 3 \frac{z_h^2 z_d - z_h z_i^2 + 3z_N z_h z_d}{D} \underline{U}_d \underline{I}_i^* \quad (6)$$

Puterile pentru impedanța firului neutru sunt:

$$\underline{S}_{hN} = 3\underline{U}_{hN} \underline{I}_h^* = 3 \frac{3z_N z_d^2 - 3z_N z_h z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (7)$$

$$\underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_{dN} \underline{I}_d^* = 0 \quad (8)$$

$$\underline{S}_{iN} = 3\underline{U}_{iN} \underline{I}_i^* = 0 \quad (9)$$

Se observă că:

$$\underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hN} = -\underline{S}_{hD}; \quad \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g; \quad \underline{S}_{iE} = -\underline{S}_{iD} \quad (10)$$

Puterea totală absorbită de receptorul considerat este:

$$\underline{S} = \underline{S}_E + \underline{S}_D + \underline{S}_N; \quad \underline{S}_E = \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{iE} \quad (11), (12)$$

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD}, \quad \underline{S}_N = \underline{S}_{hN} + \underline{S}_{dN} + \underline{S}_{iN} \quad (13), (14)$$

Rezultă: $\underline{S} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_d = \underline{S}_g$ (15)

Avem: $\underline{S} = \underline{S}_h + \underline{S}_d + \underline{S}_i; \quad \underline{S}_h = \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{hN} = 0$ (16), (17)

$$\underline{S}_d = \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^*; \quad \underline{S}_i = \underline{S}_{iE} + \underline{S}_{iD} + \underline{S}_{iN} = 0 \quad (18), (19)$$

Separarea puterilor complexe pe cele două părți ale receptorului dezechilibrat real precum și pe impedanța firului neutru pune în evidență o circulație de putere internă între aceste zone.

Partea echilibrată consumă atât puterea directă \underline{S}_{dE} cât și puterile homopolară și inversă \underline{S}_{hE} și \underline{S}_{iE} . Impedanța firului neutru consumă numai puterea homopolară \underline{S}_{hN} . Receptorul fiind alimentat de un generator simetric care furnizează putere numai pe componenta directă, deducem că puterile homopolară și inversă sunt primite prin partea dezechilibrată a receptorului.

Partea dezechilibrată consumă puterea:

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD} = \underline{S} - \underline{S}_{hE} - \underline{S}_{dE} - \underline{S}_{iE} - \underline{S}_{hN} \quad (20)$$

Se poate afirma că partea dezechilibrată a receptorului se comportă ca un convertizor de putere a componentelor simetrice [1], [2], [3], [4], [5].

Considerând că în partea echilibrată a receptorului intră și rețeaua de alimentare presupusă ca fiind și ea echilibrată, puterea homopolară și cea inversă aferentă acestei rețele este efectiv un consum suplimentar față de situația unui receptor echivalent, de aceeași putere, echilibrat.

Se poate desena o diagramă a puterilor complexe, care este o ilustrare grafică a relațiilor anterioare. Prin urmare, interpretarea acestei diagrame trebuie să fie nuanțată, strict legată de aceste relații ale puterilor complexe.

Diagrama puterilor complexe este următoarea:

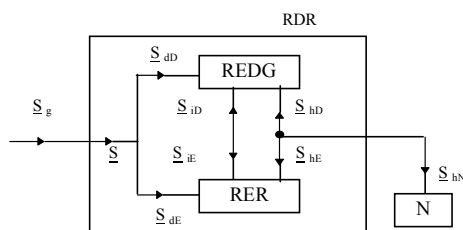


Fig. 2 - Diagrama puterilor complexe pentru receptorul dezechilibrat real (RDR)

Notațiile au următoarele semnificații:

- REDG = receptor extrem dezechilibrat generalizat;
- RER = receptor echilibrat real;
- N = impedanța firului neutru;
- RDR = receptor dezechilibrat real.

3. Coeficienții de dezechilibru ai impedanțelor

O caracterizare a receptorului dezechilibrat real se poate face cu ajutorul coeficienților de dezechilibru de calcul ai impedanțelor [1], [2], [4].

Coeficientul de dezechilibru al componentei directe, al componentei inverse și coeficientul de raportare al impedanței firului neutru sunt date prin definiție :

$$k_d = \frac{z_d}{z_h}; k_i = \frac{z_i}{z_h}; k_N = \frac{z_N}{z_h} \quad (21), (22), (23)$$

Coeficienții k_d , k_i , k_N sunt în general numere complexe.

Vom considera și receptorul echilibrat care conține pe fiecare fază impedanța z_h . Puterea absorbită de acest receptor echilibrat real este notată \underline{S}_{RER} [2], [5].

Prezintă interes studierea puterii directe corespunzătoare părții dezechilibrate și echilibrate, respectiv raportul acestor puteri:

$$\frac{\underline{S}_{dD}}{\underline{S}_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 - k_d k_i + 3k_N} \quad (24)$$

Coeficienții k_d , k_i , k_N sunt în general numere complexe, ceea ce îngreunează studiul. Considerând circulația internă a puterilor active se pot reprezenta cele două situații cu existența fizică (fig. 3, cazurile a și b).

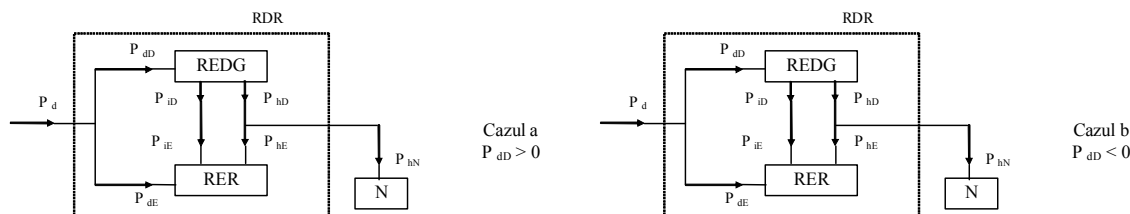


Fig. 3 - Diagrama puterilor active pentru receptorul dezechilibrat real (RDR)

De asemenea prezintă interes studierea raportului:

$$\frac{\underline{S}_{hD}}{\underline{S}_{hE}} = -1 - 3k_N \quad (25)$$

4. Cazul coeficienților de dezechilibru reali

Există cazuri particulare de receptoare trifazate dezechilibrate care prezintă interes și au și avantajul unor simplificări de calcule [1], [2].

Un caz particular important este acela în care coeficienții de dezechilibru sunt numere reale. Componentele simetrice de calcul ale impedanțelor vor fi:

$$z_h = ze^{j\alpha} ; z_d = k_d ze^{j\alpha} ; z_i = k_i ze^{j\alpha} ; z_N = k_N ze^{j\alpha} \quad (26)$$

unde: z, k_d, k_i, k_N sunt numere reale, $z > 0$.

Coeficienții k_d, k_i fiind numere reale, se simplifică studiul puterii directe corespunzătoare părții dezechilibrate.

$$\text{Astfel avem: } \frac{\underline{S}_{dD}}{\underline{S}_{dE}} = \frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 - k_d k_i + 3k_N} \quad (27)$$

unde membrul drept este un număr real.

Studiind semnul acestui raport, deducem cazurile când partea dezechilibrată se comportă ca un receptor, respectiv ca un generator (semnul este plus sau minus). Pentru un k_N fixat, reprezentarea într-un plan raportat la un sistem cartezian cu axele k_d și k_i permite delimitarea zonelor pozitive și negative.

În cele ce urmează vom presupune că avem $k_N = 1/3$, adică $z_h = 3 z_N$. Atunci

$$\text{vom avea: } \frac{\underline{S}_{dD}}{\underline{S}_{dE}} = \frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i}{2 - k_d k_i} \quad (28)$$

Analiza semnului acestui raport ne indică situațiile în care partea dezechilibrată a receptorului primește putere activă, respectiv debitează putere activă.

Coeficienții k_d, k_i fiind numere reale, se simplifică studiul puterii directe corespunzătoare părții dezechilibrate.

$$\text{Astfel avem: } \frac{\underline{S}_{dD}}{\underline{S}_{dE}} = \frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 - k_d k_i + 3k_N} \quad (29)$$

unde membrul drept este un număr real.

Studiind semnul acestui raport, deducem cazurile când partea dezechilibrată se comportă ca un receptor, respectiv ca un generator (semnul este plus sau minus). Pentru un k_N fixat, reprezentarea într-un plan raportat la un sistem cartezian cu axele k_d și k_i permite delimitarea zonelor pozitive și negative.

În cele ce urmează vom presupune că avem $k_N = 1/3$, adică $z_h = 3 z_N$. Atunci

$$\text{vom avea: } \frac{\underline{S}_{dD}}{\underline{S}_{dE}} = \frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i}{2 - k_d k_i} \quad (30)$$

$$\text{Ecuațiile: } k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i = 0 \quad (31)$$

$$2 - k_d k_i = 0 \quad (32)$$

reprezintă un foliu al lui Descartes, respectiv o hiperbolă echilaterală.

Reprezentarea grafică a celor două curbe este redată în figura 4.

Foliul lui Descartes admite asimptota:

$$k_d + k_i + 1 = 0 \quad (33)$$

El este simetric față de prima bisectoare și are "vârful" de coordonate $\left(\frac{3}{2}, \frac{3}{2}\right)$.

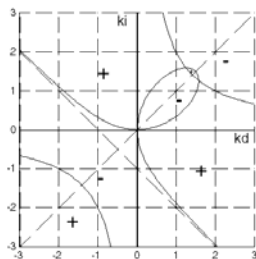


Fig. 4 - Reprezentarea grafică a număratorului (foliul lui Descartes) respectiv a numitorului (hiperbola echilaterală) pentru raportul P_{dD} / P_{dE}

Axele de coordonate sunt tangente la foliu în origine.

Hiperbola echilaterală intersectează prima bisectoare în punctele de coordonate $(\sqrt{2}, \sqrt{2})$ și $(-\sqrt{2}, -\sqrt{2})$.

Studiind semnul număratorului și numitorului, rezultă pentru raport 7 regiuni ale planului cu semnele indicate în figură.

În cele patru regiuni ale planului cu semnul plus partea dezechilibrată a receptorului primește putere activă, iar în cele trei regiuni ale planului cu semnul minus partea dezechilibrată a receptorului debitează putere activă.

În lucrarea [2] se face o astfel de analiză și pentru alte cazuri particulare privind valorile coeficienților de dezechilibru (reprezentări grafice 2D).

Revenim la variația raportului considerat anterior, adică:

$$\frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 - k_d k_i + 3k_N} \quad (34)$$

Este utilă și sugestivă reprezentarea 3D a acestui raport, respectiv a suprafeței corespunzătoare, pentru un k_N fixat. Se observă domeniile din planul variabilelor k_d, k_i unde raportul este pozitiv sau negativ, cu interpretările aferente.

În continuare, se prezintă câteva reprezentări de acest tip (figurile: 5, 6, 7, 8).

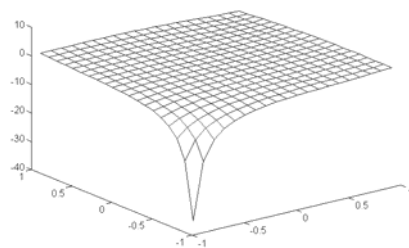


Fig. 5 - Reprezentarea grafică 3D a variației raportului P_{dD}/P_{dE} pentru $k_N = 0$

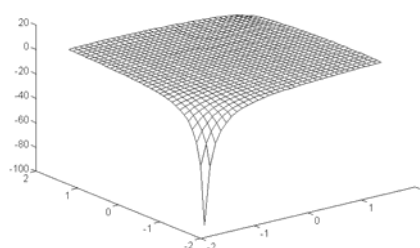


Fig. 6 - Reprezentarea grafică 3D a variației raportului P_{dD}/P_{dE} pentru $k_N = 2/3$

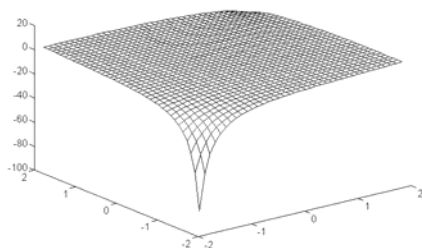


Fig. 7 - Reprezentarea grafică 3D a variației raportului P_{dD}/P_{dE} pentru $k_N = 1$

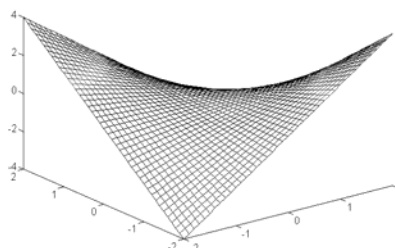


Fig. 8 - Reprezentarea grafică 3D a variației raportului P_{dD}/P_{dE} pentru $k_N = \infty$

5. Concluzii

1. Introducând noțiunea de impedanță generalizată se pot utiliza sistematic componentele simetrice de calcul ale impedanțelor și se poate da o schemă echivalentă a receptorului dezechilibrat, conținând o parte echilibrată și o parte extrem dezechilibrată.

2. Din expresiile puterilor complexe rezultă componentele puterilor pe cele trei secvențe (homopolară, directă, inversă) și pe cele trei părți ale receptorului considerat (partea echilibrată, partea extrem dezechilibrată și impedanța firului neutru).

3. În cazul coeficienților de dezechilibru reali se face un studiu detaliat al circulației interne a puterilor active.

4. Ca observație, remarcăm că utilizând metoda expusă se poate face un studiu energetic, considerând impedanțele liniei dintre generator și receptor. Concluzia care rezultă este că receptoarele dezechilibrate sunt surse (cauze) de puteri și energii de componente homopolare și inverse care sunt absorbite de receptoarele echilibrate, inclusiv de rețelele de alimentare care pot fi considerate ca fiind de asemenea echilibrate. Consecința acestor circulații de puteri de componente simetrice este creșterea consumului tehnologic al rețelelor care se adaugă influențelor negative asupra funcționării consumatorilor echilibrați. Astfel, se știe că funcționarea motoarelor asincrone trifazate în regimuri nesimetrice este însoțită de scăderea randamentului și în general a performanțelor de lucru, datorită apariției câmpului magnetic învârtitor invers.

Se impune prin urmare compensarea dezechilibrului la consumatorii trifazați. Această compensare are mari avantaje tehnice și economice, fiind o problemă complexă sub aspect teoretic și practic. În general, problema trebuie rezolvată în corelare cu necesitatea compensării și a armonicilor superioare și bineînțeles a îmbunătățirii factorului de putere [1], [2].

BIBLIOGRAFIE

- [1] Pavel, E., *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERG, Vol. VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag. 194-220
- [2] Popa, V. M., *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1998
- [3] Popa, V. M., *Using Generalized Impedances In the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2nd International Workshop "CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits" CADEMEC 99, 7-9 September, 1999, Cluj-Napoca, volum, pag. 91-94
- [4] Popa, V. M., *A Synthesis Regarding the Study of the Real Unbalanced Load*, Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, pag. 9-12
- [5] Popa, V. M., *The Complex Analysis of the Real Unbalanced Load*, Analele Universității Româno-Germane din Sibiu, Secțiunea Tehnică, 2000, www.roger-univ.ro

Prof. dr. ing. Vasile Mircea POPA, Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu, cadru didactic asociat la Universitatea Româno-Germană din Sibiu.

A SYNTHESIS REGARDING THE STUDY OF THE REAL UNBALANCED LOAD

Vasile Mircea Popa

Key words: real unbalanced load, generalized impedance, symmetrical components, powers circulation, energetical diagrams.

1. INTRODUCTION

We define a generalized impedance as an impedance with a negative real part (equivalent resistance). Also, we define the real unbalanced load, which has a balanced part and an extremely unbalanced part. In the works [1], [4], [5], the voltage and current equations are considered and the power analysis is made.

2. A SYNTHESIS USING UNBALANCED COEFFICIENTS

A characterization of the real unbalanced load may be realized with the help of the unbalanced calculation coefficients of the impedances [1], [2], [3], [4], [5].

The unbalanced coefficient of the direct component is by definition: $k_d = z_d / z_h$ (1)

The unbalanced coefficient of the inverse component is by definition: $k_i = z_i / z_h$ (2)

The coefficient of report of the impedance of the neutral wire is: $k_N = z_N / z_h$ (3)

The coefficients k_d , k_i , k_N are, in general, complex numbers. We shall consider the balanced load which contains on each phase the impedance z_h . Obviously, this load is obtained from the real unbalanced load when the unbalanced part disappears (the triangle 123 restrains in point D). [2], [4]

The power absorbed by this real balanced load would be:
$$\underline{S}_{RBL} = 3 \frac{U_d^2}{z_h} \quad (4)$$

The results previously obtained in the case of the real unbalanced load ([4], [5]) are presented in the following tables. More precise, we shall present the distribution of voltages and powers on the balanced part, on the unbalanced part and on the impedance of the neutral wire.

The supply is made with a direct system of feeding voltages (\underline{U}_{10} , \underline{U}_{20} , \underline{U}_{30}).

Table 1. The distribution of voltages

The real unbalanced load (RUL)	Voltages
The balanced part (RBL)	$\underline{U}_{hE} = \underline{U}_d \frac{k_d^2 - k_i}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{dE} = \underline{U}_d \frac{1 - k_d k_i + 3k_n}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{iE} = \underline{U}_d \frac{k_i^2 - k_d - 3k_N k_d}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{U}_{hD} = \underline{U}_d \frac{k_i - k_d^2 + 3k_N k_i - 3k_N k_d^2}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{dD} = \underline{U}_d \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{iD} = \underline{U}_d \frac{k_d - k_i^2 + 3k_N k_d}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{U}_{hN} = \underline{U}_d \frac{3k_N k_d^2 - 3k_N k_i}{1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i}$
	$\underline{U}_{dN} = 0$
	$\underline{U}_{iN} = 0$

It can be observed that if we have $k_d = k_i = 0$ we obtain $\underline{U}_{dE} = \underline{U}_d$, all the other voltages become equal to zero. It is the case of a balanced load, which has on each phase the impedance z_h , feeding with a direct symmetrical system of phase voltages of the network.

The table 2 is obtained regarding the distribution of powers.

In this table by making $k_d = k_i = 0$ is obtained $\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL}$, the case of the balanced receiver previously mentioned (all other powers are null).

Both in table 1 and table 2 we can make in turn $k_i = 0$ and $k_d = 0$ and we obtain the corresponding expressions of the respective particular cases.

Table 2. The distribution of powers

The real unbalanced load (RUL)	Absorbed powers
The balanced part (RBL)	$\underline{S}_{hE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ 1 - k_d k_i + 3k_{Ni} ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_i^2 - k_d - 3k_N k_d ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{S}_{hD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{(1 + 3k_N) k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dD} = \underline{S}_{RBL} \frac{(k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i - 3k_N k_d k_i)(1 - k_d k_i + 3k_N)^*}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{ k_i^2 - k_d - 3k_N k_d ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{S}_{hN} = \underline{S}_{RBL} \frac{3k_N k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i + 3k_N - 3k_N k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dN} = 0$
	$\underline{S}_{iN} = 0$

3. CONCLUSIONS

Regarding tables 1 and 2, we can make a few observations which stress upon some previously shown property.

1. The voltages and powers check up the relations:

$$\underline{U}_{hE} + \underline{U}_{hD} + \underline{U}_{hN} = 0 \quad (5) \quad \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{hN} = 0 \quad (8)$$

$$\underline{U}_{dE} + \underline{U}_{dD} + \underline{U}_{dN} = \underline{U}_d \quad (6) \quad \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g \quad (9)$$

$$\underline{U}_{iE} + \underline{U}_{iD} + \underline{U}_{iN} = 0 \quad (7) \quad \underline{S}_{iE} + \underline{S}_{iD} + \underline{S}_{iN} = 0 \quad (10)$$

Because \underline{S}_{RBL} has its real part positive, from the table 2 immediately results that the active inverse power corresponding to the extremely unbalanced part is negative, so it is a power generated by the extremely unbalanced load. The active powers corresponding to the homopolar and direct may be positive or negative.

2. Regarding the balanced part, the active powers are positive on all the other three components.

3. For the impedance of the neutral wire the active power corresponding to the homopolar component may be positive or negative (eventually null). If k_N is reduced to a real strict positive number, this power is positive (in this case z_N and z_h have the same argument). If z_N is a pure resistance also the active power corresponding to the homopolar component is positive.

Considering the internal circulation of the active powers, the two situations with physical

existence can be represented (fig. 1, the case a and b).

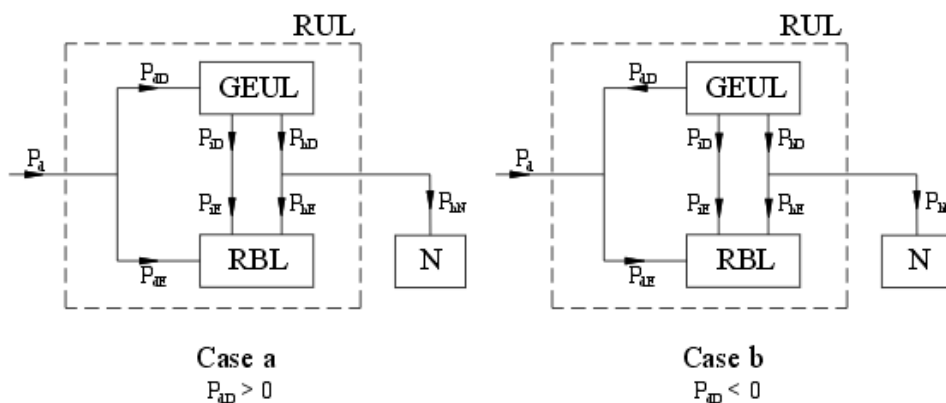


Fig. 1 The diagram of the active powers for the real unbalanced load

In the figure 1 it was noted: GEUL = generalized extremely unbalanced load; RBL = real balanced load; N = impedance of the neutral wire; RUL = real unbalanced load.

4. REFERENCES

- [1] Pavel E., *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERG, Vol. VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag. 194-220
- [2] Popa V. M., *A New Approach to be Characterized the Unbalanced Three-Phase Loads*, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. XIV (2), Sibiu, 1995, pag. 91-93
- [3] Popa V. M., *On an Analysis for the Unbalanced Loads*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 93-94
- [4] Popa V. M., *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1998
- [5] Popa V. M., *Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2-nd International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, România, volume, pag. 91-94.

5. REZUMAT

În lucrarea “O sinteză privind studiul receptorului dezechilibrat real” este prezentată o sinteză privind studiul receptorului dezechilibrat real. Se utilizează coeficienții de dezechilibru de calcul ai impedanțelor. Rezultatele sunt redată în două tabele, urmate de concluzii.

6. DATE DESPRE AUTOR

Nume: Popa; Prenume: Vasile Mircea; Titlul academic: conferențiar doctor inginer; Instituția: Universitatea “Lucian Blaga” Sibiu, Facultatea de Inginerie; Adresa: Facultatea de Inginerie, str. E. Cioran nr. 4, Sibiu; Telefon: 069-216062, int. 481; E-mail: popavm@vectra.sibiu.ro

THE STUDY OF THE REAL UNBALANCED LOAD FOR EXTREME FUNCTIONING SITUATIONS

Vasile Mircea Popa

Key words: real unbalanced load, generalized impedance, symmetrical components, powers circulation, energetical diagrams, extreme functioning situations.

1. INTRODUCTION

We define a generalized impedance as an impedance with a negative real part (equivalent resistance). Also, we define the real unbalanced load, which has a balanced part and an extremely unbalanced part. In the works [1], [4], [5], the voltage and current equations are considered and the power analysis is made.

2. EXTREME FUNCTIONING SITUATIONS

The extreme cases (from the point of view of the impedance value of the neutral wire) represent the connecting star cases with a neutral wire of practical zero impedance and of the star connection without a neutral wire.

In every of each cases we can use a similar analyze to the one presented previously for the general case of an z_N impedance [1], [2], [3], [4], [5]. Some conclusions can be draw from the general case. So in the star connecting case with a neutral wire with practicaly a zero impedance the table with the complex absorbed powers looks like this:

Table 1. The distribution of powers ($z_N = 0$)

The real unbalanced load (RUL)	Absorbed powers ($z_N = 0$)
The balanced part (RBL)	$\underline{S}_{hE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ 1 - k_d k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_i^2 - k_d ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i ^2}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{S}_{hD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{ k_d^2 - k_i ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{dD} = \underline{S}_{RBL} \frac{(k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i)(1 - k_d k_i)^*}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{ k_i^2 - k_d ^2}{ 1 + k_d^3 + k_i^3 - 3k_d k_i ^2}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{S}_{hN} = 0$
	$\underline{S}_{dN} = 0$
	$\underline{S}_{iN} = 0$

The raport prevoiusly studied (looks like this) can be write like this:

$$\frac{P_{dD}}{P_{dE}} = \frac{k_d^3 + k_i^3 - 2k_d k_i}{1 - k_d k_i} \quad (1)$$

The study of this raport is similar to the general case [1], [2], [4].

In the case of the star connection without a neutral wire, the table with the complex absorbed powers will take the shape shown in table 2.

The raport studied previously shows like this:

$$\frac{P_{hD}}{P_{hE}} = -k_d k_i \quad (2)$$

The study of this case is similar to the general case [4].

Table 2. The distribution of powers ($z_N = \infty$)

The real unbalanced load (RUL)	Absorbed powers ($z_N = \infty$)
The balanced part (RBL)	$\underline{S}_{hE} = 0$
	$\underline{S}_{dE} = \underline{S}_{RBL} \frac{1}{ 1 - k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iE} = \underline{S}_{RBL} \frac{ k_d ^2}{ 1 - k_d k_i ^2}$
The unbalanced part (GEUL)	$\underline{S}_{hD} = 0$
	$\underline{S}_{dD} = \underline{S}_{RBL} \frac{-k_d k_i}{ 1 - k_d k_i ^2}$
	$\underline{S}_{iD} = -\underline{S}_{RBL} \frac{ k_d ^2}{ 1 - k_d k_i ^2}$
The impedance of the neutral wire (N)	$\underline{S}_{hN} = 0$
	$\underline{S}_{dN} = 0$
	$\underline{S}_{iN} = 0$

3. CONCLUSIONS

Keeping in mind the different aspects shown in relation with the three – phase unbalanced load feeding with a general sistem of tensions we can draw some conclusions:

1. Introducing the generalized impedance notion there can be used sistematically the symmetric components of the impedances and can be draw a equivalent of the unbalanced receiver containing a balanced part and another a extremely unbalanced part.
2. From the voltage and current equations and from the complex power expressions results the component of voltages and powers on the three sequences (homopolar, direct, inverse) and on the three parts of the receiver (the balanced part, the extreme unbalanced part and the impedance of the neutral wire). It is shown an internal circulation of powers between these parts of the receiver. In the same time we demonstrate that the extreme unbalanced part acts like an converter of power of the symmetrical components.
3. The using of the unbalanced coefficients k_d , k_i , k_N permits a sistematization of the results previously obtained. If we refer to the circulation of the active power, we understand that the active inverse power of the extreme unbalanced part is always negative so it is a power generated by the extreme unbalanced part of the receiver. The balanced part of a receiver or a balanced reveiver absorbs always active power on all three components. But we evidientiate the two situations with objective physical existance.

4. In the case of the coefficient of unbalanced real there are must make a detail study of the internal circulation of the active powers.
5. The former general conclusions remain valid for the extreme functioning situations.

4. REFERENCES

- [1] Pavel E., *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERG, Vol. VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag. 194-220
- [2] Popa V. M., *A New Approach to be Characterized the Unbalanced Three-Phase Loads*, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol. XIV (2), Sibiu, 1995, pag. 91-93
- [3] Popa V. M., *On an Analysis for the Unbalanced Loads*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 93-94
- [4] Popa V. M., *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1998
- [5] Popa V. M., *Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2-nd International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, România, volume, pag. 91-94.

5. REZUMAT

În lucrarea “Studiul receptorului dezechilibrat real pentru situații extreme de funcționare” sunt prezentate situațiile extreme de funcționare ale unui receptor dezechilibrat real cu conexiune stea. Aceste cazuri extreme (din punctul de vedere al valorii impedanței firului neutru) reprezintă cazurile legăturii în stea cu fir neutru de impedanță practic nulă respectiv al legării în stea fără fir neutru. Puterile complexe absorbite în cele două situații extreme, pe componente simetrice, pentru partea echilibrată, partea dezechilibrată și pentru impedanța firului neutru sunt prezentate în două tabele.

6. DATE DESPRE AUTOR

Nume: Popa
Prenume: Vasile Mircea
Titlul academic: conferențiar doctor inginer
Instituția: Universitatea “Lucian Blaga” Sibiu, Facultatea de Inginerie
Adresa: Facultatea de Inginerie, str. E. Cioran nr. 4, Sibiu
Telefon: 069-216062, int. 481
E-mail: popavm@vectra.sibiu.ro

ANALIZA CAZURILOR LIMITĂ ALE RECEPTORULUI DEZECHILIBRAT REAL

Vasile Mircea Popa

Real Unbalanced Load Limit Cases Analysis

In this paper is defined the generalized impedance, the generalized extremely unbalanced load and the real balanced load. Consider voltages and currents equations and make powers analysis. Also, make energetical diagrams about the powers circulation and are presented the conclusions.

1. Introducere

Se definește impedanța generalizată ca o impedanță cu partea reală (rezistența echivalentă) negativă [1], [2], [3]. Aceasta este o impedanță de calcul, utilă în considerațiile următoare. Vom considera în continuare schema echivalentă în stea a

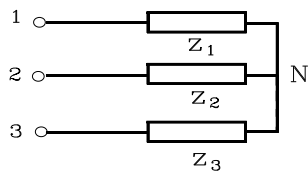


Fig. 1 Schema echivalentă în stea a unui receptor trifazat

unui receptor trifazat:

Utilizând componentele simetrice de calcul ale impedanțelor, putem scrie:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_h + Z_d + Z_i \\ Z_2 = Z_h + a^2 \cdot Z_d + a \cdot Z_i \\ Z_3 = Z_h + a \cdot Z_d + a^2 \cdot Z_i \end{cases} \quad (1)$$

Partea echilibrată a sistemului trifazat de impedanțe este constituită din componenta homopolară pentru fiecare fază:

$$Z_{1E} = Z_h; Z_{2E} = Z_h; Z_{3E} = Z_h \quad (2)$$

Partea dezechilibrată a sistemului trifazat de impedanțe va avea următoarele impedanțe în fiecare fază:

$$Z_{1D} = Z_d + Z_i; Z_{2D} = a^2 \cdot Z_d + a \cdot Z_i; Z_{3D} = a \cdot Z_d + a^2 \cdot Z_i \quad (3)$$

Prin urmare, putem scrie pentru fiecare fază:

$$Z_1 = Z_{1E} + Z_{1D}; Z_2 = Z_{2E} + Z_{2D}; Z_3 = Z_{3E} + Z_{3D} \quad (4)$$

În baza acestei relații, putem desena următoarea schemă echivalentă a receptorului din fig. 2, evidențiind partea echilibrată și cea dezechilibrată:

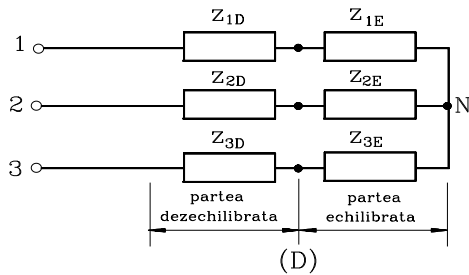


Fig. 2 Evidențierea părții echilibrate și a părții dezechilibrate (extrem dezechilibrate) pentru un receptor trifazat

Numim receptor trifazat real, un receptor realizat din trei impedanțe, având fiecare partea reală pozitivă. Dacă $z_1 \neq z_2 \neq z_3$, receptorul este numit dezechilibrat.

2. Ecuația de tensiuni și curenți

În cele ce urmează se va considera receptorul trifazat din figura 3 în conexiune stea cu fir neutru, luându-se în considerare și impedanța firului neutru z_N (fig. 3)

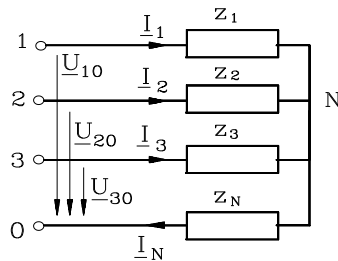


Fig. 3 Receptor trifazat legat în stea, cu fir neutru de impedanță z_N

Sistemul de tensiuni de fază de alimentare \underline{U}_{10} , \underline{U}_{20} , \underline{U}_{30} este în general nesimetric. De asemenea, considerăm receptorul în general dezechilibrat.

Aplicând legea lui Ohm pe fiecare fază, teorema I a lui Kirchhoff în nodul N precum și teorema Stokvis-Fortescue sistemelor de tensiuni și de curenți, se obține în urma unui calcul următoarea ecuație matricială:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_h + 3z_N & z_i & z_d \\ z_d & z_h & z_i \\ z_i & z_d & z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Pentru exprimarea componentelor simetrice ale curenților se inversează relația (5):

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{D} \begin{bmatrix} z_h^2 - z_d z_i & z_d^2 - z_h z_i & z_i^2 - z_h z_d \\ z_i^2 - z_h z_d & z_h^2 - z_d z_i + 3z_N z_h & z_d^2 - z_h z_i - 3z_N z_i \\ z_d^2 - z_h z_i & z_i^2 - z_h z_d - 3z_N z_d & z_h^2 - z_d z_i + 3z_N z_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

unde:

$$D = z_h^3 + z_d^3 + z_i^3 - 3z_h z_d z_i + 3z_N z_h^2 - 3z_N z_d z_i \quad (7)$$

Puterea complexă cedată pe la borne de rețea (generator) este:

$$\underline{S}_g = 3\underline{U}_h \underline{I}_h^* + 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* + 3\underline{U}_i \underline{I}_i^* \quad (8)$$

Puterea complexă primită de receptorul trifazat cu impedanțele z_1, z_2, z_3 și de impedanța firului neutru este:

$$\underline{S} = \underline{S}_g \quad (9)$$

Puterea complexă consumată în impedanța firului neutru este:

$$\underline{S}_N = \underline{U}_{NO} \underline{I}_N^* = 9z_N I_h^2 \quad (10)$$

Un caz particular important este atunci când sistemul tensiunilor de alimentare are numai componentă simetrică directă. Consumatorul este alimentat de la un generator trifazat simetric cu conexiune stea cu impedanțele interne nule (de putere infinită).

În acest caz, ecuația (6) se poate scrie în felul următor:

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} z_d^2 - z_h z_i \\ z_h^2 - z_d z_i + 3z_N z_h \\ z_i^2 - z_h z_d - 3z_N z_d \end{bmatrix} \quad (11)$$

iar relația (9) devine:

$$\underline{S}_g = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (12)$$

3. Analiza receptorului extrem dezechilibrat generalizat

Acest receptor este caracterizat de condiția $z_h = 0$.

Presupunem și acum că sistemul tensiunilor de alimentare are numai componenta simetrică directă.

Ecuația matricială a tensiunilor (5) ia următoarea formă:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & z_i & z_d \\ z_d & 0 & z_i \\ z_i & z_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3z_N & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_h \\ \underline{I}_d \\ \underline{I}_i \end{bmatrix} \quad (13)$$

Putem, de asemenea, utiliza ecuația curenților (11).

Pentru partea dezechilibrată putem scrie:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_D = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} -3z_N z_d^2 \\ z_d^3 + z_i^3 - 3z_N z_d z_i \\ 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Pentru firul neutru putem scrie:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_h \\ \underline{U}_d \\ \underline{U}_i \end{bmatrix}_N = \frac{\underline{U}_d}{D} \begin{bmatrix} 3z_N z_d^2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Se observă că avem relațiile:

$$\underline{U}_h = \underline{U}_{hD} + \underline{U}_{hN} = 0 \quad (16)$$

$$\underline{U}_d = \underline{U}_{dD} + \underline{U}_{dN}, \text{ cu } \underline{U}_{dN} = 0 \quad (17)$$

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{iD} + \underline{U}_{iN} = 0, \text{ cu } \underline{U}_{iD} = 0 \text{ și } \underline{U}_{iN} = 0 \quad (18)$$

Vom calcula puterile absorbite de receptorul extrem dezechilibrat generalizat (REDG).

Puterile pentru partea dezechilibrată sunt:

$$\underline{S}_{hD} = 3\underline{U}_{hD} \underline{I}_h^* = -9 \frac{z_N z_d^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (19)$$

$$\underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_{dD} \underline{I}_d^* = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* \quad (20)$$

$$\underline{S}_{iD} = 3\underline{U}_{iD} \underline{I}_i^* = 0 \quad (21)$$

Puterile pentru impedența firului neutru sunt:

$$\underline{S}_{hN} = 3\underline{U}_{hN} \underline{I}_h^* = 9 \frac{z_N z_d^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^* \quad (22)$$

$$\underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_{dN} \underline{I}_d^* = 0 \quad (23)$$

$$\underline{S}_{iN} = 3\underline{U}_{iN} \underline{I}_i^* = 0 \quad (24)$$

Se observă că:

$$\underline{S}_{hD} = -\underline{S}_{hN} \quad (25)$$

$$\underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g \quad (26)$$

$$\underline{S}_{iD} = 0 \quad (27)$$

Puterea totală absorbită de receptorul extrem dezechilibrat este:

$$\underline{S} = \underline{S}_D + \underline{S}_N \quad (28)$$

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD} \quad (29)$$

$$\underline{S}_N = \underline{S}_{hN} + \underline{S}_{dN} + \underline{S}_{iN} \quad (30)$$

Rezultă:

$$\underline{S} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g \quad (31)$$

Se poate evidenția o circulație de putere internă între partea dezechilibrată și impedanța firului neutru. Impedanța firului neutru consumă numai puterea homopolară \underline{S}_{hN} . Receptorul fiind alimentat cu un sistem simetric de tensiuni, el primește putere numai pe componenta directă. Puterea homopolară este deci primită de impedanța firului neutru prin intermediul receptorului extrem dezechilibrat.

Partea dezechilibrată consumă puterea:

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD} = \underline{S} - \underline{S}_{hN} \quad (32)$$

Diagrama puterilor complexe este:

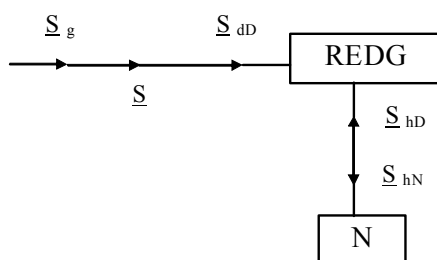


Fig. 4 Diagrama puterilor complexe pentru receptorul extrem dezechilibrat generalizat (REDG)

Am notat:

- **REDG** = receptorul extrem dezechilibrat generalizat;
- **N** = impedanța firului neutru.

4. Analiza receptorului echilibrat real

Acest receptor este caracterizat de condițiile $z_d=0$ și $z_i=0$.

Se poate face asemănător o analiză a acestui receptor ([2], [3]), particularizându-se, ecuațiile de tensiuni și curenți și calculându-se puterile absorbite de receptorul echilibrat real (**RER**).

Diagrama puterilor complexe este:

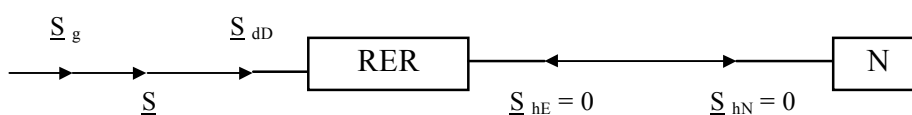


Fig. 5 Diagrama puterilor complexe pentru receptorul echilibrat real (RER)

5. Concluzii

Introducând noțiunea de impedanță generalizată se pot utiliza sistematic componentele simetrice de calcul ale impedanțelor și se poate da o schemă echivalentă a receptorului dezechilibrat, conținând o parte echilibrată și o parte extrem dezechilibrată.

Din ecuațiile de tensiuni și de curenți și din expresiile puterilor complexe rezultă componentele tensiunilor și puterilor pe cele trei secvențe (homopolară, directă, inversă) și pe cele trei părți ale receptorului considerat (partea echilibrată, partea extrem dezechilibrată și impedanța firului neutru). Este pusă în evidență o circulație internă de putere între aceste părți ale receptorului, redată în figura 1.14. În același timp se demonstrează că partea extrem dezechilibrată se comportă ca un convertizor de putere a componentelor simetrice.

6. Bibliografie

- 1) Pavel E. – *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERG, Vol. VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag. 194-220.
- 2) Popa V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1998.
- 3) Popa V.M. – *Using Generalised Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2nd International Workshop „CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits” CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, pp. 91-94.

Conf. dr. ing. Vasile Mircea Popa, Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu, Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”, str. Emil Cioran, nr. 4, 2400 – Sibiu

E-mail: popavm@vectra.ulbsibiu.ro

STUDIUL ANALITIC AL PUNȚII TRIFAZATE DE DIODE ALIMENTATE NESIMETRIC

Vasile Mircea Popa

Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu

Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”

Abstract

The paper proposes an analytical method for calculating the harmonic voltages of a three-phase diode-bridge under non-symmetrical supply conditions. We are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system:

$$u_1(x)=U_{m1}\sin(x-x_1), u_2(x)=U_{m2}\sin(x-x_2) \text{ and } u_3(x)=U_{m3}\sin(x-x_3).$$

Let a, b, c be the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x)$, $u_2(x)$ and $u_3(x)$ with $-\pi/2 < a, b, c < \pi/2$. Performing those calculations we obtain the Fourier coefficients of serial development for direct voltage u_d (there are four cases). All the calculations are conducted only by algebraic calculation with high accuracy.

The analytical equations for the harmonic components of the dc voltages in the proposed method are derived using frequency domain method. The proposed method can be easily extended to the harmonic analysis of three-phase thyristor-bridge with non-symmetrical supply conditions. The validity of the proposed method is demonstrated by comparison with the results of digital simulation.

In the end of the paper we indicate the references.

1. Puntea trifazată de diode alimentată nesimetric

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta o metodă analitică exactă de calcul [1], [2], [3], [4], [5]. Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig.1).

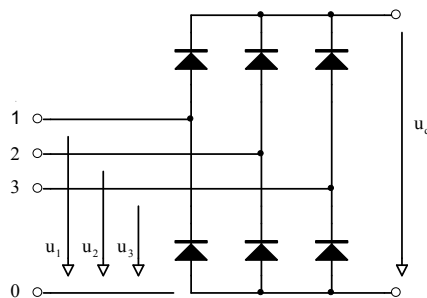


Fig. 1 Punte de diode ideale alimentată nesimetric.

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3) . Tensiunea redresată este u_d .

2. Cazul general. Teorema pozițiilor

Se consideră sistemul trifazat nesimetric general (u_1, u_2, u_3) de secvență directă. Sistemul este nesimetric la modul general, deci prezintă nesimetrie atât de module cât și de unghiuri.

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases} \quad (1)$$

unde am notat $x = \omega t$.

Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x)$, $u_2(x)$, $u_3(x)$, care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right)$. Mai exact:

- a corespunde la $u_2 \cap u_3$
- b corespunde la $u_3 \cap u_1$
- c corespunde la $u_1 \cap u_2$

Aceste abscise rezultă din următoarele ecuații:

$$u_2(x) = u_3(x); u_3(x) = u_1(x); u_1(x) = u_2(x);$$

Rezolvând aceste ecuații, se obțin următoarele expresii:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} a &= \frac{U_{m2} \sin x_2 - U_{m3} \sin x_3}{U_{m2} \cos x_2 - U_{m3} \cos x_3} \\ \operatorname{tg} b &= \frac{U_{m3} \sin x_3 - U_{m1} \sin x_1}{U_{m3} \cos x_3 - U_{m1} \cos x_1} \\ \operatorname{tg} c &= \frac{U_{m1} \sin x_1 - U_{m2} \sin x_2}{U_{m1} \cos x_1 - U_{m2} \cos x_2} \end{aligned} \quad (2)$$

De aici rezultă imediat a, b, c [3].

Fără a restrânge generalitatea, alegem ca origine de fază mărimea având amplitudinea maximă și fie u_1 această mărime.

Deci $x_1 = 0$; $0 < x_2 < x_3 < 2\pi$ și $0 < U_{m2} \leq U_{m1}$; $0 < U_{m3} \leq U_{m1}$. În această situație putem lua $U_{m1} = 1$ iar U_{m2} , U_{m3} vor fi numere pozitive subunitare.

Se pot imagina și sisteme trifazate la limită, în care pot interveni unele din următoarele situații: $U_{m2} = 0$; $U_{m3} = 0$; $x_2 = 0$; $x_2 = x_3$; $x_3 = 2\pi$. Aceste sisteme posedă o nesimetrie accentuată.

În aceste condiții (mărimea cu amplitudinea maximă este u_1 și se alege origine de fază) se constată că pot exista 4 cazuri privind poziția relativă a numerelor a , b , c . Vom numi această afirmație teorema pozițiilor.

Teorema pozițiilor poate fi ilustrată prin metoda grafică. Din cele $3! = 6$ situații trebuie să scădem 2 datorită poziției privilegiate a lui u_1 (origine de fază). Demonstrația teoremei pozițiilor este dată în anexele lucrării [3].

Cazurile care pot să existe, după poziția relativă a numerelor a , b , c , sunt următoarele:

Cazul 1: $a < b < c$;

Cazul 2: $a < c < b$;

Cazul 3: $b < c < a$;

Cazul 4: $c < b < a$.

În situații particulare, poate interveni egalitatea între două din numerele a , b , c , de asemenea egalitatea unuia din aceste numere cu $-\frac{\pi}{2}$ sau $+\frac{\pi}{2}$.

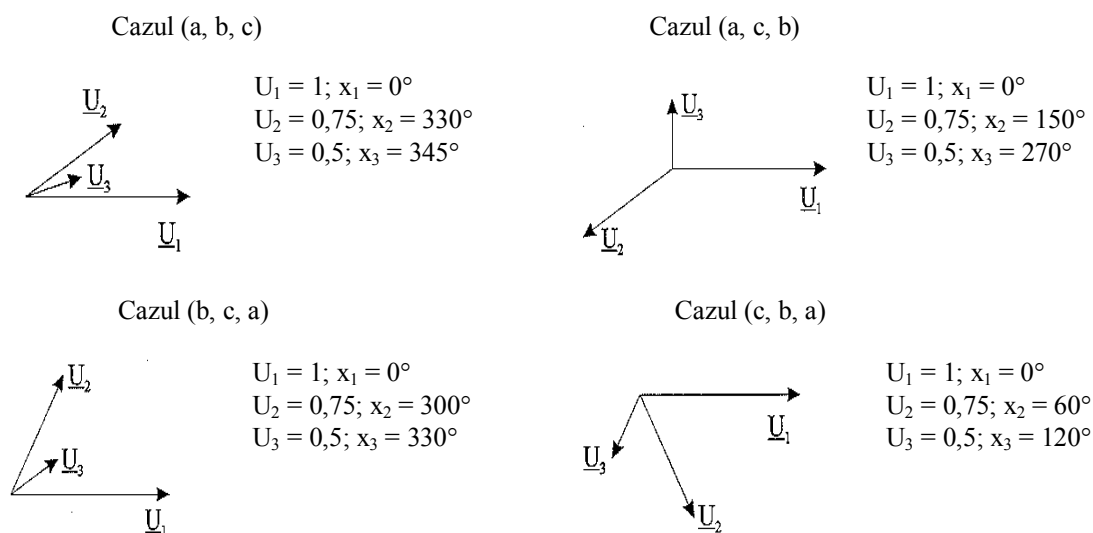


Fig. 2. Exemplificări pentru cele patru cazuri de sisteme nesimetrice.

În figura 2 s-au reprezentat fazorial 4 sisteme la modul general, deci cu nesimetrie atât de module cât și de unghiuri. Sistemele considerate reprezintă cele patru cazuri care pot exista și care au fost prezentate mai înainte.

În toate cazurile, vom nota cu d suma dintre abscisa cea mai mică și numărul π :

$$d = \min(a, b, c) + \pi \quad (3)$$

În fiecare din cazuri, semnalul $u_d(x)$ rezultă periodic cu perioada π [3].

Expresia generală a dezvoltării funcției $u_d(x)$ în serie Fourier este dată de următoarea relație:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n \frac{\pi}{1} x + b_n \sin n \frac{\pi}{1} x \quad (4)$$

unde $2l = \pi$ este perioada [3].

Deci:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos 2nx + b_n \sin 2nx \quad (5)$$

În continuare, vom studia pe rând cele patru cazuri.

3. Cazul 1

Acest caz îl numim pe scurt cazul (a, b, c) .

Avem $a < b < c < d$.

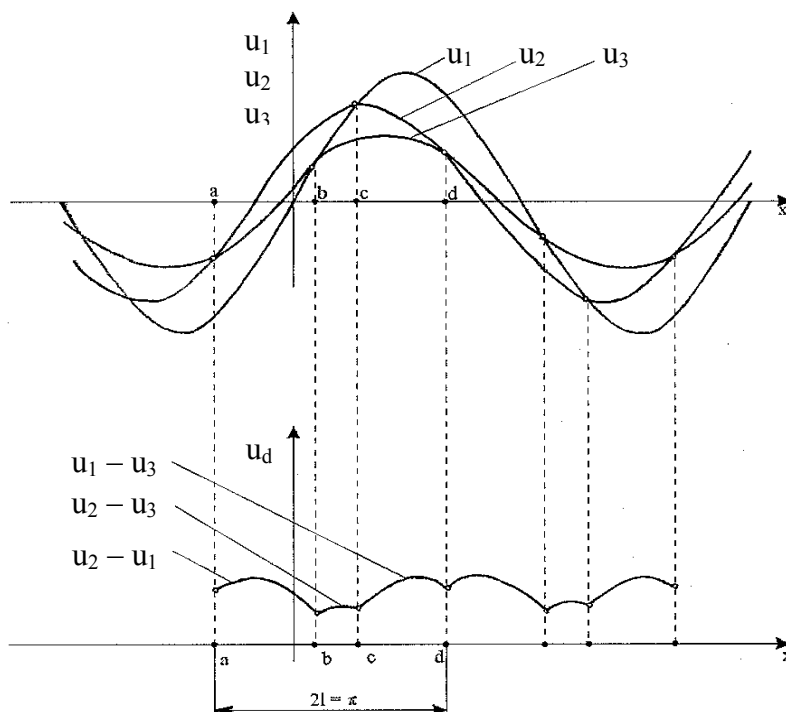


Fig. 3. Sistem nesimetric aparținând cazului 1 și tensiunea u_d corespunzătoare.

În figura 3 s-a prezentat sistemul nesimetric (u_1, u_2, u_3) funcție de x , precum și tensiunea $u_d(x)$.

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_2(x) - u_1(x), & \text{pentru } a \leq x < b \\ u_2(x) - u_3(x), & \text{pentru } b \leq x < c \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } c \leq x < d \end{cases} \quad (6)$$

Coefficienții dezvoltării în serie Fourier sunt dați de relațiile:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx, \quad a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx, \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx \quad (7)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .

Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi a_n = & \\ & -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\ & -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\ & -U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\ & +U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\ & +U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \} \\ & +U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \} \end{aligned} \quad (8)$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned} (4n^2 - 1) \pi b_n = & \\ & -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\ & -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\ & -U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\ & +U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\ & +U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \} \\ & +U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \} \end{aligned} \quad (9)$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned} -\pi a_0 = & \\ & -U_{m1} [\cos(b - x_1) + \cos(c - x_1)] - \\ & -U_{m2} [\cos(a - x_2) - \cos(c - x_2)] \\ & +U_{m3} [\cos(a - x_3) + \cos(b - x_3)] \end{aligned} \quad (10)$$

4. Cazurile 2, 3 și 4

Aceste cazuri se studiază asemănător, obținându-se seturile de formule respective [3]. De asemenea, în lucrarea [3] s-au analizat separat cazul sistemului simetric, cazul nesimetriei de module (de amplitudini), cazul nesimetriei de unghiuri (de defazaje), cazul anulării unei tensiuni, cazul anulării a două tensiuni și cazul funcționării monofazate.

S-au considerat și sistemele de secvență inversă.

5. Verificarea rezultatelor obținute

S-a realizat compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică propusă și prin metoda simulării pe calculator. S-au analizat prin ambele metode opt cazuri particulare de alimentare nesimetrică. Rezultatele obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator (PSPICE) sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%. De asemenea, s-au realizat măsurători experimentale utilizând un nanovoltmetru selectiv UNIPAN-tip 233. Valorile măsurate experimental sunt apropiate de cele obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator.

Scopul final al cercetărilor a fost realizarea unui dispozitiv de protecție antibifazică a motoarelor asincrone trifazate, brevetat (brevet nr. 87118), omologat la S.C. „Relee” Mediaș și asimilat în producția de serie.

Note bibliografice

[1] Sakui, M., Fujita, H. – *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings – B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484.

[2] Popa, V. M., Buduriși, C., Garcia Moreno, E. – *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44.

[3] Popa, V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*; Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999.

[4] Popa, V. M., Roșca, P. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Vol. I, pag. 225-228.

[5] Popa, V. M. – *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*; A treia Conferință Națională – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30 mai - 1 iunie 2003, Volumul III, pag. 105-108.

STUDIUL PUNȚII DE DIODE ALIMENTATĂ NESIMETRIC

Vasile Mircea POPA

THE STUDY OF NON-SYMMETRIC FEED DIODE-BRIDGE

In this paper we are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system: $u_k(x) = U_{mk} \sin(x - x_k)$, $k=1,2,3$. Let a, b, c be the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x)$, $u_2(x)$ and $u_3(x)$ with $a, b, c \in (-\pi/2, +\pi/2)$. We obtain the Fourier coefficients of a serial development for direct voltage u_d (there are four cases). Based on these relations, we made up a computer program (called the PDIODE program). This program computes and displays: the degree of asymmetry, the degree of dissymmetry, the Fourier coefficients a_0, a_n, b_n, A_0 for $n=1, 2, \dots, 10$, the global coefficient of non-symmetry (defined in the paper) and graphical representation for direct voltage u_d spectrum. Are presented obtained results with the computer program.

Cuvinte cheie: punte de diode, alimentare nesimetrică, sistem nesimetric de tensiuni, analiză armonică, grad de asimetrie, grad de disimetrie, coeficient global de nesimetrie.

1. Introducere

În lucrarea [3] s-a dezvoltat o metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric. Se calculează armonicile de tensiune ale unei punți trifazate de diode cu condiții de alimentare nesimetrică. Rezultatele sunt obținute prin calcule algebrice precise. Efectuând calculele, se obțin coeficienții Fourier ai dezvoltării în serie pentru tensiunea continuă u_d (există patru cazuri). Metoda poate fi ușor extinsă pentru analiza armonică a punții trifazate de tiristoare cu condiții de alimentare nesimetrică.

2. Program de calculator PDIODE

Pe baza metodei analitice s-a elaborat un program de calculator (numit **PDIODE**).

Programul elaborat parcurge următoarele etape:

1. Se introduc ca date inițiale parametrii $U_{m1}, U_{m2}, U_{m3}, x_1, x_2, x_3$; vom pune întotdeauna $U_{m1} = 1$ și $x_1 = 0$; fazele inițiale se pot exprima în grade sau în radiani (opțional).
 2. Se calculează U_h, U_d, U_i precum și gradele de asimetrie și disimetrie $\varepsilon_h, \varepsilon_i$, cu ajutorul formulelor cunoscute; acestea vor fi afișate în final.
 3. Se calculează numitorii și numărătorii expresiilor pentru calculul numerelor a, b, c ; ei sunt notați $n1, n2, n3$, respectiv $m1, m2, m3$. Dacă cel puțin unul dintre numitori este zero, se afișează „caz singular de tip 1” precum și valorile numitorilor. Dacă nu, se calculează numerele a, b, c pe baza relațiilor (3.2).
 4. Dacă avem $a = b$ sau $b = c$ sau $c = a$ se afișează „caz singular de tip 2” precum și valorile lui a, b, c .
 5. Dacă nu, se calculează în unul dintre cele 4 cazuri în care ne putem găsi, cu formulele corespunzătoare valorile lui a_0, a_n, b_n , pentru $n = 1, 2, \dots, 10$. De asemenea, se calculează A_n și se afișează lista coeficienților a_0, a_n, b_n, A_n precum și a, b, c .
 6. Se afișează coeficientul global de nesimetrie $k_n = A_1 + A_2$.
 7. Se afișează reprezentarea grafică a spectrului lui u_d (amplitudinile funcție de ordinul armonicii respective).
- Listingul programului **PDIODE** este prezentat în anexele lucrării [3].

3. Rezultate obținute prin utilizarea programului

Ecranul programului **PDIODE** este prezentat în figura 1. S-a considerat sistemul trifazat nesimetric de tensiuni caracterizat de următorii parametri: $U_{m1} = 1, U_{m2} = 0,75, U_{m3} = 0,5; x_1 = 0^\circ, x_2 = 150^\circ, x_3 = 270^\circ$ (care reprezintă cazul acb) aplicat asupra unei punți de diode ideale. S-a obținut analiza armonică a tensiunii u_d (fig.1.a) și reprezentarea spectrului de armonici (fig. 1.b).

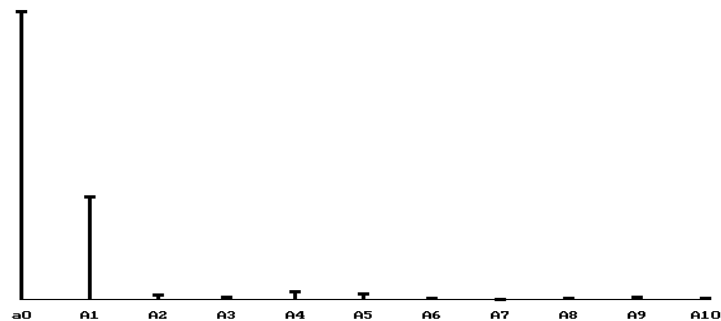
PROGRAM PENTRU ANALIZA PUNȚII DE DIODE IDEALE ALIMENTATE CU UN SISTEM NESIMETRIC DE TENSIUNI (PDIODE).

Introduceți valorile tensiunilor , Um1,Um2,Um3:1 0.75 0.5
Alegeți exprimarea fazelor în radiani sau grade [r/g]:g
Introduceți valorile fazelor inițiale , x1,x2,x3:0 150 270

```
a=-9.3223663069E-01 b= 4.6364760900E-01 c=-2.2353961103E-01
Sintem in cazul : acb
a0= 1.2412070235E+00
a1=-3.9910117761E-01 b1= 1.8673781197E-01 A1= 4.4062768909E-01
a2= 6.8289869380E-03 b2=-1.5205778986E-02 A2= 1.6668856505E-02
a3=-3.2567712774E-03 b3= 1.0190115325E-02 A3= 1.0697897433E-02
a4= 8.9668533640E-03 b4= 3.2923918075E-02 A4= 3.4123142304E-02
a5= 1.4224891016E-02 b5= 1.6447888970E-02 A5= 2.1745817436E-02
a6= 2.0848083423E-03 b6= 1.8542852677E-03 A6= 2.7901253876E-03
a7=-1.1967117158E-03 b7= 9.7157456710E-04 A7= 1.5414525845E-03
a8= 4.5626173602E-03 b8=-2.3736831050E-03 A8= 5.1431360724E-03
a9= 4.1860762919E-03 b9=-6.4031959158E-03 A9= 7.6501080161E-03
a10= 7.0674286465E-04 b10=-3.2440767011E-03 A10= 3.3201685378E-03
Coeficientul global de nesimetrie kn= 4.5729654559E-01
epsilon_h= 1.7113799853E-01 epsilon_i= 3.4768005591E-01
```

a)

acb



b)

Fig.1 Ecranul programului PDIODE (a – analiza armonică, b – spectrul)

S-au analizat și alte cazuri particulare de alimentare nesimetrică. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**, bazat pe metoda analitică) și prin metoda simulării pe calculator (**PSPICE**) sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%.

Pentru modelarea și simularea pe calculator a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având ca sarcină o rezistență pură, am utilizat produsul soft **PSPICE** al firmei MicroSim Corporation (SUA). În lucrarea [3] s-a prezentat detaliat numai analiza Fourier pentru mărimea u_d . Mai exact, s-au prezentat într-un tabel rezultatele obținute cu metoda analitică și cu metoda simulării **PSPICE** pentru componenta continuă și primele patru armonici, precum și o comparație între aceste rezultate.

De asemenea, s-au măsurat experimental armonicile tensiunii u_d în cazurile următoare: cazul sistemului simetric, cazul anulării unei tensiuni, cazul anulării a două tensiuni și cazul funcționării monofazate. S-a utilizat un nanovoltmetru selectiv UNIPAN tip 233 (Polonia) cu următoarele date tehnice principale: intrare – 1μV ... 100mV; divizor al tensiunii de intrare – 1:1000; frecvența – 1,5 ... 150kHz; selectivitate – 0; 18; 36; 54 dB/octavă.

Tensiunea u_d a fost vizualizată cu ajutorul unui osciloscop HAMEG-HM 203, 20 MHz (Germania).

Datele experimentale au fost obținute pornind de la situația inițială $U_{m1}=U_{m2}=U_{m3}=24V$.

Valorile măsurate experimental sunt apropiate de acelea obținute prin simulare **PSPICE** (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea s-a făcut analiza armonică a tensiunii u_d , folosind aparatul RFT-Sichtgerat SG1 (Germania). Rezultatele obținute coincid practic cu cele obținute utilizând nanovoltmetrul selectiv.

În concluzie, rezultatele deduse prin metoda analitică, cu ajutorul programului de calculator **PDIODE** (bazat pe metoda analitică), prin simulare pe calculator (**PSPICE**) și prin măsurători experimentale sunt apropiate, ceea ce certifică atât datele obținute cât și metodele utilizate în acest scop.

BIBLIOGRAFIE:

[1] Sakui, M., Fujita, H. – *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings – B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484.

[2] Popa, V.M., Buduriși, C., Garcia Moreno, E. – *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44.

[3] Popa, V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*; Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999.

STUDIUL PUNȚII DE DIODE ALIMENTATĂ CU SISTEME PARTICULARE NESIMETRICE DE TENSIUNI

Vasile Mircea POPA, Lizeta POPESCU

Abstract. Study of Diode-Bridge Fed by Particular Non-Symmetrical Voltage Systems.

In this paper we are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system: $u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1)$, $u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2)$ and $u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3)$. Let a, b, c be the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x)$, $u_2(x)$ and $u_3(x)$ with $a, b, c \in (-\pi/2, \pi/2)$. More precise, a corresponds to $u_2 \cap u_3$, b corresponds to $u_3 \cap u_1$ and c corresponds to $u_1 \cap u_2$. The diode-bridge gives an output voltage that is periodic, but non-sinusoidal. We obtain the Fourier coefficients of a serial development for direct voltage u_d (there are four cases). We also propose a non-symmetry total coefficient that characterizes the non-symmetry of a three-phase system applicable about diode-bridge: $k_n = (A_1 + A_2)/U_{m1}$, where A_1 is the amplitude of the first harmonic and A_2 is the amplitude of the second harmonic.

The paper proposes an analytical method for calculating the harmonic voltages of a three-phase diode-bridge under particular non-symmetrical supply conditions. All the calculations are conducted only by algebraic calculation with high accuracy. By performing those calculations we obtain the Fourier coefficients of serial development for direct voltage u_d and the non-symmetry total coefficients for four cases.

The analytical equations for the harmonic components of the dc voltage in the proposed method are derived using the frequency domain method and the rectifier switching functions.

To demonstrate the usefulness of the proposed method, the results obtained by the proposed method are compared with those obtained by the simulation method, which gives very accurate results. Comparisons between the basic analytical model and the digital simulation results are given to validate the analysis.

1. Introducere

În lucrările [3], [4] s-a considerat cazul general al unei punți de diode alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig. 1).

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases} \quad (1)$$

Puntea de diode are ca sarcină un receptor pur rezistiv. Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x)$, $u_2(x)$, $u_3(x)$ care se găsesc în intervalul $(-\pi/2, \pi/2)$.

În lucrările menționate anterior [3], [4] s-a dezvoltat o metodă analitică pentru calculul armonicilor tensiunii redresate u_d (există patru cazuri). S-au obținut formulele generale pentru coeficienții seriei Fourier.

De asemenea, s-a definit un coeficient global de nesimetrie (CGN) care caracterizează nesimetria sistemului trifazat aplicat asupra punții de diode.

Acesta este:

$$k_n = \frac{A_1 + A_2}{U_{m1}} \quad (2)$$

unde A_1 este amplitudinea armoniciei de ordinul 1 iar A_2 este amplitudinea armoniciei de ordinul 2 din tensiunea u_d . Numitorul U_{m1} reprezintă valoarea maximă a tensiunii pe faza întâi. Se poate considera $U_{m1} = 1$, iar U_{m2} , U_{m3} numere pozitive subunitare. În acest fel, fiecărui sistem trifazat nesimetric i se atașază o valoare a coeficientului global de nesimetrie cuprinsă între 0 (pentru sistemul simetric) și 1,018 (pentru sistemul monofazat).

2. Sisteme particulare nesimetrice de tensiuni

Considerăm următoarele sisteme:

a) Cazul sistemului simetric.

Acesta este un caz particular (limită).

Avem:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m \quad (3)$$

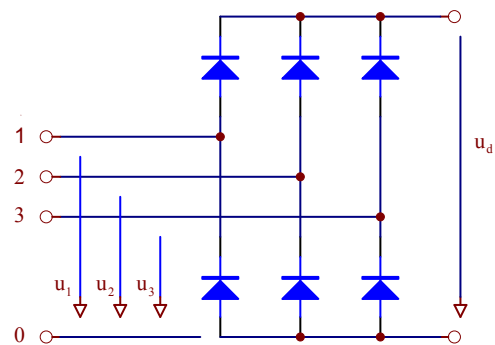


Fig. 1. Punte de diode ideale alimentată nesimetric

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (4)$$

b) Cazul nesimetriei de module (de amplitudini):

$$U_{m1} \neq U_{m2} \neq U_{m3} \quad (5)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (6)$$

c) Cazul nesimetriei de unghiuri (de defazaje):

$$x_1 = 0; \quad x_2 \neq \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 \neq \frac{4\pi}{3} \quad (7)$$

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m \quad (8)$$

d) Cazul anulării unei tensiuni:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_m; \quad U_{m3} = 0 \quad (9)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (10)$$

e) Cazul anulării a două tensiuni:

$$U_{m1} = U_m; \quad U_{m2} = U_{m3} = 0 \quad (11)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3} \quad (12)$$

f) Cazul funcționării monofazate:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_m; \quad U_{m3} = 0 \quad (13)$$

$$x_1 = 0; \quad x_2 = \pi; \quad x_3 = \text{oarecare} \quad (14)$$

Particularizând formulele generale deduse în lucrările [3], [4] se obțin rezultatele particulare respective. Pentru verificare, abordând direct aceste cazuri, se regăsesc aceleași rezultate.

În lucrarea de față prezentăm numai rezultatele obținute în cazurile sistemelor (a) și (f).

a) Cazul sistemului simetric:

$$u_d(x) = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} + \frac{6\sqrt{3}U_m}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{36k^2 - 1} \cos 6kx \quad (15)$$

$$k_n = 0 \quad (16)$$

f) Cazul sistemului monofazat:

$$u_d(x) = \frac{4U_m}{\pi} - \frac{8U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n\pi}{4n^2 - 1} \quad (17)$$

$$k_n = \frac{48}{15\pi} \approx 1,018 \quad (18)$$

3. Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator

S-au analizat prin ambele metode opt cazuri particulare care sunt prezentate în continuare, cu notațiile de la modelarea **PSPICE**.

1. Cazul sistemului simetric:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-120°
V3	100 V	-240°

2. Cazul sistemului nesimetric (anularea unei tensiuni):

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-120°
V3	0 V	-240°

3. Cazul sistemului nesimetric (anularea a două tensiuni):

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	0 V	-120°

V3	0 V	-240°
----	-----	-------

4. Cazul sistemului nesimetric (funcționare monofazată)

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	100 V	-180°
V3	0 V	0°

5. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-330°
V3	50 V	-345°

6. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-150°
V3	50 V	-270°

7. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-300°
V3	50 V	-330°

8. Cazul sistemului nesimetric caracterizat de:

Mărimea	Amplitudinea	Faza
V1	100 V	0°
V2	75 V	-60°
V3	50 V	-120°

Rezultatele obținute sunt trecute în tabelul 1.

Tabelul 1

Sistemul trifazat aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier pentru V (4,5)	Metoda analitică (programul PDIODE) (V)	Metoda simulării pe calculator (PSPICE) (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 1 (simetric)	0	a ₀	165,3	163,3	-1,2
	100	A ₁	–	–	–
	200	A ₂	–	–	–
	300	A ₃	9,5	9,5	–
Sistemul 2 (V3 = 0)	400	A ₄	–	–	–
	0	a ₀	118,7	116,8	-1,6
	100	A ₁	57,9	57,3	-1
	200	A ₂	3,1	3,1	–
Sistemul 3 (V3 = 0, V2 = 0)	300	A ₃	0,5	0,49	-2
	400	A ₄	0,73	0,72	-1,3
	0	a ₀	63,8	61,9	-2,9
	100	A ₁	42,4	41,8	-1,4
	200	A ₂	8,5	8,4	-1,1
	300	A ₃	3,6	3,5	-2,8
	400	A ₄	2,02	1,96	2,9

Sistemul 4 (monofazat)	0	a_0	127,3	125,3	-1,5
	100	A_1	84,8	83,7	-1,2
	200	A_2	16,9	16,4	-2,9
	300	A_3	7,2	7,0	-2,7
	400	A_4	4,04	3,95	-2,2
Sistemul 5 (caz (a,b,c))	0	a_0	42,7	41,9	-1,8
	100	A_1	12,4	12,3	-0,8
	200	A_2	3,05	2,97	-2,6
	300	A_3	0,82	0,8	-2,4
	400	A_4	0,45	0,44	-2,2
Sistemul 6 (caz (a,c,b))	0	a_0	124,1	122,2	-1,5
	100	A_1	44,0	43,5	-1,1
	200	A_2	1,66	1,62	-2,4
	300	A_3	1,07	1,10	2,8
	400	A_4	3,41	3,31	-2,9
Sistemul 7 (caz (b,c,a))	0	a_0	61,2	59,5	-2,7
	100	A_1	31,2	30,8	-1,2
	200	A_2	2,96	2,89	-2,3
	300	A_3	1,24	1,21	-2,4
	400	A_4	0,56	0,55	-1,7
Sistemul 8 (caz (c,b,a))	0	a_0	91,8	89,9	-2,0
	100	A_1	42,6	42,1	-1,1
	200	A_2	3,05	2,98	-2,2
	300	A_3	1,42	1,38	-2,8
	400	A_4	0,99	1,01	-2,0

Rezultatele obținute prin metoda analitică în cazul sistemelor nesimetrice particulare arătate mai sus au fost comparate cu cele obținute prin metoda simulării pe calculator (PSPICE). Aceste rezultate sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%, după cum se observă din tabel.

Bibliografie

1. Sakui M., Fujita H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484
2. Popa V. M., Buduriși, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44
3. Popa V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999
4. Popa V. M., Roșca P. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 225-228
5. Popa V. M., Roșca P. – *Program de calculator pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 229-230

Date autori

Vasile Mircea Popa, conf. dr. ing., Universitatea "Lucian Blaga", Facultatea de Inginerie, Sibiu, România
Lizeta Popescu, șef lucr. dr. ing., Universitatea "Lucian Blaga", Facultatea de Inginerie, Sibiu, România

ASPECTE EXPERIMENTALE ȘI SINTETICE PRIVIND PUNTEA TRIFAZATĂ DE DIODE ALIMENTATĂ NESIMETRIC

Vasile Mircea Popa

Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu
Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”

Abstract

In the paper is considered a three-phase diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system. The paper presents in the first part a complete modeling using the PSPICE computer package concerning a non-symmetrical supplied diode-bridge.

In the second part, a experimental measurements and a synthetical aspects regarding diode-bridge are presented. For making a test of the measurement precision, the results obtained from the experimental measurements are compared with those obtained with the simulation method, using the PSPICE environments. Experimental measured values are near to those obtained by using digital simulation (maximum relative error: 0,9%).

At the end of the paper we indicate the references.

1. Introducere

În lucrările [3], [4], [9] s-a considerat cazul general al unei punți de diode alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni. Puntea de diode are ca sarcină un receptor pur rezistiv. În lucrările menționate anterior s-a dezvoltat o metodă analitică pentru calculul armonicilor tensiunii redresate u_d (există patru cazuri). S-au obținut formulele generale pentru coeficienții seriei Fourier.

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta pe scurt metoda analitică exactă de calcul amintită anterior și apoi se prezintă rezultatele măsurărilor experimentale efectuate, comparate cu cele obținute prin modelare și simulare PSPICE.

Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig.1).

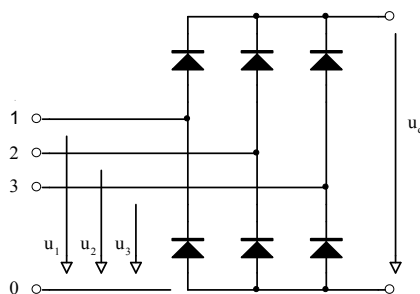


Fig. 1 Punte de diode ideale alimentată nesimetric.

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3) . Tensiunea redresată este u_d .

2. Metoda analitică

În lucrările [3], [4], [9] s-a prezentat o metodă analitică pentru calculul spectrului de armonici al tensiunii redresate u_d . S-au considerat expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat $u_1(x)$, $u_2(x)$, $u_3(x)$ și s-au determinat abscisele punctelor de intersecție ale acestor curbe care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right)$. Aceste abscise s-au notat cu a , b , c . Se constată că există patru cazuri privind poziția relativă a numerelor a , b , c , afirmație care a fost numită teorema pozițiilor. În fiecare din cele patru cazuri, tensiunea $u_d(x)$ rezultă periodică cu perioada π . S-a considerat dezvoltarea funcției $u_d(x)$ în serie Fourier și s-au obținut expresiile analitice ale coeficienților dezvoltării a_0 , a_n , b_n în cele patru cazuri. S-au analizat prin metoda analitică și o serie de cazuri particulare ale sistemului de alimentare. Pe baza metodei analitice s-a elaborat un program de calculator (numit PDIODE), care realizează analiza armonică a tensiunii u_d pentru diverse sisteme trifazate de alimentare ale punții.

3. Metoda simulării pe calculator

Pentru modelarea și simularea pe calculator a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având ca sarcină o rezistență pură, am utilizat produsul soft PSPICE al firmei MicroSim Corporation (SUA). În

figura 2 este prezentată schema electrică a unei punți trifazate de diode, cu numerotarea corespunzătoare a nodurilor.

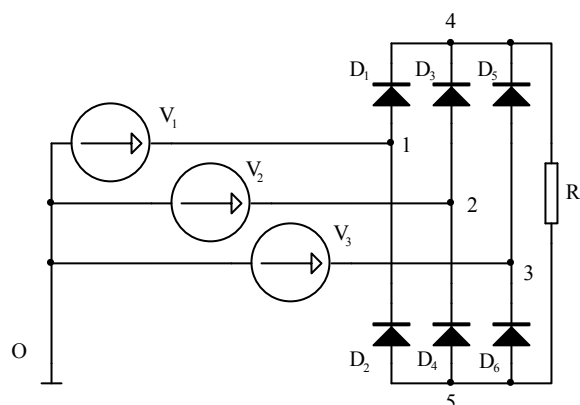


Fig. 2 Puntea de diode pentru modelarea PSPICE

Fiecare dintre tensiunile V_1 , V_2 , V_3 au fost generate în cadrul programului PSPICE folosind instrucțiunea pentru specificarea surselor de tensiune sinusoidală SIN.

Sintaxa acestei instrucțiuni este:

SIN (< vo > < va > < f > < td > < df > < faza >)

și poate defini pe cazul cel mai general un semnal sinusoidal amortizat.

Explicitarea parametrilor din instrucțiunea de mai sus este redată în tabelul următor.

Tabelul 1

Parametri	Valoarea implicită	Unitate
vo – tensiunea de offset	–	volt
va – amplitudinea	–	volt
f – frecvența	1/TSTOP	hertz
td – întârzierea	0	secunde
df – factor de amortizare	0	secunde
faza – defazajul semnalului	0	grade

Am folosit $vo = 0$, $td = 0$, $df = 0$.

Utilizăm diode pentru care sunt specificați în cadrul instrucțiunii MODEL parametrii de model: IS (curentul de saturație al joncțiunii) și BV (tensiunea de străpungere a joncțiunii).

S-a utilizat modelul de diodă: MODEL DI D(IS = $2e^{-15}$ BV = 1000). Rezistența de sarcină R1 are valoarea 1 k Ω .

Folosind modelul de punte prezentat mai sus, s-a făcut analiza PSPICE pentru mai multe cazuri, relizându-se următoarele: analiza tranzitorie (cu pasul 5 ms) pentru mărimile $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$, $V(4,5)$; reprezentarea funcției de timp a mărimilor $V(1)$, $V(2)$, $V(3)$, $V(4,5)$, pe intervalul 0...40 ms; analiza Fourier pentru mărimea $V(4,5)$; reprezentarea spectrului de armonici pentru mărimea $V(4,5)$.

Rezultatele obținute în urma analizei cu programul PSPICE concordă cu rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul PDIODE care are la bază această metodă).

În continuare vom prezenta detaliat numai analiza Fourier pentru mărimea $V(4,5) = u_d$. În unele lucrări anterioare [3], [4], [9] s-au prezentat rezultatele obținute cu metoda analitică și cu metoda simulării PSPICE pentru componenta continuă și primele patru armonici, precum și o comparație între aceste rezultate. În cazul simulării PSPICE, amplitudinea tensiunii maxime $V(1)$ este de 100 V și prin urmare rezultatele metodei analitice au fost amplificate de 100 de ori pentru a fi comparate cu acelea de la analiza Fourier, unde s-a considerat $U_{m1} = 100$ V. Prin alegerea acestei tensiuni de 100 V s-a urmărit reducerea erorii produse de căderea de tensiune pe diode în conducție directă (de cca. 0,8 V). Frecvența centrală a analizei Fourier a fost de 50 Hz.

4. Măsurători experimentale

Pentru verificarea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator s-au măsurat experimental armonicile tensiunii u_d în cazurile următoare: cazul sistemului simetric, cazul anulării unei tensiuni, cazul anulării a două tensiuni și cazul funcționării monofazate.

S-a utilizat un nanovoltmetru selectiv UNIPAN-tip 233 (Polonia) cu următoarele date tehnice principale: intrare: $1\mu\text{V} \dots 100$ mV; divizor al tensiunii de intrare: 1 : 1000; frecvența: 1,5 ... 150 kHz; selectivitate: 0; 18; 36; 54 dB/octavă.

Tensiunea u_d a fost vizualizată cu ajutorul unui osciloscop HAMEG-HM 203, 20 Mhz (Germania).

S-au obținut următoarele date experimentale, pornind de la situația inițială $U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = 24\text{V}$:

Tabelul 2

Sistemul trifazat aplicat punții	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier pentru u_d	Valori măsurate experimental (V)	Valori obținute prin simulare PSPICE (V)	Eroare relativă (%)
Sistemul 1 (simetric)	0	a_0	39,3	39,2	0,2
	300	A_3	2,26	2,28	-0,8
	600	A_6	0,480	0,484	-0,8
Sistemul 2 ($u_3 = 0$)	0	a_0	28,1	28	0,3
	100	A_1	13,7	13,75	-0,4
	200	A_2	0,745	0,750	-0,6
Sistemul 3 ($u_3 = 0, u_2 = 0$)	0	a_0	14,9	14,8	0,6
	100	A_1	9,95	10	-0,5
	200	A_2	1,99	2,01	-0,9
	300	A_3	0,81	0,815	-0,6

Sistemul 4 (monofazat)	0	a_0	30,16	30,1	0,2
	100	A_1	20,15	20	0,7
	200	A_2	3,9	3,93	-0,7
	300	A_3	1,67	1,68	-0,6

Valorile măsurate experimental sunt apropiate de acelea obținute prin simulare PSPICE (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea s-a făcut analiza armonică a tensiunii u_d , folosind aparatul RFT-Sichtgerät SG1 (Germania). Rezultatele obținute coincid practic cu acelea din tabelul 1.

5. Concluzii

În legătură cu puntea trifazată de diode alimentată nesimetric, s-au realizat o serie de cercetări, prezentate în lucrările arătate în lista bibliografică. S-a elaborat o metodă analitică exactă pentru calculul armonicilor tensiunii redresate (există patru cazuri pentru prezentarea formulelor generale). De asemenea, s-au analizat prin metoda analitică șase situații particulare de sisteme trifazate de tensiuni de alimentare. S-a realizat apoi simularea pe calculator folosind mediul PSPICE. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv prin programul de calculator PDIODE, bazat pe metoda analitică) în cazul a opt sisteme nesimetrice particulare au fost comparate cu cele obținute prin metoda simulării pe calculator (PSPICE). Aceste rezultate sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%.

S-au făcut și măsurători experimentale, măsurând armonicile tensiunii u_d cu ajutorul unui nanovoltmetru selectiv UNIPAN tip 233 (Polonia). Aceste măsurători s-au realizat pentru patru sisteme particulare de tensiuni, arătate în lucrarea de față. Valorile măsurate experimental ale amplitudinilor armonicilor sunt apropiate de cele obținute prin simulare PSPICE (eroare relativă maximă 0,9%).

De asemenea, s-a introdus un coeficient global de nesimetrie și s-a realizat o aplicație tehnică a caracterizării nesimetriei unui sistem trifazat prin coeficientul global de nesimetrie (CGN). Este vorba de un releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la întreruperea unei faze de alimentare, care a fost brevetat (brevet OSIM nr. 87118). S-a realizat un model experimental care a fost testat pe standul pentru încercarea motoarelor electrice, stand care a fost construit prin autodotare în laboratorul de electrotehnică [3].

Proiectarea dispozitivului de protecție antibifazică s-a realizat în cadrul unui contract de cercetare-proiectare încheiat cu întreprinderea S.C. „RELEE” S.A. Mediaș [3]. Dispozitivul de protecție antibifazică a fost omologat la S.C. „RELEE” S.A. Mediaș și a fost asimilat în producția de serie, existând posibilitatea producerii lui funcție de cerințele beneficiarilor din industrie.

Note bibliografice

[1] Sakui M., Fujita H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol. 139, No.5, September 1992, pp.478-484

[2] Popa V. M., Buduriși, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44

[3] Popa V. M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999

[4] Popa V. M., Roșca P. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 225-228

[5] Popa V. M., Roșca P. – *Program de calculator pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 229-230

[6] Popa, V. M., Popescu, L. – *Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag.173-176

[7] Popa, V. M., Popescu, L. – *Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetric*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag.165-166

[8] Popa, V. M. – *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*, Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2, pag.105-108

[9] Popa, V. M. – *Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric*, A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5, pag.199-204

[10] Popa, V. M. – *Analiza punții de diode alimentată cu sisteme de tensiuni nesimetrice*, Lucrările celei de A VI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2-3 iunie 2006; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 9), ISBN 10 973-8130-82-4, pag.309-314

VASILE MIRCEA POPA

COEFICIENT GLOBAL DE NESIMETRIE PENTRU SISTEME TRIFAZATE

Prof. dr. ing. Vasile Mircea Popa
Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu
Facultatea de Inginerie „Hermann Oberth”
Telefon: 0269-216062 – int. 481
Fax: 0269-212716
E-mail: popavm@yahoo.com

Rezumat

În lucrarea de față se prezintă un coeficient global de nesimetrie pentru caracterizarea nesimetriei sistemelor trifazate de tensiuni și curenți. Se analizează puntea de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni, printr-o metodă analitică exactă. Se definește în continuare coeficientul global de nesimetrie. Se prezintă apoi un program de calculator pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (**VARK**). În final se arată unele concluzii și observații.

Abstract

This paper presents a global coefficient of non-symmetry for characterizing the non-symmetry of three-phased voltage and current systems. Through an accurate analytical method, we analyse the diode-bridge under non-symmetrical supply conditions. Then we define the global coefficient of non-symmetry. We also present a computer program for representing the variation of the global coefficient of non-symmetry (**VARK**). Finally, we draw the conclusions and make some observations.

Cuvinte cheie (descriptori): sistem trifazat nesimetric, grad de asimetrie, grad de disimetrie, punte de diode, alimentare nesimetrică, analiză armonică, coeficient global de nesimetrie.

1. Introducere

Unul din aspectele importante ale îmbunătățirii calității energiei electrice la consumatorii trifazați este compensarea dezechilibrului acestora. Această compensare are mari avantaje tehnice și economice, fiind o problemă complexă sub aspect teoretic și practic. În general, problema trebuie rezolvată în corelare cu necesitatea compensării și a armonicilor superioare și a îmbunătățirii factorului de putere [4], [7], [12].

Pentru analiza și caracterizarea sistemelor trifazate nesimetrice sunt utilizate în electrotehnică componentele simetrice precum și sistemul de componente $(\alpha, \beta, 0)$ [3], [11].

Teoria coordonatelor (componentelor) simetrice a fost introdusă în electrotehnică de către Stokvis (1915) și Fortescue (1918). Ea se bazează pe ideea descompunerii unui sistem trifazat nesimetric în trei sisteme simetrice: sistemul direct, sistemul invers și sistemul homopolar. Teorema Stokvis - Fortescue ne asigură că o astfel de descompunere este întotdeauna posibilă și este unică. [1], [6], [10], [11].

Nesimetria unui sistem trifazat $(\underline{U}_1, \underline{U}_2, \underline{U}_3)$ este apreciată cu ajutorul gradului de disimetrie și al gradului de asimetrie:

$$\varepsilon_i = \frac{U_i}{U_d}; \varepsilon_h = \frac{U_h}{U_d}$$

În electrotehnică, un sistem trifazat este considerat simetric dacă atât gradul de disimetrie cât și gradul de asimetrie sunt mai mici decât 0,05 [11]. Gradul de disimetrie (asimetrie) mai este denumit uneori factor de disimetrie (asimetrie).

Gradul de disimetrie mai este denumit coeficient de nesimetrie inversă, iar gradul de asimetrie, coeficient de nesimetrie homopolară.

Ambele aceste mărimi sunt cuprinse în cadrul normelor internaționale.

O extindere a acestor noțiuni este făcută în lucrarea [5]. Astfel se definesc gradul de disimetrie complex și gradul de asimetrie complex:

$$\underline{\varepsilon}_i = \frac{\underline{U}_i}{\underline{U}_d} = \varepsilon_i e^{j\theta_i}; \quad \underline{\varepsilon}_h = \frac{\underline{U}_h}{\underline{U}_d} = \varepsilon_h e^{j\theta_h}.$$

unde θ_i este unghiul dintre \underline{U}_i și \underline{U}_d iar θ_h este unghiul dintre \underline{U}_h și \underline{U}_d . În aceeași lucrare sunt indicate metode pentru determinarea acestor coeficienți și pentru măsurarea componentelor simetrice.

Pentru caracterizarea gradului de nesimetrie introdus în rețele electrice de consumatori dezechilibrați s-au propus în lucrarea [4] următorii indicatori:

$$k_p = \frac{P_n}{P_s}; \quad k_Q = \frac{Q_n}{Q_s}.$$

unde P_n este puterea activă de nesimetrie: $P_n = P_h + P_i$, iar P_s este puterea activă de simetrie: $P_s = P_d$.

Asemănător pentru puterea reactivă:

$$Q_n = Q_h + Q_i; \quad Q_s = Q_d.$$

Acești indicatori se numesc rapoarte de nesimetrie.

Pentru caracterizarea nesimetriei sistemelor trifazate de tensiuni și de curenți ce apar în circuitele trifazate dezechilibrate se propune în lucrarea de față un coeficient global de nesimetrie.

2. Puntea de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni

În cele ce urmează vom analiza puntea de diode alimentând un receptor pur rezistiv. Se va prezenta o metodă analitică exactă de calcul, o metodă de simulare pe calculator și o comparație între rezultatele obținute prin cele două metode [7], [8], [9].

Se va studia forma de undă a tensiunii redresate u_d precum și spectrul de armonici al tensiunii u_d .

De asemenea, vom prezenta rezultatele măsurătorilor experimentale efectuate în laborator.

2.1 Metoda analitică

Considerăm o punte trifazată de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni (fig. 1).

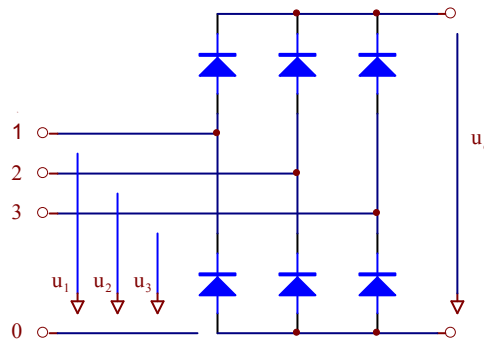


Fig. 1 Punte de diode ideale alimentată nesimetric

Sistemul trifazat nesimetric de tensiuni este notat (u_1, u_2, u_3) . Tensiunea redresată este u_d .

2.1.1 Considerarea cazului general. Teorema pozițiilor

Se consideră sistemul trifazat nesimetric general (u_1, u_2, u_3) de secvență directă. Sistemul este nesimetric la modul general, deci prezintă nesimetrie atât de module cât și de unghiuri.

Expresiile generale ale tensiunilor sistemului trifazat sunt:

$$\begin{cases} u_1(x) = U_{m1} \sin(x - x_1) \\ u_2(x) = U_{m2} \sin(x - x_2) \\ u_3(x) = U_{m3} \sin(x - x_3) \end{cases}$$

unde am notat $x = \omega t$ [6], [10], [11].

Notăm cu a, b, c abscisele punctelor de intersecție ale curbelor $u_1(x), u_2(x), u_3(x)$, care se găsesc în intervalul $\left(-\frac{\pi}{2}, +\frac{\pi}{2}\right)$. Mai exact:

- a corespunde la $u_2 \cap u_3$; - b corespunde la $u_3 \cap u_1$; - c corespunde la $u_1 \cap u_2$

Aceste abscise rezultă din următoarele ecuații:

$$u_2(x) = u_3(x); u_3(x) = u_1(x); u_1(x) = u_2(x);$$

Rezolvând aceste ecuații, se obțin următoarele expresii:

$$\operatorname{tg} a = \frac{U_{m2} \sin x_2 - U_{m3} \sin x_3}{U_{m2} \cos x_2 - U_{m3} \cos x_3}; \quad \operatorname{tg} b = \frac{U_{m3} \sin x_3 - U_{m1} \sin x_1}{U_{m3} \cos x_3 - U_{m1} \cos x_1}; \quad \operatorname{tg} c = \frac{U_{m1} \sin x_1 - U_{m2} \sin x_2}{U_{m1} \cos x_1 - U_{m2} \cos x_2}$$

De aici rezultă imediat a, b, c [7].

Fără a restrânge generalitatea, alegem ca origine de fază mărimea având amplitudinea maximă și fie u_1 această mărime.

Deci $x_1 = 0$; $0 < x_2 < x_3 < 2\pi$ și $0 < U_{m2} \leq U_{m1}$; $0 < U_{m3} \leq U_{m1}$. În această situație putem lua $U_{m1} = 1$ iar U_{m2}, U_{m3} vor fi numere pozitive subunitare.

Se pot imagina și sisteme trifazate la limită, în care pot interveni unele din următoarele situații:

$U_{m2} = 0; U_{m3} = 0; x_2 = 0; x_2 = x_3; x_3 = 2\pi$. Aceste sisteme posedă o nesimetrie accentuată.

În aceste condiții (mărimea cu amplitudinea maximă este u_1 și se alege origine de fază) se constată că pot exista 4 cazuri privind poziția relativă a numerelor a, b, c . Vom numi această afirmație teorema pozițiilor.

Teorema pozițiilor poate fi ilustrată prin metoda grafică. Din cele $3! = 6$ situații trebuie să scădem 2 datorită poziției privilegiate a lui u_1 (origine de fază). Demonstrația teoremei pozițiilor este dată în anexele lucrării [7].

Cazurile care pot să existe, după poziția relativă a numerelor a, b, c , sunt următoarele:

Cazul 1: $a < b < c$; cazul 2: $a < c < b$; cazul 3: $b < c < a$; cazul 4: $c < b < a$.

În situații particulare, poate interveni egalitatea între două din numerele a, b, c , de asemenea egalitatea unuia din aceste numere cu $-\frac{\pi}{2}$ sau $+\frac{\pi}{2}$.

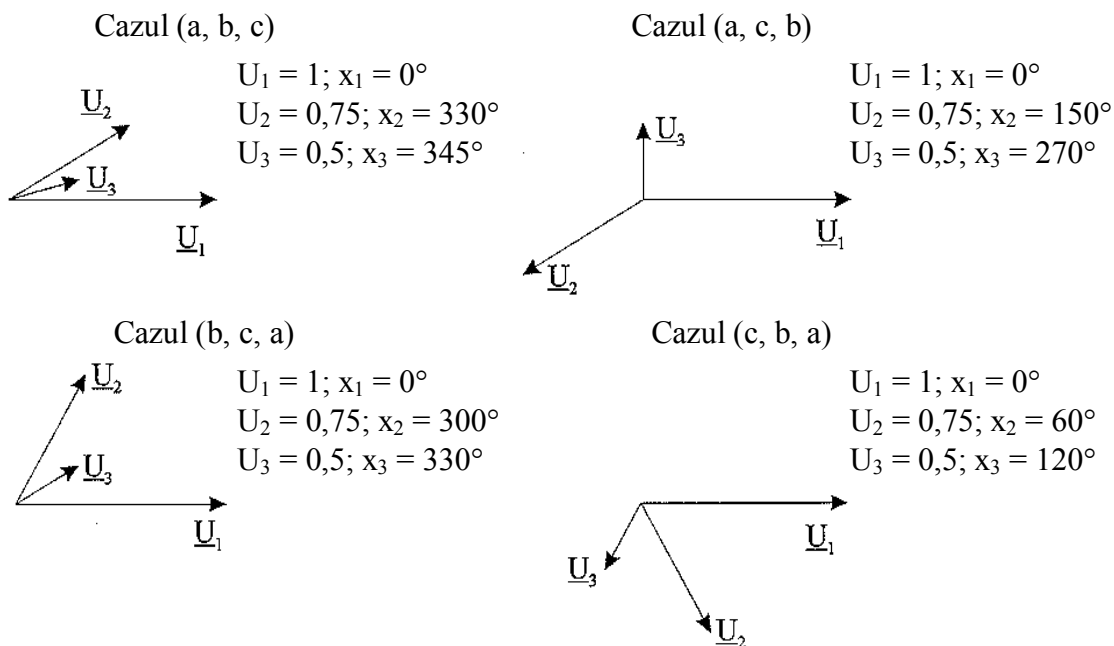


Fig. 2 Exemplificări pentru cele patru cazuri de sisteme nesimetrice

În figura 2 s-au reprezentat fazorial 4 sisteme la modul general, deci cu nesimetrie atât de module cât și de unghiuri. Sistemele considerate reprezintă cele patru cazuri care pot exista și care au fost prezentate mai înainte.

În toate cazurile, vom nota cu d suma dintre abscisa cea mai mică și numărul π :

$$d = \min(a, b, c) + \pi$$

În fiecare din cele 4 cazuri, semnalul $u_d(x)$ rezultă periodic cu perioada π [7].

Expresia generală a dezvoltării funcției $u_d(x)$ în serie Fourier este dată de următoarea relație:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos n \frac{\pi}{1} x + b_n \sin n \frac{\pi}{1} x \quad (1)$$

unde $2l = \pi$ este perioada. [6], [10], [11].

$$\text{Deci: } u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cos 2nx + b_n \sin 2nx \quad (2)$$

În continuare, vom studia pe rând cele patru cazuri.

2.1.2 Cazul I

Acest caz îl numim pe scurt cazul (a, b, c).

Avem $a < b < c < d$.

În figura 3 se prezintă sistemul nesimetric (u_1, u_2, u_3) funcție de x , precum și tensiunea $u_d(x)$.

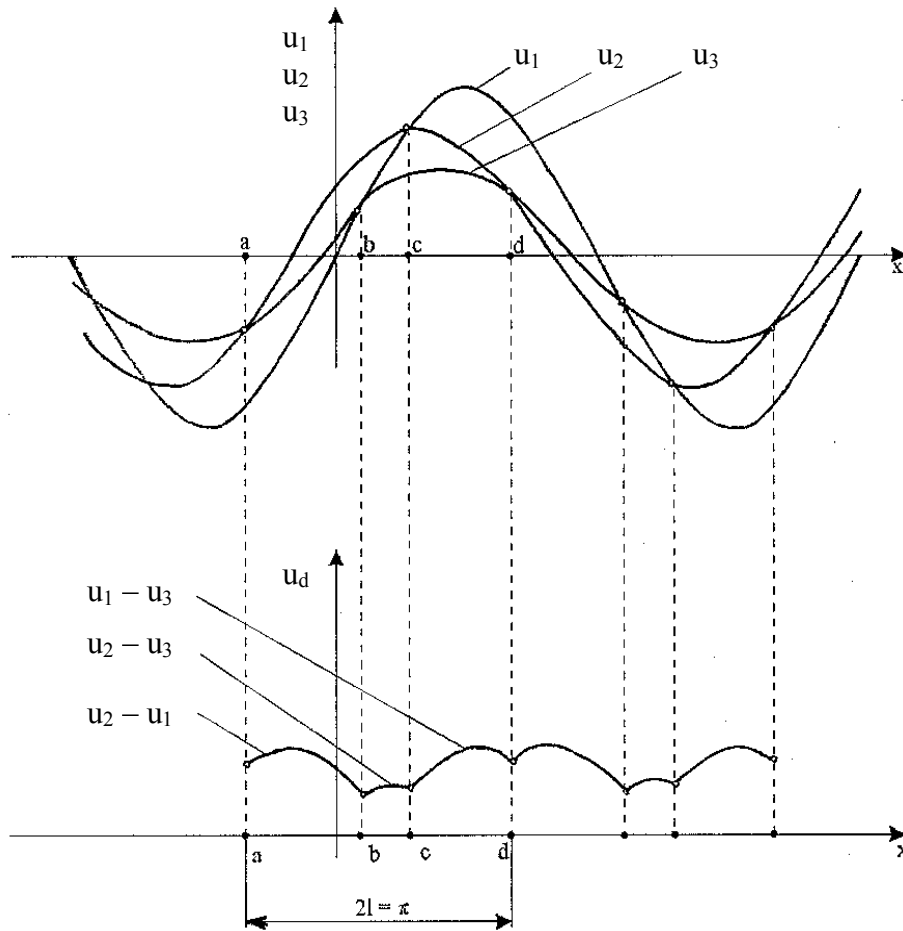


Fig. 3 Sistem nesimetric aparținând cazului 1 și tensiunea u_d corespunzătoare

Se poate scrie:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_2(x) - u_1(x), & \text{pentru } a \leq x < b \\ u_2(x) - u_3(x), & \text{pentru } b \leq x < c \\ u_1(x) - u_3(x), & \text{pentru } c \leq x < d \end{cases} \quad (3)$$

Coeficienții dezvoltării în serie Fourier sunt dați de relațiile:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx ; a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nx dx ; b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nx dx . \quad (4)$$

Efectuând calculele, se obțin următoarele expresii pentru a_n , b_n , și a_0 .
Pentru coeficientul a_n :

$$\begin{aligned}
& (4n^2 - 1) \pi a_n = \\
& = -U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_1] \} \\
& - U_{m1} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_1] \} \\
& - U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_2] \} \\
& + U_{m2} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \cos [(2n+1)c - x_2] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)a - x_3] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \cos [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \cos [(2n+1)b - x_3] \}
\end{aligned} \tag{5}$$

Pentru coeficientul b_n :

$$\begin{aligned}
& (4n^2 - 1) \pi b_n = \\
& = -U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_1] \} \\
& - U_{m1} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_1] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_1] \} \\
& - U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_2] \} \\
& + U_{m2} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)c + x_2] - (2n-1) \sin [(2n+1)c - x_2] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)a + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)a - x_3] \} \\
& + U_{m3} \{ (2n+1) \sin [(2n-1)b + x_3] - (2n-1) \sin [(2n+1)b - x_3] \}
\end{aligned} \tag{6}$$

Pentru coeficientul a_0 (termenul liber):

$$\begin{aligned}
& - \pi a_0 = \\
& = -U_{m1} [\cos (b - x_1) + \cos (c - x_1)] - \\
& - U_{m2} [\cos (a - x_2) - \cos (c - x_2)] \\
& + U_{m3} [\cos (a - x_3) + \cos (b - x_3)]
\end{aligned} \tag{7}$$

2.1.3 Cazurile II, III și IV

Aceste cazuri se tratează asemănător cazului I, obținându-se seturile de formule respective [7].

2.1.4 Cazul sistemului simetric

În acest caz particular (caz limită) avem:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_{m3} = U_m; \quad x_1 = 0; \quad x_2 = \frac{2\pi}{3}; \quad x_3 = \frac{4\pi}{3}$$

Particularizând formulele generale (sau abordând direct acest caz) obținem:

$$b_n = 0 \text{ (pentru orice } n). \tag{8}$$

$$a_n = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}(-1)^{k+1} U_m}{\pi(36k^2 - 1)}, \text{ pentru } n = 3k \\ 0, \text{ pentru } n = 3k - 1 \\ 0, \text{ pentru } n = 3k - 2 \end{cases} \tag{9}$$

$$\text{unde } k \geq 1. \quad a_0 = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi}. \tag{10}$$

Descompunerea în serie Fourier a tensiunii $u_d(x)$ este următoarea:

$$u_d(x) = \frac{3\sqrt{3}U_m}{\pi} + \frac{6\sqrt{3}U_m}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{36k^2 - 1} \cos 6kx \tag{11}$$

Se observă că amplitudinea armonicilor corespunde lui $n = 1$ este nulă: $A_1 = 0$. De asemenea, avem și $A_2 = 0$.

2.1.5 Cazul funcționării monofazate

În acest caz, $u_3 = 0$ deci $U_{m3} = 0$.

Vom avea condițiile:

$$U_{m1} = U_{m2} = U_m$$

$$U_{m3} = 0; x_1 = 0; x_2 = \pi; x_3 \text{ oarecare}$$

Particularizând formulele generale din cazul (a, c, b) sau (b, c, a) obținem:

$$a_n = -\frac{8U_m}{\pi(4n^2 - 1)}; a_0 = \frac{4U_m}{\pi}; b_n = 0. \quad (12)$$

Descompunerea în serie Fourier a tensiunii $u_d(x)$ este următoarea:

$$u_d(x) = \frac{4U_m}{\pi} - \frac{8U_m}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2nx}{4n^2 - 1} \quad (13)$$

Amplitudinea armonicilor fundamentale este:

$$A_1 = \frac{8U_m}{3\pi}; A_1 \approx 0,848 U_m. \quad (14)$$

2.2 Unele observații privind puntea de diode alimentată nesimetric

Se pot analiza și alte situații de alimentare cu sisteme nesimetrice particulare de tensiuni [7]. De asemenea, se pot considera și sisteme de secvență inversă. Pe baza metodei analitice prezentate anterior s-a elaborat un program de calculator (numit **PDIODE**) care ne furnizează pentru diverse sisteme nesimetrice de alimentare primele 10 armonici ale lui u_d , coeficientul global de nesimetrie, gradul de asimetrie, gradul de disimetrie, precum și reprezentarea grafică a spectrului lui u_d (amplitudinile funcției de ordinul armonicilor respective). S-au comparat rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**, bazat pe metoda analitică) cu rezultatele simulării pe calculator (**PSPICE**). Rezultatele sunt apropiate, eroarea relativă maximă nedepășind 2,9%. De asemenea, s-au făcut măsurători experimentale în laborator. Valorile măsurate experimental sunt apropiate de acelea obținute prin simularea **PSPICE** (eroare relativă maximă 0,9%).

3. Introducerea unui coeficient global de nesimetrie (CGN)

Din cele prezentate în paragraful 2 privind puntea de diode ideale alimentată cu un sistem trifazat nesimetric de tensiuni, rezultă că oricărui sistem nesimetric îi corespunde în mod univoc o tensiune u_d și deci o serie Fourier atașată. La modificarea nesimetriei sistemului trifazat îi va corespunde o modificare corespunzătoare a seriei de armonici. Prin urmare, la modificarea nesimetriei sistemului trifazat (u_1, u_2, u_3) se va modifica spectrul de armonici al tensiunii u_d .

În acest fel, putem caracteriza un sistem trifazat nesimetric prin coeficienții a_n, b_n, a_0, a_i ai seriei Fourier a tensiunii u_d obținută prin redresarea sistemului (u_1, u_2, u_3) cu o punte trifazată de diode [7].

3.1. Punerea problemei

În paragraful 2.1.4. am văzut că tensiunea u_d corespunzătoare unui sistem trifazat simetric (u_1, u_2, u_3) nu are armonică corespunzătoare lui $n = 1$ (deci de pulsație 2ω și frecvență $2f$) și de asemenea pentru $n = 2$ (deci de pulsație 4ω și frecvență $4f$).

Pe de altă parte, tensiunea u_d corespunzătoare unui sistem trifazat accentuat nesimetric cum este cel de la paragraful 2.1.5 (funcționare monofazată) conține o armonică importantă corespunzătoare lui $n = 1$ dar și una corespunzătoare lui $n = 2$.

Deoarece intuitiv este clar că la creșterea nesimetriei sistemului (u_1, u_2, u_3) trebuie să crească amplitudinea armonicilor corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ din tensiunea u_d , vom defini în continuare un coeficient global de nesimetrie (CGN). Acesta va ține seama concomitent de nesimetria de module și de nesimetria de faze.

Putem considera $U_{m1} = 1$ și U_{m2}, U_{m3} , numere pozitive subunitare. Altfel spus, pentru orice sistem trifazat simetric (u_1, u_2, u_3) putem considera un sistem trifazat "asemenea" cu cel dat, la care $U_{m1} = 1$ și U_{m2}, U_{m3} sunt numere pozitive subunitare iar fazele inițiale sunt aceleași cu ale sistemului inițial.

Definim coeficientul global de simetrie ca suma amplitudinilor armonicilor corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ pentru tensiunea u_d atașată sistemului trifazat "asemenea" având $U_{m1} = 1$ [7].

Deoarece armonica corespunzătoare lui n are amplitudinea:

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (15)$$

rezultă că armonicele corespunzătoare lui $n = 1$ și $n = 2$ vor avea amplitudinile:

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}; A_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (16)$$

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \frac{A_1 + A_2}{U_{m1}} \quad (17)$$

Punând $U_{m1} = 1$, putem scrie:

$$k_n = A_1 + A_2 \quad (18)$$

Deoarece în această definiție se ia în considerare și armonica de ordinul 2, putem nota pentru claritate $k_n = k_{n2}$. Inițial am considerat un coeficient de nesimetrie care lua în considerare numai armonicele de ordinul 1 [7] și care avea definiția:

$$k_{n1} = \frac{A_1}{U_{m1}} \quad (19)$$

În urma cercetărilor efectuate am ajuns la concluzia că se poate face o caracterizare mai cuprinzătoare a nesimetriei unui sistem trifazat cu ajutorul coeficientului global de nesimetrie de ordinul 2 ($k_n = k_{n2}$). Din acest motiv, în cele ce urmează se va studia acest coeficient.

3.2. Analiza generală pe cazuri

Vom analiza cele patru cazuri, prezentând formulele de calcul pentru a_1, b_1, a_2, b_2 , care intervin în definiția coeficientului global de nesimetrie.

Considerăm la început cazul I. Este vorba de cazul (a, b, c).

Prin particularizarea formulelor generale (5) și (6), obținem expresiile pentru a_1, b_1, a_2, b_2 .

Rezultă coeficientul global de nesimetrie:

$$k_n = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} + \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (20)$$

Asemănător se procedează și în cazurile II, III și IV.

3.3. Analiza unor cazuri particulare

În cazul sistemului trifazat simetric (paragraful 2.1.4) coeficientul global de nesimetrie este nul:

$$k_n = 0 \quad (21)$$

În cazul $u_3 = 0$ și $u_2 = -u_1$ de funcționare monofazată (paragraful 2.1.5), coeficientul global de nesimetrie rezultă:

$$k_n = \frac{48}{15\pi} \approx 1,018 \quad (22)$$

3.4. Cazul sistemelor de secvență inversă

Având în vedere cele arătate în paragraful 2.2 rezultă că pentru orice sistem nesimetric de secvență inversă, coeficientul global de nesimetrie este egal cu cel al sistemului pereche de secvență directă [7].

4. Program de calculator pentru reprezentarea variației coeficientului global de nesimetrie (VARK)

S-a realizat programul de calculator **VARK** care permite calculul și reprezentarea grafică 3D a variației coeficientului global de nesimetrie.

Coeficientul global de nesimetrie este o funcție (continuă) de patru parametri: U_{m2}, U_{m3}, x_2, x_3 (deoarece luăm întotdeauna $U_{m1} = 1, x_1 = 0$). Se pot realiza reprezentări grafice ale variației lui $k_n = k_{n2}$ funcție de 2 parametri, ceilalți 2 fiind menținuți constanți.

Programul **VARK** oferă următoarele posibilități de reprezentare:

1. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, U_{m3})$; 2. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, x_2)$; 3. Grafic $k_{n2} = f(U_{m2}, x_3)$; 4. Grafic $k_{n2} = f(U_{m3}, x_2)$; 5. Grafic $k_{n2} = f(U_{m3}, x_3)$; 6. Grafic $k_{n2} = f(x_2, x_3)$; 7. Ieșire.

Pentru fiecare posibilitate, se pot realiza trei tipuri de reprezentări grafice:

1. Cu bare; 2. Suprafață; 3. Mixt.

De asemenea, la fiecare reprezentare se indică coeficientul global de nesimetrie maxim și sistemul nesimetric pentru care se obține. În grafic, acest maxim este indicat printr-o bară îngroșată.

Programul **VARK** lucrează în felul următor:

1. Se introduce un sistem trifazat nesimetric prin parametrii U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} , x_1 , x_2 , x_3 .
2. Se realizează analiza armonică a tensiunii u_d corespunzătoare.
3. Se alege una din cele șase variante de reprezentare 3D.

În acest moment, programul menține constanți cei doi parametri care nu variază în timpul reprezentării alese. Mai exact, valorile acestor parametri sunt “moșteniți” de la introducerea (vezi punctul 1 de mai sus). Cei doi parametri variabili variază în conformitate cu rețelele de discretizare din figura 4. Programul calculează de fiecare dată valoarea coeficientului global de nesimetrie k_{n2} și apoi realizează reprezentarea grafică 3D a variației lui k_{n2} funcție de parametrii variabili specifici variantei de reprezentare alese.

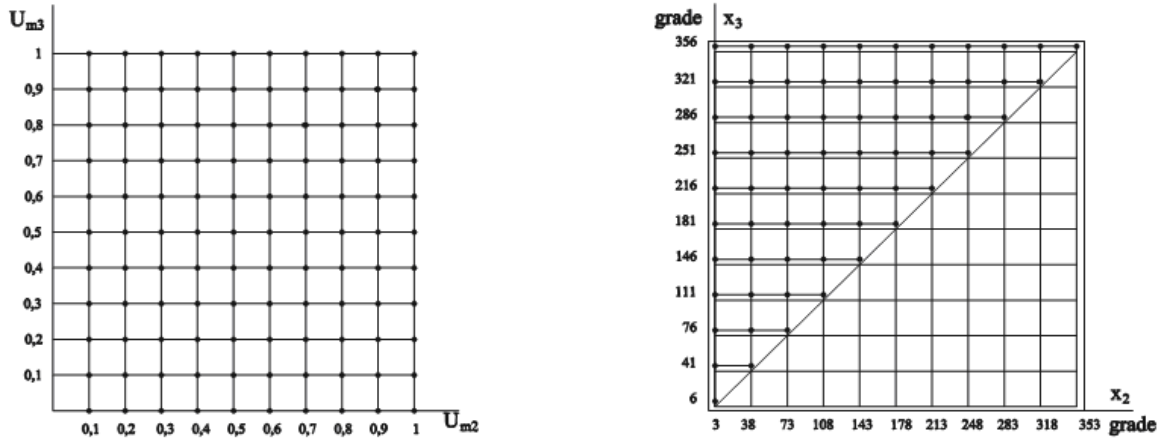


Fig. 4 Rețele de discretizare pentru U_{m2} , U_{m3} , x_2 , x_3

Aplicația Vark 1 lucrează după rețelele de discretizare din figura 4, deci realizează o diviziune a intervalului de variație maxim pentru x_2 și x_3 în $n = 11$ puncte. Aplicația Vark 2 permite o discretizare mai fină (corespunzătoare la $n = 11 \dots 15$, la alegere).

De asemenea, am realizat rularea programului **VARK** în mediul **MATLAB**. Datele obținute în programul **VARK** sunt transformate în fișiere ASCII care sunt prelucrate în mediul **MATLAB** pentru realizarea unor reprezentări grafice 3D cu parametri îmbunătățiți. Mediul **MATLAB** permite scalarea automată a axelor și modificarea punctului de vedere asupra suprafeței, ceea ce conduce la reprezentări 3D de calitate superioară. De asemenea se pot realiza reprezentări de forma “mesh” (suprafață-rețea) sau “surf” (suprafață plină). Suprafețele obținute sunt color, cu indicarea prin modificarea culorilor a variației lui k_{n2} .

5. Reprezentări grafice 3D ale variației coeficientului global de nesimetrie

În continuare sunt redată o serie de reprezentări grafice 3D ale variației coeficientului global de nesimetrie, realizate cu programul **VARK**, respectiv cu programul **VARK** rulat în mediul **MATLAB**.

PROGRAM PENTRU REPREZENTAREA VARIATIEI COEFICIENTULUI

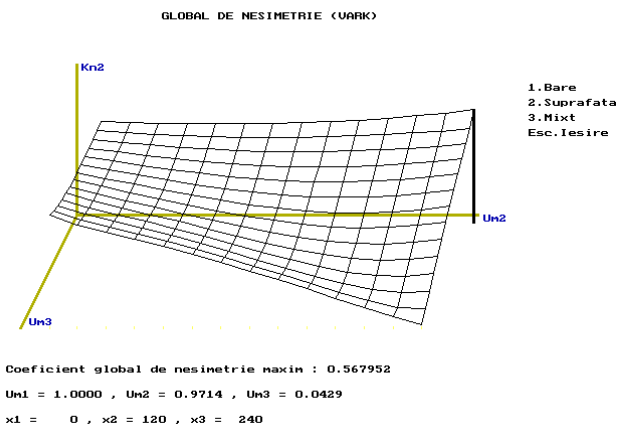


Fig. 5 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^\circ$ și $x_3=240^\circ$ (variante suprafață)

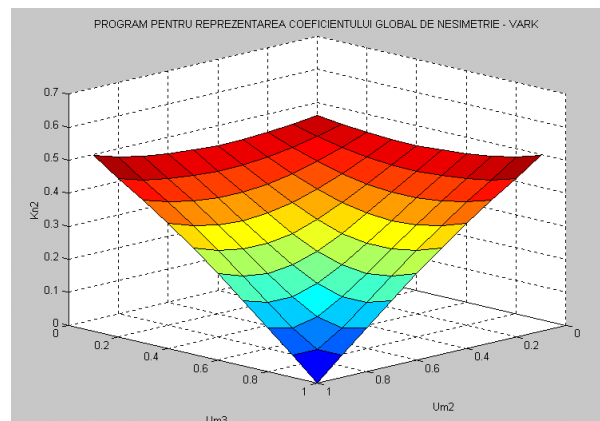


Fig. 6 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^\circ$ și $x_3=240^\circ$ (variantă surf executată în Matlab cu Vark 1)

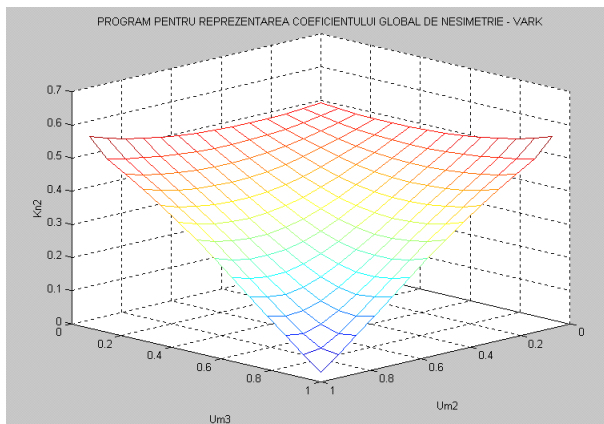


Fig. 7 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și U_{m3} și sunt constanți $x_2=120^\circ$ și $x_3=240^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

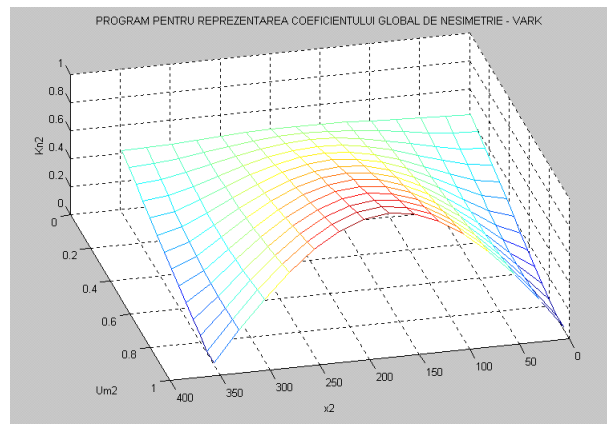


Fig. 8 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m2} și x_2 și sunt constanți $U_{m3}=1$ și $x_3=356^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

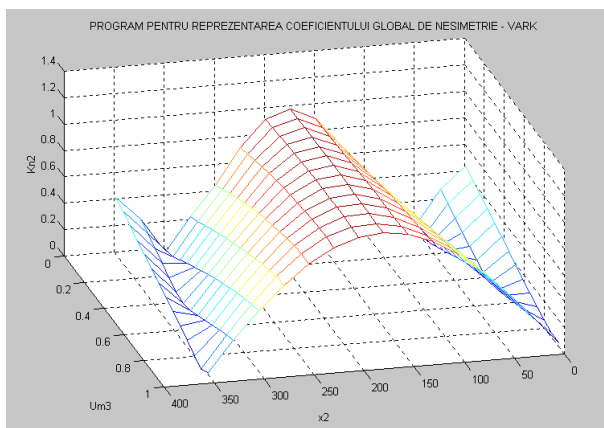


Fig. 9 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_2 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_3=356^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

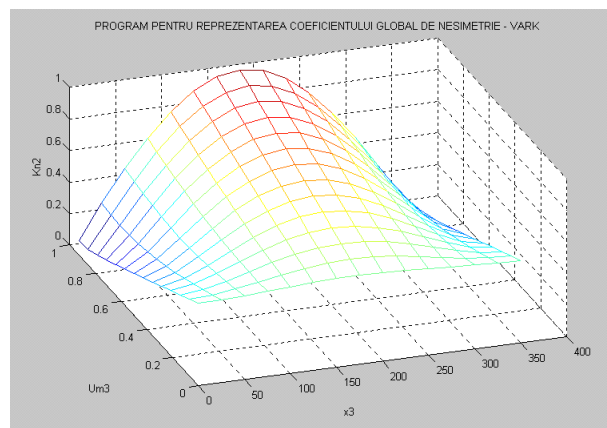


Fig. 10 Reprezentarea coeficientului global de nesimetrie când variază U_{m3} și x_3 și sunt constanți $U_{m2}=1$ și $x_2=3^\circ$ (varianta mesh executată în Matlab cu Vark 2)

6. Concluzii și observații

În această lucrare s-au pus în evidență o serie de aspecte legate de funcționarea unei punți trifazate de diode alimentate cu un sistem nesimetric de tensiuni.

La început, s-a considerat cazul punții de diode ideale alimentând o rezistență pură. S-a prezentat o metodă analitică exactă de calcul, în cele patru cazuri care pot exista. De asemenea, s-au analizat o serie de cazuri particulare. Pe baza metodei analitice prezentate, s-a elaborat programul de calculator **PDIODE**. Rezultatele obținute prin metoda analitică (respectiv cu programul **PDIODE**) au fost comparate cu cele obținute prin simulare pe calculator, respectiv prin măsurători experimentale în laborator.

În continuare se propune introducerea unui coeficient global de nesimetrie pentru sistemele trifazate nesimetrice. După cum se știe, în mod clasic se indică nesimetria unui sistem trifazat prin gradul de asimetrie și gradul de disimetrie. Pentru ca nesimetria unui sistem trifazat să fie relativ mică, ambele grade trebuie să fie mai mici decât niște valori admise convențional, de exemplu 5%. Coeficientul global de nesimetrie (k_n) indică nesimetria sistemului printr-un singur număr cuprins între 0 și 1,018. S-au prezentat formulele analitice de calcul ale lui k_n pentru cele patru cazuri și valorile lui pentru unele cazuri particulare. De asemenea, s-a prezentat programul de calculator **VARK** care permite calcularea lui k_n și reprezentarea grafică a variației coeficientului global de nesimetrie, împreună cu rezultatele obținute cu acest program. Definierea acestui coeficient global de nesimetrie aparține autorului prezentei lucrări.

S-a realizat o aplicație tehnică a caracterizării nesimetriei unui sistem trifazat prin coeficientul global de nesimetric definit în prezenta lucrare. Este vorba de un releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la întreruperea unei faze de alimentare, care a fost brevetat (brevet OSIM nr. 87118).

S-a realizat un model experimental care a fost testat pe standul pentru încercarea motoarelor electrice, stand care a fost construit prin autodotare în laboratorul de electrotehnică [7]. Standul este prevăzut cu o frână cu curenți turbionari, proiectată și construită de asemenea în laboratorul de electrotehnică [7]. Prin încărcarea motorului cu diverse cupluri de sarcină s-a putut testa dispozitivul de protecție antibifazică în diverse regimuri de funcționare ale motorului protejat. Funcționarea dispozitivului de protecție a fost corespunzătoare.

Proiectarea dispozitivului de protecție antibifazică s-a făcut în cadrul unui contract de cercetare-proiectare încheiat cu întreprinderea S.C. "RELEE" S.A. Mediaș [7]. Dispozitivul de protecție antibifazică a fost omologat la S.C."RELEE" S.A. Mediaș și asimilat în producția de serie, existând posibilitatea producerii lui, funcție de cerințele beneficiarilor. După o perioadă de stagnare datorată condițiilor grele cauzate de restructurare și tranziția la economia de piață, există în momentul de față o preocupare susținută la nivelul conducerii întreprinderii pentru promovarea acestui dispozitiv de protecție antibifazică. (DPAB). Astfel, s-a realizat reproiectarea și modernizarea acestui produs, însoțită de îmbunătățirea tehnologiei de construcție.

7. Bibliografie

- [1] Brittain, J.E.- *Charles L.G. Fortescue and the method of symmetrical components*, Proceeding of the IEEE, Vol.86, no.5, May 1998, pp.1020-1025
- [2] Ciupa, R.V. , Topa, V. – *The Theory of Electric Circuits*, Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 1998
- [3] Clarke, E. - *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice* (traducere selectivă din limba engleză - S.U.A.), Editura Tehnică, București, 1973
- [4] Ionescu, T.G., Coculescu, S., Neagoe, M., Pavel, E. - *Regimul nesimetric generator de consumuri proprii tehnologice suplimentare în rețelele electrice*; Energetica, Vol.XXXVI, Nr.9, septembrie 1988, pag.404 - 411
- [5] Ionescu, T.G., Golovanov, C., Manolescu, P., Oprea, R. - *Metode de determinare a coeficientului de nesimetric inversă de tensiune*; Energetica, Vol. XXXVIII, Nr. 8 - 9, august - septembrie 1990, pag. 371 - 376
- [6] Mocanu, C.I. - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
- [7] Popa, V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*; Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj - Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999
- [8] Popa, V.M. – *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*, A treia Conferință națională "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 30 mai – 1 iunie 2003, volum I, pag. 105-108
- [9] Sakui, M., Fujita, H. - *An Analytical Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with DC Filter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.9, No.6, November 1994, pp.631-637
- [10] Simion, E., Man, E., Ciupa, R.V., Roșca, P., Neamțu, V., Popa, V.M. - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [11] Șora, C. - *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
- [12] Țugulea, A., Golovanov, C. - *Efectele energetice ale regimurilor nesimetrice și deformante ale sistemelor electroenergetice. Posibilități de măsurare*; ENERGA, Vol.III, Editura Tehnică, București, 1987, pag.130-162

Considerations upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors

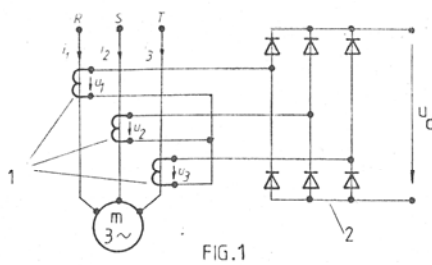
Vasile Mircea Popa

University "Lucian Blaga" of Sibiu, Department of electrical Engineering, 2400 Sibiu, Romania

Abstract: The paper presents the problem of studying the working of the protection relay of asynchronous motors at the interruption of one phase, made by the author [1], when the three-phase system of tensions obtained at the outlet of the current transducers is non-symmetric.

1.Introduction

Figure 1 represents the entrance circuit in the protection relay, formed by the current transducers (1) and the three-phase rectifier-bridge (2).



For a start, we have considered the case in which tensions u_1, u_2, u_3 are equally differentiated, but at different amplitudes:

$$U_m, \alpha U_m, \beta U_m; 0 < \beta < \alpha < 1.$$

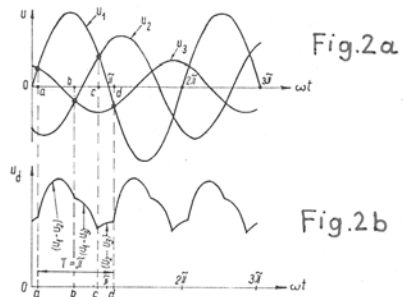
2.The problem framing

In the paper we calculate the amplitude of the harmonic of **100 Hz**, which plays a functional part essential to the relay and we also determinate the domain of variation of the α and β parameters which characterize the non-symmetric system of tensions so that the degree of dissymmetry may have an imposed value.

By rectifying the three-phase system shown in **figure 2.a.**, at the outlet of the three-phase bridge we obtain the signal u_d shown in **figure 2.b**. [2]. We notice that the function

$$u_d(\omega t) = u_d(x)$$

is periodic, having the period $T = \pi$.



We may rewrite it as:

$$u_d(x) = \begin{cases} u_1(x) - u_2(x); & x \in [a; b] \\ u_1(x) - u_3(x); & x \in [b; c] \\ u_2(x) - u_3(x); & x \in [c; d] \end{cases} \quad (1)$$

in which a, b, c, d are the Ox coordinates of the intersection points of the curves $u_1(x), u_2(x)$ and $u_3(x)$ (**fig.2.a**).

The general expressions of the three-phase system are:

$$\begin{aligned} u_1(x) &= U_{m1} \sin(x - x_1); x_1 = 0; U_{m1} = U_m \\ u_2(x) &= U_{m2} \sin(x - x_2); x_2 = \frac{2\pi}{3}; U_{m2} = \alpha U_m \\ u_3(x) &= U_{m3} \sin(x - x_3); x_3 = \frac{4\pi}{3}; U_{m3} = \beta U_m \end{aligned} \quad (2)$$

in which α and β are subunitary parameters.

The general expression of developing the function $u_d(x)$ in Fourier series is given by the relation 3:

$$u_d(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l} \right) \quad (3)$$

in which:

$$T = d - a = 2l = \pi$$

The coefficients of a serial development are given by the relations 4:

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_a^d u_d(x) dx$$

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \cos 2nxdx \dots\dots\dots(4)$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_a^d u_d(x) \sin 2nxdx$$

The harmonic of 100Hz corresponds to the terms in (3) which have $n=1$. By replacing $n=1$ in the relations (4) we may express a_1 and b_1 depending on α and β .

Hence,

$$A_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} = f(\alpha, \beta) \quad (5)$$

Calculating the degree of dissymmetry and the degree of assymetry in the case of the system of tensions under consideration we obtain:

$$k_i = k_h = \frac{\sqrt{(2-\alpha-\beta)^2 + 3(\alpha-\beta)^2}}{2(1+\alpha+\beta)} \quad (6)$$

If we impose

$$k_i = k_h \leq 10\%$$

we obtain the domain of variation for α and β shown in figure 3., which has an elliptical shape, with the long semiaxis of

$$\frac{5\sqrt{2}}{16} \approx 0,44$$

and the short semiaxis of

$$\frac{1}{4} = 0,25$$

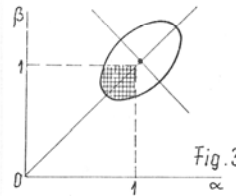


Fig. 3

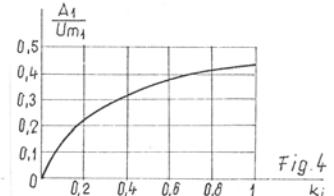


Fig. 4

In the particular case when $\alpha = \beta$, we obtain:

$$k_i = k_h = \frac{1-\alpha}{1+2\alpha} \quad (7)$$

On performing the numerical calculations for : $k_i \in [0;1]$ we have obtained the dependence

$$\frac{A_1}{U_{m1}} = f(k_i)$$

shown in fig.4.

3. Conclusions

The paper demonstrates the necessity of taking into consideration the possibilities of an undesired switching in at the outlet of the current transducers in case of non-symmetry with the system of tensions.

4. References

[1] P. Rosca, C. Diaconescu, V. M. Popa, L. Modran - *Relevu pentru protectia motoarelor asincrone trifazate la intreruperea unei faze de alimentare*, Brevet de inventie 87118 din 19.03.1985
 [2] V. M. Popa - *Aplicatii si incercari experimentale privind comportarea circuitelor trifazate in regimuri nesimetrice*, Referat de doctorat nr.2, Universitatea Tehnica Cluj-Napoca, 1994.

METODĂ ANALITICĂ PENTRU STUDIUL PUNȚII DE DIODE AVÂND O SARCINĂ COMPLEXĂ

Vasile Mircea POPA

ANALYTICAL METHOD FOR THE STUDY OF THE DIODE- BRIDGE WITH A COMPLEX LOAD

Commonly, three-phase diode bridge rectifiers are often used to convert AC input into a DC voltage. It is well known that they generate large amounts of harmonic currents in DC and AC sides. The paper proposes an analytical method for calculating the harmonic currents of a three-phase diode-bridge under non-symmetrical supply conditions and with a complex load. We are considering a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system: $e_a(x) = E_a \sin(x-x_1)$, $e_b(x) = E_b \sin(x-x_2)$ and $e_c(x) = E_c \sin(x-x_3)$. Performing those calculations we obtain the Fourier coefficients of series development for the harmonic currents on both the DC and AC sides. The equations for the harmonic currents are derived, taking into account the effects of the DC and AC side impedances. All the calculations are conducted only by algebraic calculation with high accuracy. The proposed method can be easily extended to the harmonic analysis of three-phase thyristor-bridge with non-symmetrical supply conditions and a complex load.

Cuvinte cheie: punte de diode, alimentare nesimetrică, sarcină complexă, analiză armonică.

1. Introducere

În cele ce urmează se va studia puntea de diode alimentând o sarcină formată dintr-o rezistență R_d , o reactanță inductivă X_d și o sursă

de tensiune contraelectromotoare E_d . Sursa de tensiune alternativă trifazată posedă în cele trei faze reactanțele X_a , X_b , X_c . Sistemul de tensiuni electromotoare (e_a , e_b , e_c) este în general nesimetric.

Se vor deduce formele de undă ale mărimilor care intervin la funcționarea punții și se vor calcula armonicile acestor mărimi.

Se va prezenta o metodă analitică obținută prin adaptarea și dezvoltarea unor procedee de calcul din literatura tehnică de specialitate [1], [3], [4], [9], [13].

2. Metoda analitică

Metoda analitică dezvoltată în continuare permite calculul armonicilor de curent pentru o punte trifazată de diode sub condiții de dezechilibru a sursei de alimentare. Expresiile analitice pentru armonicile de curent sunt obținute luând în considerare efectele undei de curent continuu și a unghiului de comutație. În literatura de specialitate există lucrări care tratează această problemă, dar în diferite ipoteze de lucru [1].

Astfel, în unele lucrări impedanța pentru partea de curent continuu este considerată infinită, deci curentul continuu este considerat perfect constant (fără efect de undă, deci fără ondulații). În alte lucrări se neglijează reactanța de comutație (deci unghiul de comutație) sau se consideră puntea ca o sursă de tensiune ideală (impedanța părții de curent alternativ este cu mult mai mică decât impedanța părții de curent continuu).

În metoda analitică prezentată în continuare se iau în considerare efectele undei de curent continuu și ale unghiului de comutație. Impedanța părții de curent alternativ nu este necesar să fie mai mică decât impedanța părții de curent continuu. Ele pot fi comparabile în mărime.

Metoda este foarte precisă, rezultatele obținute fiind foarte apropiate față de acelea obținute prin metoda simulării pe calculator [1], [3], [13].

3. Expresiile generale pentru armonicile de curent

În figura 1 este reprezentată puntea trifazată analizată.

Curentul i_d al părții de curent continuu constă în componenta I_d și în componenta alternativă i_{dr} . Expresia generală pentru acest curent va fi deci:

$$i_d = I_d + i_{dr} = I_d + \sum_m i_{dm} = I_d + \sum_m \sqrt{2} I_{dm} \cos(mx - \beta_m) \quad (1)$$

unde: m = ordinul armonicii; I_{dm} = valoarea efectivă a armonicii m ; β_m = faza inițială pentru armonica m .

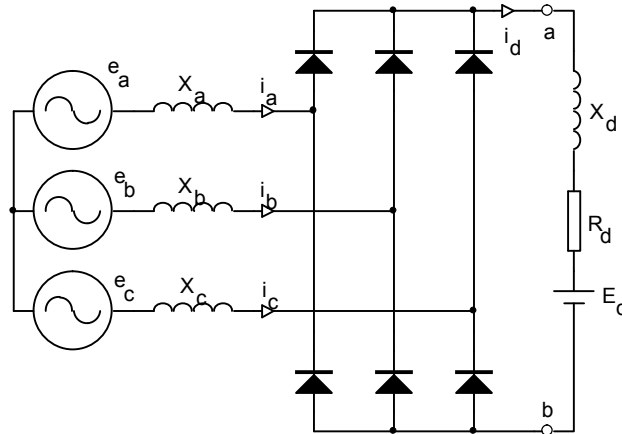


Fig. 1 Punte de diode alimentată nesimetric, cu o sarcină complexă

Curentul de linie de c.a. poate fi analizat pe o cale asemănătoare. Mai precis, curentul de linie i_a (din faza a) constă din curentul i_{oa} care este produs de curentul neted de c.c. egal cu valoarea medie I_d și din curentul Δi_a care este determinat în zona de c.a. de către componenta i_{dr} injectată în circuitul de redresare.

Deci, el are expresia:

$$i_a = i_{oa} + \Delta i_a \quad (2)$$

Similar, ecuațiile pentru curenții de linie de c.a. pentru celelalte două faze pot fi scrise în felul următor:

$$i_b = i_{ob} + \Delta i_b \quad (3)$$

$$i_c = i_{oc} + \Delta i_c \quad (4)$$

Calcularea curenților pentru zonele de c.c. și de c.a. este prezentată în continuare. Pentru detalii se poate vedea [3] și [13].

4. Calcularea armonicilor de curent pentru partea de curent continuu

În lucrările [3] și [13] se prezintă tensiunea de circuit deschis (t.e.m.) e_{dm} , egală cu armonica componentă a tensiunii de ieșire de c.c. pentru cazul mărimii infinite a reactanței de netezire, adică având

curent continuu perfect neted. În acest caz, tensiunea e_d din zona de c.c. se poate exprima cu ajutorul funcțiilor de comutație ale redresării S_a, S_b, S_c , arătate în fig. 2.

Avem:

$$e_d = S_a e_a + S_b e_b + S_c e_c \quad (5)$$

unde e_a, e_b, e_c sunt tensiunile electromotoare de pe cele trei faze dezechilibrate, date de relațiile:

$$e_a = E_a \sin(x - x_1) \quad (6)$$

$$e_b = E_b \sin(x - x_2) \quad (7)$$

$$e_c = E_c \sin(x - x_3) \quad (8)$$

Fiecare funcție de comutație a redresării poate fi exprimată cu seriile Fourier următoare:

$$S_a = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} A_{an} \cos nx + B_{an} \sin nx \quad (9)$$

$$S_b = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} A_{bn} \cos nx + B_{bn} \sin nx \quad (10)$$

$$S_c = \sum_{m=1,3,5,\dots}^{\infty} A_{cn} \cos nx + B_{cn} \sin nx \quad (11)$$

unde:

$$A_{an} = -\frac{2}{n\pi} \left[\sin n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{nu_1}{2} - \sin n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{nu_2}{2} \right] \quad (12)$$

$$B_{an} = \frac{2}{n\pi} \left[\cos n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{nu_1}{2} - \cos n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{nu_2}{2} \right] \quad (13)$$

$$A_{bn} = -\frac{2}{n\pi} \left[\sin n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{nu_2}{2} - \sin n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{nu_3}{2} \right] \quad (14)$$

$$B_{bn} = \frac{2}{n\pi} \left[\cos n \left(\alpha_2 + \frac{u_2}{2} \right) \cos \frac{nu_2}{2} - \cos n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{nu_3}{2} \right] \quad (15)$$

$$A_{cn} = -\frac{2}{n\pi} \left[\sin n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{nu_3}{2} - \sin n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{nu_1}{2} \right] \quad (16)$$

$$B_{cn} = \frac{2}{n\pi} \left[\cos n \left(\alpha_3 + \frac{u_3}{2} \right) \cos \frac{nu_3}{2} - \cos n \left(\alpha_1 + \frac{u_1}{2} \right) \cos \frac{nu_1}{2} \right] \quad (17)$$

În aceste relații avem:

$$n = 2k - 1; k = 1, 2, 3, \dots$$

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ = unghiurile de aprindere ale fazelor respective de la punctul zero $x = 0$, arătate în fig. 2.

u_1, u_2, u_3 = unghiurile de comutație ale fazelor respective, arătate în fig.2.

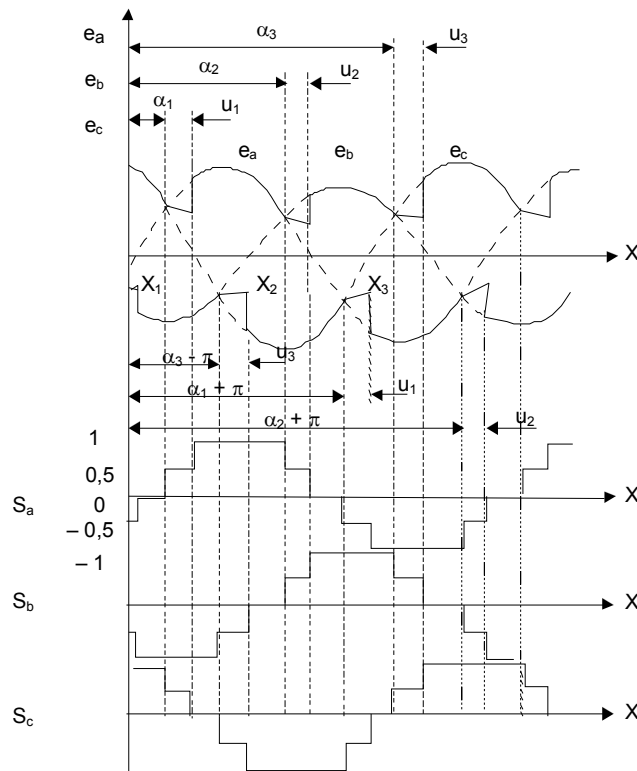


Fig. 2 Sistemul nesimetric de alimentare și funcțiile de comutație ale redresării

Sub condiții de dezechilibru (nesimetrie) ale sursei, unghiurile de comutație u_1, u_2, u_3 în fazele a, b, c sunt date de relațiile:

$$u_1 = \arccos \left[1 - \frac{(X_c + X_a)I_d}{\sqrt{E_c^2 + E_a^2 - 2E_cE_a \cos(x_3 - x_1)}} \right] \quad (18)$$

$$u_2 = \arccos \left[1 - \frac{(X_a + X_b)I_d}{\sqrt{E_a^2 + E_b^2 - 2E_aE_b \cos(x_1 - x_2)}} \right] \quad (19)$$

$$u_3 = \arccos \left[1 - \frac{(X_b + X_c) I_d}{\sqrt{E_b^2 + E_c^2 - 2E_b E_c \cos(x_2 - x_3)}} \right] \quad (20)$$

unde:

$$\alpha_1 = \operatorname{arctg} \frac{-E_c \sin x_3 + E_a \sin x_1}{-E_c \cos x_3 + E_a \cos x_1} \quad (21)$$

$$\alpha_2 = \operatorname{arctg} \frac{-E_a \sin x_1 + E_b \sin x_2}{-E_a \cos x_1 + E_b \cos x_2} \quad (22)$$

$$\alpha_3 = \operatorname{arctg} \frac{-E_b \sin x_2 + E_c \sin x_3}{-E_b \cos x_2 + E_c \cos x_3} \quad (23)$$

5. Calcularea armonicilor de curent pentru partea de curent alternativ

Vom analiza curenții i_{oa} , i_{ob} , i_{oc}

După cum rezultă din paragraful 3, curenții de linie din zona de c.a. i_{oa} , i_{ob} , i_{oc} sunt produși de curentul constant I_d din partea de c.c. Deci, după ecuațiile 18 ... 23 curentul alternativ i_{oa} în faza a arătat în fig. 3 este reprezentat de o formă simetrică de undă descrisă de:

(a) $\alpha_1 \leq x < \alpha_1 + u_1$

$$i_{oa} = \frac{1 - \cos(x - \alpha_1)}{1 - \cos u_1} \cdot I_d \quad (24)$$

(b) $\alpha_1 + u_1 \leq x < \alpha_2$

$$i_{oa} = I_d \quad (25)$$

(c) $\alpha_2 \leq x < \alpha_2 + u_2$

$$i_{oa} = \left[1 - \frac{1 - \cos(x - \alpha_2)}{1 - \cos u_2} \right] I_d \quad (26)$$

(d) $\alpha_2 + u_2 \leq x < \alpha_1 + \pi$

$$i_{oa} = 0 \quad (27)$$

De aici, seria Fourier a curentului i_{oa} este exprimată prin următoarea relație:

$$i_{oa} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} (A_{oan} \cos nx + B_{oan} \sin nx) \quad (28)$$

unde A_{oan} și B_{oan} sunt dați în lucrările [3] și [13].

Expresiile lui i_{ob} și i_{oc} pentru fazele b și c pot fi obținute schimbând notațiile în ecuația (28) în felul următor:

Faza b:

b în loc de a

a în loc de c

2 în loc de 1

1 în loc de 3

Faza c:

c în loc de a

b în loc de c

3 în loc de 1

2 în loc de 3

Formele de undă ale curenților de linie pe partea de curent alternativ sunt redate în figura 3.

Analizând figurile 3 b la 3 d se poate concluziona că curentul Δi_a care este determinat în faza a de componenta de c.a. i_{dr} a părții de c.c., poate fi obținut prin multiplicarea curentului i_{dr} cu funcția de comutație a redresării S_a .

$$\Delta i_a = S_a i_{dr} \quad (29)$$

$$\Delta i_a = \sum_{n=1,3,5\dots}^{\infty} \Delta A_{an} \cos nx + \Delta B_{an} \sin nx \quad (30)$$

unde:

$$\Delta A_{an} = \sum_{m=2,4,6\dots}^{\infty} I_{dm} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(A_{a(n-m)} + A_{a(n+m)}) \cdot \cos \beta_m - (B_{a(n-m)} + B_{a(n+m)}) \cdot \sin \beta_m \right] \quad (31)$$

$$\Delta B_{an} = \sum_{m=2,4,6\dots}^{\infty} I_{dm} \frac{1}{\sqrt{2}} \left[(A_{a(n-m)} + A_{a(n+m)}) \cdot \cos \beta_m - (B_{a(n-m)} + B_{a(n+m)}) \cdot \sin \beta_m \right] \quad (32)$$

$$n = 2k - 1; \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

$$m = 2k; \quad k = 1, 2, 3, \dots$$

Aici trebuie notat:

$$A_{a(n-m)} = A_{a(m-n)} \text{ și} \quad (33)$$

$$B_{a(n-m)} = -B_{a(m-n)} \quad (34)$$

pentru $n - m < 0$.

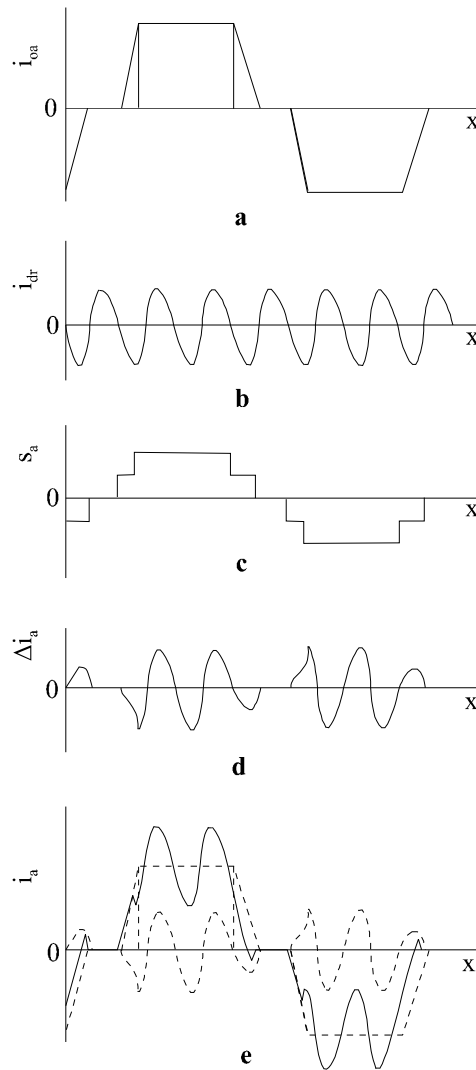


Fig. 3 Formele de undă ale curenților alternativi

Prin urmare curentul de linie i_a arătat în figura 3 este dedus din ecuațiile 2, 28, și 30 după cum urmează:

$$i_a = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} [(A_{0an} + \Delta A_{an}) \cos nx + (B_{0an} + \Delta B_{an}) \sin nx] \quad (35)$$

$$i_a = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} [A_{ian} \cos nx + B_{ian} \sin nx] \quad (36)$$

Valoarea efectivă I_{an} a armonicii n a lui i_a este:

$$I_{an} = \frac{\sqrt{A_{ian}^2 + B_{ian}^2}}{2}$$

Expresiile pentru i_b și i_c rezultă ușor prin reamplasarea indicilor după cum s-a arătat mai înainte.

6. Concluzii

În această lucrare se prezintă o metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentate nesimetric și avînd o sarcină complexă. Se calculează curenții pentru partea de curent continuu și pentru partea de curent alternativ. Calculele au o mare acuratețe, iar rezultatele finale obținute au fost verificate prin comparație cu cele provenind din modelarea pe calculator (PSPICE). Eroarea relativă maximă nu depășește 1,1% pentru partea curent continuu și respectiv 2,6 % pentru partea de curent alternativ. Metoda reprezintă adaptarea unui procedeu de calcul analitic preluat din literatura de specialitate [1] și care se referă la o punte trifazată comandată, cu tiristoare.

Pentru detalii ale metodei analitice prezentate în acest articol se pot vedea lucrările [3] și [13] din lista bibliografică.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Sakui M., Fujita H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484
- [2] Popa V. M., Buduriși, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44
- [3] Popa V. M. – Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999
- [4] Popa V. M., Roșca P. – Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 225-228
- [5] Popa V. M., Roșca P. – Program de calculator pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 229-230

- [6] Popa, V. M., Popescu, L. – Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9
- [7] Popa, V. M., Popescu, L. – Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetri, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9
- [8] Popa, V. M. – Studiul punții de diode alimentată nesimetric, Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2
- [9] Popa, V. M. – Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric, A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5
- [10] Popa, V. M. – Analiza punții de diode alimentată cu sisteme de tensiuni nesimetrice, Lucrările celei de A VI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2-3 iunie 2006; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 9), ISBN 10 973-8130-82-4
- [11] Popa, V. M. – Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric, A VII-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19 aprilie 2007, Extras, ISBN 978-973-7998-32-3
- [12] Popa, V. M. – Rezultate experimentale și comparative privind puntea de diode în regim de alimentare nesimetric, Lucrările celei de A VII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2007; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 11), ISBN 973-8130-82-4
- [13] Popa, V. M. – Sisteme nesimetrice în electrotehnică, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2011, ISBN 978-606-12-0253-9, monografie tehnică, 150 pag.

Prof. dr. ing. Vasile Mircea POPA,
Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, membru AGIR
Facultatea de Inginerie “Hermann Oberth”
str. Emil Cioran nr. 4, cod poștal: 550025
Sibiu
e-mail: popavm@yahoo.com

ASPECTE COMPARATIVE PRIVIND PUNTEA DE DIODE AVÂND O SARCINĂ COMPLEXĂ

Vasile Mircea POPA

COMPARATIVE ASPECTS REGARDING THE DIODE-BRIDGE WITH A COMPLEX LOAD

In this paper we consider a three-phase ideal diode-bridge fed by a non-symmetrical voltage system and with a complex load. Using an analytical method we obtain the Fourier coefficients of serial development for the harmonic currents on both of the DC and AC sides. To demonstrate the usefulness of the analytical method, the results obtained by the analytical method are compared with those obtained by the simulation method, which gives accurate results. The paper considers a three-phase diode-bridge under four particular non-symmetrical supply conditions. The values obtained by the analytical method are near to those obtained by using digital simulation (maximum relative error 1.1% in DC side and 2.6% in AC side). Finally, we draw the conclusions and we indicate the references.

Cuvinte cheie: punte de diode, alimentare nesimetrică, sarcină complexă, simulare pe calculator, compararea rezultatelor obținute.

1. Introducere

Într-o lucrare anterioară [6] s-a prezentat o metodă analitică pentru studiul punții de diode având o sarcină complexă. În lucrarea de față se prezintă metoda simulării pe calculator și se face o comparație între rezultatele obținute prin cele două metode. Rezultatele obținute sunt prezentate sub formă tabelară.

2. Metoda simulării pe calculator

S-a realizat modelarea PSPICE a punții de diode alimentată cu un sistem nesimetric de tensiuni și având o sarcină complexă formată dintr-o rezistență, o inductanță și o tensiune contraelectromotoare.

În figura 1 este prezentată schema electrică a unei punți trifazate de diode, a sursei, a sarcinii, cu numerotarea corespunzătoare a nodurilor.

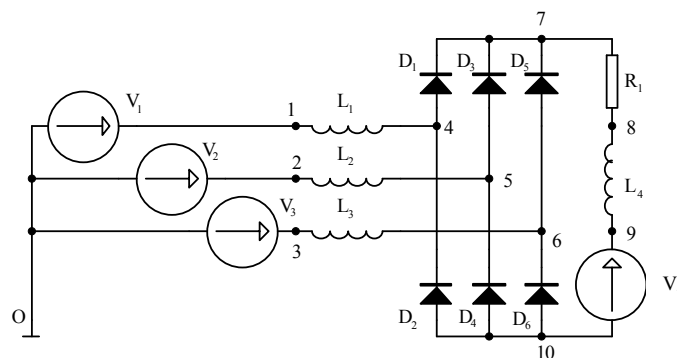


Fig. 1 Puntea de diode cu sarcină complexă, pentru modelarea PSPICE

Folosind modelul prezentat mai sus, s-a făcut analiza PSPICE pentru mai multe cazuri, modelul de lucru fiind asemănător cu cel descris în lucrarea [2].

Interesează în mod deosebit analiza Fourier a curenților i_d , i_a , i_b , i_c . Rezultatele obținute în urma analizei cu programul PSPICE concordă cu rezultatele obținute prin metoda analitică prezentată anterior. În continuare, vom prezenta comparativ aceste rezultate.

3. Compararea rezultatelor obținute prin metoda analitică și prin metoda simulării pe calculator

S-au analizat prin ambele metode patru cazuri particulare (I – sistemul simetric, II, III, IV – sisteme nesimetrice). Aceste cazuri particulare, respectiv parametrii de circuit sunt redată în tabelul 1, cu notațiile din figura 1 (modelare PSPICE).

În prima coloană a tabelului sunt prezentați parametrii de circuit luați în considerare pentru analiza efectuată.

În a doua coloană a tabelului sunt date valorile numerice aferente unui sistem simetric de alimentare (sistem I).

Tabelul 1

Parametrii de circuit	Sistem simetric I	Sistem nesimetric II	Sistem nesimetric III	Sistem nesimetric IV
$E_a (V_1)$ (val. max.)	100 V	100	100	100
$E_b (V_2)$ (val. max.)	100 V	95	100	95
$E_c (V_3)$ (val. max.)	100 V	90	100	90
x_1	0°	0°	0°	0°
x_2	120°	120°	117°	117°
x_3	240°	240°	243°	243°
$X_a (X_1)$	10 Ω	10	10	10
$X_b (X_2)$	10 Ω	10	10	11
$X_c (X_3)$	10 Ω	10	10	9
L_1	0,03184 H	0,03184	0,03184	0,03184
L_2	0,03184 H	0,03184	0,03184	0,03503
L_3	0,03184 H	0,03184	0,03184	0,02866
$X_d (X_4)$	5 Ω	5	1	5
L_4	0,01592 H	0,01592	0,01592	0,01592
$R_d (R_1)$	10 Ω	10	10	10
$E_d (V_4)$	145 V	145	145	145

În a treia coloană a tabelului sunt date valorile numerice aferente unui sistem nesimetric de alimentare (sistem nesimetric II).

În a patra coloană a tabelului sunt date valorile numerice aferente unui sistem nesimetric de alimentare (sistem nesimetric III).

În a cincea coloană a tabelului sunt date valorile numerice aferente unui sistem nesimetric de alimentare (sistem nesimetric IV).

Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelele 2, 3, 4 și 5.

Ele se referă atât la partea de curent continuu, cât și de alternativ. Se observă erorile relative respective.

Tabelul 2

Sistem simetric I	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,9161	0,9101	0,7
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	-	-	-
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	-	-	-
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0975	0,0965	1
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	-	-	-
i_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	1,0140	1,0040	1
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0094	0,0096	-2
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,2075	0,2050	1,2
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0731	0,0714	2,3
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	1,0140	1,0040	1
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0094	0,0096	-2
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,2075	0,2050	1,2
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0731	0,0714	2,3
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	1,0140	1,0040	1
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0094	0,0096	-2
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,2075	0,2050	1,2
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0731	0,0714	2,3

Tabelul 3

Sistem nesimetric II	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,5109	0,5084	0,5
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	0,1060	0,1065	- 0,5
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	0,0197	0,0195	1
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0810	0,0815	0,6
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	0,0112	0,0111	0,9
I_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	0,6362	0,6282	1,2
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0250	0,0254	-1,5
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,1261	0,1238	1,8
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0481	0,0469	2,6
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	0,5455	0,5333	2,2
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0741	0,0732	1,2
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,1469	0,1432	2,6
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0357	0,0362	-1,4
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	0,5261	0,5240	0,4
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0621	0,0629	-1,2
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,1351	0,1330	1,5
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0252	0,0246	2,4

Tabelul 4

Sistem nesimetric III	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,9136	0,9086	0,6
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	0,1230	0,1223	0,6
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	0,0242	0,0244	-0,8
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0931	0,0921	1,1
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	0,0117	0,0116	0,8
i_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	0,9236	0,9145	1
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0289	0,0286	1
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,2151	0,2177	-1,1
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0525	0,0519	1,1
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	1,0776	1,0670	1
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0608	0,0598	1,6
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,1902	0,1865	2
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0825	0,0805	2,5
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	1,0241	1,0140	1
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0852	0,0867	-1,7
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,2073	0,2035	1,8
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0702	0,0684	2,6

Tabelul 5

Sistem nesimetric IV	Frecvența (Hz)	Componenta Fourier	Metoda analitică (A)	Metoda simulării pe calculator (A)	Eroare relativă %
i_d (I (R ₁))	0	I_d	0,5028	0,4998	0,6
	100	$\sqrt{2}I_{d2}$	0,0483	0,0486	- 0,6
	200	$\sqrt{2}I_{d4}$	0,0685	0,0068	0,7
	300	$\sqrt{2}I_{d6}$	0,0850	0,0842	0,9
	400	$\sqrt{2}I_{d8}$	0,00425	0,0043	-1,1
i_a (I (V ₁))	0	I_a	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{a1}$	0,5749	0,5687	1
	150	$\sqrt{2}I_{a3}$	0,0310	0,0304	1,9
	250	$\sqrt{2}I_{a5}$	0,1250	0,1264	-1,1
	350	$\sqrt{2}I_{a7}$	0,0413	0,0403	2,5
i_b (I (V ₂))	0	I_b	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{b1}$	0,5740	0,5667	1,3
	150	$\sqrt{2}I_{b3}$	0,0302	0,0295	2,3
	250	$\sqrt{2}I_{b5}$	0,1293	0,1323	-2,2
	350	$\sqrt{2}I_{b7}$	0,0423	0,0412	2,6
i_c (I (V ₃))	0	I_c	-	-	-
	50	$\sqrt{2}I_{c1}$	0,5280	0,5177	2
	150	$\sqrt{2}I_{c3}$	0,0093	0,0091	2,2
	250	$\sqrt{2}I_{c5}$	0,1419	0,1423	-0,3
	350	$\sqrt{2}I_{c7}$	0,0343	0,0335	2,4

4. Concluzii

În această lucrare se prezintă o metodă de simulare pe calculator pentru studiul punții de diode alimentate nesimetric și având o sarcină complexă. S-au calculat prin metoda analitică [6] curenții pentru partea de curent continuu și pentru partea de curent alternativ. Calculele au o mare acuratețe, iar rezultatele finale obținute în [6] au fost verificate prin comparație cu cele provenind din modelarea pe calculator (PSPICE). Aspectele comparative sunt prezentate tabelar.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Sakui M., Fujita H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase converter with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484
- [2] Popa V. M. – Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999
- [3] Popa V. M., Roșca P. – Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric, A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, Volumul I, pag. 225-228
- [4] Popa, V. M., Popescu, L. – Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetric, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9
- [5] Popa, V. M. – Sisteme nesimetrice în electrotehnică, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2011, ISBN 978-606-12-0253-9, monografie tehnică, 150 pag
- [6] Popa, V. M. – Metodă analitică pentru studiul punții de diode având o sarcină complexă, Lucrările celei de A XII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2012; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 21), ISSN 2067-7138
- [7] Popa, V. M. – Regimuri nesimetrice în electrotehnică, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2012, ISBN 978-606-12-0382-6, monografie tehnică, 194 pag

Prof. dr. ing. Vasile Mircea POPA,
Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, membru AGIR
Facultatea de Inginerie
str. Emil Cioran nr. 4, cod poștal: 550025
Sibiu
e-mail: popavm@yahoo.com

ANALIZA PUTERILOR COMPLEXE ALE UNUI RECEPTOR TRIFAZAT

Vasile Mircea POPA

THE COMPLEX POWERS ANALYSIS OF A THREE-PHASE LOAD

This paper presents the real unbalanced load and the powers absorbed by it. It is considered the impedances with negative real part, in other words generalized impedances. Also, taking into consideration the calculation symmetrical components of impedances, a three-phase impedance system may be divided into two parts: a balanced part and an unbalanced part. Afterwards, the complex powers absorbed are calculated for the direct, inverse and homopolar sequences. Then the diagram of the complex powers is deduced for the real unbalanced load and are presented the conclusions. The bibliography can be found at the end of the paper.

Cuvinte cheie: receptor trifazat, putere complexă, impedanță generalizată, componente simetrice, componente simetrice de calcul ale impedanțelor, diagrama puterilor.

1. Introducere

După cum se știe, funcționarea circuitelor electrice trifazate în regimuri nesimetrice a fost studiată încă de la începuturile utilizării energiei electrice în sistem trifazat. Utilizând teoria componentelor simetrice se poate face o analiză detaliată a puterilor aferente unui receptor trifazat. O semnificație aparte se poate da impedanțelor cu partea reală negativă, denumite impedanțe generalizate și care pot fi considerate niște mărimi de calcul utile de multe ori în electrotehnică.

2. Receptor trifazat și puterile complexe absorbite

Un receptor trifazat admite o schemă echivalentă în stea și pe baza teoremei de transfigurare, o schemă echivalentă în triunghi. Considerăm schema echivalentă în stea a unui receptor trifazat:

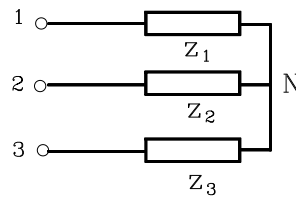


Fig. 1 Schema echivalentă în stea a unui receptor trifazat

Utilizând componentele simetrice de calcul ale impedanțelor, se poate scrie:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_h + Z_d + Z_i \\ Z_2 = Z_h + a^2 Z_d + a Z_i \\ Z_3 = Z_h + a Z_d + a^2 Z_i \end{cases} \quad (1)$$

Relația (1) este o extindere a teoremei Stokvis – Fortescue pentru un sistem trifazat de impedanțe. Partea reală a impedanțelor trebuie să fie nenegativă în schema echivalentă a receptorului (pentru receptorul trifazat real, considerat de noi în figura 1).

Partea echilibrată a sistemului trifazat de impedanțe este dată de componenta homopolară pentru fiecare fază:

$$Z_{1E} = Z_h; Z_{2E} = Z_h; Z_{3E} = Z_h \quad (2)$$

Partea dezechilibrată a sistemului trifazat de impedanțe este dată pentru fiecare fază de următoarele impedanțe:

$$\begin{cases} Z_{1D} = Z_d + Z_i \\ Z_{2D} = a^2 Z_d + a Z_i \\ Z_{3D} = a Z_d + a^2 Z_i \end{cases} \quad (3)$$

Prin urmare, ținând seama de relațiile de mai sus, putem scrie pentru fiecare fază în parte:

$$\begin{cases} Z_1 = Z_{1E} + Z_{1D} \\ Z_2 = Z_{2E} + Z_{2D} \\ Z_3 = Z_{3E} + Z_{3D} \end{cases} \quad (4)$$

În conformitate cu aceste relații, putem desena următoarea schemă echivalentă a receptorului, în care sunt evidențiate partea echilibrată și partea dezechilibrată (figura 2):

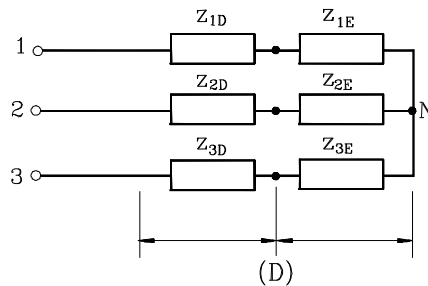


Fig. 2 Partea echilibrată și dezechilibrată (extrem dezechilibrată) a unui receptor trifazat

Considerăm receptorul trifazat legat în stea cu fir neutru alimentat cu un sistem trifazat de tensiuni indicat în figura următoare.

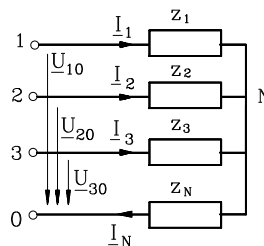


Fig. 3 - Receptor trifazat legat în stea, cu fir neutru de impedanță Z_N

Presupunem că sistemul tensiunilor de alimentare are numai componentă simetrică directă. De asemenea, considerăm receptorul în general dezechilibrat.

În continuare, vom analiza puterile absorbite de receptorul dezechilibrat real (**RDR**) și care sunt deduse în lucrările [3], [4], [5].

Puterile pentru partea echilibrată sunt:

$$S_{hE} = 3U_{hE} I_h^* = 3 \frac{Z_h Z_d^2 - Z_h^2 Z_i}{D} U_d I_h^*$$

$$S_{dE} = 3U_{dE} I_d^* = 3 \frac{Z_h^3 - Z_h Z_d Z_i + 3Z_N Z_h^2}{D} U_d I_d^*$$

$$\underline{S}_{iE} = 3\underline{U}_{iE} \underline{I}_i^* = 3 \frac{z_h z_i^2 - z_h^2 z_d - 3z_N z_h z_d}{D} \underline{U}_d \underline{I}_i^* \quad (5)$$

Puterile pentru partea dezechilibrată sunt:

$$\underline{S}_{hD} = 3\underline{U}_{hD} \underline{I}_h^* = 3 \frac{z_h^2 z_i - z_h z_d^2 + 3z_N z_h z_i - 3z_N z_d^2}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^*$$

$$\underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_{dD} \underline{I}_d^* = 3 \frac{z_d^3 + z_i^3 - 2z_h z_d z_i - 3z_N z_d z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_d^*$$

$$\underline{S}_{iD} = 3\underline{U}_{iD} \underline{I}_i^* = 3 \frac{z_h^2 z_d - z_h z_i^2 + 3z_N z_h z_d}{D} \underline{U}_d \underline{I}_i^* \quad (6)$$

Puterile pentru impedanța firului neutru sunt:

$$\underline{S}_{hN} = 3\underline{U}_{hN} \underline{I}_h^* = 3 \frac{3z_N z_d^2 - 3z_N z_h z_i}{D} \underline{U}_d \underline{I}_h^*$$

$$\underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_{dN} \underline{I}_d^* = 0$$

$$\underline{S}_{iN} = 3\underline{U}_{iN} \underline{I}_i^* = 0 \quad (7)$$

$$D = z_h^3 + z_d^3 + z_i^3 - 3z_h z_d z_i + 3z_N z_h^2 - 3z_N z_d z_i$$

Se observă că avem următoarele relații:

$$\underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hN} = -\underline{S}_{hD}; \quad \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_g; \quad \underline{S}_{iE} = -\underline{S}_{iD} \quad (8)$$

Puterea totală absorbită de receptorul considerat este:

$$\underline{S} = \underline{S}_E + \underline{S}_D + \underline{S}_N; \quad \underline{S}_E = \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{iE}$$

$$\underline{S}_D = \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{iD}; \quad \underline{S}_N = \underline{S}_{hN} + \underline{S}_{dN} + \underline{S}_{iN} \quad (9)$$

$$\text{Rezultă:} \quad \underline{S} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^* = \underline{S}_d = \underline{S}_g \quad (10)$$

$$\text{Avem:} \quad \underline{S} = \underline{S}_h + \underline{S}_d + \underline{S}_i; \quad \underline{S}_h = \underline{S}_{hE} + \underline{S}_{hD} + \underline{S}_{hN} = 0$$

$$\underline{S}_d = \underline{S}_{dE} + \underline{S}_{dD} + \underline{S}_{dN} = 3\underline{U}_d \underline{I}_d^*; \quad \underline{S}_i = \underline{S}_{iE} + \underline{S}_{iD} + \underline{S}_{iN} = 0. \quad (11)$$

3. Diagrama puterilor complexe

Toate aceste puteri pot fi așezate într-o matrice în care sumele laturilor și coloanelor sunt impuse, în conformitate cu relațiile prezentate mai sus:

\underline{S}	\underline{S}_E	\underline{S}_D	\underline{S}_N
\underline{S}_h	\underline{S}_{hE}	\underline{S}_{hD}	\underline{S}_{hN}
\underline{S}_d	\underline{S}_{dE}	\underline{S}_{dD}	\underline{S}_{dN}
\underline{S}_i	\underline{S}_{iE}	\underline{S}_{iD}	\underline{S}_{iN}

Separarea puterilor complexe pe cele două părți ale receptorului dezechilibrat real precum și pe impedanța firului neutru pune în evidență o circulație de putere internă între aceste zone.

Partea echilibrată consumă atât puterea directă \underline{S}_{dE} cât și puterile homopolară și inversă \underline{S}_{hE} și \underline{S}_{iE} . Impedanța firului neutru consumă numai puterea homopolară \underline{S}_{hN} . Receptorul fiind alimentat de un generator simetric care furnizează putere numai pe componenta directă, deducem că puterile homopolară și inversă sunt primite prin partea dezechilibrată a receptorului.

Se poate afirma că partea dezechilibrată a receptorului se comportă ca un convertizor de putere a componentelor simetrice [8].

Considerând că în partea echilibrată a receptorului intră și rețeaua de alimentare presupusă ca fiind și ea echilibrată, puterea homopolară și cea inversă aferentă acestei rețele este efectiv un consum suplimentar față de situația unui receptor echivalent, de aceeași putere, echilibrat.

Se poate desena o diagramă a puterilor complexe, care este o ilustrare grafică a relațiilor anterioare (fig. 4).

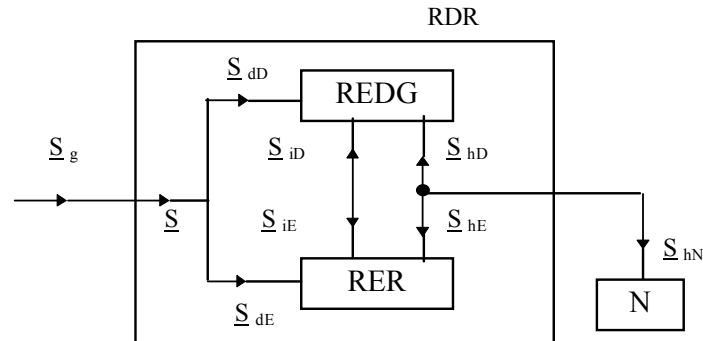


Fig. 4 Diagrama puterilor complexe pentru receptorul dezechilibrat real (**RDR**)

Notățiile au următoarele semnificații:

- **REDG** = receptor extrem dezechilibrat generalizat;
- **RER** = receptor echilibrat real;
- **N** = impedanța firului neutru;
- **RDR** = receptor dezechilibrat real.

4. Concluzii

În această lucrare este prezentat un nou punct de vedere asupra receptoarelor trifazate dezechilibrate și asupra calculului puterilor complexe absorbite de acesta. Acest punct de vedere utilizează noțiunea de impedanță generalizată. Impedanța generalizată are partea reală (rezistența echivalentă în curent alternativ) negativă. Ea nu are existență fizică reală, obiectivă, ci este o noțiune teoretică, de calcul, foarte utilă în interpretarea unor fenomene legate de funcționarea circuitelor electrice trifazate în regimuri nesimetrice și dezechilibrate. Aceste regimuri intervin des în practică, iar analiza lor este evident foarte importantă.

BIBLIOGRAFIE

- [1] Pavel, E. - *Noi aspecte ale teoriei receptoarelor trifazate statice dezechilibrate*, Energetica, Vol.37, Nr.11, noiembrie 1989, pag.481-492
- [2] Țugulea, A. - *Considerații privind efectele energetice în regimuri armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.3, martie 1986, pag.121-129
- [3] Popa, V. M. - *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1999
- [4] Popa, V. M. - *Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2-nd International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, Romania, volume, pag. 91-94.
- [5] Popa, V. M. - *The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load*, Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1, pag. 144-151
- [6] Popa, V. M. - *Receptoare generalizate în electrotehnică*, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2010, ISBN 978-606-12-0033-7
- [7] Popa, V. M. - *Regimuri nesimetrice în electrotehnică*, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2012, ISBN 978-606-12-0382-6
- [8] Popa, V. M. - *Circuite trifazate dezechilibrate*, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2013, ISBN 978-606-12-0512-7

Prof. dr. ing. Vasile Mircea POPA,
Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, membru AGIR
Facultatea de Inginerie
str. Emil Cioran nr. 4, cod poștal: 550025
Sibiu
e-mail: popavm@yahoo.com

ANALIZA PUTERILOR ACTIVE ALE UNUI RECEPTOR TRIFAZAT

Vasile Mircea POPA

THE ACTIVE POWERS ANALYSIS OF A THREE-PHASE LOAD

In this paper we consider a three-phase load and the absorbed powers by it. We define the real unbalanced load, which has a balanced part and an extremely unbalanced part. Using the complex power absorbed by the three-phase load, we make the active powers analysis of it. Also, we construct the energetical diagrams about the active powers circulation and are presented the conclusions. In the end of the paper we indicate the references.

Cuvinte cheie: receptor trifazat, putere complexă, putere activă, impedanță generalizată, componente simetrice, componente simetrice de calcul ale impedanțelor, diagrame energetice.

1. Introducere

În prezenta lucrare se consideră un receptor trifazat dezechilibrat alimentat cu un sistem simetric de tensiuni. Utilizând sistematic metoda componentelor simetrice se ajunge la ideea separării receptorului într-o parte echilibrată și o parte extrem dezechilibrată generalizată. De asemenea, în acest mod se pot prezenta puterile complexe absorbite de receptor și se pot deduce din acestea puterile active aferente. Se construiesc diagramele energetice pentru circulația puterilor active și se trag concluzii asupra pierderilor de energie activă în linia de alimentare a receptorului trifazat dezechilibrat considerat în lucrarea de față. Calculul puterii complexe a fost făcut de autor într-o lucrare anterioară, indicată la bibliografie [3].

2. Receptor trifazat

Se consideră receptorul trifazat din figură în conexiune stea cu fir neutru, alimentat cu un sistem simetric direct de tensiuni.

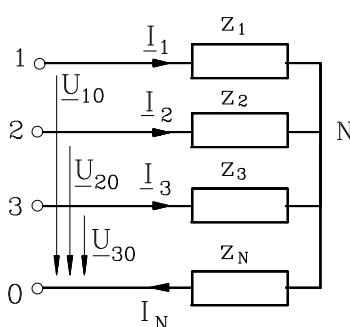


Fig. 1 Receptor trifazat legat în stea, cu fir neutru de impedanță z_N

Calculând puterile complexe, s-au obținut o serie de rezultate [3], [4] din care se pot deduce și puterile active absorbite de receptor. Avem rezultatele arătate în continuare.

3. Puterile active consumate

Analizând expresiile puterilor complexe calculate, rezultă imediat că puterea activă inversă corespunzătoare părții extrem dezechilibrată este negativă, deci este o putere generată de partea extrem dezechilibrată a receptorului.

Puterile active corespunzătoare componentelor homopolară și directă pot fi pozitive sau negative.

Relativ la partea echilibrată, puterile active sunt pozitive pe toate cele trei componente.

Pentru impedanța firului neutru, puterea activă corespunzătoare componentei homopolare poate să fie pozitivă sau negativă (eventual nulă). Există situații când această putere este pozitivă (în această situație z_N și z_h au același argument). Dacă z_N este o rezistență pură, de asemenea se poate deduce ca puterea activă corespunzătoare componentei homopolare este pozitivă.

Considerând circulația internă a puterilor active se pot reprezenta cele două situații cu existență fizică (fig. 2, cazurile a și b).

În figura 2 s-a notat:

- **REDG** = receptor extrem dezechilibrat generalizat;
- **RER** = receptor echilibrat real;
- **N** = impedanța firului neutru;
- **RDR** = receptor dezechilibrat real.

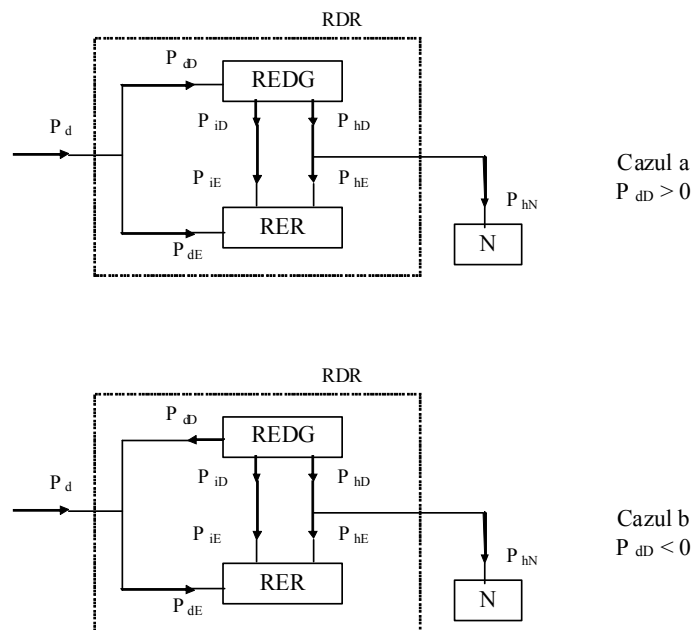


Fig. 2 Diagrama puterilor active pentru receptorul dezechilibrat real (RDR)

Trebuie să facem observația că în studiul anterior rezistența conductoarelor liniei de alimentare a fost inclusă în partea echilibrată a receptorului dezechilibrat real. Concluzia care rezultă este că receptoarele dezechilibrate sunt surse (cauze) de puteri și energii de componente homopolare și inverse care sunt absorbite de receptoarele echilibrate, inclusiv de rețelele de alimentare care pot fi considerate ca fiind de asemenea echilibrate. Consecința acestor circulații de puteri de componente simetrice este creșterea consumului tehnologic al rețelelor care se adaugă influențelor negative asupra funcționării consumatorilor echilibrați. Astfel, se știe că funcționarea motoarelor asincrone trifazate în regimuri nesimetrice este însoțită de scăderea randamentului și în

general a performanțelor de lucru, datorită apariției câmpului magnetic învârtitor invers [3].

Pentru a evidenția mai clar consumul de putere activă pe linia de transport care alimentează un receptor trifazat dezechilibrat, să considerăm această situație în figura 3.

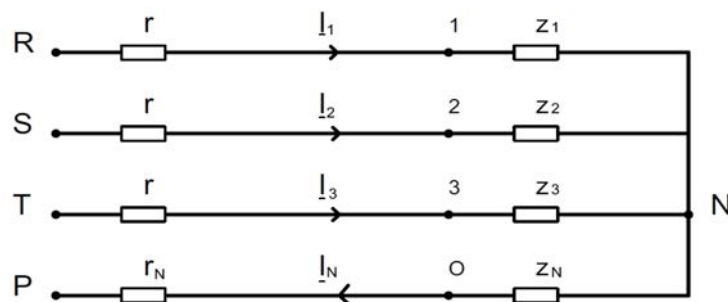


Fig. 3 Receptor dezechilibrat și linie de transport

Pierderile de putere activă în linia de transport sunt date de relația următoare:

$$\Delta P_{ID} = rI_1^2 + rI_2^2 + rI_3^2 + r_N I_N^2 \quad (1)$$

Să considerăm acum un receptor echilibrat alimentat prin aceeași linie trifazată.

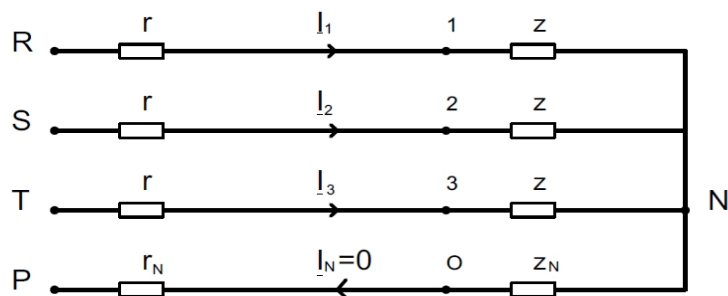


Fig. 4 Receptor echilibrat și linie de transport

Pierderile de putere activă în linia de transport vor fi date de următoarea relație.

$$\Delta P_{IE} = 3rI^2 \quad (2)$$

unde: $I_1 = I_2 = I_3 = I$ și $I_N = 0$.

Facem observația foarte importantă că în ambele situații puterea activă consumată de receptor este aceeași și de asemenea se asigură același nivel de tensiuni de alimentare la bornele receptorului.

Rezultă din analiza făcută anterior și bazată pe utilizarea coordonatelor simetrice următoarea relație:

$$\Delta P_{IE} \leq \Delta P_{ID} \quad (3)$$

Cu alte cuvinte, pierderile de putere activă pe linia de transport scad pe măsura scăderii gradului de dezechilibru al receptorului. Acestea ajung la valoarea minimă, când receptorul trifazat este perfect echilibrat.

Rezultatul obținut se poate deduce și prin alte considerente, fără utilizarea coordonatelor simetrice. Dar, prin utilizarea acestei metode se evidențiază o serie de aspecte de finețe asupra fluxurilor de putere activă în receptor și pe linia de transport.

4. Concluzii

În această lucrare se prezintă o analiză a puterilor active absorbite de un receptor trifazat. S-a utilizat descompunerea receptorului trifazat într-un receptor echilibrat real și unul extrem dezechilibrat generalizat, folosind teoria componentelor simetrice precum și expresiile puterilor complexe absorbite care au fost calculate în același context în unele lucrări anterioare. Prezența receptorului dezechilibrat determină o absorbție suplimentară de putere de la generator, care va fi redistribuită în rețea ca putere de nesimetrie, în general nedorită. Prin urmare, receptorul dezechilibrat este un convertor de putere de nesimetrie care primește de la generator putere activă de simetrie și generează în rețea putere activă de nesimetrie. Utilizând mijloace de măsură adecvate, aceste circulații de putere pot fi puse în evidență experimental. Deci este utilă punerea în evidență într-o rețea energetică a receptorilor dezechilibrați, care produc pierderi suplimentare în linia de transport și în consumatorii echilibrați din rețea. În prezent se măsoară numai puterile și energiile active primite efectiv de consumatori. Astfel, consumatorii echilibrați sunt dezavantajați (în general) primind și putere de nesimetrie, nedorită de cele mai multe ori. Cresc de asemenea pierderile pe liniile de alimentare (consumuri tehnologice), creșteri care deși sunt provocate de receptoarele dezechilibrate, sunt suportate de sistem. Evident, se impune o analiză tehnico-economică riguroasă, bazată pe criterii cantitative obiective. Acestea se încadrează în domeniul calității energiei electrice [5].

BIBLIOGRAFIE

- [1] Pavel, E. - *Noi aspecte ale teoriei receptoarelor trifazate statice dezechilibrate*, Energetica, Vol.37, Nr.11, noiembrie 1989, pag.481-492
- [2] Țugulea, A. - *Considerații privind efectele energetice în regimuri armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.3, martie 1986, pag.121-129
- [3] Popa, V. M. - *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1999
- [4] Popa, V. M. - *Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load*, Proceedings of the 2-nd International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 99, 7-9 September 1999, Cluj-Napoca, Romania, volume, pag. 91-94.
- [5] Popa, V. M. - *Considerații privind alimentarea receptorilor trifazați*, Sesiunea de comunicări științifice a Universității "Petru Maior", Târgu Mureș, 27-28 octombrie 2000, Volumul 7, Electroenergetică, ISBN 973-8084-19-9, pag. 191-196
- [6] Popa, V. M. - *The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load*, Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1, pag. 144-151
- [7] Popa, V. M. - *Receptoare generalizate în electrotehnică*, Editura Universității "Lucian Blaga" din Sibiu, Sibiu, 2010, ISBN 978-606-12-0033-7
- [8] Popa, V. M. - *Sisteme nesimetrice în electrotehnică*, Editura Universității "Lucian Blaga" din Sibiu, Sibiu, 2011, ISBN 978-606-12-0253-9
- [9] Popa, V. M. - *Regimuri nesimetrice în electrotehnică*, Editura Universității "Lucian Blaga" din Sibiu, Sibiu, 2012, ISBN 978-606-12-0382-6
- [10] Popa, V. M. - *Circuite trifazate dezechilibrate*, Editura Universității "Lucian Blaga" din Sibiu, Sibiu, 2013, ISBN 978-606-12-0512-7

Prof. dr. ing. Vasile Mircea POPA,
Universitatea „Lucian Blaga” din Sibiu, membru AGIR
Facultatea de Inginerie
str. Emil Cioran nr. 4, cod poștal: 550025
Sibiu
e-mail: popavm@yahoo.com

LUCRĂRI PRACTICE

Lucrări de laborator

Lucrarea nr. 7 - Conexiunea consumatorilor trifazați în stea

I. Partea teoretică

Un sistem de m mărimi sinusoidale (tensiuni, curenți) care au aceeași frecvență, dar sunt defazate între ele, reprezintă un *sistem polifazat de mărimi*, respectiv un sistem m - fazat. Circuitele în care se stabilesc astfel de sisteme de mărimi se numesc circuite polifazate.

În stadiul actual de dezvoltare a tehnicii, producerea, transportul, distribuția și utilizarea energiei electrice se face aproape exclusiv în *sistemul trifazat*, datorită numeroaselor avantaje tehnico-economice pe care le prezintă:

- economie de material pentru linii de transport, la putere transmisă dată;
- posibilitatea de a produce câmpuri magnetice învârtitoare, care stau la baza funcționării unei clase importante de mașini electrice (motoarele asincrone);
- obținerea (în regim simetric) a unei puteri instantanee totale constante și altele.

Considerând un generator trifazat, principial este posibil ca fiecare dintre cele trei faze ale acestuia să alimenteze câte un receptor. Această soluție, cu circuite distincte pe cele trei faze, nu se aplică însă în practică fiind neeconomică, deoarece ea presupune 6 conductoare de legătură între generator și receptoare. În scopul reducerii numărului de conductoare ale sistemului, se folosesc diferite conexiuni între faze. La un sistem trifazat, *conexiunile* de bază sunt *în stea* și *în triunghi*.

În prezenta lucrare de laborator se studiază conexiunea în stea a receptoarelor electrice.

II. Partea experimentală

Conexiunea în stea (figura 1) poate fi cu sau fără fir neutru, deci poate avea 4, sau 3 conductoare de alimentare. Conexiunea se realizează legând împreună, la o bornă comună (N) numită neutrul sau nulul receptorului, “sfârșiturile” celor trei faze. Se obține astfel conexiunea

în stea având în total 4 conductoare și anume, 3 conductoare principale numite și conductoare de linie și conductorul neutru.

Sistemele trifazate de mărimi se pot clasifica în sisteme *simetrice* și sisteme *nesimetrice*. Un sistem trifazat se numește *simetric* dacă cele trei mărimi ale sistemului, având aceeași frecvență, au valorile efective (sau maxime) egale și de asemenea defazajul dintre câte două mărimi succesive este egal cu $2/3$. Dacă aceste condiții nu sunt îndeplinite, sistemul trifazat de mărimi este *nesimetric*.

Legat de receptoare, trebuie precizat că se deosebesc receptoare *echilibrate* și receptoare *dezechilibrate*. Un receptor trifazat se numește *echilibrat* dacă impedanțele celor trei faze sunt identice; dacă impedanțele sunt diferite, receptorul este *dezechilibrat*.

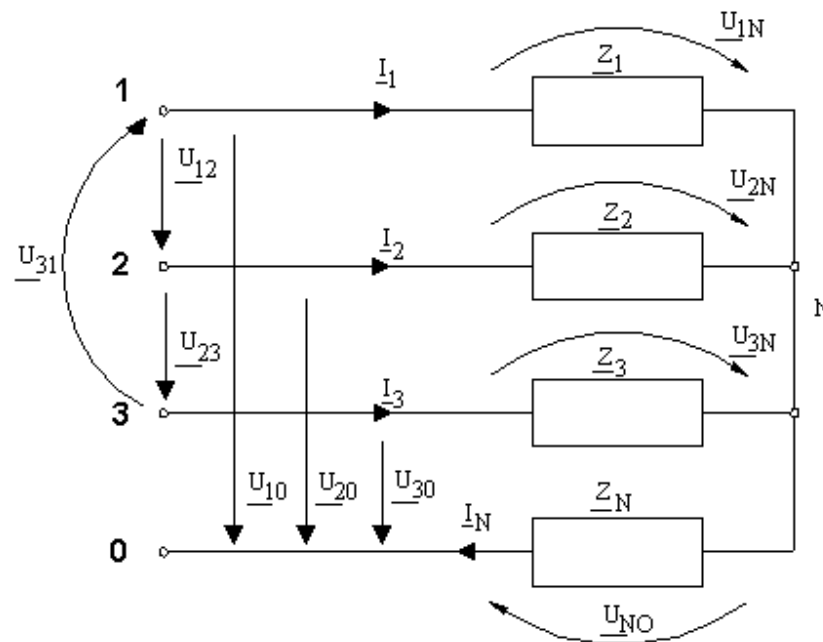


Figura 1

Receptor echilibrat

În acest caz, se poate scrie:

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}_3, \quad \underline{U}_{NO} = 0 \quad \text{deci} \quad \underline{I}_N = 0; \quad U_1 = \sqrt{3} \cdot U_f \quad \text{și} \quad I_1 = I_f = I = \frac{U_f}{Z}, \quad \text{care sunt}$$

relațiile dintre tensiunile, respectiv curenții de linie și de fază. Se observă că firul neutru nu are nici un rol, deci se poate elimina. Diagrama fazorială este prezentată în figura 2.

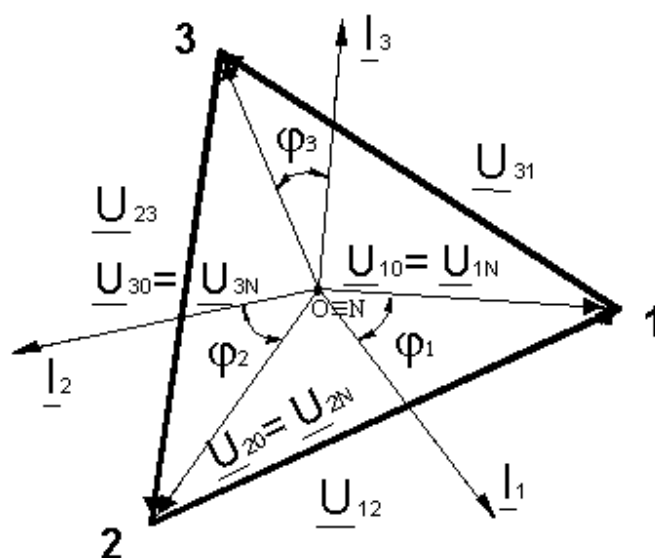


Figura 2

Receptor dezechilibrat

În acest caz mai general, $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_3$

Se pot scrie evident relațiile:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{1N}}{Z_1} = \underline{U}_{1N} \cdot \underline{Y}_1 \quad (1)$$

$$\underline{I}_N = \frac{\underline{U}_{N0}}{Z_N} = \underline{U}_{N0} \cdot \underline{Y}_N, \text{ și încă două analoge;} \quad (2)$$

și respectiv: $\underline{U}_{1N} = \underline{U}_{10} - \underline{U}_{N0} \quad (3)$

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \underline{I}_N, \text{ și încă două analoge.} \quad (4)$$

Din relațiile (1), (2), (3), (4), se obține imediat expresia căderii de tensiune pe conductorul neutru, care se mai numește și deplasarea punctului neutru:

$$\underline{U}_{N0} = \frac{\underline{U}_{10} \cdot \underline{Y}_1 + \underline{U}_{20} \cdot \underline{Y}_2 + \underline{U}_{30} \cdot \underline{Y}_3}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 + \underline{Y}_3 + \underline{Y}_N}$$

Diagrama fazorială este următoarea (figura 3):

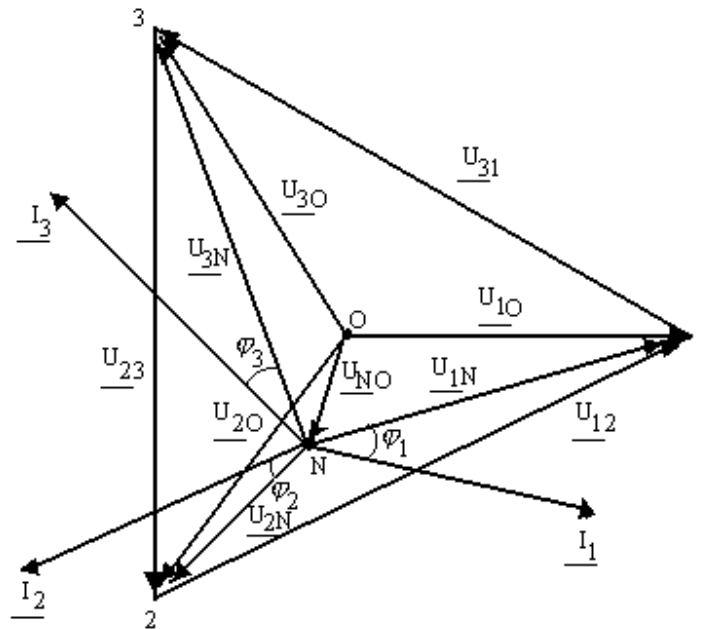


Figura 3

Se studiază două situații limită de asimetrie, în cazul conexiunii în stea fără fir neutru ($\underline{Y}_N=0$).

Una din faze este întreruptă (figura 4)

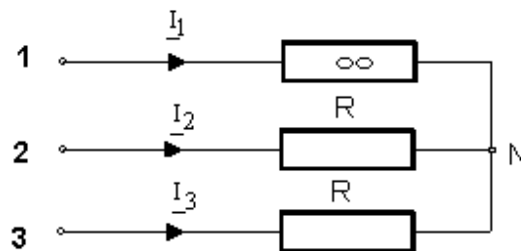


Figura 4

Se consideră un caz simplificat: $\underline{Z}_2=\underline{Z}_3=R$

În aceste condiții: $\underline{Z}_1=\infty$, deci $\underline{Y}_1=0$ și $\underline{I}_1=0$

$$\underline{U}_{N0} = \frac{(\underline{U}_{20} + \underline{U}_{30}) \cdot \frac{1}{R}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R}} = \frac{1}{2}(\underline{U}_{20} + \underline{U}_{30})$$

deci punctul N se deplasează în mijlocul fazorului \underline{U}_{23} . Diagrama fazorială este prezentată în figura 5:

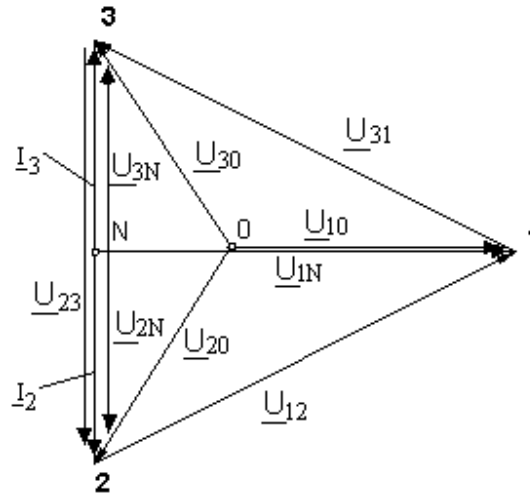


Figura 5

Considerente geometrice simple, conduc la relațiile:

$$U_{1N} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_f; \quad U_{2N} = U_{3N} = \frac{1}{2} U_1;$$

$$I_2 = \frac{U_{2N}}{R}; \quad I_3 = \frac{U_{3N}}{R}; \quad I_2 = I_3$$

Una din faze este scurtcircuitată (figura 6)

Se consideră, în mod analog: $Z_2 = Z_3 = R$

$Z_1 = 0$ deci $\underline{U}_{1N} = 0$ și $\underline{Y}_1 = \infty$; de asemenea, $\underline{Y}_N = 0$. Din expresia generală a deplasării punctului neutru, prin simplificarea forțată cu \underline{Y}_1 , se obține: $\underline{U}_{NO} = \underline{U}_{10}$, deci punctul N se confundă cu punctul 1. Diagrama fazorială este prezentată în figura 7.

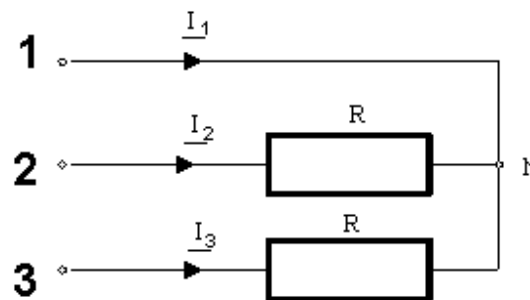


Figura 6

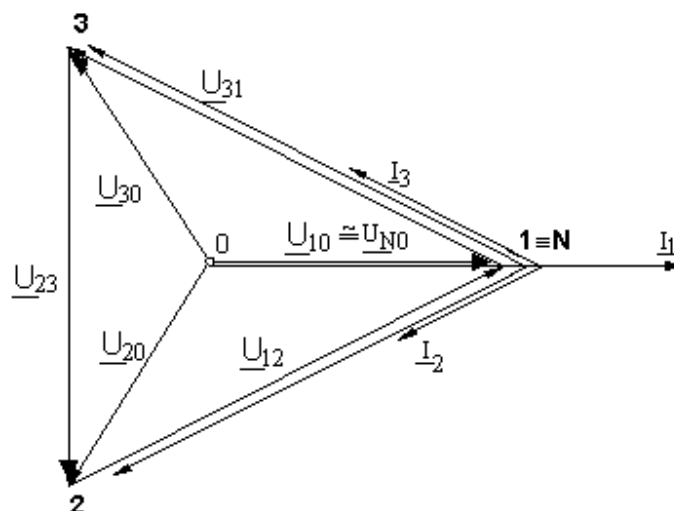


Figura 7

Evident: $\underline{I}_1 = -(\underline{I}_2 + \underline{I}_3)$; $I_2 = \frac{U_{2N}}{R}$; $I_3 = \frac{U_{3N}}{R}$, $I_2 = I_3$

III. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Se efectuează montajul următor:

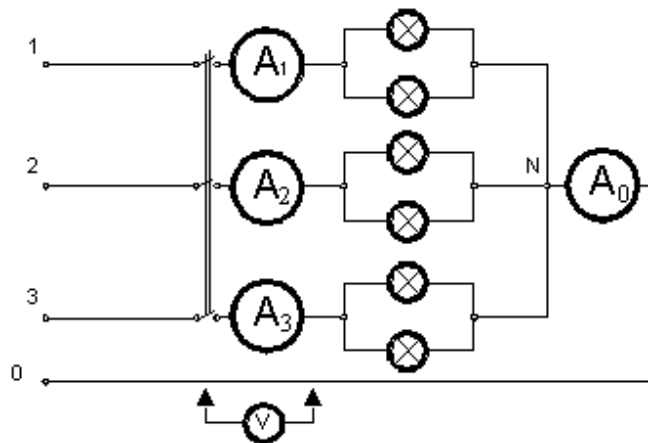


Figura 8

Cu conductorul neutru deconectat, se stabilește o încărcare simetrică a celor trei faze, măsurându-se curenții și tensiunile. Citirile se trec în tabelul 1.

Se conectează conductorul neutru și se constată că nu se schimbă regimul de funcționare al circuitului ($I_N = 0$).

Se încarcă fazele nesimetric și se fac citiri cu conductorul de nul deconectat. Rezultatele citirilor se trec în tabelul 1.

Se conectează conductorul neutru, se fac din nou citirile și se trec în tabelul 1.

Se întrerupe o fază (conductorul de nul nu e conectat), se fac măsurătorile și se trec în tabelul 1 .

Se scurtcircuitază o fază (conductorul de nul nu este conectat), se fac măsurătorile și se trec în tabelul 1.

Tabelul nr. 1

Nr. crt	U_{12} [V]	U_{23} [V]	U_{31} [V]	U_{1N} [V]	U_{2N} [V]	U_{3N} [V]	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_N [A]	U_{N0} [V]	Z_1 [Ω]	Z_2 [Ω]	Z_3 [Ω]
1														
2														
3														
4														
5														
6														

Se construiesc la scară convenabilă diagramele fazoriale pentru fiecare dintre cele șase subpuncte de la partea a II - a.

Lucrarea nr. 8 - Conectarea consumatorilor trifazați în triunghi

I. Partea teoretică

În această lucrare de laborator se studiază conexiunea în triunghi a receptoarelor (figura 1). Sistemul trifazat are trei conductoare de alimentare (fazele). Conexiunea se realizează legând împreună “sfârșitul” unei faze cu ‘începutul’ fazei următoare, fazele fiind considerate într-o anumită ordine.

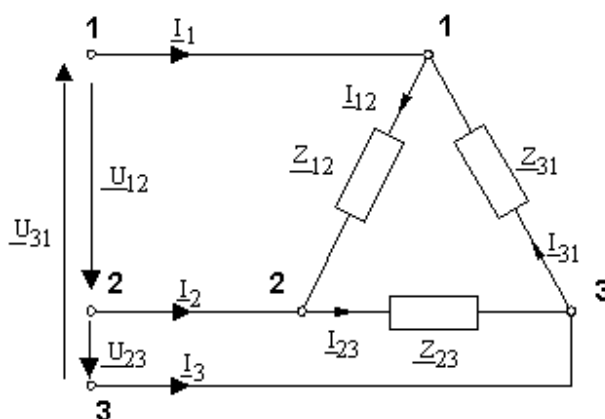


Figura 1

Receptor echilibrat

În acest caz:

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z} \quad (1)$$

Tensiunile de linie, tensiunile de fază (egale cu cele de linie), curenții de linie și curenții de fază, formează sisteme trifazate simetrice. Există relațiile:

$$U_1 = U_f \quad I_1 = \sqrt{3} \cdot I_f \quad I_f = \frac{U_f}{Z} \quad (2)$$

Diagrama fazorială corespunzătoare este prezentată în figura 2.

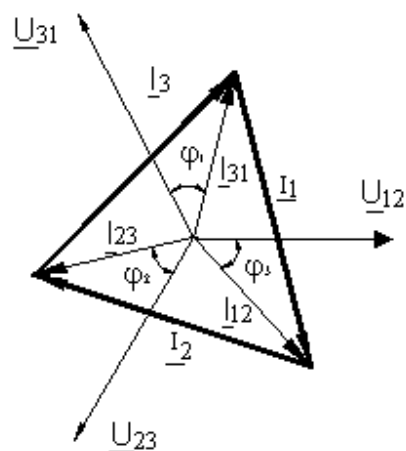


Figura 2

Receptor dezechilibrat

În cazul general al unui receptor dezechilibrat oarecare, sunt valabile relațiile:

$$\underline{Z}_{12} \neq \underline{Z}_{23} \neq \underline{Z}_{31} \quad (3)$$

Se pot scrie evident relațiile:

$$\underline{I}_{12} = \frac{\underline{U}_{12}}{\underline{Z}_{12}} \quad \underline{I}_{23} = \frac{\underline{U}_{23}}{\underline{Z}_{23}} \quad \underline{I}_{31} = \frac{\underline{U}_{31}}{\underline{Z}_{31}} \quad (4)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{12} - \underline{I}_{31} \quad \underline{I}_2 = \underline{I}_{23} - \underline{I}_{12} \quad \underline{I}_3 = \underline{I}_{31} - \underline{I}_{23} \quad (5)$$

De unde rezultă:

$$\underline{I}_1 + \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 0 \quad (6)$$

Și în acest caz tensiunile de linie (egale cu cele de fază) formează un sistem trifazat simetric. Curenții din fazele receptorului vor forma însă un sistem trifazat nesimetric, de asemenea curenții de linie.

Diagrama fazorială este indicată în figura 3.

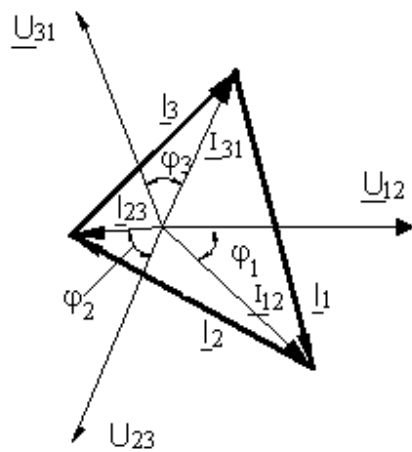


Figura 3

II. Partea experimentală

Se realizează montajul din figura 4.

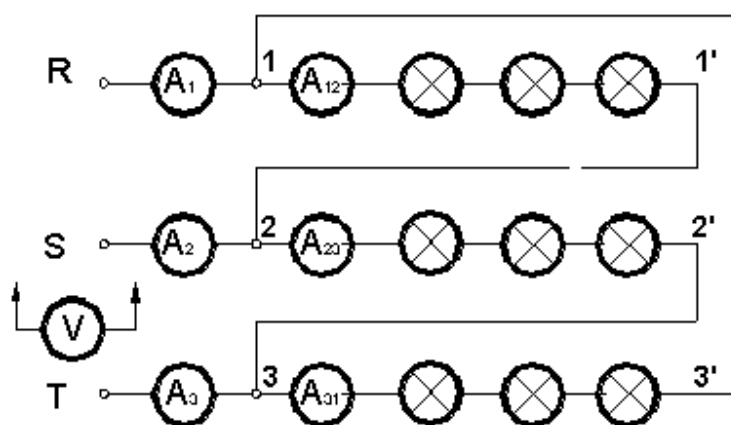


Figura 4

Se încarcă simetric cele trei faze cu câte trei consumatori rezistivi (becuri cu incandescență). Se măsoară tensiunile și curenții, rezultatele trecându-se în tabelul 1.

Se încarcă cele trei faze diferit, scoțându-se de pe faza R unul dintre cele trei becuri legate în serie, prin scurtcircuitare. Se măsoară tensiunile și curenții, rezultatele trecându-se în tabelul 1.

Se mai scoate un bec de pe faza S (unul dintre cele trei becuri legate în serie). Se măsoară tensiunile și curenții, rezultatele trecându-se în tabelul 1.

Scoțând încă un bec de pe faza T (unul dintre cele trei becuri legate în serie), se realizează din nou o încărcare simetrică a fazelor. Se măsoară tensiunile și curenții, rezultatele trecându-se în tabel.

Tabelul nr. 1

Nr. crt	I_1 [A]	I_2 [A]	I_3 [A]	I_{12} [A]	I_{23} [A]	I_{31} [A]	U_{12} [V]	U_{23} [V]	U_{31} [V]	Z_{12} [Ω]	Z_{23} [Ω]	Z_{31} [Ω]
1												
2												
3												
4												

Observație:

Se va evita rămânerea pe o fază a unui singur bec, deoarece tensiunea nominală a unui bec fiind de 220 V, fiind alimentat cu 380 V, becul se va arde.

III. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Se construiesc la scară diagramele fazoriale ale tensiunilor și curenților pentru fiecare din cele patru subpuncte ale părții experimentale.

Lucrarea nr. 9 - Studiul cuadripolului electric

I. Partea teoretică

Cuadripolul este un circuit electric cu patru borne de acces. Asupra structurii interioare a cuadripolului nu se impune nici-o restricție, astfel că ea poate să fie oarecare. Numai în ceea ce privește legătura cuadripolului cu exteriorul se impune condiția ca aceasta să se facă exclusiv pe la borne.

Cuadripolii se pot clasifica pe baza aceluiași criterii care se utilizează și în teoria circuitelor electrice. Astfel, cuadripolii pot să fie *activi* sau *pasivi*, după cum conțin sau nu surse de energie; dacă sursele sunt independente, cuadripolii activi se numesc *autonomi*, iar dacă sursele nu sunt independente, ei se numesc *neautonomi*. După comportarea față de cele două perechi de borne se deosebesc cuadripoli *simetrici* și cuadripoli *nesimetrici*. După caracterul parametrilor elementelor de circuit componente cuadripolii pot fi: *liniari* și *neliniari*; cu parametri *concentrați* și parametri *repartizați*. Se mai pot deosebi cuadripoli de *curent continuu* și *curent alternativ*.

Se vor considera în continuare cuadripoli liniari pasivi, deci cu parametri constanți și fără surse interioare de tensiune electromotoare. Un cuadripol se reprezintă ca în figura 1.



Figura 1

Ecuțiile cuadripolului sunt:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}\underline{U}_2 + \underline{B}\underline{I}_2 \quad (1)$$

$$\underline{I}_1 = \underline{C}\underline{U}_2 + \underline{D}\underline{I}_2 \quad (2)$$

unde \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} se numesc parametrii fundamentali ai cuadripolului și satisfac condiția de reciprocitate:

$$\underline{A}\underline{D} - \underline{B}\underline{C} = 1 \quad (3)$$

Făcând $\underline{I}_2 = 0$ (mers în gol) se obține:

$$\underline{U}_{10} = \underline{A} \underline{U}_{20}; \quad \underline{A} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{U}_{20}} = \text{raport de transformare};$$

$$\underline{I}_{10} = \underline{C} \underline{U}_{20}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{I}_{10}}{\underline{U}_{20}} = \text{admitanță internă}$$

Făcând $\underline{U}_2 = 0$ (mers în scurtcircuit) se obține:

$$\underline{U}_{1SC} = \underline{B} \underline{I}_{2SC}; \quad \underline{B} = \frac{\underline{U}_{1SC}}{\underline{I}_{2SC}} = \text{impedanță internă}$$

$$\underline{I}_{SC} = \underline{D} \underline{I}_{2SC}; \quad \underline{D} = \frac{\underline{I}_{1SC}}{\underline{I}_{2SC}} = \text{raport de transformare}$$

În continuare, sunt valabile relațiile:

$$\frac{\underline{B}}{\underline{D}} = \frac{\underline{U}_{1SC}}{\underline{I}_{1SC}} = \underline{Z}_{1SC} = \text{impedanță aparentă de mers în scurtcircuit} \quad (4)$$

$$\frac{\underline{A}}{\underline{C}} = \frac{\underline{U}_{10}}{\underline{I}_{10}} = \underline{Z}_{10} = \text{impedanță aparentă de mers în gol} \quad (5)$$

Făcând $\underline{I}_1 = 0$ (mers în gol la ieșire) se obține :

$$\frac{\underline{D}}{\underline{C}} = \frac{\underline{U}_{20}}{\underline{I}_{20}} = \underline{Z}_{20} = \text{impedanță aparentă de mers în gol la ieșire} \quad (6)$$

Din relațiile (3), (4), (5), (6) se obține:

$$\underline{A} = \frac{\underline{Z}_{10}}{\sqrt{\underline{Z}_{20} \cdot (\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1SC})}}; \quad \underline{B} = \underline{Z}_{1SC} \cdot \sqrt{\frac{\underline{Z}_{20}}{\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1SC}}} \quad (7)$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_{20} \cdot (\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1SC})}}; \quad \underline{D} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{20}}{\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1SC}}} \quad (8)$$

Se consideră în continuare un cuadripol în T (figura 2).

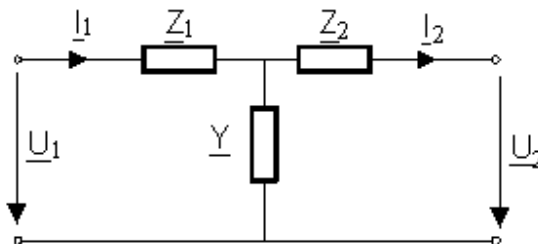


Figura 2

La acest cuadripol se obține:

$$\underline{A} = 1 + \underline{Z}_1 \underline{Y}; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 \underline{Y} \quad (9)$$

$$\underline{C} = \underline{Y}; \quad \underline{D} = 1 + \underline{Z}_2 \underline{Y} \quad (10)$$

În prezenta lucrare de laborator se studiază cuadripolul din figura 3.

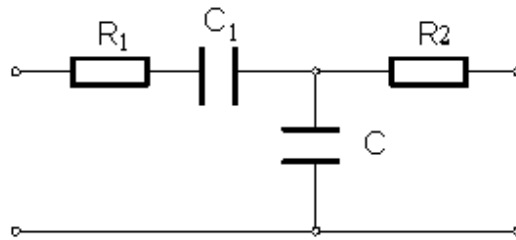


Figura 3

$$R_1 = 100\Omega; \quad C_1 = 10 \mu\text{F}; \quad C = 10 \mu\text{F}; \quad R_2 = 100\Omega$$

În aceste condiții:

$$\underline{Z}_1 = 100 - j 320; \quad \underline{Z}_2 = 100; \quad \underline{Y} = \frac{j}{320} \quad (11)$$

$$\text{și: } \underline{A} = 2 + 0,31j; \quad \underline{B} = 300 - 289j; \quad \underline{C} = 0,0031j; \quad \underline{D} = 1 + 0,31j \quad (12)$$

Din încercările de mers în gol și în scurtcircuit la ieșire, precum și de mers în gol la intrare, se pot determina impedențele:

$$\underline{Z}_{10} = \frac{U_1}{I_{10}} \cdot e^{-j} \cdot \arccos \frac{P}{U_1 \cdot I_{10}} \quad (13)$$

$$\underline{Z}_{1SC} = \frac{U_1}{I_{1sc}} \cdot e^{-j} \cdot \arccos \frac{P}{U_1 \cdot I_{1sc}} \quad (14)$$

$$\underline{Z}_{20} = \frac{U_2}{I_{20}} \cdot e^{-j} \cdot \arccos \frac{P}{U_2 \cdot I_{20}} \quad (15)$$

și în continuare parametrii fundamentali ai cuadripolului:

$$\underline{A} = \underline{C} \underline{Z}_{10}; \quad \underline{B} = \underline{C} \underline{Z}_{1SC} \underline{Z}_{20} \quad (16)$$

$$\underline{C} = \frac{1}{\sqrt{\underline{Z}_{20} \cdot (\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1SC})}} \quad \underline{D} = \underline{C} \underline{Z}_{20} \quad (17)$$

Relațiile (17) sunt variante ale relațiilor (7) și (8), în care se calculează la început \underline{C} , apoi restul parametrilor.

II. Partea experimentală

Se execută montajul din figura 4.

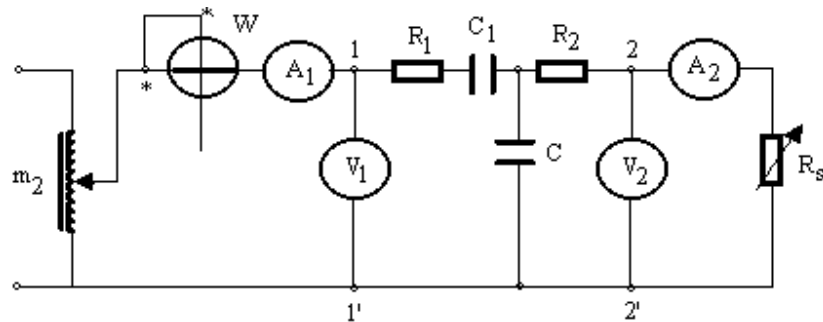


Figura 4

unde:

- m^2 - autotransformator de laborator (din standul SIE-2);
- A_1 - ampermetru (1A);
- W_1 - Wattmetru D-51 (300V; 2,5A);
- V_1 - voltmetru (300V);
- V_2 - voltmetru (300V);
- A_2 - ampermetru (1A);
- R_S - rezistența de sarcină ($5 \cdot 100\Omega$).

Cuadripolul (cu bornele 11'22') este realizat fizic pe o placă.

Se alimentează montajul cu $U_1=220V$ (tensiunea indicată de voltmetru V_1) pentru diverse valori ale rezistenței de sarcina: $R_S=0; 100; 200; 300; \infty (\Omega)$.

Pentru fiecare măsurătoare se aplică tensiunea U_1 prin creșterea de la 0 la 220V .Se completează tabelul 1.

Tabelul nr.1

$R_S (\Omega)$	$P (W)$	$I_1 (A)$	$U_1 (V)$	$U_2 (V)$	$I_2 (A)$

Se alimentează montajul pe la ieșire, cu intrarea în gol ($I_1=0$) modificând montajul inițial astfel:

- se deconectează sarcina R_S ;
- se deconectează sfârșitul bobinei de curent a wattmetrului de la intrarea în ampermetru A_1 și se conectează la A_2 . Se aplică tensiunea $U_2=220V$ (prin creșterea treptată de la 0).

Se completează tabelul 2.

Tabelul nr.2

P (W)	I ₁ (A)	U ₁ (V)	U ₂ (V)	I ₂ (A)

III. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Se calculează parametrii A, B, C, D teoretic (relațiile (9), (10)) verificându-se valorile indicate la (12).

Se calculează Z_{10} , Z_{1sc} , Z_{20} cu ajutorul relațiilor (13), (14), (15), folosind datele experimentale. Apoi se calculează parametrii A, B, C, D (cu relațiile (16), (17)). Se compară cu valorile teoretice;

Se trasează diagramele $I_1=I_1(R_s)$ și $P=P(R_s)$.

Lucrarea nr. 10 - Studiul regimurilor tranzitorii ale circuitelor R-C, R-L și R-L-C serie

I. Partea teoretică

Prin regim tranzitoriu se înțelege regimul de funcționare al circuitelor electrice la trecerea între două stări staționare. Figura 1 ilustrează această definiție pentru cazul unui circuit de curent continuu (figura 1a) și al unui circuit de curent alternativ (figura 1b). Astfel de regimuri apar la conectarea sau deconectarea circuitelor și la modificarea bruscă a parametrilor de circuit.

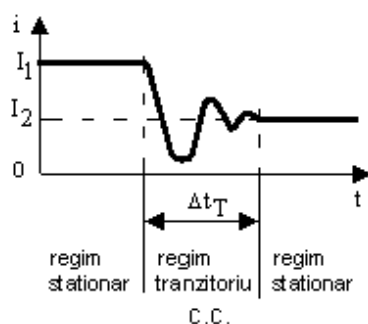


Figura 1a)

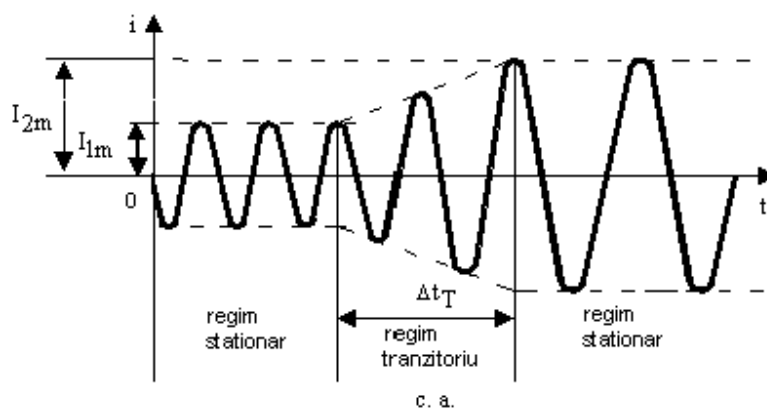


Figura 1b)

Regimul tranzitoriu durează un interval de timp Δt_T (țimp tranzitoriu sau durată tranzitorie), necesar variației energiei acumulate în elementele reactive ale circuitului (inductanțe și capacități).

În cazul circuitelor simple, regimul tranzitoriu se studiază prin integrarea ecuațiilor integro-diferențiale pentru curenți sau tensiuni. Constantele de integrare se determină din condițiile inițiale impuse acestor mărimi, pornind de la observația că energia electrică, respectiv magnetică, acumulată în circuit, nu poate varia brusc (puterea nu poate fi infinită). Se deduce de

aici că tensiunea la bornele condensatoarelor, respectiv curentul prin bobine nu poate varia brusc:

$$U_C(0^-)=U_C(0^+) \quad I_L(0^-)=I_L(0^+) \quad (1)$$

unde prin „0-” s-a notat momentul imediat anterior, iar prin „0+” momentul imediat ulterior declanșării regimului tranzitoriu.

Se analizează în continuare regimurile tranzitorii cu importanță practică, pentru câteva circuite simple de tip serie. Fiecare caz este prezentat după următoarea schemă:

- ecuația circuitului;
- ecuația diferențială a curentului;
- condițiile inițiale;
- soluția ecuației diferențiale.

1. Circuitul R-C

Conectarea la o sursă de t.e.m. constantă

$$E = u_R + u_C = R \cdot i + \frac{1}{C} \int i \cdot dt$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{T} \cdot i = 0, \text{ unde } T=RC - \text{ reprezintă constanta de timp a circuitului;}$$

$$t = 0 \quad u_C = 0;$$

$$i = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

$$u_R = R \cdot i = E \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

$$u_C = E - u_R = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$$

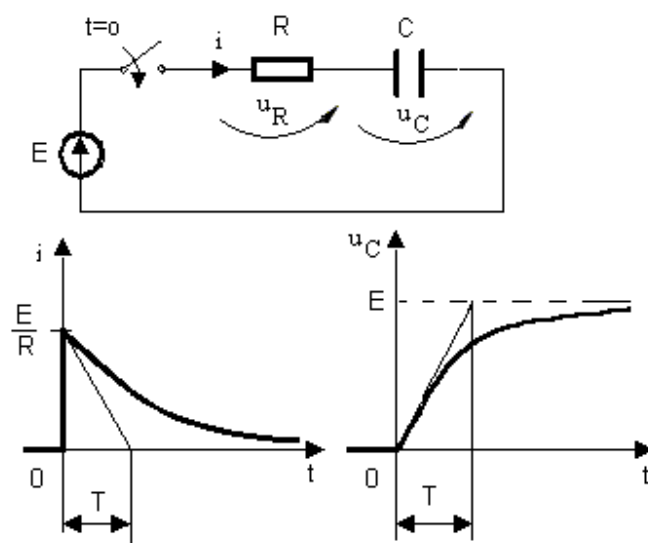


Figura 2

Descărcarea unui condensator peste o rezistență

$$0 = u_R - u_C = R \cdot i - (U_0 - \frac{1}{C} \int i \cdot dt);$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{T} \cdot i = 0, \text{ unde } T = RC;$$

$$t=0; \quad u_C=U_0;$$

$$i = \frac{U_0}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

$$u_C = u_R = R \cdot i = U_0 \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

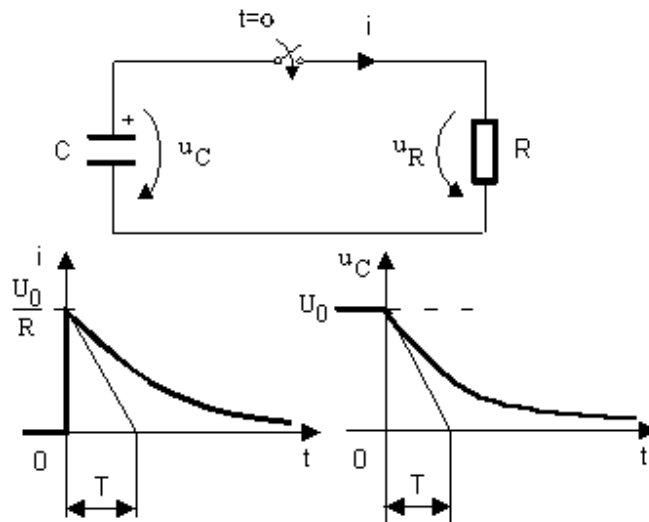


Figura 3

2. Circuitul R-L

Conectarea la o sursă de t.e.m. constantă

$$E = u_R + u_L = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt};$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{T} \cdot i = 0, \text{ unde } T = L/R - \text{constanta de timp a circuitului};$$

$$t=0; \quad i=0;$$

$$i = \frac{E}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right);$$

$$u_R = R \cdot i = E \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}}\right)$$

$$u_L = L \cdot \frac{di}{dt} = E \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

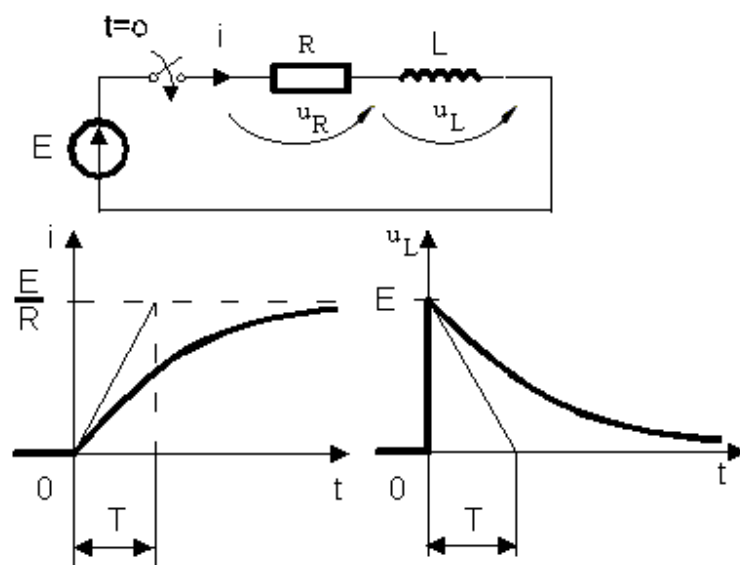


Figura 4

Scurtcircuitarea sursei

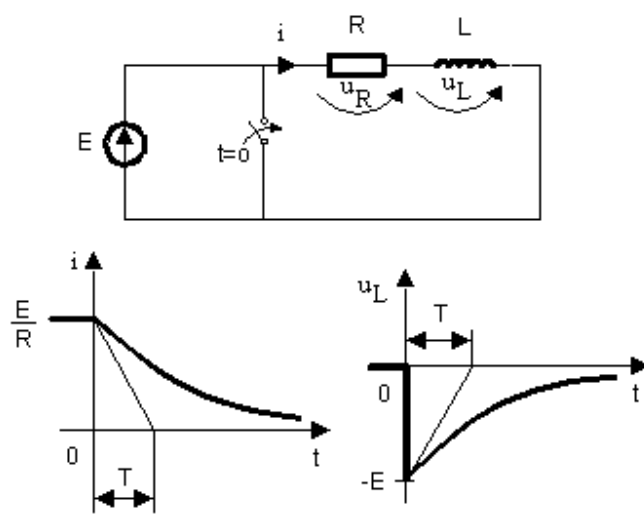


Figura 5

$$0 = u_R + u_L = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt};$$

$$\frac{di}{dt} + \frac{1}{T} \cdot i = 0, \text{ unde } T = L/R \text{ constanta de timp a circuitului;}$$

$$t=0; \quad i=E/R;$$

$$i = \frac{E}{R} \cdot e^{-\frac{t}{T}};$$

$$u_R = R \cdot i = E \cdot e^{-\frac{t}{T}};$$

$$u_L = -u_R = -E \cdot e^{-\frac{t}{T}}$$

3. Circuitul R-L-C serie

Conectarea la o sursă de t.e.m. constantă

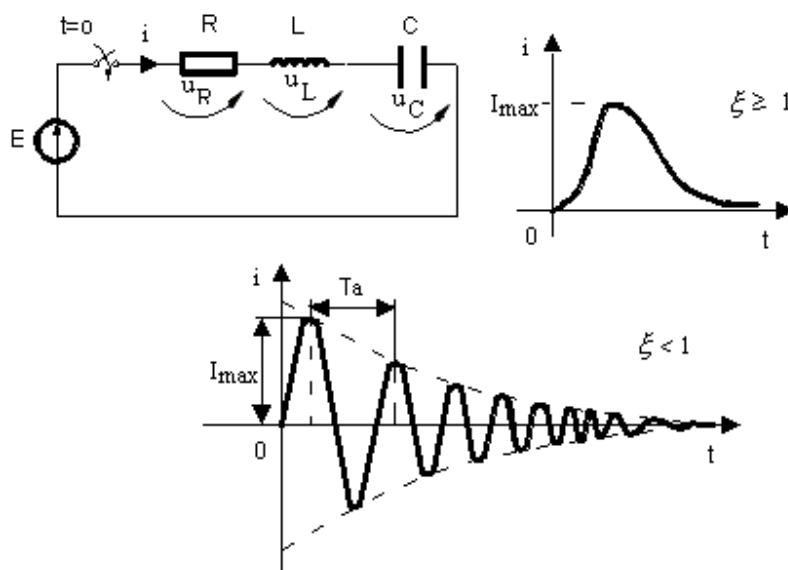


Figura 6

$$E = u_R + u_L + u_C = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int i \cdot dt;$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + 2 \cdot \omega_n \cdot \xi \cdot \frac{di}{dt} + \omega_n^2 \cdot i = 0, \text{ unde } \omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ este pulsația naturală și}$$

$$\xi = \frac{R}{2 \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}} \text{ este factorul amortizare;}$$

$$t = 0; \quad u_C = 0; \quad i = 0;$$

pentru $\xi < 1$ (regim oscilant amortizat):

$$i = \frac{E}{\alpha L} e^{-\omega_n \xi t} \sin \alpha t, \text{ unde } \alpha = \sqrt{1 - \xi^2};$$

pentru $\xi \geq 1$ (regim aperiodic):

$$i = \frac{E}{\beta\omega_n L} e^{-\omega_n \xi t} \text{sh} \omega_n \beta t, \text{ unde } \beta = \sqrt{\xi^2 - 1};$$

Observație: pentru $\xi = 1$, regimul este numit aperiodic critic.

II. Partea experimentală

Circuitul R-C

Se realizează montajul din figura 7.

Folosind un înregistrator X – Y se determină experimental variația tensiunilor u_R și u_C , în următoarele situații:

- cuplarea circuitului la $E = 20V$;
- descărcarea condensatorului pe rezistența R.

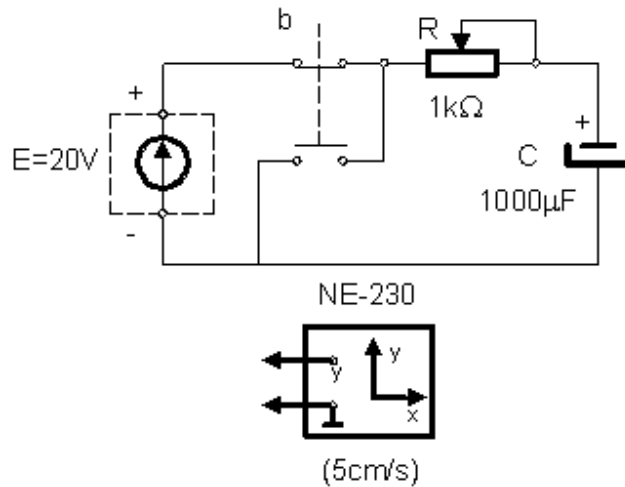


Figura 7

Circuitul R-L

Se execută montajul din figura 8.

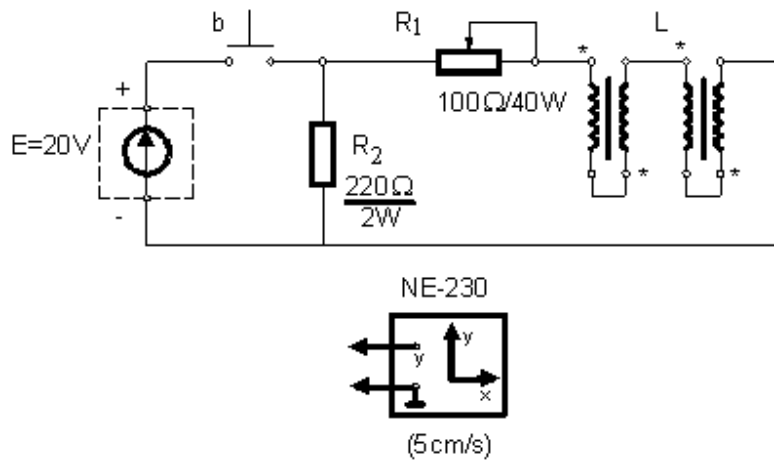


Figura 8

Se înregistrează variația tensiunilor u_{R1} și u_L , în situațiile:

- cuplarea circuitului la $E = 20V$;
- întreruperea alimentării și închiderea circuitului prin R_2 .

Circuitul R-L-C

Se realizează montajul:

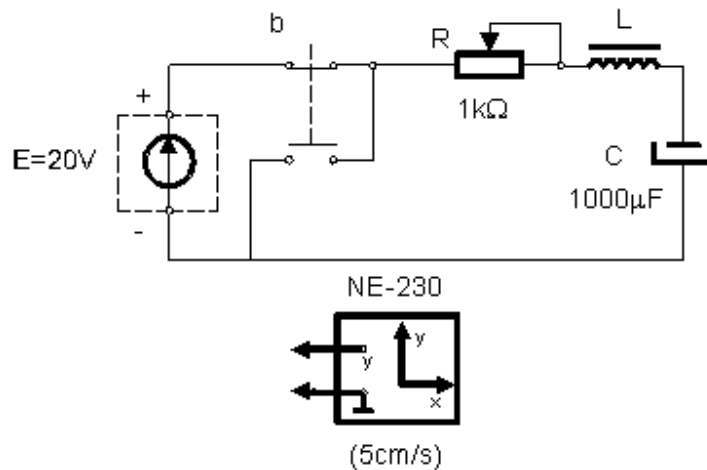


Figura 9

Se înregistrează tensiunea u_{R1} , în situațiile:

- $\xi < 1$ ($R < 150\Omega$);
- $\xi \geq 1$ ($R \geq 150\Omega$).

III. Prelucrarea rezultatelor experimentale

Folosind înregistrările de la punctele 1 și 2 se determină constantele de timp T pentru circuitele R-C și R-L.

Folosind înregistrările făcute la punctul 3 se determină:

- valoarea maximă a curentului în circuit:

$$I_{\max} = \frac{U_{R\max}}{R_1}$$

- perioada oscilațiilor amortizate (T_a)

Lucrarea nr. 11 - Studiul fenomenului de ferorezonanță

I. Partea teoretică

În circuitele inductive neliniare ce conțin o capacitate, o variație progresivă a tensiunii aplicate poate duce la variații bruște (salturi) în amplitudine și fază a primei armonici a curentului sau, invers, o variație progresivă a curentului poate produce variații bruște în amplitudine și fază a tensiunii pe anumite porțiuni de circuit. Acest fenomen este cauzat de caracteristica tensiune-curent neliniară a bobinelor cu miez de fier și este denumit ferorezonanță. În circuitele liniare ferorezonanța nu apare.

Pentru studiul fenomenului de ferorezonanță se consideră următoarele ipoteze simplificatoare:

tensiunea, curentul și fluxul magnetic sunt sinusoidale;

inductivitatea bobinei este presupusă cvasiliniară și dependentă de curentul prin bobină;

se consideră că nu există pierderi în bobina cu miez de fier și se neglijează rezistența ohmică a bobinei.

Ferorezonanța de tensiune

Se consideră un circuit serie format dintr-un condensator și o bobină cu miez de fier (figura 1), circuit în care, conform celei de-a doua teoreme a lui Kirchhoff, se poate scrie:

$$\underline{U} = \underline{U}_L + \underline{U}_c \quad (1)$$

sau în mărimi efective:

$$U = |U_L - U_c| \quad (2)$$

deoarece fazorii \underline{U}_L și \underline{U}_c sunt în opoziție de fază (a se vedea diagrama fazorială corespunzătoare circuitului, reprezentată în figura 2).

Dependența tensiunii la bornele bobinei de curent, este reprezentată de curba $U_L(I)$ în figura 3.

Caracteristica tensiune-curent $U_c(I)$ a condensatorului este o dreaptă care trece prin origine, deoarece:

$$U_c = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I \quad (3)$$

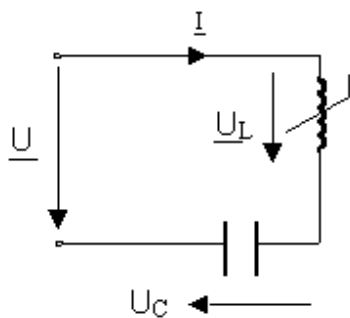


Figura 1

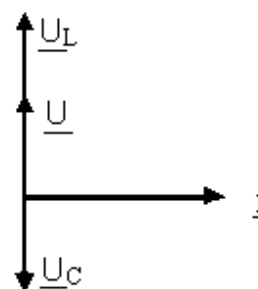


Figura 2

Valoarea lui C poate fi întotdeauna aleasă astfel încât dreapta $U_c(I)$ să intersecteze curba $U_L(I)$. Diferența dintre coordonatele curbelor $U_c(I)$ și $U_L(I)$ definește o curba $U'(I)$ care reprezintă tocmai dependența tensiunii U , aplicată circuitului, de valoarea curentului (figura 3). Punctul în care curba $U(I)$ intersectează axa absciselor (curentul corespunzător este I_0) corespunde condiției de ferorezonanță de tensiune și anume $U_L = U_c$. Întrucât valoarea efectivă U a tensiunii de alimentare este pozitivă, curba $U(I)$ coincide cu $U'(I)$ numai în domeniul $I < I_0$. Pentru valori $I > I_0$, curba $U(I)$ este imaginea în oglindă a curbei $U'(I)$ față de abscisă (conform relației (2)).

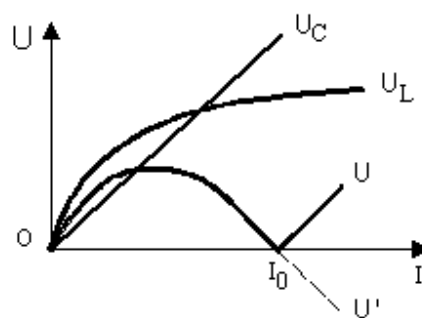


Figura 3

În realitate, datorită pierderilor în miez și în special datorită formelor de undă nesinusoidale ale curentului și tensiunii, curba $U(I)$ are o formă diferită de cea stabilită teoretic (figura 4).

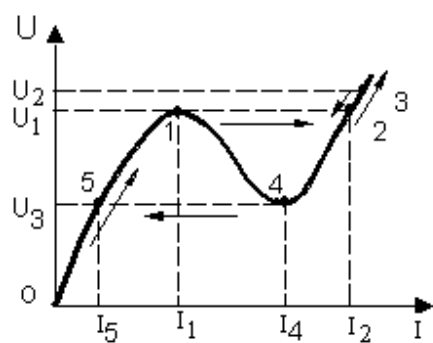


Figura 4

Urmărind forma caracteristicii $U(I)$ (figura 4) a circuitului $L_{Fe}-C$ serie, se observă că pot apărea variații bruște (salturi) ale curentului. Astfel, dacă se realizează o creștere lentă și monotonă a mărimii U începând de la valoarea $U = 0$, în momentul în care U depășește valoarea U_1 , valoarea efectivă a curentului face un salt de la I_1 la I_2 ; punctul de funcționare nu poate parcurge porțiunea 1–4 a curbei $U(I)$ deoarece, pe această porțiune, panta caracteristicii este negativă iar mărimea U crește mereu, prin ipoteză. Dacă U crește în continuare, deci peste valoarea U_1 , se observă începând din acest punct o dependență $U(I)$ cvasiliniară dar cu inversarea defazăjului tensiune-curent. Similar, dacă se realizează o scădere monotonă a mărimii U , începând de la valoarea U_2 de exemplu, valoarea efectivă a curentului face un salt de la I_4 la I_5 , în momentul în care U ajunge la U_3 , deoarece porțiunea 4-1 a caracteristicii presupune o creștere a mărimii U , deci nu poate fi parcursă de punctul de funcționare în regim permanent.

În jurul punctului 1 de pe caracteristică, la variații relativ mari ale curentului I , corespund variații mici ale tensiunii U . Circuitul poate fi utilizat deci ca stabilizator de tensiune, de fapt singura aplicație practică a fenomenului de ferorezonanță.

Ferorezonanța de curent

Ferorezonanța poate de asemenea să apară într-un circuit conținând o bobină cu miez de fier și un condensator conectate în paralel (figura 5). Spre deosebire de circuitul ferorezonant serie, salturi bruște de tensiune însoțite de inversarea defazăjului dintre tensiune și curent apar numai când circuitul este conectat la o sursă de curent.

Ecuția circuitului va fi:

$$\underline{I} = \underline{I}_L + \underline{I}_C \quad (4)$$

sau, în valori efective:

$$I = |I_L - I_C| \quad (5)$$

deoarece la bornele unui condensator ideal tensiunea este defazată în urma curentului cu 90° , iar la bornele unei bobine ideale tensiunea e defazată înaintea curentului cu 90° (a se vedea diagrama fazorială a circuitului reprezentată în figura 6).

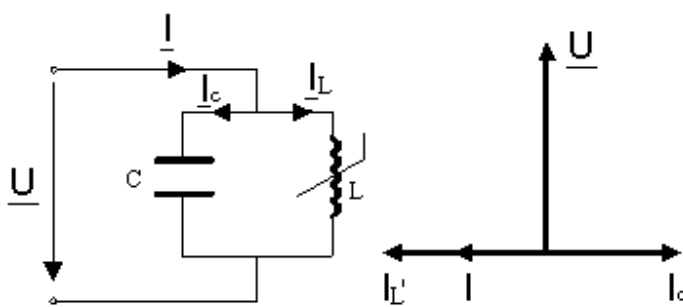


Figura 5

Figura 6

Dacă se construiesc caracteristicile $I_L(U)$ și $I_C(U)$ (figura 7), diferența absciselor va da curba de variație a curentului total din circuit în funcție de tensiunea de alimentare. După cum se observă din caracteristica $I(U)$, de la o valoare bine definită a tensiunii $U=U_0$, are loc condiția de ferorezonanță de curent: $I_L = I_C$.

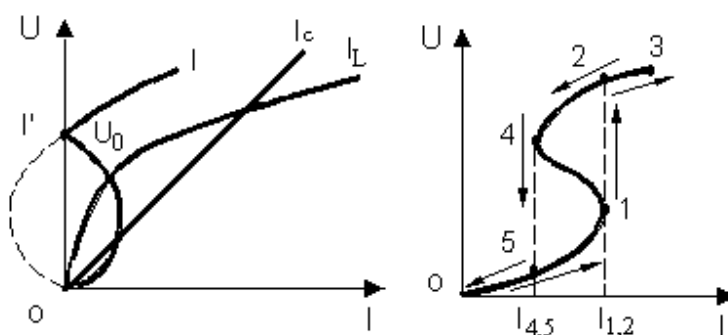


Figura 7

Figura 8

Curba $I(U)$ reprezentată în figura 7 este una ipotetică. În realitate, datorită pierderilor în miezul bobinei și distorsionării formei de undă a curentului, curentul total nu se anulează la condiția de ferorezonanță de curent, iar forma caracteristicii $I(U)$ reale este asemănătoare cu cea reprezentată în figura 8.

După cum se observă din caracteristica $I(U)$, circuitul $L_{Fe}-C$ paralel va suporta salturi de tensiune la variații progresive ale curentului.

II. Partea experimentală

Se execută montajul din figura 9. Se alimentează montajul cu tensiune progresiv crescătoare (de la 0V la 150V) de la autotransformatorul m_2 din standul de laborator, citindu-se curenții corespunzători la ampermetrul A.

Se completează tabelul 1.

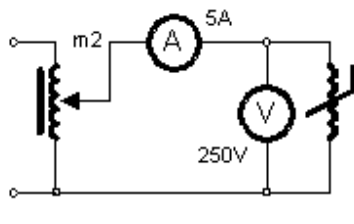


Figura 9

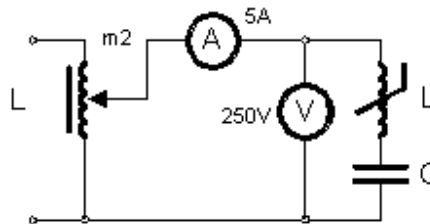


Figura10

Tabelul nr.1

$U_L(V)$	0	10	20	30	...	140	150
$I_L(A)$							

Se execută montajul din figura 10, realizând circuitul $L_{Fe}-C$ serie. Se utilizează o capacitate de $67\mu F$. Se alimentează montajul cu tensiune progresiv crescătoare (0V – 150V) și se citesc la ampermetru valorile curentului, completându-se prima parte a tabelului 2. Se observă saltul de curent în momentul în care este realizată condiția de ferorezonanță.

III. Prelucrarea rezultatelor experimentale

- Se trasează grafic, pe același sistem de coordonate, caracteristicile $U(I)$ pentru bobina neliniară și pentru condensator, aceasta din urmă prin calcul, utilizând relația (3).
- Se trasează caracteristica $U(I)$ rezultantă, teoretică, prin scădere grafică, pentru circuitul ferorezonant serie și caracteristica rezultantă experimentală. Se compară cele două caracteristici.
- Se trasează caracteristica $I(U)$ experimentală a circuitului L_{Fe} -C paralel.

ANEXA

Tabel
care indică unde au mai fost publicate articolele.

Articolul	Unde a mai fost publicat
On Generalized Loads in Electrotechnics.	Sesiunea anuală de comunicări științifice cu participare internațională, ediția a X-a, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19-20 noiembrie 2010, Extras, ISBN 978-973-7998-61-3 și CD al sesiunii, pag. 12-15.
The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load.	Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1, pag. 144-151.
Studiul receptorului trifazat cu coeficienți de dezechilibru reali.	A treia sesiune anuală de comunicări științifice a cadrelor didactice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 30 aprilie 2004, Volum 2; ISBN 973-7998-11-1, pag. 101-111.
A Synthesis Regarding the Study of a Real Unbalanced Load.	Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag. 9-12.
The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations.	Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag. 13-16.
Analiza cazurilor limită ale receptorului dezechilibrat real.	Sesiunea Jubiliară de Comunicări Științifice cu Participare Internațională prilejuită de împlinirea a 30 de ani de învățământ superior de stat în Arad, Arad, 28-29 noiembrie 2002, Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad, Volum, Seria Electrică, ISSN 1582-3377, pag. 126-131.
Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric.	A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5, pag. 199-204.
Studiul punții de diode alimentată nesimetric.	Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și

	„Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2, pag.105-108.
Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni.	A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag.173-176.
Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric.	A VII-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19 aprilie 2007, Extras, ISBN 978-973-7998-32-3 și CD al sesiunii, pag.263-269.
Coeficient global de nesimetrie pentru sisteme trifazate.	Seminarul Științific Național „Electrotehнологii și Mediul ambiant”, Sibiu, 5-6 noiembrie 2004, Revista „Energetica”, nr. 12/2004, ISSN 1453-2360, pag.544-549.
Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors.	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 15 -18 august 1996, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.37, nr. 1, ISSN 1224-2497, pag.61-62.
Metodă analitică pentru studiul punții de diode având o sarcină complexă.	Lucrările celei de A XII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2012; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 21), ISSN 2067-7138, pag. 289-298
Aspecte comparative privind puntea de diode având o sarcină complexă.	Lucrările celei de A XIII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 7-8 iunie 2013; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 23), ISSN 2067-7138, pag. 305-312
Analiza puterilor complexe ale unui receptor trifazat.	Lucrările celei de A XIV-a Conferințe Internaționale multidisciplinare „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 6-7 iunie 2014; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 25), ISSN 2067-7138 (în curs de apariție).
Analiza puterilor active ale unui receptor trifazat.	Lucrările celei de A XIV-a Conferințe Internaționale multidisciplinare „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 6-7 iunie 2014; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 25), ISSN 2067-7138 (în curs de apariție).

LISTĂ LUCRARI

LISTA LUCRĂRILOR PUBLICATE
de prof. dr. ing. Vasile Mircea Popa

A. Teza de doctorat

1	Titlul tezei de doctorat	Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații.
	Conducător științific	prof. dr. ing. Emil Simion
	Instituția la care a fost susținută	Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, 1999
	Specializarea	Electrotehnică
	Număr de pagini	214

B. Monografiile, manuale, culegeri de probleme, îndrumare

1	Titlul lucrării	Electrotehnică, măsurări și mașini electrice-lucrări de laborator (îndrumar).
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u>
	Editura	Institutul de Învățământ Superior Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1982
	Număr de pagini	225

2	Titlul lucrării	Electrotehnică, măsurări electrice și mașini electrice-culegere de probleme.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u>
	Editura	Institutul de Învățământ Superior Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1983
	Număr de pagini	156

3	Titlul lucrării	Curs de electrotehnică, măsurări și mașini electrice, vol. I. Electrotehnică.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Editura	Institutul de Învățământ Superior Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1984
	Număr de pagini	135

4	Titlul lucrării	Electrotehnică, măsurări și mașini electrice, curs, vol. II. Transformatorul electric și mașina asincronă.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.
	Editura	Institutul de Subingineri Sibiu

	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986
	Număr de pagini	180
5	Titlul lucrării	Electrotehnică, măsurări și mașini electrice, curs, vol. III. Mașina sincronă și mașina de curent continuu.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Editura	Institutul Politehnic Cluj-Napoca; Institutul de Subingineri Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1988
	Număr de pagini	323
6	Titlul lucrării	Teoria circuitelor electrice (2 vol.).
	Autori	Simion, E., Man, E., Ciupa, R. Neamțu, V., Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u>
	Editura	Universitatea Tehnică Cluj-Napoca
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1995
	Număr de pagini	376-358
7	Titlul lucrării	Electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u> , Roșca, P.
	Editura	Universitatea "Lucian Blaga" Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1996
	Număr de pagini	318
8	Titlul lucrării	Teoria circuitelor electrice (2 vol., ediția a II-a).
	Autori	Simion, E., Man, E., Ciupa, R.V., Roșca, P., Neamțu, V., <u>Popa, V.M.</u>
	Editura	Universitatea Tehnică Cluj-Napoca
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1996
	Număr de pagini	304-286
9	Titlul lucrării	Electrotehnică-îndrumar de laborator.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Editura	Universitatea "Lucian Blaga" Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1996
	Număr de pagini	53
10	Titlul lucrării	Electrotehnică și electronică.
	Autori	Modran, L., <u>Popa, V.M.</u> , Crăciunaș, G., Spătar, O.
	Editura	Editura Meteor Sibiu, ISBN 973-96985-4-9

	Locul și anul publicării	Sibiu, 1998
	Număr de pagini	288
11	Titlul lucrării	Complemente de electrotehnică pentru inginerii din industrie.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” Sibiu, ISBN 973-651-132-4
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2000
	Număr de pagini	59
12	Titlul lucrării	Asigurarea calității în electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității “Lucian Blaga” Sibiu, ISBN 973-651-133-2
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2000
	Număr de pagini	70
13	Titlul lucrării	Electrotehnică-Îndrumar de laborator.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u> , Vințan, M.
	Editura	Universitatea Româno-Germană Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Număr de pagini	50
14	Titlul lucrării	Electrotehnică, îndrumar de laborator.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u> , Vințan, M.
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” Sibiu, ISBN 973-651-205-3
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Număr de pagini	82
15	Titlul lucrării	Electrotehnică-Învățământ la distanță.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura “Alma Mater” Sibiu, ISBN 973-8230-87-x
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Număr de pagini	266
16	Titlul lucrării	Bazele electrotehnicii, partea a II-a.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura “Alma Mater” Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Număr de pagini	145

17	Titlul lucrării	Bazele electrotehnicii, partea a II-a, ediția a II-a, completată.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura “Alma Mater” Sibiu, ISBN 973-8230-95-0
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2002
	Număr de pagini	155

18	Titlul lucrării	Matematică aplicată.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2005
	Număr de pagini	150

19	Titlul lucrării	Aspecte de combinatorică cu aplicații în electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, ISBN 978-973-739-873-4
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2009
	Număr de pagini	262

20	Titlul lucrării	Matematică aplicată, ediția a II-a, completată.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Număr de pagini	214

21	Titlul lucrării	Receptoare generalizate în electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, ISBN 978-606-12-0033-7
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Număr de pagini	154

22	Titlul lucrării	Electrotehnică, partea I.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura “Alma Mater” Sibiu, ISBN 978-973-632-618-9
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Număr de pagini	270

23	Titlul lucrării	Electrotehnică, partea a II-a.
----	-----------------	--------------------------------

	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura "Alma Mater" Sibiu, ISBN 978-973-632-619-6
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Număr de pagini	160
24	Titlul lucrării	Electrotehnică generală.
	Autori	<u>Popa, V. M.,</u> Roșca, P.
	Editura	Editura BURG Sibiu, ISBN 978-973-7998-64-4
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Număr de pagini	156
25	Titlul lucrării	Electrotehnică, teorie și aplicații.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2011
	Număr de pagini	450
26	Titlul lucrării	Sisteme nesimetrice în electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, ISBN 978-606-12-0253-9
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2011
	Număr de pagini	150
27	Titlul lucrării	Regimuri nesimetrice în electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, ISBN 978-606-12-0382-6
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2012
	Număr de pagini	194
28	Titlul lucrării	Circuite trifazate dezechilibrate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, ISBN 978-606-12-0512-7
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2013
	Număr de pagini	140
29	Titlul lucrării	Receptoare discrete m-fazate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Editura	Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, ISBN 978-606-12-0592-9

	Locul și anul publicării	Sibiu, 2013
	Număr de pagini	140

C. Lucrări publicate în reviste de specialitate, anale, volume simpoziune - plan internațional (inclusiv conferințe naționale cu participare internațională)

1	Titlul lucrării	Relevu cu fiabilitate ridicată pentru protecția complexă a motoarelor asincrone trifazate.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Conferința Națională de Energetică (cu participare internațională), București, 23-25 noiembrie 1983, volum, secția 34
	Locul și anul publicării	București, 1983
	Pagini	34.091-34.096

2	Titlul lucrării	Studiul comparativ al metodelor de încălzire a barelor de arc sub raportul randamentului energetic.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Dat, C., Magda, N.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Conferința Națională de Energetică (cu participare internațională), București, 23-25 noiembrie 1983, volum, secția 53
	Locul și anul publicării	București, 1983
	Pagini	53.027-53.033

3	Titlul lucrării	Recherches sur les possibilités de mesurer les paramètres des vibrations relatives à l'aide des traducteurs de déplacement à organe sensible capacitif.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Al IV-lea Simpozion Național de Tensometrie (cu participare internațională), Brașov, 24-27 septembrie 1986, vol 1.
	Locul și anul publicării	Brașov, 1986
	Pagini	203-208

4	Titlul lucrării	Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u> , Budurisi, C., Garcia Moreno, E.

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 17-20 august 1995, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.36, nr. 1, ISSN 1224-2497
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1995
	Pagini	42-44

5	Titlul lucrării	A Mathematical Model for Polyphasic Loads Unbalanced Classes Analysis.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 17-20 august 1995, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.36, nr. 1, ISSN 1224-2497
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1995
	Pagini	91-92

6	Titlul lucrării	On an Analysis for the Unbalanced Loads.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 17-20 august 1995, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.36, nr. 1, ISSN 1224-2497
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1995
	Pagini	93-94

7	Titlul lucrării	Contribution to Electric Field Potential Computation Produced by Any Charge Distribution and the Visualisation of the Equipotential Surfaces and Isolines.
	Autori	Drechsler, S., <u>Popa, V.M.</u> , Vulcan, N.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 15 -18 august 1996, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.37, nr. 1, ISSN 1224-2497
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1996
	Pagini	17-20

8	Titlul lucrării	Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	International Workshop in Electrotechnics, Cluj-Napoca, 15 -18 august 1996, Acta Electrotehnica Napocensis, vol.37, nr. 1, ISSN 1224-2497
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1996
	Pagini	61-62

9	Titlul lucrării	Using Generalised Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Proceedings of the 2 nd International Workshop “CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits” CADEMEC 99, 7-9 September, 1999, Cluj-Napoca
	Locul și anul publicării	Cluj-Napoca, 1999
	Pagini	91-94

10	Titlul lucrării	Metodă analitică pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u> , Roșca, P.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice SIELMEC '99, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, volumul I, ISBN 9975-994-30-2
	Locul și anul publicării	Rep. Moldova, Chișinău, 1999
	Pagini	225-228

11	Titlul lucrării	Program de calculator pentru studiul punții de diode alimentată nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u> , Roșca, P.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A doua Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice, SIELMEC '99, Chișinău, 8-9 octombrie 1999, volumul I, ISBN 9975-994-30-2
	Locul și anul publicării	Rep. Moldova, Chișinău, 1999
	Pagini	229-230

12	Titlul lucrării	Using Generalized Impedances in the Study of a Real Unbalanced Load.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	BEYOND 2000: Engineering Research Strategies-International Conference, Sibiu, 25-26 November 1999, Acta Universitatis Cibiniensis, volumul XLI, Seria Tehnică, H. Inginerie electrică și electronică, ISSN 1221-4949
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	173-176

13	Titlul lucrării	Using Generalized Impedances in the Study of a Generalized Extremely Unbalanced Load.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	BEYOND 2000: Engineering Research Strategies-International Conference, Sibiu, 25-26 November 1999, Acta Universitatis Cibiniensis, volumul XLI, Seria Tehnică, H. Inginerie electrică și electronică, ISSN 1221-4949
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	177-180

14	Titlul lucrării	A Synthesis Regarding the Study of a Real Unbalanced Load.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531
	Locul și anul publicării	Hunedoara, 2000
	Pagini	9-12

15	Titlul lucrării	The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531

	Locul și anul publicării	Hunedoara, 2000
	Pagini	13-16

16	Titlul lucrării	Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u> , Popescu, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9
	Locul și anul publicării	Rep. Moldova, Chișinău, 2001
	Pagini	165-166

17	Titlul lucrării	Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u> , Popescu, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9
	Locul și anul publicării	Rep. Moldova, Chișinău, 2001
	Pagini	173-176

18	Titlul lucrării	O metodă de reducere pentru calculul numărului receptoarelor dezechilibrate discrete m-fazate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A III-a Sesiune de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 4-5 octombrie 2001; Universitatea "Politehnica" din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul III, Fascicola 2, ISSN 1454-6531
	Locul și anul publicării	Hunedoara, 2001
	Pagini	44-47

19	Titlul lucrării	Analiza asistată de calculator a receptoarelor dezechilibrate discrete m-fazate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A III-a Sesiune de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 4-5 octombrie 2001; Universitatea “Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul III, Fascicola 2, ISSN 1454-6531
	Locul și anul publicării	Hunedoara, 2001
	Pagini	48-51

20	Titlul lucrării	The Order Reducing Method for Discreet Unbalanced Loads Number Determination.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, volumul XLII, Seria Tehnică, H. Inginerie Electrică și Electronică (nivel internațional).
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Pagini	61-66

21	Titlul lucrării	Analiza cazurilor limită ale receptorului dezechilibrat real.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea Jubiliară de Comunicări Științifice cu Participare Internațională prilejuită de împlinirea a 30 de ani de învățământ superior de stat în Arad, Arad, 28-29 noiembrie 2002, Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad, Volum, Seria Electrică, ISSN 1582-3377
	Locul și anul publicării	Arad, 2002
	Pagini	126-131

22	Titlul lucrării	Studiul punții de diode alimentată nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2003
	Pagini	105-108

23	Titlul lucrării	Analiza receptorului dezechilibrat real cu coeficienți de dezechilibru reali.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A Patra Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 21-23 mai 2004; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. V), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-67-9
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2004
	Pagini	151-156
24	Titlul lucrării	Asupra nesimetriei unui sistem trifazat.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A V-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 3-4 iunie 2005; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 7), ISBN 973-720-015-2; ISBN 973-8130-84-0
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2005
	Pagini	241-246
25	Titlul lucrării	The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2005
	Pagini	144-151
26	Titlul lucrării	Analiza punții de diode alimentată cu sisteme de tensiuni nesimetrice.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A VI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2-3 iunie 2006; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 9), ISBN 10 973-8130-82-4

	Locul și anul publicării	Sebeș, 2006
	Pagini	309-314
27	Titlul lucrării	Rezultate experimentale și comparative privind puntea de diode în regim de alimentare nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A VII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2007; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 11), ISBN 973-8130-82-4
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2007
	Pagini	191-196
28	Titlul lucrării	The design of a magnetic separator.
	Autori	Popescu, L., <u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A doua Conferință Științifică Internațională eRA-2, privind contribuția tehnologiei informației în știință, economie, societate și educație. Conferință organizată de Institutul de Educație Tehnologică (TEI) din Pireu (Grecia) și Universitatea din Paisley (Scoția), Atena, 22-23 septembrie 2007. Volum, ISSN-1791-1133, CD și site-ul confer.: ikaros.teipir.gr/era
	Locul și anul publicării	Grecia, Atena, 2007
	Pagini	Poziția pe site (full papers): B.5.6.
29	Titlul lucrării	The electromagnetic drive movement – dependent inductivity.
	Autori	Popescu, L., <u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A doua Conferință Științifică Internațională eRA-2, privind contribuția tehnologiei informației în știință, economie, societate și educație. Conferință organizată de Institutul de Educație Tehnologică (TEI) din Pireu (Grecia) și Universitatea din Paisley (Scoția), Atena, 22-23 septembrie 2007. Volum, ISSN-1791-1133, CD și site-ul confer.: ikaros.teipir.gr/era
	Locul și anul publicării	Grecia, Atena, 2007
	Pagini	Poziția pe site (full papers): B.5.7.

30	Titlul lucrării	Model matematic al receptorului dezechilibrat discret.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A VIII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai 2008; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 13), ISBN 973-8130-82-4
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2008
	Pagini	229-234
31	Titlul lucrării	Studiul energetic al receptorului extrem dezechilibrat generalizat.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A IX-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 5-6 iunie 2009; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 15), ISBN 973-8130-82-4
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2009
	Pagini	363-368
32	Titlul lucrării	Studiul energetic al receptorului echilibrat real.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A X-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 4-5 iunie 2010; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 17), ISSN 2067-7138
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2010
	Pagini	357-362
33	Titlul lucrării	On Generalized Loads in Electrotechnics.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea anuală de comunicări științifice cu participare internațională, ediția a X-a, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19-20 noiembrie 2010, Extras, ISBN 978-973-7998-61-3 și CD al sesiunii.

	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Pagini	12-15

34	Titlul lucrării	Aspecte privind receptoarele generalizate în electrotehnică.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A XI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 3-4 iunie 2011; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 19), ISSN 2067-7138
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2011
	Pagini	345-352

35	Titlul lucrării	Metodă analitică pentru studiul punții de diode având o sarcină complexă.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A XII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2012; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 21), ISSN 2067-7138
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2012
	Pagini	289-298

36	Titlul lucrării	Aspecte comparative privind puntea de diode având o sarcină complexă.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A XIII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 7-8 iunie 2013; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 23), ISSN 2067-7138
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2013
	Pagini	305-312

D. Lucrări publicate în reviste de specialitate, anale, volume simpozioane - plan național

1	Titlul lucrării	Unele generalizări în combinatorică.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Sibiu, 24-26 octombrie 1980, publicată în Buletinul Științific, vol. III
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1980
	Pagini	33-39
2	Titlul lucrării	Aspecte ale posibilităților de sinterizare electrică a pieselor din pulberi metalice.
	Autori	Isarie, I., Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Sibiu, 24-26 octombrie 1980, publicată în Buletinul Științific, vol. III
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1980
	Pagini	121-126
3	Titlul lucrării	Noi cercetări privind protecția motoarelor asincrone.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Sibiu, 24-26 octombrie 1980, publicată în Buletinul Științific, vol. IV
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1981
	Pagini	244-247
4	Titlul lucrării	Realizarea unui traductor cvasi-numeric de turație având fiabilitate ridicată.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, vol. V
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1981
	Pagini	278-281
5	Titlul lucrării	An Improved Protection Method at the Electric Drive Systems with Asynchronous Motors.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A III-a Conferință Națională de Acționări Electrice, Brașov, 28-30 mai 1982, vol. I

	Locul și anul publicării	Brașov, 1982
	Pagini	A135-A138
6	Titlul lucrării	Quasi-digital Speed Transducers Improving the Braking of Electric Drive Systems.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A III-a Conferință Națională de Acționări Electrice, Brașov, 28-30 mai 1982, vol. II
	Locul și anul publicării	Brașov, 1982
	Pagini	C33-C36
7	Titlul lucrării	Cercetări privind realizarea unui traductor analog-numeric pentru măsurarea forțelor.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L., Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Al II-lea Simpozion Național de Teoria Sistemelor, Craiova, 11-12 iunie 1982, vol. IV
	Locul și anul publicării	Craiova, 1982
	Pagini	213-217
8	Titlul lucrării	Asupra optimizării proceselor tehnologice în sisteme flexibile de fabricație.
	Autori	Rotaru, D., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, vol. VI
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1982
	Pagini	91-96
9	Titlul lucrării	Tahometru electronic.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, vol. VI
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1982
	Pagini	126-129
10	Titlul lucrării	Calculul armonicilor de 100 Hz din tensiunea obținută prin redresarea unui sistem trifazat asimetric cu ajutorul unei punți trifazate.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, vol. VI
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1982
	Pagini	130-134
11	Titlul lucrării	Sursă cu tensiune variabilă și curent de scurtcircuit limitat pentru prelucrări prin eroziune complexă.
	Autori	Roșca, P., Popa, V.M. , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, vol. VI
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1982
	Pagini	108-112
12	Titlul lucrării	Sistem pentru indicarea deplasării cu selsine.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., Popa, V.M. , Diaconescu, C., Cleșiu, S.R.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, vol. VI
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1982
	Pagini	135-140
13	Titlul lucrării	Instalație de încălzire directă cu funcționare automată pentru barele de arc.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., Popa, V.M. , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Simpozion organizat de Universitatea din Galați și Combinatul Siderurgic Galați, Galați, 8 aprilie 1983, vol. 3, Transporturi, Automatizări
	Locul și anul publicării	Galați, 1983
	Pagini	178-182
14	Titlul lucrării	Traductor cvasi-numeric de turație.
	Autori	Roșca, P., Popa, V.M. , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Simpozionul de Electronică Industrială, Craiova, 17-18 noiembrie 1983, volum
	Locul și anul publicării	Craiova, 1983
	Pagini	143-147
15	Titlul lucrării	A Speed-Relay.

	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A IV-a Conferință Națională de Acționări Electrice, Craiova, 20-21 septembrie 1984, vol. II
	Locul și anul publicării	Craiova, 1984
	Pagini	C131-C136

16	Titlul lucrării	The Influence of Non-Symmetric States on the Functioning of the Electronic Relay RPMA-1 of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors at the Interruption of one Phase.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A IV-a Conferință Națională de Acționări Electrice, Craiova, 20-21 septembrie 1984, vol. II
	Locul și anul publicării	Craiova, 1984
	Pagini	C127-C130

17	Titlul lucrării	Utilizarea traductoarelor de proximitate pentru măsurarea vitezei liniare.
	Autori	Sîrbu, N., Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, vol. VII
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1985
	Pagini	72-74

18	Titlul lucrării	Frână cu curenți turbionari.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări tehnico-științifice a Institutului de Subingineri Sibiu, Sibiu, 24-25 octombrie 1986, publicată în Buletinul Științific, vol. VII
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1985
	Pagini	68-71

19	Titlul lucrării	Asupra numărării bijecțiilor între două mulțimi multiple.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Gazeta Matematică-Perfecționare metodică și metodologică în matematică și informatică, vol. VII, nr. 2
	Locul și anul publicării	București, 1986
	Pagini	78-81
20	Titlul lucrării	Cercetări privind realizarea unui traductor analog-numeric de deplasare cu element sensibil capacitiv.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările sesiunii științifice jubilar, secția IV, Măsurări electrice, Iași, 16-17 mai 1986, volum
	Locul și anul publicării	Iași, 1986
	Pagini	43-48
21	Titlul lucrării	Considerații asupra calculului de verificare a electromagneților de curent continuu.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările sesiunii științifice jubilar, secția VI, Aparate electrice, Iași, 16-17 mai 1986, volum
	Locul și anul publicării	Iași, 1986
	Pagini	69-74
22	Titlul lucrării	Performanțele de conversie pentru un generator sincron monofazat conectat pe o sarcină rezistivă.
	Autori	Roșca, P., Modran, L. <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, vol. VIII
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986
	Pagini	99-102
23	Titlul lucrării	Instalație pentru ridicarea caracteristicii mecanice a motoarelor electrice.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări tehnico-științifice a Institutului de Subingineri Sibiu, Sibiu, 24 - 25 octombrie 1986, publicată în Buletinul Științific, vol. IX
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986

	Pagini	370-373
24	Titlul lucrării	Traductor de proximitate.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, vol. IX
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986
	Pagini	374-377
25	Titlul lucrării	Determinarea experimentală a caracteristicilor forță-deplasare pentru electromagneții de curent continuu.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., Dușe, D., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L., Rusen, D.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, vol. IX
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986
	Pagini	378-381
26	Titlul lucrării	Contor pentru măsurarea sarcinii electrice vehiculate în circuite de curent continuu.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Modran, L.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, vol. IX
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986
	Pagini	382-386
27	Titlul lucrării	Construcția circuitului magnetic și determinarea caracteristicii interne pentru un generator electric sincron monofazat.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Avram, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, vol. IX
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1986
	Pagini	387-391
28	Titlul lucrării	Some Considerations Regarding the Design and the Conversion Performances of a Three-Phase Synchronous Microgenerator.
	Autori	Modran, L., Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> , Avram, C.

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Conferința OPTIM organizată de Universitatea din Brașov, Brașov, 20-21 noiembrie 1987, vol. I
	Locul și anul publicării	Brașov, 1987
	Pagini	163-168

29	Titlul lucrării	Cercetări referitoare la realizarea unui transformator rotativ.
	Autori	Modran, L., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Simpozion organizat de ICPE București, București, 1-2 iulie 1988, volumul “Senzori și traductoare”
	Locul și anul publicării	București, 1988
	Pagini	56-58

30	Titlul lucrării	Systeme électronique pour la mesure de l'énergie de percussion des marteaux pneumatiques.
	Autori	Sîrbu, N., Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A VI-a Conferință de Vibrații Mecanice, Timișoara, 1-3 decembrie 1988, vol. 1
	Locul și anul publicării	Timișoara, 1988
	Pagini	229-232

31	Titlul lucrării	Cuplaj electromagnetic asincron cu câmp axial și frână înglobată.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C.
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice Electromotor 89 organizată de Întreprinderea “Electromotor”, Institutul Politehnic “Traian Vuia” și Universitatea Timișoara, Timișoara, 19-20 mai 1989, vol. 1
	Locul și anul publicării	Timișoara, 1989
	Pagini	15-21

32	Titlul lucrării	Algoritm și program pentru aproximarea caracteristicilor unor traductoare de deplasare analog-numeric.
	Autori	Roșca, P., <u>Popa, V.M.</u> , Diaconescu, C., Modran, L., Volovici, D.

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Al II-lea simpozion “Structuri, algoritmi și echipamente de conducere a proceselor industriale”, Iași, 27-28 octombrie 1989, volum
	Locul și anul publicării	Iași, 1989
	Pagini	379-382
33	Titlul lucrării	Asupra unei probleme de algebră.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Astra Matematică, vol. I, nr. 1
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1990
	Pagini	29-31
34	Titlul lucrării	Algoritm pentru liniarizarea caracteristicilor unor clase de traductoare analog-numerice.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Simpozionul Național de Teoria Sistemelor, Sintes 6, Craiova, 28-29 martie 1991, vol. III
	Locul și anul publicării	Craiova, 1991
	Pagini	135-140
35	Titlul lucrării	On a Question of Linear Programming.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. X (1), Technical series, A. Electronics, Electrotechnics and Computer Science, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1993
	Pagini	65-67
36	Titlul lucrării	On a Classification of the Three-Phase Loads.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XIV (2), Technical series, A. Electronics, Electrotechnics and Computer Science, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1995
	Pagini	87-90
37	Titlul lucrării	A New Approach to be Characterized the Unbalanced Three-Phase Loads.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XIV (2), Technical series, A. Electronics, Electrotechnics and Computer Science, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1995
	Pagini	91-93

38	Titlul lucrării	Considerații privind comportarea circuitelor electrice în regimuri nesimetrice de funcționare.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice “Implicarea cercetării științifice în dezvoltarea și modernizarea proceselor de fabricație”, Sibiu, 17-18 noiembrie 1995, publicată în Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XX, Seria tehnică, A. Electronică, Electrotehnică și Știința calculatoarelor, ISSN 1221-4930.
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1995
	Pagini	129-134

39	Titlul lucrării	Grounding Systems-a Present Day Approach.
	Autori	Vințan, M., <u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XXXII, Technical series, A. Electrical Engineering and Electronics, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	25-28

40	Titlul lucrării	The Recurrence Method for m-Phased Loads Unbalanced Classes Number Calculation.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XXXII, Technical series, A. Electrical Engineering and Electronics, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	29-30

41	Titlul lucrării	Methods for the Discreet Unbalanced Loads Number Calculation.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XXXII, Technical series, A. Electrical Engineering and Electronics, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	31-32

42	Titlul lucrării	The Algebraic Characterisation of the Discreet Unbalanced Loads.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XXXII , Technical series, A. Electrical Engineering and Electronics, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	33-34

43	Titlul lucrării	Energetical Aspects Concerning the Unbalanced Loads Feeding.
	Autori	<u>Popa, V.M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. XXXII , Technical series, A. Electrical Engineering and Electronics, ISSN 1221-4930
	Locul și anul publicării	Sibiu, 1999
	Pagini	35-38

44	Titlul lucrării	Considerații privind alimentarea receptorilor dezechilibrați.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Universității “Petru Maior”, Târgu Mureș, 27-28 octombrie 2000, Volumul 7, Electroenergetică, ISBN 973-8084-19-9
	Locul și anul publicării	Târgu Mureș, 2000
	Pagini	191-196

45	Titlul lucrării	Aspecte algebrice privind receptoare dezechilibrate m-fazate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Universității “Petru Maior”, Târgu Mureș, 27-28 octombrie 2000, Volumul 7, Electroenergetică, ISBN 973-8084-19-9
	Locul și anul publicării	Târgu Mureș, 2000
	Pagini	197-200

46	Titlul lucrării	Metode pentru analiza claselor de dezechilibru ale receptoarelor m-fazate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Academiei Forțelor Terestre “Nicolae Bălcescu”, TEHNOMIL 2001, Sibiu, 27 aprilie 2001, Volum, Electronică și Electrotehnică, ISBN 973-8088-48-8
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Pagini	103-106
47	Titlul lucrării	Metodă recursivă pentru determinarea numărului receptoarelor dezechilibrate discrete.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Sesiunea de comunicări științifice a Academiei Forțelor Terestre “Nicolae Bălcescu”, TEHNOMIL 2001, Sibiu, 27 aprilie 2001, Volum, Electronică și Electrotehnică, ISBN 973-8088-48-8
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2001
	Pagini	107-110
48	Titlul lucrării	Program de calculator pentru analiza structurii receptoarelor dezechilibrate discrete.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările primei Conferințe tehnico-științifice “Profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 8-9 iunie 2001, Volumul Tehnică și Inginerie, ISBN 973-8254-07-8
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2001
	Pagini	121-126
49	Titlul lucrării	The Complex Analysis of the Real Unbalanced Load.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	www.roger-univ.ro, Publicații; Analele Universității Româno-Germane din Sibiu; Secțiunea Tehnică
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2002
	Pagini	

50	Titlul lucrării	Studiul energetic al receptorului dezechilibrat real.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Lucrările celei de A Doua Conferințe Naționale „Profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 31 mai; 1-2 iunie 2002, Volumul Știință și Inginerie (Vol. I), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8130-83-2
	Locul și anul publicării	Sebeș, 2002
	Pagini	69-74
51	Titlul lucrării	The Newton Type Polynomials Method for the Discreet Unbalanced Loads Classes Analysis.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	www.roger-univ.ro, Publicații; Analele Universitații Româno-Germane din Sibiu; Secțiunea Tehnică
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2003
	Pagini	
52	Titlul lucrării	Studiul receptorului trifazat cu coeficienți de dezechilibru reali.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A treia sesiune anuală de comunicări științifice a cadrelor didactice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 30 aprilie 2004, Volum 2; ISBN 973-7998-11-1
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2004
	Pagini	101-111
53	Titlul lucrării	Factor global de nesimetrie pentru sisteme trifazate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Seminarul Științific Național “Electrotehnologii și Mediul ambiant”, Sibiu, 5-6 noiembrie 2004, Revista „Energetica”, nr. 12/2004, ISSN 1453-2360
	Locul și anul publicării	București, 2004
	Pagini	544-549
54	Titlul lucrării	Matematica și Bazele electrotehnicii.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>

	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Revista „Educația matematică”, editată de Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu și Societatea de Științe Matematice din România, Volumul 1, nr. 1, ISSN 1583-9826
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2005
	Pagini	67-76
55	Titlul lucrării	Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2005
	Pagini	199-204
56	Titlul lucrării	Aranjamente generalizate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Revista „Educația matematică”, editată de Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu și Societatea de Științe Matematice din România, Volumul 1, nr. 2, ISSN 1583-9826
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2005
	Pagini	49-58
57	Titlul lucrării	Combinări generalizate.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Revista „Educația matematică”, editată de Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu și Societatea de Științe Matematice din România, Volumul 2, nr. 1-2, ISSN 1583-9826
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2006
	Pagini	63-72
58	Titlul lucrării	Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	A VII-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19 aprilie 2007, Extras, ISBN 978-973-7998-32-3 și CD al sesiunii.
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2007
	Pagini	263-269

59	Titlul lucrării	Numărarea soluțiilor admisibile ale problemei transporturilor în numere întregi.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Revista „Educația matematică”, editată de Universitatea „Lucian Blaga” Sibiu și Societatea de Științe Matematice din România, Volumul 3, nr. 1-2, ISSN 1583-9826
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2007
	Pagini	3-7

60	Titlul lucrării	Generalized Impedances and Unbalanced Loads.
	Autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Titlul și numărul publicației în care a apărut	Acta Universitatis Cibiniensis, vol. LXI , Technical series, ISSN 1583-7149
	Locul și anul publicării	Sibiu, 2010
	Pagini	47-50

E. Invenții, inovații

1	Denumire	Relevu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la întreruperea unei faze de alimentare.
	Autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.,</u> Modran, L.
	Titular	Institutul de Învățământ Superior Sibiu
	Nr. brevet	Brevet de invenție 87118, eliberat de Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci
	Data eliberării	19.03.1985

2	Denumire	Microgenerator sincron monofazat excitat cu magnet permanent (inovație).
	Autori	Diaconescu, C., Modran, L., <u>Popa, V.M.</u>
	Titular	Institutul de Subingineri Sibiu
	Nr. brevet	Certificat de inovator 717, eliberat de Ministerul Educației și Învățământului
	Data eliberării	21.12.1987

3	Denumire	Cuplaj-frână electromagnetic.
	Autori	Roșca, P., Modran, L., <u>Popa, V.M.,</u> Diaconescu, C.
	Titular	Roșca, P., Modran, L., <u>Popa, V.M.,</u> Diaconescu, C

Nr. brevet	Brevet de invenție 108833, eliberat de Oficiul de Stat pentru Invenții și Mărci
Data eliberării	30.08.1994

F. Contracte de cercetare științifică

1	Denumire	Studiul ambalării prafurilor alimentare, posibilități de ambalare mecanizată.
	Responsabil contract și autori	<u>Popa, V. M.</u> , Cruciat, N.
	Beneficiar	Contract de cercetare-proiectare-dezvoltare realizat prin Centrul de Organizare, Calcul și Perfecționarea Cadrelor din Industria Alimentară (COCPICIA) București, beneficiar întreprinderea "Victoria" Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 3/1974

2	Denumire	Informarea documentară a cadrelor tehnice în întreprindere.
	Responsabil contract și autori	<u>Popa, V. M.</u> , Boroș, H.
	Beneficiar	Contract de cercetare științifică, beneficiar Centrul de Organizare, Calcul și Perfecționarea Cadrelor din Industria Alimentară (COCPICIA) București
	Număr contract / an	Nr. 1/1977

3	Denumire	Analiza sistemului de ventilație la sala cuptoarelor, înlocuirea ventilației artificiale cu ventilația naturală.
	Responsabil contract și autori	<u>Popa, V. M.</u> , Togan, A., Bischin, G.
	Beneficiar	Contract de cercetare-proiectare-dezvoltare realizat prin Centrul de Organizare, Calcul și Perfecționarea Cadrelor din Industria Alimentară (COCPICIA) București, beneficiar întreprinderea "Victoria" Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 2/1977

4	Denumire	Studiul posibilităților de economisire severă a energiei electrice și a combustibililor la toate utilajele tehnologice de la întreprinderea "Victoria" Sibiu.
	Responsabil contract și autori	<u>Popa, V. M.</u>
	Beneficiar	Contract de cercetare tehnologică, beneficiar întreprinderea "Victoria" Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 5/1977

5	Denumire	Optimizarea combustiei la cele 18 cuptoare tehnologice din întreprindere.
	Responsabil contract și autori	Popa, V. M. , Togan, A., Bischin, G.
	Beneficiar	Contract de cercetare științifică și tehnologică, beneficiar întreprinderea "Victoria" Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 4/1978
6	Denumire	Noi posibilități de economisire a energiei și gazului metan în întreprinderea "Victoria" Sibiu.
	Responsabil contract și autori	Popa, V. M. , Togan, A., Bischin, G., Dan, D.
	Beneficiar	Contract de cercetare tehnologică, beneficiar întreprinderea "Victoria" Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 2/1979
7	Denumire	Studiu privind organizarea și raționalizarea consumului de energie electrică și frigorifică la întreprinderea de industrializarea laptelui Sibiu, unitatea Mediaș.
	Responsabil contract și autori	Comșia, E., Popa, V. M. , Diaconescu, C. ș.a.
	Beneficiar	Contract de cercetare-proiectare realizat prin Cabinetul de Organizare Economico-Socială al Consiliului Județean Sibiu, beneficiar Întreprinderea de industrializarea laptelui Sibiu, unitatea Mediaș
	Număr contract / an	Nr. 7/1981
8	Denumire	Bilanț energetic al Institutului de Învățământ Superior Sibiu.
	Responsabil contract și autori	Roșca, P., Popa, V. M. , Diaconescu, C.
	Beneficiar	Convenție de cercetare-proiectare, beneficiar Institutul de Învățământ Superior Sibiu, Direcția Economică
	Număr contract / an	Nr. 4/1982
9	Denumire	Instalație pentru încercarea motoarelor electrice.
	Responsabil contract și autori	Roșca, P., Popa, V. M. , Diaconescu, C.
	Beneficiar	Convenție de cercetare-proiectare, beneficiar Oficiul Național pentru Mijloace de Învățământ (OCMI), București
	Număr contract / an	Nr. 9/1983

10	Denumire	Instalație și tehnologie de debavurare termică.
	Responsabil contract și autori	Ștețiu, G., <u>Popa, V.M.</u> , ș.a.
	Beneficiar	Contract de cercetare- proiectare, beneficiar I.C.T.C.M. București
	Număr contract / an	Nr. 8/1983-1984
11	Denumire	Cercetări referitoare la proiectarea traductoarelor și elaborarea unei tehnologii de măsurare cu ajutorul acestor traductoare a energiei de percuție la ciocanul pneumatic P-125.
	Responsabil contract și autori	Sîrbu, N., <u>Popa, V.M.</u> , ș. a.
	Beneficiar	Contract de cercetare-proiectare, beneficiar întreprinderea Independența Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 2/1983
12	Denumire	Proiectarea și realizarea unor standuri în vederea îmbunătățirii parametrilor funcționali ai distribuitorilor hidraulice de la întreprinderea Balanța Sibiu.
	Responsabil contract și autori	Cernat, C., <u>Popa, V.M.</u> , ș.a.
	Beneficiar	Contract de cercetare-proiectare, beneficiar întreprinderea Balanța Sibiu
	Număr contract / an	Nr. 6/1986
13	Denumire	Proiectarea produsului “Dispozitiv de protecție antibifazică” în vederea asimilării în fabricație.
	Responsabil contract și autori	Roșca, P., Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u>
	Beneficiar	Contract de cercetare științifică, beneficiar Întreprinderea de Relee Mediaș
	Număr contract / an	Nr.4/1989
14	Denumire	Cercetări privind realizarea unui sistem de achiziție și procesare de date pentru optimizarea consumurilor energetice. Faza I: Cercetări privind identificarea metodelor de modelare a proceselor electrice și de procesare numerică a semnalelor.
	Responsabil contract și autori	Diaconescu, C., <u>Popa, V.M.</u> ș.a.
	Beneficiar	Contract de cercetare-dezvoltare-proiectare, beneficiar Ministerul Cercetării și Tehnologiei
	Număr contract / an	Nr. 660B/1994

BIBLIOGRAFIE

- [A1] Abuelma'atti, M.T. - *Simple method for calculating Fourier coefficients of experimentally obtained waveforms*; IEE Proc. - Sci.Meas.Technol., Vol.141, No.3, May 1994, pp.177-178
- [A2] Akherraz, M. - *Pspice - Assisted Dynamic Modeling and Simulation of Induction Motor Drives*; 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, May 18-21, 1997, pp. MB1, 8.1-8.3
- [A3] Akpinar, K., Pillay, P., Richards, G.G. - *Induction motor drive behavior during unbalanced faults*; Electric Power Systems Research, Vol.36, No.2, February 1996, pp. 131-137
- [A4] Albu, T., Ion, I.D. - *Itinerar în algebra superioară*, Editura All, București, 1997
- [A5] Amin, B. - *Contribution to iron-loss evaluation in electrical machines*; *European Transactions on Electrical Power Engineering*, Vol.5, No.5, Sep.-Oct. 1995, pp.325-332
- [A6] Amin, B. - *Slot - Based Equations and General Equivalent Circuit in Induction Motor-Analysis and Control*; ETEP, Vol.5, No.6, November/December 1995, pp.375-382
- [A7] Arkhangelskii, N.L., Kurnyshev, B.S., Zakharov, P.A. - *A tensor approach to the electromagnetic analysis of an induction motor*; *Electrical Technology, Selected Translations from Elektrichestvo*, No.1, 1995, pp.75-83
- [B1] Benamrouche, N., Haddad, S., Bousbaine, A., Low, W.F.- *Determination of iron and stray load losses in induction motors using a thermometric method*; *Electric Machines and Power Systems*, Vol.26, No.1, January 1998, pp.3-12

- [B2] Benes, J. - *Sisteme cibernetice cu organizare automată*, Editura Tehnică, București, 1970
- [B3] Bercovici, M., Arie, A., Tudose, M. - *Aspecte privind aplicarea teoriei componentelor simetrice în analiza regimurilor nesimetrice ale rețelelor electrice*; Buletinul Institutului Politehnic București, tomul XXIX, numărul 4, iulie-august 1967, pag.101-131
- [B4] Berndt, M.M., Schmitz, N.L. - *Derating of Polyphase Induction Motors Operated with Unbalanced Line Voltages*; IEEE Trans. Power App. Syst., February 1963, pp.680-686
- [B5] Blasko, V., Kaura, V. - *A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, No.1, jan.1997, pp.116-123
- [B6] Bogoevici, N., Toader, D. - *Utilizarea fazorilor de nesimetrie în analiza rețelelor electrice trifazate nesimetrice și dezechilibrate*; Energetica, Vol.41., nr.4-B, 1993, pag.29-34
- [B7] Bonacina, G., Salvetti, M., Zola, M. - *Structural testing of electromechanical equipment - Mathematical modeling and experimentation*; A.E.I. Automazione Energia Informazione, Vol.85, No.3, march 1998
- [B8] Bose, B.K., Patel, N.R. - *Quasi-fuzzy estimation of stator resistance of induction motor*, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.13, no.3, May 1998, pp.401-409
- [B9] Boys, J.T. - *Theoretical Spectra for Narrow-Band Random PWM Waveforms*; IEE Proceedings - B, Electric Power Applications, Vol.140, No.6, November 1993
- [B10] Brice, C.W., Dougal, R.A., Hudgins, J.K. - *Review of technologies for current-limiting low-voltage circuit breakers*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, no.5, September-October 1996, pp.1005-1010

- [B11] Brittain, J.E.- *Charles L.G. Fortescue and the method of symmetrical components*, Proceeding of the IEEE, Vol.86, no.5, May 1998, pp.1020-1025
- [B12] Bromilow, M. - *Computer algebra and applied mathematics*; IEE Review, Vol.43, No.5, sept.1997, pp.259-267
- [B13] Busch, R. – *About the concept of consumed life of electrical machine windings and its application*, European Transaction on Electrical Power, Vol.8, no.2, March-April 1998, pp.105-110
- [C1] Caramia, P., Carpinelli, G., Gagliari, F., Verde, P. - *Analysis and Design of a Combined System of Shunt Passive and Active Filters*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.2, Mar.-Apr. 1994
- [C2] Castello, R., Montecchi, F., Rezzi, F., Baschiroto, A. - *Low - voltage analog filters*; IEEE Transactions on Circuits and Systems I, Fundamental Theory and Applications, Vol.42, No.11, November 1995, pp.827-840
- [C3] Cavallini, A., Loggini, M., Montanari, G.C. - *Comparison of Approximate Methods for Estimate Harmonic Currents Injected by AC/DC Converters*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.41, No.2, april 1994, pp.256-262
- [C4] Cerovsky, Z., Seinsch, H.O. - *Time Dependence and Symmetrical Properties of Rotor - Currents of Induction Machines Fed from U-Converters with Block - Waveform*; Archiv fur Elektrotechnik, Vol.77, No.2, January 1994
- [C5] Cherry, J.A., Snelgrove, W.M. – *On the characterization and reduction of distortion in bandpass filters*, IEEE Transactions on Circuits and System I, Vol.45, no.5, May 1998, pp.523-537
- [C6] Ciupa, R.V., Croicu, A.M. – *The Optimization of an Electromagnet by the Gradient Method*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 75-77
- [C7] Ciupa, R.V. – *Regimuri tranzitorii în sisteme electrice*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996

- [C8] Ciupa, R.V., Croicu, A.M. – *Optimization in Electrotechnics through the Descending Methods. Examples; Proceedings of the 1st International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits*, CADEMEC 97, 5-7 August 1997, Cluj-Napoca, Romania, Volume, pag. 102-107.
- [C9] Ciupa, R.V. , Topa, V. – *The Theory of Electric Circuits*, Casa Cărții de Știință, Cluj-Napoca, 1998
- [C10] Ciupa, R.V. – *Regimuri tranzitorii în sisteme electrice*, ediția a-II-a, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1998
- [C11] Clarke, E. - *Analiza circuitelor sistemelor electroenergetice* (traducere selectivă din limba engleză -S.U.A.), Editura Tehnică, București, 1973
- [C12] Coloși, T., Feștilă, R., Nascu, I., Raica, P. - *Modelling and numerical simulation alternative of induction motors in d-q axes*; Proceedings, First International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Control Systems ELECTROMOTION'95, Cluj-Napoca, 25-26 May 1995, Volume, pp.116-119
- [C13] Cristaldi, L., Ferrero, A. - *Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: An algebraic approach*; European Transaction on Electrical Power, Vol.6, No.5, sep.-oct. 1996, pp.305-309
- [C14] Czarnecki, L.S., Tan, O.T. - *Evaluation and Reduction of Harmonic Distortion Caused by Solid State Voltage Controllers of Induction Motors*; IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.9, No.3, September 1994, pp.528-534
- [C15] Czarnecki, L.S. - *Power theory of electrical circuits with quasi-periodic waveforms of voltages and currents*; European Transaction on Electrical Power, Vol.6, No.5, sep.-oct. 1996, pp.321-328
- [C16] Czarnecki, L.S. - *Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents*; Electrical Engineering, Vol.80, No.6, december 1997, pp.359-368
- [D1] De Jong, H.C.J. - *Skew Leakage in Induction Machines*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.1, January-February 1994

- [D2] De Jong, H.C.J. - *Scale aspects of electrical machine inductances*; *International Journal of Electrical Engineering Education*, Vol.32, No.2, April 1995, pp.179-185
- [D3] Dems, M., Komez, K., Wiak, S. - *Computation of rotor winding power losses in squirrel-cage induction motor*; COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.4, December 1995, pp.89-93
- [D4] Dessouky, Y.G., Williams, B.W., Fletcher, J.E. - *Cooling enhancement of electric motors*, IEE Proceedings Electric Power Applications, Vol.145, No.1, January 1998, pp.57-60
- [D5] De Weerd, R., Hameyer, K., Belmans, R. - *End winding leakage calculation of a squirrel-cage induction motor for different load conditions*; COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.4, December 1995, pp.85-89
- [D6] Ding, K.Q., Zhou, Z.G., Liu, C.T. - *Latin hypercube sampling used in the calculation of the fracture probability*, Reliability Engineering & Sistem Safety, Vol.59, no.2, February 1998, pp.239-242
- [D7] Dogaru, O., Tevy, I., Udriste, C. - *Extrema constrained by a family of curves and local extrema*, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol.97, no.3, June 1998, pp.605-622
- [D8] Dordea, T. - *Mașini electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1970
- [D9] Dragomir, A., Laziun, V. - *Teorie combinatorie. Elemente de combinatorică clasică și generalizată*, Editura Universității din Timișoara, 1974
- [D10] Dragomir, A., Dragomir, P. - *Structuri algebrice*, Editura Facla, Timișoara, 1981
- [D11] Drăgănescu, O.G. - *Încercările mașinilor electrice rotative*, Editura Tehnică, București, 1987

- [D12] Dupre, L.R., Vankeer, R., Melkebeek, J.A.A. – *A computational model for the iron losses in rotating electrical machines*; International Journal of Engineering Science, Vol.36, no.7-8, May-June 1998, pp. 699-710
- [D13] Duric, M., Radojevic, Z., Skokljev, I., Terzija, V. - *A simple algorithm for the symmetrical components relaying and monitoring*; Electrical Engineering, Vol.79, 1996
- [E1] Eldhemy, S.A., Mohamed, A.A., Shokralla, S.S. - *Calculation of additional losses caused by feeding an induction motor from a nonsinusoidal supply*; International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.32, No.1, January 1995, pp.51-63
- [E2] El Din, A.S.Z., Lashine, A.E., Shokralla, S.S. - *Improvement of starting characteristic and speed control of three-phase induction motor using microprocesor*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.3, April 1998, pp.265-276
- [E3] Emanuel, A.E. - *The oscillatory nature of the power in single - and polyphase circuits*, European Transactions on Electrical Power, Vol.6, No.5, Sep.-Oct. 1996, 315-320
- [E4] Enns, M.K. – *Neutral impedances in fault analysis*; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.13, no.2, May 1998, pp.274-279
- [F1] Fabre, A., Saaid, O., Wiest, F., Boucheron, C.- *Current controlled bandpass filter based on translinear conveyors*; Electronics Letters, Vol.31, No.20, September 1995, pp.1727-1728
- [F2] Faiz, J., Sharifian, M.B.B. - *Transient behaviour of optimum - designed three-phased squirrel-cage induction motors*; European Transactions on Electrical Power, Vol.7, No.6, Nov.-Dec. 1997, pp. 415-420
- [F3] Farag, S.F., Bartheld, R.G., May, W.E. - *Electronically Enhanced Low Voltage Motor Protection and Control*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.30, No.3, May/June 1994, pp.776-784

- [F4] Fiser, R., Ferkolj, S. – *Magnetic field analysis of induction motor with rotor faults*; COMPEL The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.17, no.1-2, 1998, pp.206-211
- [F5] Fransua, A., Nicolaide, A., Trifu, G. - *Mașini electrice uzuale. Exploatare și regimuri de funcționare*, Editura Tehnică, București, 1973
- [F6] Fransua, A., Măgureanu, R. - *Mașini și acționări electrice. Elemente de execuție*, Editura Tehnică, București, 1986
- [G1] Gafford, B.N., Duesterhoeft, W.C., Mosher, C.C. - *Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages*, AIEE Transactions Power Applications Systems, June 1959, pp. 282-288
- [G2] Galan, N. - *Considerații privind teoria moderna a mașinii asincrone trifazate*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electronica, Vol.38, Nr.8, noiembrie 1990, pag.295-299
- [G3] Galan, N. - *Ecuatiile generale ale motorului asincron trifazat aplicate în regimuri nesimetrice*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica, Vol.38, Nr.8, noiembrie 1990, pag.300-305
- [G4] Ghani, S.N. - *Digital Computer Simulation of Three-Phase Induction Machine Dynamics - A Generalized Approach*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.1, January/February 1988, pp.106-114
- [G5] Gheorghiu, I.S., Fransua, A.S. - *Tratat de mașini electrice, Vol.III, Mașini asincrone*, Editura Academiei R.S.R., București, 1971
- [G6] Glazenko, A.V., Danilevich, Y.B., Karymov, A.A. - *Digital modelling of thermal and mechanical processes in electrical machines*; Electrical Technology, Selected Translations from Elektrichestvo, No.4, 1995, pp.123-134
- [G7] Gluskin, E. - *On the Calculation of Ripple Factor*; ETEP, Vol.5, No.6, November/December 1995, pp.413-414

- [G8] Goode, P.V., Chow, M. - *Using a Neuronal Fuzzy System to Extract Heuristic Knowledge of Incipient Faults in Induction Motors: Part I - Methodology*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.2, April 1995, pp.131-138
- [G9] Goode, P.V., Chow, M. - *Using a Neuronal / Fuzzy System to Extract Heuristic Knowledge of Incipient Faults in Induction Motors: Part II - Application*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.42, No.2, April 1995, pp.139-146
- [G10] Green, T.C., Taha, M.H., Rahim, A.B.D., Williams, B.W. - *Three-phase step-down reversible AC-DC power converter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, No.2, March 1997, pp.319-324
- [G11] Grimes, C.A., Grimes, D.M. - *Complex power in circuits with multiple reactive elements*, Electric Machines and Power Systems, Vol.25, No.9, Nov. 1997, pp.955-966
- [G12] Grotzbach, M., Xu, J. - *Line-Side Behaviour of 3-Phase Diode Rectifiers with Reactance Smoothing*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.1, Jan-Feb. 1994
- [H1] Holtz, J. - *The representation of AC machine dynamics by complex signal flow graphs*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 42, No. 3, June 1995, pp. 263 - 272
- [H2] Ho, S.L., Fu, W.N. - *Review and future application of finite element methods in induction motors*; Electric Machines and Power Systems, Vol. 26, No. 2, February - March 1998, pp.111 - 126
- [I1] Ionescu, T.G., Coculescu, S., Neagoe, M., Pavel, E. - *Regimul nesimetric generator de consumuri proprii tehnologice suplimentare în rețelele electrice*; Energetica, Vol.XXXVI, Nr.9, septembrie 1988, pag.404 - 411
- [I2] Ionescu, T.G., Golovanov, C., Manolescu, P., Oprea, R. - *Metode de determinare a coeficientului de nesimetrie inversă de tensiune*; Energetica, Vol. XXXVIII, Nr. 8 - 9, august - septembrie 1990, pag. 371 - 376

- [I3] Ion, I.D., Niță, C., Năstăsescu, C. - *Complemente de algebră*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1984
- [J1] Joaquim, M. B. – *A bandpass active filter for Fourier analysis laboratory*; International Journal of Electrical Engineering Education, Vol. 32, No.4, October 1995, pp. 350 – 354
- [K1] Karacal, S.C. – *A novel approach to simulation modeling*, Computers & Industrial Engineering, Vol.34, no.3, July 1998, pp.573-588
- [K2] Kaufmann, A., Précigout, M. - *Elemente de teoria mulțimilor și algebră modernă*, Vol I, Editura Tehnică, București, 1972
- [K3] Kaufmann, A., Précigout, M. - *Elemente de teoria mulțimilor și algebră modernă*, Vol II, Editura Tehnică, București, 1973
- [K4] Keerthipala, W. W. L., Wai, C. T., Huisheng, W. - *Neuronal network based classifier for power system protection*; Electric Power Systems, Vol. 42, No. 2, august 1997, pp. 109 – 114
- [K5] Kellerer, H., Kotov, V., Speranza, M.C., Tuza, Z. – *Semi on-line algorithms for the partition problem*, Operations Research Letters, Vol.21, no.5, December 1997, pp.235-242
- [K6] Kluszczynski, K., Miksiewicz, R. - *Synchronous parasitic torques in asymmetrically fed three - phase squirrel cage motor*; Electric Machines and Power Systems, Vol. 24, No. 1, January - February 1996, pp. 9- 20
- [K7] Knopp, M., Kohle, S. - *Time - varying loads in electric power systems; Power input, equivalent circuit elements, and disturbances*, European Transactions on Electrical Power, Vol. 7, No.1, January - February 1997, pp. 5 - 12
- [K8] Knuth, D.E. - *Tratat de programarea calculatoarelor, vol I - Algoritmi fundamentali*, Editura Tehnică, București, 1974
- [K9] Knuth, D.E. - *Tratat de programarea calculatoarelor, vol II - Sortare și căutare*, Editura Tehnică, București, 1976

- [K10] Knuth, D.E. - *Tratat de programarea calculatoarelor, vol III - Algoritmi seminumerici*, Editura Tehnică, București, 1983
- [L1] Labuntsov, V. A., Daizhun, C. - *Three - phase rectifier with a capacitance filter and an improved waveform for the current drawn from the network*; *Electrichestvo*, No. 2, 1993
- [L2] Lawrance, W. B. , Mielczarski, W. - *Harmonic Current Reduction in a Three - Phase Diode Bridge Rectifier*; *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 39, No. 6, December 1992, pp. 571 - 576
- [L3] Lawrance, W. , Mielczarski, W., Michalik, G. - *Application of a new scheme for harmonic current reduction in three - phase bridge rectifier systems*; *Electric Power Research*, Vol. 36, No. 2, February 1996, pp. 123 – 130
- [L4] Lee, C.Y. – *Temperature-based optimal test sequence for determining the equivalent circuit parameters of a three-phase induction motor*, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, Vol.21, no.4, July 1998, pp.459-466
- [L5] Levi, E., Krzeminski, Z. - *Main Flux - Saturation Modelling in d-q Axis Models of Induction Machines Using Mixed Current - Flux State - Space Models*; *ETEP*, Vol. 6, No. 3, May - June 1996, pp.207 – 215
- [L6] Lian, J.A. – *Orthogonality criteria for multiscaling functions*, *Applied and Computational Harmonic Analysis*, Vol.5, no.3, July 1998, pp.277-311
- [L7] Lim, T.J. – *A stochastic regime switching model for the failure process of a repairable system*, *Reliability Engineering & System Safety*, Vol.59, no.2, February 1998, pp.225-238
- [L8] Lin, B.R., Hoft, R.G. - *Analysis of power converter control using neural network and rule - based methods*; *Electric Machines and Power Systems*, Vol. 24, No. 7, October - November 1996, pp. 695 – 720
- [L9] Lin, K.P., Lin, M.H., Lin, T.P. – *An advanced computer code for single-tuned harmonic filter design*, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.34, no.4, July-August 1998, pp.640-648

- [L10] Loggini, M., Montanari, G. C., Cavallini, A. - *Generation of Uncharacteristic Harmonics in Electrical Plants with AC/DC Converters*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No. 3, May - June 1994
- [M1] Maier, R. - *Protection of Squirrel-Cage Induction Motor Utilizing Instantaneous Power and Phase Information*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.28, No.2, March/April 1992, pp.376-380
- [M2] Man, E., Rizzo, R., Micu, D., Munteanu, D. - *A Simultaneous Treatment of Symmetrization and Power Factor Improvement in Three-Phased Networks*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 50- 52.
- [M3] Man, E., Pop, E. - *Impedance Adaptation and Negative Resistance Synthesis, using Controlled Sources*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 37, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1996, pag. 21 - 24
- [M4] Man, E. - *Circuite electrice cu surse comandate*, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, 1996
- [M5] Man, E. - *A Generalization of the Maximum Power Transfer Theorem In DC Circuits*; Proceedings of the 1st International Workshop CAD in Electromagnetism and Electrical Circuits CADEMEC 97, CLuj-Napoca, 5-7 August 1997, Volume, pp.91-93
- [M6] Man, E., Hintea, S. - *Analiza circuitelor electrice prin modelare cu surse comandate*, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 1997
- [M7] Mattavelli, P., Tenti, P. - *Load and line identification in multi-phase systems: A compensation-oriented approach*; European Transaction on Electrical Power, Vol.6, No.6, November-December 1996, pp.373-379
- [M8] Mbamalu, G.A.N., El Hawary, M.E., El Hawary, F. - *Pseudo inverse based probabilistic power flow approach*; Electric Machines and Power Systems, Vol.23, No.2, March-April 1995, pp.107-119

- [M9] Micu, D., Oniga, A. - *Componente simetrice pentru sisteme polifazate*; Conferința Națională de Matematică Aplicată și Mecanică, Cluj-Napoca, 20-23 octombrie 1988
- [M10] Micu, D. - *Basis of Electrotechnics. The theory of electric circuits*, Technical University of Cluj-Napoca, 1993.
- [M11] Micu, D., Rizzo, R., Man, E. - *A Study on Polyphase Machine Fed by Non Symmetrical Voltage System*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 53 - 57
- [M12] Micu, D., Rizzo, R., Man, E. - *Polyphase Machine Fed by Non Symmetrical System. Fault Detection in Case of Bar Breakage in Three-Phase Motors*, Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 36, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1995, pag. 58 - 61
- [M13] Micu, D., Micu, A., Vlad, S. - *A Dissipative Singlephase-Threephase Convertor*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol. 37, Nr. 1, Cluj-Napoca, 1996, pag. 57 - 60
- [M14] Mielczarski, W., Lawrance, W.B., Nowaki, R., Holmes, D.G. - *Harmonic Current Reduction in Three-Phase Bridge-Rectifier Circuits Using Controlled Current Injection*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.44, No.5, October 1997, pp.604-611
- [M15] Mihalache, M. – *Determinarea parametrilor interni ai motorului asincron utilizând datele de catalog: Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica*, vol. 34, nr. 6, august 1986, pag. 261-264.
- [M16] Milenko, D. B. - *Determining symmetric components by a method of four samples (power system analysis)*, Electrichestvo, No. 9, September 1992, pp. 50-51
- [M17] Mocanu, C.I. - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1979
- [M18] Modran, L., **Popa, V.M.**, Crăciunaș, G., Spătar, O. – *Electrotehnică și electronică*, Editura Meteor, Sibiu, 1998

- [M19] Moshchinskii, Y. A., Osin, I. L. - *Determination of three-phase induction motor parameters from an asymmetric supply test*, *Electrichestvo*, Nr. 1, 1993
- [N1] Nakagawa, S., Niki, N., Hashiguchi, H. – *Computer algebra application to the distribution of sample correlation coefficient*, *Mathematics and Computers in Simulation*, Vol.45, no.1-2, January 1998, pp.23-32
- [N2] Năstăsescu, C., Niță, C., Vraciu, C. - *Bazele algebrei*, Vol.I, Editura Academiei, București, 1986
- [N3] Neamțu, V. - *Circuite electrice în regim permanent sinusoidal și nesinusoidal - culegere de probleme*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [N4] Nedelcu, V.N. - *Regimurile de funcționare ale mașinilor de curent alternativ*, Editura Tehnică, București, 1968
- [N5] Nedelcu, V.N. - *Teoria conversiei electromecanice*, Editura Tehnică, București, 1978
- [N6] Nilsson, W.J. - *Electric Circuits*, Fourth Edition, Addison Wesley Co., Iowa State University, 1993
- [O1] Oberretl, K. - *Tooth breakage and tooth forces in asynchronous motors*; *Electrical Engineering*, Vol.80, No.5, October 1997, pp.309-324
- [O2] Ostovic, V. - *Computer-aided Analysis of Electric Machines*, Prentice Hall, New York, 1994
- [P1] Palco, S. - *Structural optimisation of an induction motor using a genetic algorithm and a finite element*; *Acta Polytechnica Scandinavica*, Electrical Engineering Series, No.84, 1996, pp.2-99
- [P2] Pană, T. - *MATLAB în sisteme de acționare electrică*, Editura Mediamira, Cluj-Napoca, 1996
- [P3] Pană, T. - *MATLAB Application Toolbox, Electrical Drives - Induction Motor*, Mediamira Science Publisher, Cluj-Napoca, 1997

- [P4] Pandurangavittal, K., Fakmddin, D.B., Rao, I. R. , Parthasarathy, K. - *Microcontroller based three-phase induction motor protection relay with operator selectable thermal I-T curve feature*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.1, January 1998, pp.13-26
- [P5] Pavel, E., Ionescu, T.G. - *Efectele consumatorilor nesimetrice asupra rețelilor electrice*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.10, octombrie 1986, pag.457-459
- [P6] Pavel, E. - *Receptoare trifazate dezechilibrate. Caracteristic și particularități de funcționare în regimuri stabilizate*; Energetica, Vol.XXXVI, Nr.6, iunie 1988, pag.241-249
- [P7] Pavel, E. - *Considerații privind receptoarele electrice trifazate dezechilibrate*, ENERGA, Vol.VII, Editura Tehnică, București, 1989, pag.194-220
- [P8] Pavel, E. - *Noi aspecte ale teoriei receptoarelor trifazate statice dezechilibrate*; Energetica, Vol.37, Nr.11, noiembrie 1989, pag.481-492
- [P9] Perahia, J., Nayar, C.V. - *Analysis of a series - delta connected tandem induction motor*; Electric Machines and Power Systems, Vol.23, No.2, March-April 1995, pp.221-230
- [P10] Pillay, P., Sabur, S.M.A., Haq, M.M. - *A model for induction motor aggregation for power system studies*; Electric Power Systems, Vol.42, No.3, September 1997, pp.225-228
- [P11] Pillay, P., Nolan, R., Haque, T. - *Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.33, No.5, September-October 1997, pp.1273-1282
- [P12] Pinto, J.A.D., Coimbra, A.P., Antunes, C.L., Fernandez, X.M.L., Donsion, M.P. - *Influence of the neutral in the thermal performance of a three-phase induction motor under unbalanced power supply using the finite element approach*, COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.17, no.1-2, 1998, pp.378-382

- [P13] **Popa, V.M.** - *Unele generalizări în combinatorică*; Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Vol.III, Sibiu, 1980, pag.33-39
- [P14] **Popa, V.M.**, Diaconescu, C. - *Noi cercetări privind protecția motoarelor asincrone*; Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Vol.IV, 1981, pag.244-247
- [P15] **Popa, V.M.**, *Asupra numărării bijecțiilor între două mulțimi multiple*; Gazeta Matematică - Perfecționare metodică și metodologică în matematică și informatică, Vol.VII, Nr.2, București, 1986, pag.78-81
- [P16] **Popa, V.M.** - *Asupra unei probleme de algebră*; Astra Matematică, Vol.1, Nr.1, Sibiu, 1990, pag.29-31
- [P17] **Popa, V.M.** - *On a question of linear programming*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.X (1), Sibiu, 1993, pag.65-67
- [P18] **Popa, V.M.** - *Unele aspecte privind caracterizarea circuitelor trifazate dezechilibrate*; Referat de doctorat nr.1, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, octombrie 1993
- [P19] **Popa, V.M.** - *Aplicații și încercări experimentale privind comportarea circuitelor trifazate în regimuri nesimetrice*; Referat de doctorat nr.2, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, octombrie 1994
- [P20] **Popa, V.M.** - *On a classification of the three-phase loads*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XIV (2), Sibiu, 1995, pag.87-90
- [P21] **Popa, V.M.** - *A new approach to be characterized the unbalanced three-phase loads*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XIV (2), Sibiu, 1995, pag.91-93
- [P22] **Popa, V.M.**, Buduriși, C., Garcia Moreno, E. - *Some Aspects about the Analysis of a Three-Phase Non-Symmetrical Alimentated Bridge with Thyristors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.42-44
- [P23] **Popa, V.M.** - *A Mathematical Model for Polyphasic Loads Unbalanced Classes Analysis*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.91-92

- [P24] **Popa, V.M.** - *On an Analysis for the Unbalanced Loads*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.36, Nr.1, Cluj-Napoca, 1995, pag.93-94
- [P25] **Popa, V.M.** - *Considerații privind comportarea circuitelor electrice în regimuri nesimetrice de funcționare*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XX, Sibiu, 1995, pag.129-134
- [P26] **Popa, V.M.** - *Considerations Upon a Relay of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.37, No.1, Cluj-Napoca, 1996, pag.61-62
- [P27] **Popa, V.M.**, Roșca, P. - *Electrotehnică*, Editura Universității “Lucian Blaga”, Sibiu, 1996
- [P28] **Popa, V.M.** - *Electrotehnică - îndrumar de laborator*, Editura Universității “Lucian Blaga”, Sibiu, 1996
- [P29] **Popa, V.M.** – *Aspecte energetice privind alimentarea receptorilor dezechilibrați*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P30] **Popa, V.M.** – *Caracterizarea algebrică a receptoarelor dezechilibrate discrete*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P31] **Popa, V.M.** – *Metode pentru calculul numărului receptoarelor dezechilibrate discrete*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P32] **Popa, V.M.** – *Metoda de recurență pentru calculul numărului claselor de dezechilibru ale receptoarelor m-fazate*; Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.XXVIII, Sibiu, 1998
- [P33] Popescu, D., Vraciu, C. - *Elemente de teoria grupurilor finite*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1986
- [P34] Prisăcaru, A., Cojocaru-Filipiuc, C. - *On the nonsinusoidal and unsymmetrical behaviour of three-phase asynchronous motor*; Proceedings, First International Symposium on Advanced Electromechanical Motion Control Systems ELECTROMOTION'95, Cluj-Napoca, 25-26 May 1995, Volume, pp.116-119

- [P34-a] Pyati, V.P. – *Comment on “On the geometry of parallel impedances”*, IEEE Transactions on Education, Vol.41, no.2, May 1998, pp.171-176
- [R1] Ramras, M. – *Congestion-free routings of linear complement permutations*, Siam Journal of Discrete Mathematics, Vol.11, no.3, 1998, pp.487-500
- [R2] Rankin, D.R. - *The industrial application of phase current analysis to detect rotor winding faults in squirrel cage induction motors*; Power Engineering Journal, Vol.9, No.2, April 1995, pp.77-89
- [R3] Rashid, M.H., Maswood, A.I. - *Analysis of Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.3, May/June 1988, pp.449-455
- [R4] Rashid, M.H., Maswood, A.I. - *A Novel Method of Harmonic Assessment Generated by Three-Phase AC-DC Converters Under Unbalanced Supply Conditions*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.24, No.4, July/August 1988, pp.590-597
- [R5] Rastogi, M., Mohan, N., Henze, C.P. - *Three-phase sinusoidal current rectifier with zero-current switching*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.10, No.6, November 1995, pp.753-760
- [R6] Ravezzi, L., Stoppa, D., DallaBetta, G.F. – *Current-mode A/D converter*, Electronics Letters, Vol.34, no.7, April 1998, pp.615-616
- [R7] Reljin, B., Ristic, S., Sreckovic, M. - *Analysis of some physical phenomena and processes by equivalent electrical circuits*, International Journal of Electrical Engineering Education, Vol.33, No.4, October 1996, pp.353-360
- [R8] Richter, R. - *Mașini electrice, Vol.IV, Mașini asincrone*, Editura Tehnică, București, 1960
- [R9] Riordan, J. - *An Introduction to Combinatorial Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1967
- [R10] Riordan, J. - *Combinatorial Identities*, John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1968

- [R11] Roger Folch, J., Joares, V.J.Z. - *Contribution to the transient analysis of induction motors solving the electrodynamic equations by using the finite elements method*; COMPEL, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol.14, No.4, December 1995, pp.93-97
- [R12] Roșca, P., Diaconescu, C., Modran, L, **Popa, V.M.** - *An Improved Protection Method at the Electric Drive Systems with Asynchronous Motors*; A treia Conferință Națională de Acționări Electrice, Brașov, 28-30 mai 1982, volum, pag.A135-A138
- [R13] Roșca, P., Diaconescu, C., **Popa, V.M.**, Modran, L. - *Calculul armonicii de 100Hz din tensiunea obținută prin redresarea unui sistem trifazat asimetric cu ajutorul unei punți trifazate*; Buletinul Științific al Institutului de Învățământ Superior Sibiu, Vol.VI, 1982, pag.130-134
- [R14] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *Releu cu fiabilitate ridicată pentru protecția complexă a motoarelor asincrone trifazate*; Conferința Națională de Energetică, București, 23-25 noiembrie 1983, volum secția 34, pag.34.091-34.096
- [R15] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *The Influence of Non-Symmetric States on the Functioning of the Electronic Relay RPMA-1 of Protecting Asynchronous Three-Phase Motors at the Interruption of one Phase*; A patra Conferință Națională de Acționări Electrice, Craiova, 20-21 septembrie 1984, volum, pag.C127-C130
- [R16] Roșca, P., Diaconescu, C., **Popa, V.M.**, Modran, L. - *Releu pentru protecția motoarelor asincrone trifazate la întreruperea unei faze de alimentare*; Brevet de Invenție 87118 din 19.03.1985
- [R17] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *Frână cu curenți turbionari*; Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, Vol.VII, 1985, pag.68-71

- [R18] Roșca, P., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C., Modran, L. - *Instalație pentru ridicarea caracteristicii mecanice a motoarelor electrice*; Buletinul Științific al Institutului de Subingineri Sibiu, Vol.IX, 1986, pag.370-373
- [R19] Roșca, P., Diaconescu, C., **Popa, V.M.** - *Proiectarea produsului "Dispozitiv de protecție antibifazică" în vederea asimilării în fabricație*, Contract de cercetare științifică între Institutul de Subingineri Sibiu și Intreprinderea de Relee Mediaș, 1989
- [R20] Roșca, P., Modran, L., **Popa, V.M.**, Diaconescu, C. - *Cuplaj - frână electromagnetică*, Brevet de invenție 108833 din 30.08.1996
- [R21] Rosolowski, E., Izykowski, J., Kasztenny, B., Saha, M.M. - *A new distance relaying algorithm based on complex differential equation for symmetrical components*; Electric Power Systems Research, Vol.40, No.3, March 1997, pp.175-180
- [R22] Rukgauer, A., Schiehlen, W. – *Simulation of modular dynamic systems*, Mathematics and Computers in Simulation, Vol.46, no.5-6, June 1998, pp.535-542
- [S1] Saari, J. - *Thermal modelling of high-speed induction machines*; Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.82, 1995, pp.1-82
- [S2] Șafarevici, I.R. - *Noțiunile fundamentale ale algebrei*, Editura Academiei, București, 1989
- [S3] Sakui, M., Fujita, H, Shioya, M. - *A Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Bridge Uncontrolled Rectifier with DC Filter*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.36, No.3, August 1989, pp.434-440
- [S4] Sakui, M., Fujita, H. - *Calculation of Uncharacteristic Harmonics of a Three-Phase Bridge Rectifier with DC Current Ripple*; Electrical Engineering in Japan, Vol.111, No.5, 1991, pp.127-129

- [S5] Sakui, M., Fujita, H. - *Harmonic Analysis of a Capacitor-Filtered Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with Complex Source Impedance*; IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol.39, No.1, February 1992, pp.80-81
- [S6] Sakui, M., Fujita, H. - *Calculation of harmonic currents in a three-phase convertor with unbalanced power supply conditions*; IEE Proceedings-B, Vol.139, No.5, September 1992, pp.478-484
- [S7] Sakui, M., Fujita, H. - *An Analytical Method for Calculating Harmonic Currents of a Three-Phase Diode-Bridge Rectifier with DC Filter*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.9, No.6, November 1994, pp.631-637
- [S8] Sakui, M., Minamijima, M., Amei, K., Fujita, H. - *Analytical Method for Calculating Harmonic Currents of an AC/DC Converter with AC Filters*; ETEP, Vol.6, No.2, March/April 1996, pp.97-101
- [S9] Salmon, J.C. - *Operating a three-phase diode rectifier with a low-input current distortion using a series-connected dual boost converter*; IEEE Transactions on Power Electronic, Vol.11, No.4, July 1996, pp.592-604
- [S10] Sarkar, D. - *Approximate analysis of temperature rise in a induction motor during dynamic braking*, Electric Machines and Power Systems, Vol.26, no.6, July 1998, pp.585-600
- [S11] Sasdelli, R., Menchetti, A. - *Some remarks on power theories*; European Transactions on Electrical Power Engineering, Vol.4, No.6, November-December 1994, pp.457-463
- [S12] Schoen, R.R., Habetler, T.G. - *A new method of current-based condition monitoring in induction machines operating under arbitrary load conditions*; Electric Machines and Power Systems, Vol.25, No.2, February-March 1997, pp.141-152
- [S13] Shi, K.L., Chan, T.F., Wong, Y.K. - *Modelling of the three-phase induction motor using SIMULINK*; 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, May 18-21, 1997, pp.WB3, 6.1-6.3

- [S14] Shi, S.W. - *Study of fault analysis using two vector system symmetrical components*; Electric Machines and Power Systems, Vol.26, No.2, February-March 1998, pp.155-170
- [S15] Simion, E., Mîndru, G., Gligor, T., Nicula, O. – *Bazele electrotehnicii*, Institutul Politehnic, Cluj, 1972
- [S16] Simion, E. – *Electrotehnica*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1978
- [S17] Simion, E., Maghiar, T. - *Electrotehnica*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [S18] Simion, E., Man, E., Munteanu, C. – *The Symmetrization of the Line Current's Three-Phased System Using the Symmetric Components Method*; Annual Scientific Workshop, Oradea, 29-30 May, 1992
- [S19] Simion, E., Ursu, M.F., Man, E. - *The Systematization of the Three-Phase Electric Circuit in Sinusoidal Steady State - The Tripole*, Proceedings of 4th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments OPTIM'94, Brașov, 12-14 May 1994, pp.79-83
- [S20] Simion, E., Țopa, M. - *On Symbolic Analysis for Analog Filter Design*, Proceedings of the 4th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments OPTIM'94, Brașov, 12-14 May 1994, pp.181-185
- [S21] Simion, E., Man, E., Munteanu, C. - *Contributions to the symmetrization of line current three-phase system*, Proceedings of the 4th International Conference on Optimization of Electric and Electronic Equipments, OPTIM'94, Brașov, 12-14 May 1994, pp.287-291
- [S22] Simion, E., Man, E., Ciupa, R.V., Roșca, P., Neamțu, V., **Popa, V.M.** - *Teoria circuitelor electrice*, Editura Universității Tehnice Cluj-Napoca, 1996
- [S23] Simion, E., Munteanu, C., Topa, V. – *The Numerical Analysis of the Electromagnetic Interference Phenomena in Printed Circuit Boards Using the Transmission Line Model*; Acta Electrotehnica Napocensis, Vol.37, Nr.1, Cluj-Napoca, 1996, pag.35-38

- [S24] Slemon, G.R. - *Modelling of Induction Machines for Electric Drives*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.25, No.6, November/December 1989, pp.1126-1131
- [S25] Smith, O.D. – *Generation of ground structures for 2D and 3D design domains*, Engineering Computations, Vol.15, no.4, 1998, pp.462-500
- [S26] Smolleck, H.A. - *A new look at the effects of unbalanced voltages upon synchronous and induction machines*; Electric Power Systems Research, Vol.25, 1992, pp.199-206
- [S27] Soliman, S.A, Al Kandari, A.M., El Hawary, M.E. - *Time domain estimation techniques for harmonic load models*; Electric Machines and Power Systems, Vol.25, No.8, October 1997, pp.885-896
- [S28] Sonea, P., Fransua, A., Nicolaide, A., Saal, C. - *Electrotehnică, mașini și instalații electrice*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1966
- [S29] Șora, C. - *Bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1982
- [S30] Sowaied, A., Taleb, M. - *Assessment of power converter harmonics*; Electric Machines and Power Systems, Vol.24, No.2, March 1996, pp.147-158
- [S31] Speranza, F. - *Relații și structuri*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1975
- [S32] Stănășilă, O. - *Noțiuni și tehnici de matematică discretă*, Editura Științifică și Enciclopedică, București, 1985
- [S33] Stringer, N.T., Waser, D. - *An innovative method of providing total breaker failure protection*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, No.5, September-October 1996, pp.1011-1017
- [S34] Șurianu, F.D. - *Experiment și simulare numerică a comportării motoarelor asincrone la golurile de tensiune simetrice*; Energetica, Vol.42, Nr.5-B, 1994, pag.223-226

- [T1] Terzija, V., Djuric, M. - *A numerical algorithm for direct real-time estimation of voltage phasor, frequency and its rate of change*; Electric Machines and Power Systems, Vol.24, No.4, June 1996, pp.417-428
- [T2] Timotin, A., Hortopan, V., Ifrim, A., Preda, M. - *Lecții de bazele electrotehnicii*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1970
- [T3] Țogui, L., Covrig, M., Manoliu, V. - *Determinarea cuplului electromagnetic al masinii asincrone trifazate cu înfășurări nesimetrice*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica, Vol.44, Nr.5-6, mai-iunie 1996, pag.19-21
- [T4] Țogui, L., Covrig, M., David, F. - *Modelul matematic al masinii asincrone trifazate cu înfășurare nesimetrică pe stator*; Electrotehnica, Electronica, Automatica, Electrotehnica, Vol.43, Nr.7-8, iulie-august 1995, pag.21-25
- [T5] Tomescu, I. - *Introducere în combinatorică*, Editura Tehnică, București, 1972
- [T6] Tomescu, I. - *Introduction to Combinatorics*, Collet's (Publishers) Limited, London and Wellingborough, 1975
- [T7] Tomescu, I. - *Combinatorică și teoria grafurilor*, Editura Universității din București, 1978
- [T8] Tomescu, I. - *Probleme de combinatorică și teoria grafurilor*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1981
- [T9] Tou, M., Al Haddad, K., Olivier, G., Rajagopalan, V. - *Analysis and design of single-controlled switch three-phase rectifier with unity power factor and sinusoidal input current*; IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.12, No.4, July 1997, pp.608-614
- [T10] Țugulea, A. - *Considerații privind efectele energetice în regimuri armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.3, martie 1986, pag.121-129

- [T11] Țugulea, A. - *Considerații referitoare la definirea factorului de putere pentru sistemele trifazate dezechilibrate*; Energetica, Vol.XXXIV, Nr.4, aprilie 1986, pag.164-167
- [T12] Țugulea, A., Golovanov, C. - *Efectele energetice ale regimurilor nesimetrice și deformante ale sistemelor electroenergetice. Posibilități de măsurare*; ENERG, Vol.III, Editura Tehnică, București, 1987, pag.130-162
- [V1] Vaananen, J. - *Combination of two-dimensional finite element analysis of electrical machines with circuit simulation techniques*; Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.80, 1995, pp.1-104
- [V2] Văzdăuțeanu, O. - *Cu privire la compensarea nesimetriei într-un sistem trifazat de tensiuni*; Buletinul Științific și Tehnic al Universității Tehnice din Timișoara, tomul 37 (51), fascicola 1-2, ianuarie-decembrie 1992, pag.73-76
- [W1] Waikar, D.L., Elangovan, S., Liew, A.C. - *Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method. 1. Mathematical modelling*; Electric Power Systems Research, Vol.40, No.3, March 1997, pp.189-194
- [W2] Waikar, D.L., Liew, A.C., Elangovan, S. - *Further enhancements in the symmetrical components based improved fault impedance estimation method. 2. Performance evaluation*; Electric Power Systems Research, Vol.40, No.3, March 1997, pp.195-202
- [W3] Wang, Y.J., Pierrat, L., Feuillet, R. - *An Analytical Method for Predicting Current Harmonics Produced by an AC/DC Converter under Unbalanced Supply Voltage*; ETEP, Vol.2, No.4, July/August 1992, pp.237-244
- [W4] Wang, Y.J., Pierrat, L. - *Probabilistic modelling of current harmonics produced by an AC/DC converter under voltage unbalance*; IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.4, October 1993, pp.2060-2066
- [W5] White, D.J. - *Epsilon dominance and constraint partitioning in multiple objective problems*, Journal of Global Optimization, Vol.12, no.4, June 1998, pp.435-445

- [W6] Willems, J.L. - *The compensation of non-active currents for three-phase power systems in sinusoidal steady state*; Electrical Machines and Power Systems, Vol.21, No.6, November-December 1993
- [W7] Willems, J.L. - *Mathematical foundations of the instantaneous power concepts: A geometrical approach*; European Transactions on Electrical Power, Vol.6, No.5, September-October 1996, pp.299-304
- [W8] Williams, J.E. - *Operation of 3-Phase Induction Motors on Unbalanced Voltages*; AIEE Transactions Power Applications Systems, Vol.PAS-73, April 1954, pp.125-133
- [W9] Witherspoon, S.A., Choma, J. - *The analysis of balanced, linear differential circuits*; IEEE Transactions on Education, Vol.38, No.1, February 1995, pp.40-51
- [W10] Woll, R.F. - *Effect of Unbalanced Voltage on the Operation of Polyphase Induction Motors*; IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.IA-11, No.1, January/February 1975, pp.38-42
- [W11] Wroblewski, Z. - *Digital simulation of reliability of contacts used in AC electromagnetic contactors*, European Transactions on Electric Power, Vol.8, no.3, May-June 1998, pp.201-206
- [X1] Xia, R.W., Chen, S.J. - *A quasi-analytic method for structural optimization*, Communications in Numerical Methods in Engineering, Vol.14, no.6, June 1998, pp.569-580
- [X2] Xypteras, J., Maras, K., Spyrelis, D. - *Calculation of the temperature distribution in an asynchronous machine*; European Transaction on Electrical Power Engineering, Vol.5, No.3, May-June 1995, pp.181-187
- [Y1] Yacamini, R. - *Power system harmonics. 4. Inter-harmonics*; Power Engineering Journal, Vol.10, No.4, August 1996, pp.185-196

- [Y2] Yu, D.C., Chen, D., Ramasamy, S., Flinn, D.G. - *A Windows based graphical package for symmetrical components analysis*; IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, No.4, November 1995, pp.1742-1749
- [Z1] Zaninelli, D., Zanotti, P. - *Simplified frequency dependent model for induction machines*; Electric Machines and Power Systems, Vol.22, No.6, November-December 1994, pp.727-742
- [Z2] Zuckerberger, A., Alexandrovitz, A. - *Modelling and Simulation of Unsymmetrical Supplied Three-Phase Induction Motor*; ETEP, Vol.6, No.3, May/June 1996, pp.189-194

BIBLIOGRAFIE SUPLIMENTARĂ

- [B14] Boldea, I. – *Transformatoare și mașini electrice*, Editura Politehnica, 2001
- [B15] Buta, A., Milea, L., Pană, A. – *Impedanța armonică a rețelelor electrice*, Editura Tehnică, București, 2000
- [B16] Buta, A., Pană, A., Milea, L. – *Calitatea energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2001
- [D14] Delapeta, M., Deaconu S., Iagăr, A. – *Echipamente electrice*, vol. I și vol. II, Centrul de Multiplicare al U.P.T., 2000
- [F7] Felea, I., Coroi, N. – *Fiabilitatea și mentenanța echipamentelor electrice*, Editura Tehnică, București, 2001
- [F8] Felea, I., Dale, E. – *Efecte ale regimului deformant și nesimetric*, Editura Universității din Oradea, 2002
- [F9] Felea, I., Rancov, N., Haș, V. – *Testing procedure in distortional operation condition of asynchronous machine*, Conferința de Inginerie Energetică CIE 2008, Oradea
- [H3] Hortopan, G. – *Aparate electrice de comutație*, Editura Tehnică, București, 1993

- [I4] Iordănescu, I., Golovanov, N., Postolache, P., Toader, C., Porumb, R., Lipan, L., Popescu, S. – *Instalații electrice și elemente de audit electroenergetic*, Editura TIPOGAL 2008
- [M20] Milici, Mariana – *Circuite electrice – Regimuri sinusoidale și particulare de funcționare*, Editura MatrixRom, București, 2005
- [P35] Popa, V.M. – *Contribuții la analiza sistemelor trifazate nesimetrice, cu aplicații*, Teză de doctorat, Universitatea Tehnică Cluj-Napoca, Facultatea de Electrotehnică, Cluj-Napoca, 1999
- [P36] Popa, V.M. - *A Synthesis Regarding the Study of a Real Unbalanced Load*, Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag.9-12
- [P37] Popa, V.M. - *The Study of the Real Unbalanced Load for Extreme Functioning Situations*, Sesiunea de Comunicări Științifice cu participare internațională, Hunedoara, 19-20 octombrie 2000; Universitatea „Politehnica” din Timișoara, Analele Facultății de Inginerie din Hunedoara, Tomul II, Fascicola 2, ISSN 1454-6531, pag. 13-16
- [P38] Popa, V.M. - *Considerații privind alimentarea receptorilor dezechilibrați*, Sesiunea de comunicări științifice a Universității “Petru Maior”, Târgu Mureș, 27-28 octombrie 2000, Volumul 7, Electroenergetică, ISBN 973-8084-19-9, pag. 191-196
- [P39] Popa, V.M., Popescu, Lizeta - *Măsurători experimentale privind puntea de diode alimentată nesimetric*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Republica Moldova, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag. 165-166
- [P40] Popa, V.M., Popescu, Lizeta - *Studiul punții de diode alimentată cu sisteme particulare nesimetrice de tensiuni*, A treia Conferință Internațională de Sisteme Electromecanice și Energetice SIELMEN - 2001, Republica Moldova, Chișinău, 4-6 octombrie 2001, volumul III, ISBN 9975-9638-8-9, pag. 173-176

- [P41] Popa, V.M. - *The Complex Analysis of the Real Unbalanced Load*, www.roger-univ.ro, Publicații; Analele Universității Româno-Germane din Sibiu; Secțiunea Tehnică, Sibiu, 2002
- [P42] Popa, V.M. - *Studiul energetic al receptorului dezechilibrat real*, Lucrările celei de A Doua Conferințe Naționale „Profesorul Dorin Pavel-fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 31 mai; 1-2 iunie 2002, Volumul Știință și Inginerie (Vol. I), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8130-83-2, pag. 69-74
- [P43] Popa, V.M. - *Analiza cazurilor limită ale receptorului dezechilibrat real*, Sesiunea Jubiliară de Comunicări Științifice cu Participare Internațională prilejuită de împlinirea a 30 de ani de învățământ superior de stat în Arad, Arad, 28-29 noiembrie 2002, Analele Universității „Aurel Vlaicu” din Arad, Volum, Seria Electrică, ISSN 1582-3377, pag. 126-131
- [P44] Popa, V.M. - *Studiul punții de diode alimentată nesimetric*, Lucrările celei de A Treia Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 30-31 mai; 1 iunie 2003, Volumul „Știință și Inginerie” (vol. III), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-03-2, pag. 105-108
- [P45] Popa, V.M. - *Studiul receptorului trifazat cu coeficienți de dezechilibru reali*, A treia sesiune anuală de comunicări științifice a cadrelor didactice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 30 aprilie 2004, Volum 2; ISBN 973-7998-11-1, pag. 101-111
- [P46] Popa, V.M. - *Analiza receptorului dezechilibrat real cu coeficienți de dezechilibru reali*, Lucrările celei de A Patra Conferințe Naționale – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 21-23 mai 2004; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. V), ISBN 973-8130-82-4; ISBN 973-8466-67-9, pag. 151-156
- [P47] Popa, V.M. - *Factor global de nesimetrie pentru sisteme trifazate*, Seminarul Științific Național “Electrotehnologii și Mediul ambiant”, Sibiu, 5-6 noiembrie 2004, Revista „Energetica”, nr. 12/2004, ISSN 1453-2360, pag. 544-549
- [P48] Popa, V.M. - *Studiul analitic al punții trifazate de diode alimentate nesimetric*, A VI-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 4 noiembrie 2005, Extras, ISBN 973-7998-23-5, pag. 199-204

- [P49] Popa, V.M. - *Asupra nesimetriei unui sistem trifazat*, Lucrările celei de A V-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 3-4 iunie 2005; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 7), ISBN 973-720-015-2; ISBN 973-8130-84-0, pag. 241-246
- [P50] Popa, V.M. - *The Energetical Study of the Unbalanced Three-Phased Load*, Conferința Națională cu participare internațională „Electrotehnica aplicată în eco-reconstrucția industrială”, Sibiu, 23-24 septembrie 2005; Volum, ISBN 973-739-138-1, pag. 144-151
- [P51] Popa, V.M. - *Analiza punții de diode alimentată cu sisteme de tensiuni nesimetrice*, Lucrările celei de A VI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 2-3 iunie 2006; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 9), ISBN 10 973-8130-82-4, pag. 309-314
- [P52] Popa, V.M. - *Aspecte experimentale și sintetice privind puntea trifazată de diode alimentată nesimetric*, A VII-a Sesiune de comunicări științifice, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19 aprilie 2007, Extras, ISBN 978-973-7998-32-3 și CD al sesiunii, pag. 263-269
- [P53] Popa, V.M. - *Rezultate experimentale și comparative privind puntea de diode în regim de alimentare nesimetric*, Lucrările celei de A VII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2007; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 11), ISBN 973-8130-82-4, pag. 191-196
- [P54] Popa, V.M. - *Studiul energetic al receptorului extrem dezechilibrat generalizat*, Lucrările celei de A IX-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 5-6 iunie 2009; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 15), ISBN 973-8130-82-4, pag. 363-368
- [P55] Popa, V.M. – *Aspecte de combinatorică cu aplicații în electrotehnică*, Editura Universității „Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2009
- [P56] Popa, V.M. - *Studiul energetic al receptorului echilibrat real*, Lucrările celei de A X-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 4-5

- iunie 2010; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 17), ISSN 2067-7138, pag.357-362
- [P57] Popa, V.M. – *Receptoare generalizate în electrotehnică*, Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2010
- [P58] Popa, V.M. - *On Generalized Loads in Electrotechnics*, A X-a Sesiune de comunicări științifice cu participare internațională, Universitatea Româno-Germană Sibiu, 19-29 noiembrie 2010, Extras, ISBN 978-973-7998-61-3 și CD al sesiunii, pag. 12-15
- [P59] Popa, V.M. - *Generalized Impedances and Unbalanced Loads*, Acta Universitatis Cibiniensis, Vol.LXI, Technical series, ISSN 1583-7149, pag. 47-50, Sibiu, 2010
- [P60] Popa, V.M. – *Aspecte privind receptoarele generalizate în electrotehnică*, Lucrările celei de A XI-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 3-4 iunie 2011; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 19), ISSN 2067-7138, pag.345-352
- [P61] Popa, V.M. – *Sisteme nesimetrice în electrotehnică*, Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2011
- [P62] Popa, V.M. – *Metodă analitică pentru studiul punții de diode având o sarcină complexă*, Lucrările celei de A XII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Sebeș, 1-2 iunie 2012; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 21), ISSN 2067-7138, pag.289-298
- [P63] Popa, V.M. – *Regimuri nesimetrice în electrotehnică*, Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2012
- [P64] Popa, V.M. – *Circuite trifazate dezechilibrate*, Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2013
- [P65] Popa, V.M. – *Aspecte comparative privind puntea de diode având o sarcină complexă*, Lucrările celei de A XIII-a Conferințe Naționale multidisciplinare – cu participare internațională – „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul

- hidroenergeticii românești”, Sebeș, 7-8 iunie 2013; Volumul „Știință și Inginerie” (vol. 23), ISSN 2067-7138, pag. 305-312
- [P66] Popa, V.M. – *Receptoare discrete m – fazate*, Editura Universității “Lucian Blaga” din Sibiu, Sibiu, 2013
- [P67] Postolache, P., Toader, C. – *Calitatea și eficiența energiei electrice*, Editura AGIR, București, 2007
- [P68] Popescu, Lizeta – *Echipamente electrice*, Editura Alma Mater, Sibiu, 2008
- [P69] Popa, I., Popa, G. N. – *Dispozitive electronice cu structură cablată și programată de protecție a motoarelor asincrone trifazate de joasă tensiune*, Editura Mirton, Timișoara, 2000
- [R23] Rancov, N. – *Aspects regarding experimental determination of thermal inertia at asynchronous motors operating in harmonics regime*, CIE 2009, Oradea
- [V3] Vasilievici, A. – *Aparate și echipamente electrice*, vol. I, vol. II, Editura MS, Sibiu, 1995, 1996
- [W12] www.moeller.net
- [W13] www.siemens.com
- [W14] www.omron.com
- [W15] www.littelfuse.com
- [W16] www.fairchildsemi.com
- [W17] www.futureelectronics.com
- [W18] www.datasheetcatalog.com
- [W19] www.schneider-electric.ro
- [W20] www.ganzkk.ro