



**UNIVERSITATEA POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI**

**Școala Doctorală de Inginerie Electrică**

# **TEZĂ DE DOCTORAT**

**- REZUMAT -**

**REGIMURI DEFORMANTE ÎN CIRCUITELE  
TRIFAZATE NELINIARE**

**Autor:**

**drd. ing. Claudiu Tufan**

**Conducător de doctorat:**

**Prof. dr. ing. Ioan Florea HĂNȚILĂ**

București 2022

## CUPRINS

<b>CAPITOLUL 1.</b>	<b>9</b>
<b>INTRODUCERE</b>	<b>9</b>
1.1 EFECTE PERTURBATOARE CAUZATE DE ELEMENTELE NELINIARE ÎN CIRCUITELE ELECTRICE TRIFAZATE	9
1.2 STADIUL CERCETĂRII	10
<b>1.2.1 Soluții de limitare a apariției armonicelor</b>	<b>10</b>
<b>1.2.2 Metode de analiză a circuitelor neliniare</b>	<b>10</b>
1.3 OBIECTIVELE CERCETĂRII	12
1.4 STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI	13
1.5 DISEMINAREA REZULTATELOR	15
<b>CAPITOLUL 2.</b>	<b>17</b>
<b>SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE NELINIARE UTILIZÂND METODA HĂNȚILĂ</b>	<b>17</b>
2.1 SCURTĂ DESCRIERE A METODEI	17
2.2 CORECȚIA ÎN TENSIUNE	18
2.3 CORECȚIA ÎN CURENT	25
2.4 EXEMPLUL ILUSTRATIV 1 - GENERATOR CU POLI ÎNECAȚI CU REACTANȚE EGALE PE SUCCESIUNI	28
<b>2.4.1 Soluționare folosind corecția în tensiune</b>	<b>29</b>
<b>2.4.2 Soluționare cu LTspice în domeniul timp</b>	<b>33</b>
2.5 CONCLUZII	35
<b>CAPITOLUL 3.</b>	<b>37</b>
<b>SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE NELINIARE AVÂND GENERATOARE CU REACTANȚE DIFERITE PE SUCCESIUNI</b>	<b>37</b>
3.1 UTILIZAREA METODEI ÎN CAZUL CIRCUITELOR TRIFAZATE AVÂND GENERATOARE CU REACTANȚE DIFERITE PE SUCCESIUNI	37
3.2 EXEMPLUL ILUSTRATIV 2 - GENERATOR CU POLI APARENȚI CU REACTANȚE DIFERITE PE SUCCESIUNI	37
<b>3.2.1 Soluționare folosind corecția în tensiune</b>	<b>38</b>
<b>3.2.2 Aproximarea soluției folosind LTspice în domeniul timp</b>	<b>40</b>
3.3 CONCLUZII	41
<b>CAPITOLUL 4.</b>	<b>43</b>
<b>CIRCULAȚIA PUTERILOR ÎN CIRCUITELE TRIFAZATE NELINIARE</b>	<b>43</b>
4.1 TEORIA PRIVIND TRANSFERUL DE PUTERI ÎN CIRCUITELE TRIFAZATE NELINIARE ELABORATĂ DE CĂTRE ACAD. A. ȚUGULEA ȘI DEZVOLTĂRILE SALE ULTERIOARE <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
4.2 REALIZAREA BILANȚULUI DE PUTERI ÎN URMA SOLUȚIONĂRII CIRCUITULUI TRIFAZAT NELINIAR UTILIZÂND METODA HĂNȚILĂ	44
4.3 EXEMPLUL ILUSTRATIV 1 - BILANȚ DE PUTERI	44
4.4 EXEMPLUL ILUSTRATIV 2 - BILANȚ DE PUTERI	46
4.5 CONCLUZII	48

<b>CAPITOLUL 5.</b>	<b>49</b>
<b>SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE CU ELEMENTE NELINIARE CU COMUTARE COMANDATA</b>	<b>49</b>
5.1 ELEMENTE NELINIARE CU COMUTARE COMANDATĂ	49
5.2 CORECȚIA ÎN TENSIUNE	50
5.3 EXEMPLU ILUSTRATIV 3 - CIRCUITE TRIFAZATE CU TIRISTOARE - COMPARAȚIE CU LTSPICE ÎN DOMENIUL TIMP	52
<b>5.3.1 Soluționare folosind metoda Hăntilă</b>	<b>54</b>
<b>5.3.2 Studiu comparativ (inclusiv cu LTspice)</b>	<b>57</b>
5.4 CONCLUZII	59
<b>CAPITOLUL 6.</b>	<b>61</b>
<b>PROCEDURI DE ACCELERARE A CONVERGENȚEI METODEI HĂNȚILĂ PENTRU SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE CU ELEMENTE NELINIARE</b>	<b>61</b>
6.1 PROCEDURI DE ACCELERARE SPECIFICE METODEI	61
<b>6.1.1 Alegerea optimă a rezistenței / conductanței de calcul</b>	<b>61</b>
6.1.1.1 <i>Alegerea R în cazul corecției în tensiune</i>	62
6.1.1.2 <i>Alegerea G în cazul corecției în curent</i>	63
<b>6.1.2 Corecția sursei comandate în tensiune sau în curent</b>	<b>64</b>
<b>6.1.3 Suprarelaxarea</b>	<b>65</b>
6.2 CALCULAREA MAI RAPIDĂ A UNUI REZULTAT INTERMEDIAR	67
<b>6.2.1 Selecția armonicelor / utilizarea unor algoritmi de calcul mai puțin exacti</b>	<b>67</b>
<b>6.2.2 Procedura hibridă de corecție în tensiune / curent</b>	<b>68</b>
<b>6.2.3 Utilizarea unor elemente liniare / neliniare de circuit cu valori modificate</b>	<b>69</b>
6.2.3.1 <i>Utilizarea de caracteristici neliniare cu factori de contracție mai buni</i>	69
6.2.3.2 <i>Utilizarea de valori modificate pentru elementele liniare de circuit</i>	69
6.3 MODIFICAREA CARACTERISTICII NELINIARE PRIN INCLUDEREA UNOR ELEMENTE EXISTENTE ÎN CIRCUIT	70
6.4 MODIFICAREA CARACTERISTICII NELINIARE PRIN INCLUDEREA UNOR ELEMENTE EXTRASE DIN IMPEDANȚA CIRCUITULUI ECHIVALENT	73
6.5 EXEMPLUL ILUSTRATIV 4 - PROCEDURI DE ACCELERARE	75
<b>6.5.1 Corecția în tensiune</b>	<b>76</b>
<b>6.5.2 Corecția în curent</b>	<b>77</b>
<b>6.5.3 Includerea în caracteristica neliniară a rezistorului serie Rs</b>	<b>81</b>
6.6 CONCLUZII	87
<b>CAPITOLUL 7.</b>	<b>89</b>
<b>CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE</b>	<b>89</b>
7.1 CONCLUZII GENERALE	89
7.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE	91
7.3 PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ	93
<b>BIBLIOGRAFIE</b>	<b>94</b>

**CUVINTE CHEIE:** Circuite trifazate neliniare, Analiză armonică, Separarea fazelor, Metoda Hăntilă, Surse comandate, Șiruri Picard-Banach în spații Hilbert, Teoria Țugulea, Transfer de puteri, Bilanțuri de puteri, Reactanțe diferite pe succesiuni, Elemente neliniare cu comutare comandată, Tiristor, Accelerarea convergenței, Fenomenul Gibbs.

## CAPITOLUL 1. INTRODUCERE

Cercetări importante privind circulația puterilor în Circuitele trifazate neliniare au fost inițiate de acad. A. Țugulea [1-5] și dezvoltate apoi de un colectiv din cadrul Departamentului de Electrotehnică al Facultății de Inginerie Electrică din Universitatea Politehnică București [6-13].

Tendențele actuale privind consumul și producerea energiei electrice sunt de a reduce costurile și de a crește eficiența energetică folosind pe scară largă electronica de putere [14-26]. Elementele de circuit neliniare sunt însă o importantă sursă de armonice în circuitele trifazate.

### 1.1 EFECTE PERTURBATOARE CAUZATE DE ELEMENTELE NELINIARE ÎN CIRCUITELE ELECTRICE TRIFAZATE

Printre principalele efecte negative amintim: generarea de pierderi suplimentare, supraîncărcări, funcționarea defectuoasă a echipamentelor și protecțiilor, scurtarea semnificativă a duratei de viață și chiar defectarea echipamentelor, perturbări ale rețelelor de comunicații [20, 27-34].

### 1.2 STADIUL CERCETĂRII

Au fost dezvoltate mai multe soluții pentru a micșora prezența armonicilor existente deja în rețele: filtre (active, pasive sau hibride), supradimensionări de echipamente și conductori, reconfigurări ale rețelelor, recablări etc. [20, 27-34]. Există și unele soluții tehnice relativ simple pentru suprimarea armonicilor multiplu de 2 precum și a armonicilor multiplu de 3.

Au fost dezvoltate mai multe metode pentru soluționarea circuitelor neliniare în regim periodic folosind în special: analiza în domeniul timp, analiza în domeniul frecvență sau combinații între acestea [21-26].

Soluționarea în domeniul timp nu beneficiază de avantajul separării pe o singură fază. De asemenea nu poate lua în considerare reactanțe diferite ale generatorului sincron pentru cele trei succesiuni. Soluționarea în domeniul timp a circuitelor electrice cu constante de timp mai mari decât perioada poate necesita un volum și un timp foarte mare de calcul. [22, 23, 25, 26]. Se poate folosi Metoda Newton-Raphson cu algoritmul de "shooting" pentru a accelera găsirea soluției [23].

Metoda Balanței Armonice permite soluționarea părții liniare a circuitului prin separarea circuitului pe cele 3 succesiuni, fapt care simplifică substanțial complexitatea circuitului trifazat. Rezultă însă un sistem uriaș de ecuații neliniare, cu un mare număr de necunoscute. Partea neliniară este evaluată în domeniul timp și soluționată folosind de obicei metoda Newton-Raphson. Nu există certitudinea convergenței și de multe ori trebuie utilizată subrelaxarea. Efortul de calcul este foarte mare. [21 - 24].

Reducerea efortului de calcul se poate face folosind doar primele armonice semnificative la bornele elementelor neliniare și construind modele în domeniul frecvență

obținute prin măsurători ale caracteristicii tensiune - curent [21-26]. Calculul se pot face astfel doar în domeniul frecvență [21-26].

Principalul avantaj al metodei este că se pot modela orice fel de elemente neliniare folosind rezultatele măsurătorilor la diverse frecvențe la bornele unui "black box" neliniar, fără a ține cont de componentele acestuia.

Pentru a reduce volumul de calcul este de obicei micșorat numărul de armonice luate în considerare la maxim 25, chiar și cu eliminarea armonicilor multiplu de 2 și 3. Se pot obține astfel viteze de calcul foarte bune, având însă în spate măsurători destul de laborioase ale caracteristicilor în domeniul frecvență.

Principalul dezavantaj al metodei constă în dificultatea de a crea modele suficient de apropiate de cele fizice precum și de a obține rezultate suficient de exacte menținând și un timp de calcul acceptabil. De asemenea soluționarea folosind un număr mare de armonice este practic imposibilă.

O metodă interesantă de soluționare a circuitelor cu elemente rezistive neliniare, în regim periodic, a fost propusă de prof. Hăniță în [35-38]. Aplicarea metodei în soluționarea circuitelor trifazate neliniare a fost sugerată în: [8, 12, 39], fără a fi însă prezentate și exemple numerice.

În lucrarea de față analizăm utilitatea aplicării metodei Hăniță pentru circuitele trifazate neliniare și avantajele sale comparativ cu principalele metode existente. De asemenea dezvoltăm această metodă prin proceduri de accelerare a convergenței.

### 1.3 OBIECTIVELE CERCETĂRII

Obiectivul principal al tezei de doctorat este dezvoltarea metodei Hăniță pentru a putea fi aplicată pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare și efectuarea unei analize privind avantajele sale comparativ cu alte metode de calcul existente. Pentru aceasta ne-am propus:

- a. Identificarea algoritmului de calcul și modelarea metodei Hăniță pe calculator prin realizare unui program de calcul. Analizarea ei în cazul unui exemplu concret de circuit trifazat neliniar cu valori numerice.
- b. Analizarea modului în care metoda se comportă în situația existenței unor rezonanțe în circuitul propus spre soluționare.
- c. Analizarea modului în care Bilanțul de Puteri calculat în urma soluționării circuitului neliniar utilizând Metoda Hăniță respectă Teoria privind transferul de puteri în circuitele neliniare elaborată de către acad. A. Țugulea și dezvoltările sale ulterioare și Teorema lui Tellegen privind conservarea puterilor.
- d. Utilizarea metodei pentru soluționarea circuitelor trifazate având generatoare cu reactanțe diferite pe succesiuni.
- e. Dezvoltarea și utilizarea metodei pentru soluționarea circuitelor trifazate cu elemente neliniare cu comutare comandată (cum este cazul tiristoarelor).
- f. Realizarea de studii comparative cu alte metode de calcul.
- g. Efectuarea unei analize privind exactitatea rezultatelor obținute.
- h. Evaluarea volumului și timpului de calcul necesar, inclusiv în situația utilizării unui număr mare de armonice. Analizarea posibilității de a utiliza algoritmi de accelerare a convergenței precum și dezvoltarea unor astfel de algoritmi.
- i. Analizarea modului în care metoda se comportă în situația în care apar variații / salturi bruște ale semnalului.

j. Analizarea posibilității de a evita apariția Fenomenului Gibbs.

#### 1.4 STRUCTURA ȘI CONȚINUTUL TEZEI

Teza de doctorat este împărțită în 7 capitole, după cum urmează:

**Capitolul 1 Introducere** prezintă tendințele actuale de consum și producere a energiei electrice, creșterea numărului de elemente neliniare prezente în rețelele electrice trifazate și problemele pe care acestea le pot genera. Sunt descrise pe scurt efectele perturbatoare cauzate de elementele neliniare. Este făcută o analiză a stadiului actual al cercetării privind soluțiile de limitarea a apariției armonicelor precum și a metodelor de analiză a circuitelor neliniare și posibilitățile existente de punere în evidență a efectului deformant. Sunt discutate avantajele și dezavantajele acestor metode. Este propus obiectivul principal al cercetării: analizarea utilității metodei Hăntilă pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare și sunt stabilite în mod detaliat obiectivele componente. Sunt prezentate structura și conținutul pe scurt al tezei pe capitolele.

**Capitolul 2** analizează **Soluționarea circuitelor trifazate neliniare utilizând metoda Hăntilă**. Este prezentat un scurt istoric al dezvoltării metodei, cu prezentarea de referințe bibliografice și utilizării acesteia pentru diferite aplicații din electrotehnică. Este analizată în detaliu aplicarea metodei în soluționarea circuitelor trifazate neliniare cu cele două variante ale sale: corecție în curent sau corecție în tensiune a sursei comandate. În exemplul ilustrativ 1 se propune un circuit trifazat care are în componență circuite Boucherot pe cele 3 faze și se soluționează folosind metoda Hăntilă și LTspice [40] în domeniul timp. Se compară rezultatele și avantajele și dezavantajele celor două metode. Rezultatele obținute folosind metoda Hăntilă sunt validate de cele obținute folosind LTspice [40] în domeniul timp.

**Capitolul 3** analizează **Soluționarea circuitelor trifazate neliniare având generatoare cu reactanțe diferite pe succesiuni** utilizând metoda Hăntilă. În exemplul ilustrativ 2 circuitul trifazat propus spre soluționare este alimentat de un generator cu poli aparenti care prezintă această particularitate. Soluționarea în domeniul timp nu poate lua în considerare reactanțele diferite pe succesiuni și eventualele aproximări pot da rezultate cu o eroare destul de mare față de rezultatul corect. Analiza circuitului fiind făcută în domeniul frecvență, metoda Hăntilă permite introducerea în calcul a elementelor cu valori (reactanțe sau rezistențe) diferite pe armonice sau succesiuni, un avantaj comparativ cu soluționarea în domeniul timp.

În **Capitolul 4** este analizată **Circulația puterilor în circuitele trifazate neliniare** rezultate în urma soluționării folosind metoda Hăntilă. În exemplul ilustrativ sunt realizate bilanțurile de puteri pentru circuitele soluționate în exemplele ilustrative 1 și 2 și sunt verificate și confirmate: respectarea teoremei Tellegen și respectarea teoriei acad. A. Țugulea cu dezvoltările sale ulterioare privind circulația puterilor în rețelele trifazate cu elemente neliniare. Metoda permite urmărirea facilă a transferului de puteri din circuit, pe armonice, pentru fiecare element de circuit, inclusiv elementele neliniare. De asemenea permite evidențierea frecvențelor pe care elementele de circuit consumă putere și pe care "debitează".

**Capitolul 5** analizează **Soluționarea circuitelor trifazate cu elemente neliniare cu comutare comandată** (cum este cazul tiristoarelor) folosind metoda Hăntilă. Corecția cu

caracteristicile neliniare fiind făcută în domeniul timp, metoda poate fi aplicată ușor și în cazul elementelor neliniare cu comutare comandată sau compuse din mai multe caracteristici definite pe ramuri. Metoda poate fi aplicată chiar și atunci când soluționarea în domeniul timp nu este posibilă ca urmare a necesității alegerii unui pas foarte mic de timp. În exemplul ilustrativ 3 rezultatele obținute sunt validate de soluționarea comparativă cu LTspice [40] în domeniul timp. Este propusă și analizată o soluție de evitare a Fenomenului Gibbs în cazul soluționării folosind metoda Hăntilă.

În **Capitolul 6** sunt propuse și analizate mai multe **Proceduri de accelerare a convergenței metodei Hăntilă pentru soluționarea circuitelor trifazate cu elemente neliniare**. Un avantaj important al metodei Hăntilă îl reprezintă posibilitatea adoptării unui număr mare de armonice, fapt practic imposibil în cazul altor metode. În funcție de caracteristica neliniară și de circuitul conectat la bornele elementului neliniar pot să apară situații în care factorul de contracție al algoritmului să aibă valori foarte apropiate de 1 și numărul de iterații și timpul de calcul pot crește substanțial. Analizăm și dezvoltăm mai multe proceduri de accelerare a algoritmului de calcul: alegerea optimă a rezistenței de calcul  $R$ , utilizarea suprarelaxării, selecția armonicelor, corecția sursei comandate în tensiune sau în curent. De asemenea propunem și detaliam mai multe proceduri originale privind reducerea efortului și a timpului de calcul: procedura hibridă de corecție tensiune / curent, folosirea de caracteristici neliniare "mai puțin dure" cu factori de contracție mai buni, utilizarea de valori modificate pentru elementele liniare de circuit, respectiv corectarea caracteristicii neliniare prin includerea sau extragerea altor elemente existente circuit. Exemplul ilustrativ 4 demonstrează eficiența procedurilor de accelerare propuse și aplicarea în practică a acestora.

**Capitolul 7** prezintă **Concluzii și contribuții originale**, precum și perspectivele de dezvoltare ulterioară. Metoda Hăntilă și-a demonstrat eficiența în toate cazurile analizate și prezintă mai multe avantaje comparativ cu alte metode. Considerăm că obiectivul principal al tezei de doctorat: de dezvoltare a metodei pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare și efectuarea unei analize privind avantajele acesteia comparativ cu alte metode de calcul existente, a fost atins. Au fost aduse mai multe contribuții originale la aplicarea metodei Hăntilă atât pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare, cât și a circuitelor neliniare în general. Au fost dezvoltate mai multe proceduri de accelerare a convergenței.

Considerăm că o direcție importantă de dezvoltare a metodei este creșterea vitezei de calcul. Aceasta se poate face prin identificarea de algoritmi mai eficienți pentru calculul transformatei Fourier directă și inversă, atât ca viteză, cât și ca precizie, inclusiv cu eșantionare neuniformă în domeniul timp, precum și prin dezvoltarea procedurilor de accelerare. O altă direcție de dezvoltare interesantă poate fi extinderea utilizării metodei Hăntilă și pentru soluționarea circuitelor cu elemente inductive neliniare.

### 1.5 DISEMINAREA REZULTATELOR

O parte din rezultatele obținute precum și analizele realizate și concluziile rezultate în cadrul cercetării de față și care sunt prezentate în continuare în cadrul tezei de doctorat au fost publicate sau sunt în curs de publicare într-o serie de 4 articole în calitate de prim autor:

1. **Tufan, C.**; Nemoianu, I.V. Method for the Analysis of Three-Phase Networks Containing Nonlinear Circuit Elements in View of an Efficient Power Flow Computation. *Electronics* **2021**, *10*, 2710.

2. **Tufan, C.**; Nemoianu, I.V.; Maricar, M; Stanculescu, M.; Marin, M. E.; Efficient Method of Harmonic Analysis of Three-Phase Circuits with Nonlinear Controlled Switching Elements, *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg.*, vol. 67, 1, pp. 47–54, Bucharest, 2022.

3. **Tufan, C.**; Maricar, M; Nemoianu, I.V.; Procedures for accelerating the convergence of the Hăntilă method for solving three-phase circuits with nonlinear elements - Part I, *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg.*, vol. 67, 3, pp. 293–300, Bucharest, 2022.

4. **Tufan, C.**; Maricar, M; Nemoianu, I.V.; Procedures for accelerating the convergence of the Hăntilă method for solving three-phase circuits with nonlinear elements - Part II - în curs de publicare.

## CAPITOLUL 2. SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE NELINIARE UTILIZÂND METODA HĂNȚILĂ

Metoda a fost utilizată cu succes în rezolvarea mai multor probleme de electrotehnică unde apar neliniarități [41, 42]. Este o metodă de punct fix și tratează neliniaritatea prin construcția unui șir Picard-Banach convergent.

Pentru prima dată, metoda a fost prezentată și folosită în [35], pentru soluționarea circuitelor cu elemente rezistive neliniare și apoi dezvoltată într-o serie de articole [36-38], pentru circuite în regim periodic. Soluționarea circuitelor trifazate utilizând metoda Hăntilă a fost propusă în [39] fără a prezenta însă și rezultate numerice.

Aplicarea metodei constă în "liniarizarea" circuitului prin înlocuirea elementelor neliniare cu generatoare cu surse comandate și rezistențe interne. Valoarea surselor este corectată iterativ prin construcția unui algoritm cu convergență asigurată. Valoarea rezistențelor interne este aleasă pentru a asigura convergența. Corecția surselor comandate cu caracteristicile neliniare se face în domeniul timp. Analiza circuitelor liniare conectate la bornele elementelor neliniare se face în domeniul frecvență. Când valoarea sursei comandate este obținută cu o precizie suficient de bună, se pot calcula în domeniul frecvență curenții și tensiunile pentru toate elementele din circuit [36-39]. Există două variante duale de utilizare a metodei: corecție în tensiune a sursei comandate sau corecție în curent [39].

În cazul corecției în tensiune metoda constă în înlocuirea elementelor neliniare cu generatoare de tensiune compuse din surse de tensiune  $e$  comandate și rezistențe interne  $R$ .

Caracteristica  $u - i$  a elementului neliniar de pe o fază este descrisă în domeniul timp de funcția  $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  :

$$i = f(u) \quad (2.1)$$

unde  $i$  și  $u$  sunt curentul și respectiv tensiunea elementului neliniar.

$$u = R i + e \quad (2.2)$$

$$e = u - R f(u) = u \left(1 - R \frac{f(u)}{u}\right) = u \left(1 - \frac{R}{R_u(u)}\right) = g(u) \quad (2.3)$$



Conform [35, 39] se alege  $R$  astfel încât  $g(u)$  să fie contracție în spațiul Hilbert al funcțiilor periodice. O condiție suficientă pentru asigurarea  $g: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  să fie contracție, este ca funcția  $f$  să fie lipschitziană și uniform monotonă [37-39, 42].

$$0 < \frac{1}{R_{max}} \stackrel{\text{def}}{=} \lambda \leq \left| \frac{f(u_1) - f(u_2)}{u_1 - u_2} \right| \leq \Lambda \stackrel{\text{def}}{=} \frac{1}{R_{min}} \forall u_1, u_2 \text{ și } u_1 \neq u_2 \quad (2.7)$$

Punem condiția ca  $g(u)$  să fie contracție, de unde rezultă:

$$\left| 1 - R \frac{f(u_1) - f(u_2)}{u_1 - u_2} \right| = \left| 1 - \frac{R}{\Delta R_{12}} \right| \leq \theta_g < 1 \text{ cu } \Delta R_{12} \in [R_{min}, R_{max}] \quad (2.12)$$

În cazul unui uniport neliniar  $R$  trebuie ales în intervalul  $(0, 2R_{min})$  [39].

Factorul de contracție al funcției  $g(u)$  este:

$$\theta_g = \text{Max} \left[ \left( 1 - \frac{R}{R_{max}} \right), \left( \frac{R}{R_{min}} - 1 \right) \right] \quad (2.13)$$

Prin înlocuirea elementelor neliniare cu generatoare comandate se obține un circuit liniar în regim periodic. Folosind analiza armonică circuitul trifazat poate fi descompus pe o singură fază pe succesiunile DIH. Se obțin circuite liniare mult mai simple în regim sinusoidal. Prin rezolvare se obține tensiunea la bornele elementului neliniar.

Pentru fiecare armonică de rang  $k$ , circuitul liniar conectat la bornele sursei neliniare poate fi înlocuit cu generatorul echivalent, având sursa  $E_{gk}$  și impedanța  $Z_{ek}$ .

Fie  $U_k$  tensiunea de la bornele elementului neliniar,  $I_k$  intensitatea curentului prin elementul neliniar și  $E_k$  tensiunea sursei comandate neliniar, pe fiecare armonică de ordin  $k$ .

$$\underline{U}_k = (\underline{E}_k + \underline{E}_{gk}) \underline{Z}_{ek} / (\underline{Z}_{ek} + R) = h_k(\underline{E}_k) \quad (2.16)$$

Funcția  $h_k$  este întotdeauna neexpansivă.

$\underline{U} = h(\underline{E})$ , unde  $h$  este operator diagonal liniar cu componentele  $h_k$ .  $h$  este neexpansiv.

Procesul iterativ de soluționare de la iterația  $n$  la iterația  $n + 1$ :

$$\dots e^{(n)} \xrightarrow{F} \underline{E}^{(n)} \xrightarrow{h} \underline{U}^{(n)} \xrightarrow{F^{-1}} u^{(n)} \xrightarrow{g} e^{(n+1)} \dots \quad (2.20)$$

$e^{(n)}$  este sursa comandată a elementului neliniar în domeniul timp,  $\underline{E}^{(n)}$  este vectorul imaginilor în complex ale armonicelor sursei  $e^{(n)}$ ,  $\underline{U}^{(n)}$  este vectorul imaginilor în complex ale tensiunii de la bornele elementului neliniar,  $u^{(n)}$  este tensiunea de la bornele elementului neliniar în domeniul timp,  $F$  - transformată Fourier și  $F^{-1}$  - transformată inversă Fourier.

Avem: funcția  $h$  neexpansivă, funcția  $g$  contracție și transformata Fourier  $F$  neexpansivă. Procedura iterativă este o compunere de funcții neexpansive și o contracție, deci este convergentă.

Eroarea (distanța) între două valori succesive ale iterației la iterația  $n$  [39, 41, 42]:

$$\varepsilon^{(n)} \stackrel{\text{def}}{=} \|\underline{E}^{(n)} - \underline{E}^{(n-1)}\| \quad (2.22)$$

Soluționarea circuitului folosind corecția în curent a sursei comandate este duală cu corecția în tensiune.

Pentru a ilustra aplicarea metodei, am ales un circuit simplu în care un generator sincron, conexiune stea, alimentează o rețea în care se afla un redresor trifazat (stea cu fir neutru). Reactanțele interne ale generatorului sunt egale pe succesiuni pentru a putea compara rezultatele cu cele obținute cu LTspice [40] în domeniul timp.

Diodele din circuit au caracteristica liniarizată pe porțiuni [36-39]. Algoritmul de calcul a fost simulat utilizând GNU Octave 6.2.0 [43].

Trunchiem dezvoltarea în serie Fourier la armonica de rang 1000 inclusiv și împărțim perioada  $T$  folosind 8000 de puncte echidistante. Oprim iterațiile atunci când distanța (eroarea)  $\varepsilon^{(n)}$  scade sub  $10^{-8}$ .

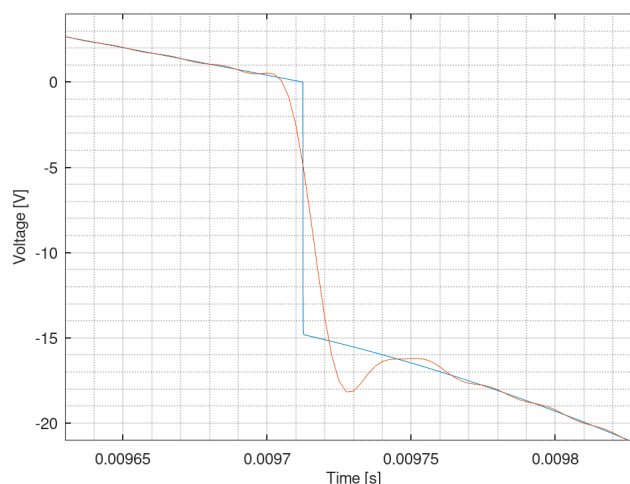


Fig. 2.11 Suprapunere în domeniul timp a tensiunii pe elementul neliniar (detaliu în zona de apariție a Fenomenului Gibbs) obținute cu: (a) albastru - LTspice și (b) roșu - metoda Hăntilă

Comparația cu LTspice o facem în domeniul timp atât prin suprapunerea graficelor obținute în domeniul timp, cât și calculând:

$$\varepsilon_{dif} = \sqrt{\frac{\sum \Delta U_n^2 \Delta t_n}{T}} \quad (2.40)$$

unde  $\Delta U_n$  este diferența între valorile tensiunii obținute de LTspice [40] și respectiv folosind metoda Hăntilă în punctul  $n$ , iar  $\Delta t_n$  este pasul de timp folosit de LTspice. Valoarea maximă obținută pentru  $\Delta U_n$  este 9.6744 V. Diferențele mari sunt în zona în care apare Fenomenul Gibbs.

Pentru norma  $\varepsilon_{dif}$  am obținut valoarea 0.15377 V. Chiar dacă este afectată de Fenomenul Gibbs, exactitatea rezultatelor obținute cu metoda Hăntilă este suficient de bună.

Rezultatele sunt validate de cele obținute cu LTspice în domeniul timp.

### CAPITOLUL 3. SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE NELINIARE AVÂND GENERATOARE CU REACTANȚE DIFERITE PE SUCCESIUNI

Metoda face analiza circuitului liniar conectat la bornele elementului neliniar, în domeniul frecvență și permite utilizarea de valori diferite ale elementelor de circuit pe succesiuni sau armonice și este foarte utilă de exemplu în situația generatoarelor cu reactanțe diferite pe succesiuni.

Diferență apare doar la calcularea coeficienților  $\frac{Z_{e_k}}{Z_{e_k} + R}$  ai  $h$ , care se va face cu noile valori diferite pe succesiuni.

În exemplul ilustrativ generatorul sincron cu conexiune stea are reactanțe interne DIH diferite.

Soluționarea în domeniul timp nu poate lua în considerare reactanțele diferite ale generatorului sincron pentru cele trei succesiuni. O eventuală aproximare prin utilizarea doar a valorii reactanței de pe fundamentală pentru toate succesiunile nu va da rezultate suficient de apropiate.

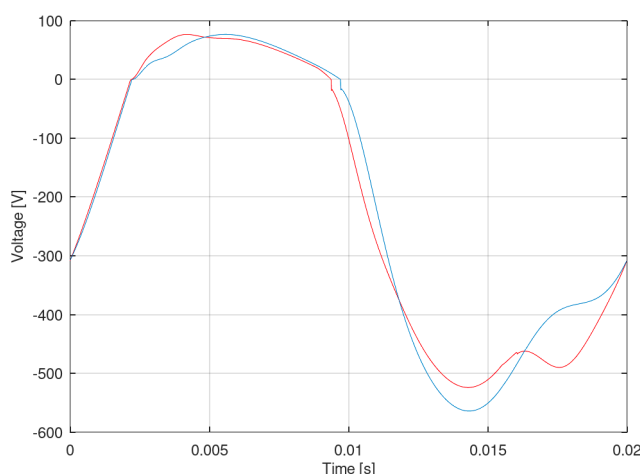


Fig. 3.5 Comparație a tensiunii pe elementul neliniar în domeniul timp: albastru - exemplul ilustrativ 1 și roșu - exemplul ilustrativ 2

Din cunoștințele noastre, metoda Hăniță este singura metodă ce poate fi aplicată eficient la circuite neliniare având generatoare cu reactanțe interne diferite pe succesiuni.

### CAPITOLUL 4. CIRCULAȚIA PUTERILOR ÎN CIRCUITELE TRIFAZATE NELINIARE

Având în vedere teorema Tellegen care asigură conservarea puterilor, faptul că termenii seriei Fourier formează o bază ortonormată și Teoria privind Transferul de Puteri elaborată de către acad. A. Țugulea [1-5] și dezvoltările sale ulterioare [6-13]: Sursele generatorului trifazat  $e_g$  debitează putere în circuit și de asemenea pe impedanțele interne doar pe frecvența fundamentală. Având în vedere existența elementelor neliniare, aceasta se împarte pe armonice. Elementul neliniar consumă putere pe fundamentală și "debitează" putere pe

armonice prin sursa comandată neliniar. Bilanțurile de puteri se verifică pe armonice pentru fiecare frecvență.

Metoda Hăntilă face analiza circuitului în domeniul frecvență și permite o apreciere ușoară a transferului de putere pe armonice. După determinarea valorii sursei comandate se pot calcula în domeniul frecvență curenții și tensiunile pentru toate elementele din circuit. Având aceste valori se pot calcula puterile pe armonice.

Facem bilanțul de puteri pentru fiecare armonică pentru puterile complexe pentru circuitul din Exemplul Ilustrativ 1 prezentat la 2.4 pentru situația generatorului cu reactanțe egale pe succesiuni, respectiv pentru circuitul din Exemplul Ilustrativ 2 pentru situația generatorului cu reactanțe diferite pe succesiuni.

Se confirmă principiile enunțate: generatorul trifazat debitează putere complexă pe fundamentală. Elementele neliniare consumă putere pe fundamentală. O parte din această putere este consumată intern și restul reinjectată pe armonice. Este respectată teorema Tellegen care asigură conservarea puterilor.

Deși are caracteristică aparent pur rezistivă, elementul neliniar consumă intern și putere reactivă.

Validarea calculului este dată de valorile foarte apropiate de zero pentru bilanțurile de puteri: pe armonice, pe elementele neliniare de circuit și de asemenea pe întreg circuitul.

O reactanță de valoare mai mică pe succesiuni are influență și pe fundamentală. Apare o scădere semnificativă a puterii reactive pe generator, însoțită de o creștere a puterii active debitate.

## CAPITOLUL 5. SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE CU ELEMENTE NELINIARE CU COMUTARE COMANDATA

În cazul elementelor neliniare cu comutare comandată în domeniul timp, nu vom considera dependența curentului funcție doar de tensiune, ci și de timp. De fapt există două caracteristici care sunt comutate în domeniul timp la apariția comenzii ( $t = t_{\alpha}$ ) și înapoi la neîndeplinirea unei condiții prag pentru curentul sau tensiunea dintre terminale. În rest aplicarea metodei este similară cu cele prezentate în Capitolul 2.

În Exemplul ilustrativ 3 soluționăm un circuit trifazat cu tiristoare. Folosim pentru tiristoarele  $T_r$ , caracteristica liniarizată [44].

Variația rapidă a tensiunii la bornele tiristorului determină apariția fenomenului Gibbs. Analizăm posibilitatea implementării unei soluții de reducere a acestuia. Trunchiem seria Fourier la armonica de rang 6000 inclusiv și împărțim perioada  $T$  tot la un număr de 6000 de puncte echidistante. Oprim iterațiile atunci când distanța (eroarea)  $\varepsilon^{(n)}$  scade sub  $10^{-6}$ .

În Fig. 5.4a se observă evitarea fenomenului Gibbs.

Valorile obținute pentru norma  $\varepsilon_{dif}$  calculată pentru tensiunea pe tiristor și rezistența serie pentru cele trei variante simulate, comparativ cu rezultatul obținut cu LTspice [40] sunt prezentate în Tab. 5.1

## Regimuri deformante în circuitele trifazate neliniare

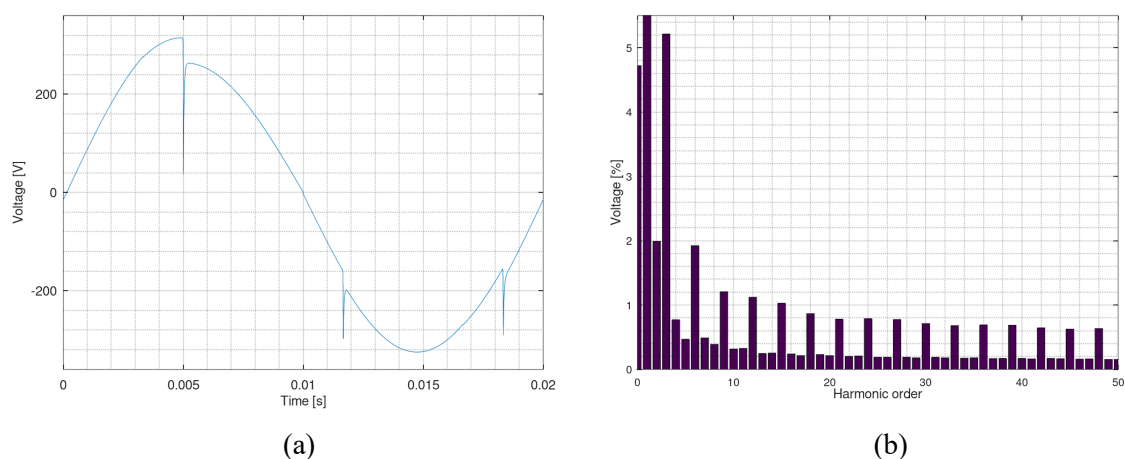


Fig. 5.4 Tensiunea pe tiristor și rezistența serie : (a) în domeniul timp și (b) detaliu spectru armonic până la rangul 50

**Tabel 5.1 Valorile normei  $\varepsilon_{dif}$  pentru tensiunea pe  $T_r + R_s$ , pentru cele trei variante simulate comparativ cu LTspice.**

Nr. simulare	Rang armonică	Nr. puncte de eșantionare	$\varepsilon_{dif}$
1	6000	6000	2,72 V
2	1000	6000	3,70 V
3	1000	1000	5,75 V

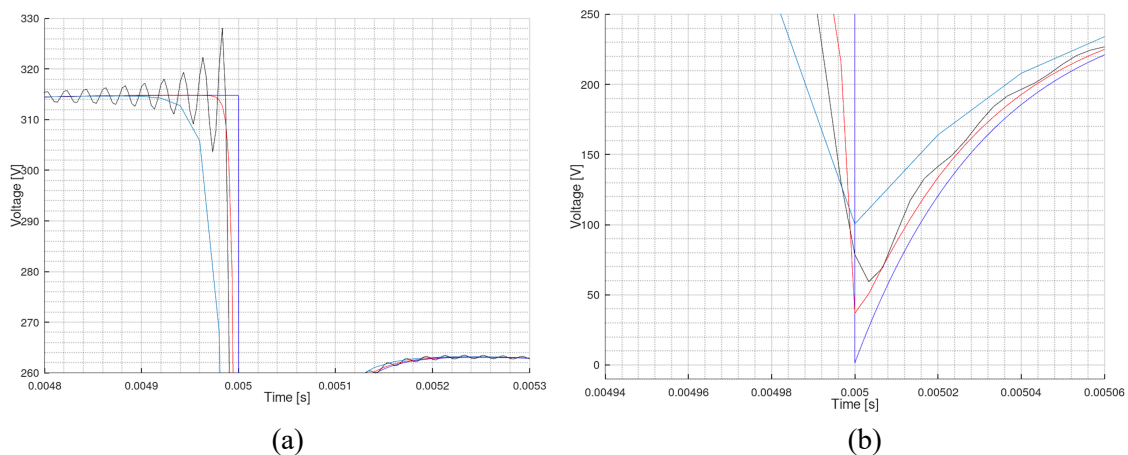


Fig. 5.6 Tensiunea pe  $T_1 + R_2$  obținută prin cele patru simulări: mov - LTspice, roșu - Simulare 1, negru - Simulare 2 și albastru deschis Simulare 3, cu detaliile: (a) și (b)

Metoda poate fi aplicată ușor și în cazul elementelor neliniare cu comutare comandată în domeniul timp sau compuse din mai multe caracteristici definite pe ramuri. Rezultatele obținute sunt validate de cele obținute cu LTspice în domeniul timp. Metoda poate fi utilizată

chiar și atunci când soluționarea în domeniul timp nu este posibilă ca urmare a necesității alegerii unui pas foarte mic de timp.

În simularea circuitelor utilizând metoda Hăntilă, se poate micșora semnificativ apariția fenomenului Gibbs prin păstrarea unui raport de 1 (+/- 10%) între numărul de puncte de calcul eșantionate și numărului de armonice folosit la trunchierea seriei Fourier.

## **CAPITOLUL 6. PROCEDURI DE ACCELERARE A CONVERGENȚEI METODEI HĂNȚILĂ PENTRU SOLUȚIONAREA CIRCUITELOR TRIFAZATE CU ELEMENTE NELINIARE**

### **6.1 PROCEDURI DE ACCELERARE SPECIFICE METODEI**

#### **6.1.1 Alegerea optimă a rezistenței / conductanței de calcul**

Alegerea rezistenței de calcul trebuie făcută într-un anumit interval pentru a asigura convergența metodei. Valoarea aleasă poate influența factorii de contracție și viteza de convergență a algoritmului.

În [39] este propusă o soluție de minimizare a factorului de contracție  $\theta_g$  al funcției  $g(u)$  (definite în subcapitolul 2.2), prin alegerea

$$R = R_{opt} = \frac{2R_{min}R_{max}}{R_{min} + R_{max}} \quad (6.1)$$

și care conduce la cel mai mic factor de contracție pentru  $g(u)$

$$\theta_{g_{opt}} = \frac{R_{max} - R_{min}}{R_{max} + R_{min}} \quad (6.2)$$

Nu este obligatoriu ca viteza de convergență să fie mai mare atunci când folosim rezistența optimă  $R_{opt}$ . În vederea asigurării unei viteze mai bune de convergență, se poate restrânge intervalul de selecție al  $R$  la intervalul  $[R_{min}, 2R_{min})$ .

Prin trunchierea seriei Fourier,  $h$  este în practică o contracție. Pentru un circuit dat și pentru un număr de armonice finit, se poate defini un factor de contracție:

$$1 > \theta_h = \max_k \left| 1 / (1 + R / \underline{Z_{e_k}}) \right| \quad (6.4)$$

O valoare mai mare a  $R$  asigură un factor de contracție  $\theta_h$  de valoare mai mică pentru  $h$ , precum și valori mai mici pentru modulele coeficienților aplicați lui  $\underline{E_k}$ .

Pentru a asigura o viteză de convergență cât mai bună pentru procedura iterativă cât mai bună alegerea  $R$  trebuie făcută în intervalul  $[R_{min}, 2R_{min})$ . Este probabil ca alegerea  $R$  în jurul valorii  $R_{opt}$  să asigure o viteză de convergență foarte bună.

Corecția în curent este duală: pentru a asigura o viteză de convergență cât mai bună alegerea  $G$  trebuie făcută în intervalul  $[G_{min}, 2G_{min})$ , cu o probabilitate mai mare în jurul valorii  $G_{opt}$ .

### 6.1.2 Corecția sursei comandate în tensiune sau în curent

Este posibil ca una din variante să asigure un timp mai scurt de calcul și un număr mai mic de iterații, comparativ cu cealaltă.

Dacă  $R$  și  $G$  sunt alese cu:  $R = xR_{min}$  și  $G = xG_{min}$  cu  $x \in (0,2)$ , atunci pentru aceeași valoare a lui  $x$  vom avea  $\theta_g = \theta_{g_i}$ .

Evaluarea trebuie făcută doar pentru  $\theta_h$  și  $\theta_{h_i}$ , și respectiv modulele coeficienților de corecție pe armonice ai  $h$  și  $h_i$ .

### 6.1.3 Suprarelaxarea

Fiind bazată pe un șir de tip Picard Banach sigur convergent, metoda permite utilizarea suprarelaxării, care în multe situații accelerează convergența [36, 41, 42]:

$$\underline{E}'^{(n)} = \underline{E}^{(n-1)} + \mu(\underline{E}^{(n)} - \underline{E}^{(n-1)}) \text{ cu } \mu > 1 \quad (6.10)$$

Evaluarea eficienței suprarelaxării aplicată la iterația  $n$  se poate face prin evaluarea erorii la iterația  $n + 1$ . Procedura se poate folosi cu o valoare fixă pentru  $\mu$ , sau se poate dezvolta o procedură de căutare a valorilor optime pentru  $\mu$  testând relația (6.11).

Dacă factorul de contracție este sensibil mai mic decât 1, este posibil ca utilizarea suprarelaxării să nu aducă un câștig semnificativ.

## 6.2 CALCULAREA MAI RAPIDĂ A UNUI REZULTAT INTERMEDIAR

Aceste proceduri de accelerare se bazează pe proprietatea șirurilor Picard Banach de a converge către soluție pornind de la orice valoare inițială și posibilitatea de a calcula într-o primă fază mai rapid un rezultat aproximativ, dar suficient de apropiat de punctul fix și de a folosi acest rezultat ca valoare de intrare pentru calculul final cu precizia și parametrii doriți.

### 6.2.1 Selecția armonicelor / utilizarea unor algoritmi de calcul mai puțin exacti

În [38] este propusă o procedură eficientă de reducere a volumului și a timpului de calcul folosind selecția armonicelor, precum și un algoritm de selecție.

În rețelele electrice trifazate valorile pentru amplitudinile armonicelor sunt în general descrescătoare. În această situație se poate utiliza o metodă rudimentară de selecție a armonicelor: creștere progresivă a numărului de armonice și utilizarea rezultatului în următorul ciclu iterativ. În majoritatea cazurilor scade atât numărul de iterații necesar, cât și timpul de calcul.

Similar într-o primă fază se poate folosi un număr redus de puncte de eșantionare, acesta putând fi crescut în faza următoare.

### 6.2.2 Procedura hibridă de corecție în tensiune /curent

Pornind de la evaluarea de la 6.1.2, poate fi utilă utilizarea succesivă a corecției sursei comandate în tensiune și apoi în curent (sau invers).

În cazul circuitelor cu caracter inductiv poate fi util să se aplice metoda cu trunchiere pentru un număr mai mic de armonice folosind corecția în tensiune, urmând ca la mărirea numărului de armonice să se folosească corecția în curent. În astfel de cazuri o soluționare hibridă poate fi mai rapidă.

Similar, în cazul circuitelor cu caracter capacitiv poate fi util, în anumite cazuri, să se aplice metoda cu trunchiere pentru un număr mai mic de armonice folosind corecția în curent, urmând ca la mărirea numărului de armonice să se folosească corecția în tensiune.

Decizia de a aplica procedura hibridă sau direct corecția în tensiune sau în curent se poate lua doar în urma evaluării descrisă la 6.1.2.

### 6.2.3 Utilizarea unor elemente liniare / neliniare de circuit cu valori modificate

O caracteristică neliniară "foarte dură" poate determina factori de contracție foarte apropiați de 1 [42]. În astfel de cazuri se poate soluționa circuitul într-o prima fază folosind o caracteristică "mai puțin dură" care asigură un factor de contracție mai bun. Rezultatul obținut devine valoare inițială pentru calculul cu caracteristica corectă.

Prin modificarea valorilor anumitor elemente de circuit liniare, se pot modifica valorile pentru  $\underline{Z}_{e_k}$  și  $\underline{Y}_{e_k}$  și influența factorii de contracție și coeficienții pentru funcțiile  $h(\underline{E})$  și respectiv  $h_i(\underline{I}_s)$ . Se poate calcula astfel rapid un rezultat intermediar.

## 6.3 MODIFICAREA CARACTERISTICII NELINIARE PRIN INCLUDEREA UNOR ELEMENTE EXISTENTE ÎN CIRCUIT

Includerea unui rezistor serie existent în circuit în elementul neliniar modifică convenabil caracteristica neliniară. Inițial avem dependența  $i \rightarrow u$  cu pantele maxime și minime mărginite de  $R_{max}$  și  $R_{min}$ . După includerea rezistorului acesta se modifică în  $R_s + R_{max}$  și  $R_s + R_{min}$ .

$$e = u_2 - R^s f_2(u_2) = g_2(u_2) \quad (6.19)$$

unde  $u_2$  este tensiunea pe noul element neliniar format din elementul neliniar inițial și rezistența serie  $R_s$  și  $R^s$  este noua rezistență de calcul.

Factorul de contracție al funcției  $g_2(u_2)$  devine:

$$\theta_g^s = \text{Max} \left[ \left( 1 - \frac{R^s}{R_s + R_{max}} \right), \left( \frac{R^s}{R_s + R_{min}} - 1 \right) \right] \quad (6.20)$$

cu intervalul de selecție pentru  $R^s$ :  $[R_s + R_{min}, 2(R_s + R_{min})]$  (considerând și 6.1.1).

O valoare cât mai mare a  $R_s$  asigură un factor de contracție și de asemenea coeficienți (de contracție) mai buni pentru  $g_2(u_2)$ .

Prin includerea rezistorului  $R_s$  în elementul neliniar, impedanța echivalentă a circuitului conectat la bornele noului element neliniar devine:

$$\underline{Z}_{e_{k2}} = \underline{Z}_{e_k} - R_s \quad (6.21)$$

Coeficientul pentru noua funcție  $h_2(\underline{E})$  pentru o armonică de rang  $k$  devine:

$$\left| 1 / (1 + R^s / (\underline{Z}_{e_k} - R_s)) \right| < \left| 1 / (1 + R / \underline{Z}_{e_k}) \right|, \quad (6.23)$$

asigurând și în acest caz un factor de contracție mai bun :  $\theta_h^s < \theta_h$ .



Includerea rezistorului  $R_s$  este benefică pentru accelerarea procedurii iterative.

Similar, un rezistor paralel se poate include în caracteristica neliniară în situația utilizării corecției în curent.

#### 6.4 MODIFICAREA CARACTERISTICII NELINIARE PRIN INCLUDEREA UNOR ELEMENTE EXTRASE DIN IMPEDANȚA CIRCUITULUI ECHIVALENT

Posibilitatea transferării unei rezistențe din impedanța circuitului conectat la bornele elementului neliniar permite generalizarea aplicării procedurii de la 6.3.

Trebuie aleasă valoarea rezistențelor de calcul astfel încât funcțiile  $g'_2$  și  $h'_2$  să rămână contracții și să asigure o viteză mai bună de convergență.

Pentru corecția în tensiune, urmare a transferului unei rezistențe  $R'_s$  din impedanța echivalentă  $Z_{e_k}$  conectată la bornele elementului neliniar vom avea  $\theta'_{g^s} < \theta_g$ .

O valoare cât mai mare a  $R'_s$  asigură un factor de contracție cât mai bun pentru  $g'_2$  și o viteză de convergență mai bună, cât timp este respectat intervalul de selecție al lui  $R$ .

Pentru modificarea  $h$  în  $h'_2$ :

$$\left| \frac{Z_{e_k} - R'_s}{Z_{e_k} + R} \right| < \left| \frac{Z_{e_k}}{Z_{e_k} + R} \right| < 1 \quad (6.24)$$

este îndeplinită dacă  $R'_s < 2\min_k(\Re(Z_{e_k}))$  cu un optim pentru  $R'_s = \min_k(\Re(Z_{e_k}))$ .

Extragerea unei rezistențe paralel folosind corecția în curent este duală. Impedanța echivalentă poate fi adusă în forma dorită folosind formulele de transformare serie - paralel a impedanțelor. Se poate alege rezistența paralel cu valoarea cea mai mare de pe armonice pentru a fi extrasă.

Similar cu 6.1.2 se poate face o analiză pentru cele două funcții  $g'_2$  și  $h'_2$ , respectiv  $g'_i$  și  $h'_i$  asupra factorilor de contracție și ai coeficienților de corecție și se poate alege procedura mai rapidă.

#### 6.5 EXEMPLUL ILUSTRATIV 4 - PROCEDURI DE ACCELERARE

Soluționăm un circuit similar cu cel de la 5.3, dar cu valori diferite ale elementelor de circuit și cu un alt unghi de comandă al tiristoarelor.

Trunchiem seria Fourier până la armonica de rang 100 inclusiv și împărțim perioada  $T$  tot la un număr de 40.000 de puncte echidistante. Oprim iterațiile atunci când distanța relativă (eroarea relativă)  $\varepsilon^{(n)}/\|e_g\|$  scade sub valoarea de  $10^{-8}$ . Folosirea distanței relative permite compararea rezultatelor calculate cu metrice diferite.

Conform 6.1.2 analizăm modulul coeficienților pe armonice ai  $h$  și  $h_i$  și factorii globali de contracție  $\theta_h$  și  $\theta_{h_i}$ . În urma analizei avem 77 de valori mai mici pentru funcția  $h$  și doar 24 de valori mai mici pentru funcția  $h_i$  - doar pe armonicele multiplu de 3 și de frecvență mare. Deși factorul global de contracție este favorabil corecției în curent cu  $\theta_{h_i} < \theta_h$ , datorită distribuției modulelor coeficienților pentru cele două funcții  $h$  și  $h_i$  favorabili corecției în tensiune, ne așteptăm corecția în tensiune să fie mai rapidă decât cea în curent.

De asemenea observăm rezistorul  $R_s$  în serie cu elementul neliniar: se poate utiliza corecția în tensiune cu includerea  $R_s$  în caracteristica neliniară.

### 6.5.1 Corecția în tensiune

Alegerea unei rezistențe  $R$  de valoare mai mare reduce timpul și numărul de iterații.

În cazul utilizării suprarelaxării, numărul minim de iterații a fost obținută pentru  $R = 1.5 R_{min}$ , fiind și cel mai rapid rezultat obținut.

Pentru  $R = 1.9 R_{min}$  folosind suprarelaxarea s-a înregistrat o scădere a numărului de iterații, dar o creștere semnificativă a timpului de calcul. Economia generată de introducerea suprarelaxării este aici mai mică decât timpul necesar efectuării calculului suplimentare.

Pentru  $R = R_{opt}$  nu s-a putut adopta un factor de suprarelaxare.

### 6.5.2 Corecția în curent

Alegerea unei conductanță  $G$  de valoare mai mare reduce timpul și numărul de iterații.

În cazul utilizării suprarelaxării, soluția cea mai rapidă a fost obținută pentru  $G = 1.5 G_{min}$ .

Pentru cazul  $G = G_{opt}$  s-a putut adopta doar un factor de suprarelaxare de 1.1.

Pentru  $G = 1.9 G_{min}$  și  $G = G_{opt}$  utilizarea suprarelaxării reduce numărul de iterații, dar crește semnificativ timpul de calcul.

Se confirmă decizia luată în urma analizei modulelor coeficienților de corecție ai funcției  $h$  și  $h_i$ : corecția în tensiune este în acest caz mai rapidă decât cea în curent.

### 6.5.3 Includerea în caracteristica neliniară a rezistorului serie $R_s$

Modificăm caracteristica neliniară prin includerea rezistorului serie  $R_s$ .

O rezistență  $R^s$  de valoare mai mare reduce timpul și numărul de iterații. Soluția cea mai rapidă a fost obținută pentru valoarea  $R^s = R_{opt}^s$ , dar și în apropierea acesteia, cum este cazul  $R^s = 1.9 (R_s + R_{min})$ .

Includerea rezistorului serie  $R_s$  în caracteristica neliniară determină o scurtare spectaculoasă a timpilor de calcul precum și a numărului de iterații.

Factorul de contracție fiind suficient de bun, se pot adopta doar factori de suprarelaxare de valoare mică și utilizarea suprarelaxării nu aduce o îmbunătățire semnificativă a timpului de calcul.

Între procedurile de accelerare compuse analizate, cea mai rapidă s-a dovedit înglobarea rezistenței serie în caracteristica neliniară, alegerea  $R^s = R_{opt}^s$  și folosirea unui algoritm de calcul cu pas intermediar: micșorarea numărului de puncte de eșantionare.

## CAPITOLUL 7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

### 7.1 CONCLUZII GENERALE

Metoda Hăntilă și-a demonstrat eficiența în toate cazurile analizate. Menționăm că aceasta prezintă mai multe avantaje comparativ cu alte metode: convergență asigurată, soluționare pe o singură fază, posibilitatea de soluționare a circuitelor cu elemente neliniare cu

caracteristici cu comutare comandată sau definite pe ramuri, posibilitatea de a soluționa circuite cu valori ale elementelor de circuit diferite pe armonice sau succesiuni (de exemplu: generatoare cu reactanțe diferite pe succesiuni), posibilitatea de a calcula folosind un număr foarte mare de armonice.

Metoda este un instrument de calcul util ce poate fi folosită cu ușurință încă din faza de dimensionare și proiectare, atât a circuitelor cât și a rețelelor, pentru a putea pune în evidență efectul deformant precum și transferul de putere pe armonice și pentru a implementa optim și verifica eventuale măsuri de corecție.

Bilanțul de puteri realizat folosind rezultatele obținute în domeniul frecvență soluționând circuitul trifazat prin metoda Hăntilă, respectată teorema Tellegen și confirmă teoria acad. A. Țugulea cu dezvoltările sale ulterioare privind circulația puterilor în rețele trifazate cu elemente neliniare.

Metoda aduce o simplificare spectaculoasă a volumului de calcul, deoarece permite rezolvarea prin soluționare pe o singură fază. O mare parte din calcule, de exemplu: răspunsul circuitului conectat la bornele elementului neliniar (funcția  $h$ ) sau tabelele de calcul pentru transformata inversă Fourier trebuie făcute o singură dată și nu sunt reluate pe parcursul iterațiilor.

Deși se bazează pe demonstrații complexe și necesită cunoștințe avansate de analiză funcțională, metoda rămâne ușor de înțeles, de aplicat și de simulat în programele de calcul.

Convergența este asigurată și nu este necesară utilizarea subrelaxării (cum se întâmplă în cazul altor metode). În situațiile cu factori de contracție apropiați de 1 se poate folosi eficient suprarelaxarea și economia de timp poate fi semnificativă.

Rezultatele obținute prin metoda Hăntilă sunt validate de cele obținute cu LTspice [40] în domeniul timp. Menționăm că LTspice nu permite separarea unei singure faze pentru analiza circuitului trifazat. În schimb, analiza în domeniul timp evită Fenomenul Gibbs ce apare în cazul metodei prezentate în această lucrare.

Metoda poate fi utilizată chiar și atunci când soluționarea în domeniul timp nu este posibilă ca urmare a necesității alegerii unui pas foarte mic de timp.

Chiar dacă este afectată de Fenomenul Gibbs (așa cum sunt toate metodele bazate pe analiză armonică), exactitatea rezultatelor este suficient de bună.

Se poate evita Fenomenul Gibbs prin păstrarea unui raport de 1 (+/- 10%) între numărul de puncte de calcul eșantionate și numărului de armonice folosit la trunchierea seriei Fourier.

Metoda poate fi folosită și soluționarea nu este "blocață" de rezonanțele la diferite frecvențe existente în circuitul analizat.

Dacă este nevoie de luarea în considerare a unui număr mare de armonici, volumul și timpul de calcul pot crește semnificativ. În funcție de caracteristica neliniară și de circuitul conectat la bornele elementului neliniar pot să apară situații în care factorul de contracție al algoritmului să aibă valori foarte apropiate de 1. În astfel de cazuri sunt foarte utile procedurile de accelerare.

Toate procedurile de accelerare analizate s-au dovedit utile și ușor de implementat în programele de calcul. În situația în care factorul de contracție este deja suficient de bun (semnificativ mai mic ca 1) sau dacă trunchierea nu se face la un număr mare de armonice, impactul acestora poate fi în unele cazuri ceva mai redus.

Evaluare inițială a coeficienților pe armonice a funcțiilor  $h$  și  $h_i$  privind decizia de a folosi corecția în tensiune, corecția în curent sau soluționarea hibridă este ușor de realizat și implementat, iar rezultatul a fost cel așteptat.

Alegerea rezistenței de calcul  $R$  în apropierea valorii  $R_{opt}$  a dus la o reducere substanțială a timpului de calcul. În situația unui factor de contracție foarte apropiat de 1 a apărut o "convergență oscilantă" a erorii datorate erorilor de calcul, dar fenomenul a putut fi evitat prin corectarea caracteristicii neliniare prin includerea rezistorului serie existent și folosirea unei caracteristici mai puțin "dure" ce asigură un factor de contracție mai bun.

În situațiile cu factori de contracție apropiați de 1 se poate folosi eficient suprarelaxarea și economia de timp poate fi semnificativă.

Soluția de modificare a caracteristicii neliniare prin includerea unor elemente de circuit rezistive existente sau extragerea acestora din impedanța echivalentă conectată la bornele elementului neliniar s-a dovedit extrem de eficientă, efectul de reducere a timpului și a numărului de iterații fiind spectaculos.

Considerăm că obiectivul principal al tezei de doctorat de a dezvolta metoda Hăntilă pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare și de a efectua o analiză a avantajelor acesteia comparativ cu alte metode de calcul existente a fost atins. Au fost aduse mai multe contribuții originale la aplicarea metodei atât pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare, cât și a circuitelor neliniare în general. De asemenea metoda a fost dezvoltată prin procedurile de accelerare a convergenței.

### 7.2 CONTRIBUȚII ORIGINALE

Principalele contribuții originale prezentate în teza de doctorat sunt:

1. Am identificat algoritmul de calcul și modelarea metodei Hăntilă pe calculator prin realizare unui program de calcul și am aplicat metoda în cazul unui exemplu concret de circuit trifazat neliniar cu valori numerice. Menționez că metoda a fost prezentată și folosită în [35], pentru soluționarea circuitelor cu elemente rezistive neliniare și apoi dezvoltată într-o serie de articole [36-38], pentru circuite în regim periodic. Soluționarea circuitelor trifazate utilizând metoda Hăntilă a fost propusă în [39] fără a prezenta însă și rezultate numerice.

2. Am analizat modul în care metoda se comportă în situația existenței unor rezonanțe în circuitul analizat. Soluționarea folosind metoda nu a fost "blocată" de rezonanțele pe armonice existente în circuitul propus care conține circuite Boucherot pe cele 3 faze.

3. Am analizat modul în care Bilanțul de Puteri calculat în urma soluționării circuitului neliniar utilizând metoda Hăntilă respectă Teoria privind transferul de puteri în circuitele neliniare elaborată de către acad. A. Țugulea și dezvoltările sale ulterioare și Teorema lui Tellegen privind conservarea puterilor. Metoda face analiza circuitului în domeniul frecvență și permite o apreciere ușoară a transferului de putere pe armonice, pentru fiecare element de circuit, inclusiv elementele neliniare și permite evidențierea frecvențelor pe care elementele de circuit consumă putere și pe care "debitează". Bilanțurile de puteri respectată teorema Tellegen și confirmă teoria acad. A. Țugulea cu dezvoltările sale ulterioare privind circulația puterilor în rețele trifazate cu elemente neliniare.

4. Am propus și analizat utilizarea metodei Hăntilă pentru soluționarea circuitelor trifazate având generatoare cu reactanțe diferite pe succesiuni. Datorită faptului că analiza circuitului se face în domeniul frecvență, metoda Hăntilă permite orice fel de valori ale elementelor de circuit pe succesiuni sau armonice și este foarte utilă de exemplu în situația generatoarelor cu reactanțe diferite pe succesiuni.

5. Am propus, dezvoltat și analizat utilizarea metodei Hăntilă pentru soluționarea circuitelor trifazate cu elemente neliniare cu comutare comandată (cum este cazul tiristoarelor). Rezistoarele neliniare cu comutare comandată sunt din ce în ce mai des întâlnite în echipamentele moderne. De asemenea, principiul de funcționare al filtrelor active se bazează și el pe această posibilitate de comutare. Corecția cu caracteristicile neliniare fiind făcută în domeniul timp, metoda poate fi aplicată ușor și în cazul elementelor neliniare cu comutare comandată în domeniul timp sau compuse din mai multe caracteristici definite pe ramuri.

6. Am realizat de studii comparative cu alte metode de calcul. Rezultatele obținute prin metoda Hăntilă sunt validate de cele obținute cu LTspice în domeniul timp. Metoda poate fi utilizată chiar și atunci când soluționarea în domeniul timp nu este posibilă ca urmare a necesității alegerii unui pas foarte mic de timp. LTspice [40] folosind soluționarea în domeniul timp nu poate soluționa circuite cu reactanțe diferite pe succesiuni și nu este util în astfel de aplicații. Menționez că LTspice [40] nu permite separarea unei singure faze pentru analiza circuitului trifazat. În schimb, analiza în domeniul timp evită efectul Gibbs. Metoda are posibilitatea de a calcula cu un număr foarte mare de armonice, fapt practic imposibil în cazul altor metode de calcul. Metoda necesită un efort de calcul redus comparativ cu alte metode.

7. Am efectuat o analiză privind exactitatea rezultatelor obținute. Rezultatele obținute prin metoda Hăntilă sunt validate de cele obținute cu LTspice în domeniul timp. Exactitatea rezultatelor poate fi îmbunătățită prin creșterea numărului de armonice și de puncte de eșantionare precum și prin alegerea unei valori mai mici pentru eroarea de oprire a iterațiilor  $\varepsilon^{(n)}$ .

8. Am analizat volumul și timpul de calcul necesar utilizării metodei în cazul soluționării circuitelor neliniare trifazate și posibilității de a calcula cu un număr mare de armonice. Metoda Hăntilă are posibilitatea de a calcula cu un număr foarte mare de armonice, fapt practic imposibil în cazul altor metode de calcul. Metoda necesită un efort de calcul redus comparativ cu alte metode.

9. Am analizat posibilitatea de aplicare a unor algoritmi de accelerare și de asemenea am dezvoltat astfel de algoritmi. Am analizat, dezvoltat și detaliat mai multe proceduri de accelerare a algoritmului de calcul: alegerea optimă a rezistenței de calcul  $R$ , utilizarea suprarelaxării, selecția armonicelor, corecția sursei comandate în tensiune sau în curent. De asemenea am propus, detaliat și dezvoltat mai multe proceduri originale privind reducerea efortului și a timpului de calcul: procedura hibridă de corecție tensiune / curent, folosirea de caracteristici neliniare "mai puțin dure" cu factori de contracție mai buni, utilizarea de valori modificate pentru elementele liniare de circuit, respectiv corectarea caracteristicii neliniare prin includerea altor elemente existente circuit sau extragerea acestora din impedanța echivalentă conectată la bornele elementului neliniar. Toate procedurile analizate s-au dovedit utile și ușor de implementat în programele de calcul.

Procedura de modificare a caracteristicii neliniare prin includerea unor elemente de circuit rezistive existente s-a dovedit extrem de eficientă în exemplul analizat, efectul de reducere a timpului și a numărului de iterații fiind spectaculos.

10. Am analizat modul în care metoda se comportă în situația în care apar variații bruște ale semnalului. Chiar dacă este afectată de Fenomenul Gibbs, așa cum sunt toate metodele bazate pe analiză armonică, exactitatea rezultatelor obținute prin metoda Hăntilă este suficient de bună.

11. Am analizat posibilitatea de a evita apariția Fenomenului Gibbs în situația utilizării metodei Hăntilă pentru soluționarea circuitelor trifazate neliniare. Am propus, dezvoltat și analizat o soluție care constă în păstrarea unui raport de 1 (+/- 10%) între numărul de puncte de

calcul eșantionate și numărului de armonice folosit la trunchierea seriei Fourier. Soluția permite evitarea apariției fenomenului Gibbs.

### 7.3 PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

Considerăm că o direcție importantă de dezvoltare a metodei Hăniță este creșterea vitezei de calcul. Aceasta se poate face prin: identificarea de algoritmi mai eficienți atât ca viteză, cât și ca precizie pentru calculul transformatelor Fourier directă și inversă, inclusiv cu eșantionare neuniformă în domeniul timp, precum și prin dezvoltarea procedurilor de accelerare.

Pentru utilizarea suprarelaxării o direcție de dezvoltare pe care o considerăm utilă o reprezintă calcularea unui factor de suprarelaxare "dinamic" similar cu soluția prezentată în [42] pentru câmpul electromagnetic în medii neliniare.

O direcție de dezvoltare a procedurilor bazate pe calcularea mai rapidă a unui rezultat intermediar o reprezintă optimizarea modului de stabilire a pașilor intermediari și identificarea unei proceduri care să permită evaluarea de la început a mărimii pasului și a punctului de oprire.

Poate fi interesantă extinderea metodei Hăniță și pentru circuite cu elemente inductive neliniare. În acest caz însă este necesar să se dezvolte procedura de soluționare specifică acestor circuite. Deocamdată putem preciza că analiza unui circuit ce conține elemente neliniare rezistive și inductive este foarte dificilă și poate să creeze probleme din punct de vedere al stabilității soluției.

### BIBLIOGRAFIE

- [1] Țugulea, A. Considerații privind efectele energetice ale regimului deformant, *Energetica*, 1986, XXXIV, 1, pp 27 – 31.
- [2] Țugulea, A. Considerații privind efectele energetice în regimurile armonice nesimetrice ale rețelelor trifazate, *Energetica*, 1986, XXXIV, 3, pp. 121 – 130.
- [3] Țugulea, A.; Golovanov, C. Efectele energetice ale regimurilor nesimetrice și deformante ale sistemelor electroenergetice. Posibilități de măsurare, *ENERG*, 1987, 3, pp. 130 – 159.
- [4] Țugulea, A. Power flows under non-sinusoidal and non-symmetric periodic and almost periodic steady-states of electrical power system, Proc. of ICHPS VI, Bologna, Italy, 1994, pp. 388 – 395.
- [5] Țugulea, A. Criteria for the definition of the electric power quality and its measurement systems, *European Transactions on Electrical Power*, 1996, 6, 5, pp. 357 – 363.
- [6] Nemoianu, I.V.; Ciuceanu, R.M. Non-symmetry and residual active and reactive powers flow in non-linear three-phase unbalanced circuits, *Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2015, 60, 2, pp. 227 – 237.
- [7] Nemoianu, I.V.; Ciuceanu, R.M. Characterization of non-linear three-phase unbalanced circuits powers flow supplied with symmetrical voltages, *Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2015, 60, 3, pp. 355 – 365.
- [8] Nemoianu, I.V.; Ciuceanu, R.M. Aspects of active and reactive powers conservation in three-phase circuits with zero impedance neutral and two nonlinear unbalanced loads, *Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2016, 61, 4, pp. 349 – 354.
- [9] Nemoianu, I.V.; Maricar, M.; Ciuceanu, R.M. Active and reactive power flow in distorting three-phase unbalanced circuits without neutral, International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE), University POLITEHNICA of Bucharest, Romania, June 30 – July 2, 2016.
- [10] Ciuceanu, R.M.; Nemoianu, I.V.; Mănescu Păltânea, V.; Păltânea, G. On Professor Țugulea's visionary power theory: A review, recent advances and perspectives. *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. Énerg.* 2018, 63, 123–127.
- [11] Nemoianu, I.V.; Dascalu, M.I.; Manescu, V.; Paltanea, G.; Ciuceanu, R.M.; Păltânea, V.M. In-deep First Assessment of the Influence of Nonlinear Elements in Three-Phase Networks with Neutral. In Proceedings of the 2019 11th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 28–30 March 2019; pp. 1–6.

- [12] Nemoianu, I.V.; Dascălu, M.I.; Mănescu Păltânea, V.; Păltânea, G.; Radulian, A. Detailed evaluation for the power flow effects of nonlinear circuit elements in three-phase networks without neutral. *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. Énerg.* 2019, *64*, 195–198.
- [13] Nemoianu, I.V.; Paltanea, V.M.; Paltanea, G.; Ciuceanu, R.M. Insight into the Non-Symmetry and Residual Active and Reactive Power Flow in the case of Three-Phase Distorting Networks without Neutral. In Proceedings of the 2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania, 25–27 March 2021; pp. 1–6.
- [14] Mahmoudian, M.; Rodrigues, E.M.G.M.G.; Pouresmaeil, E. An Efficient H7 Single-Phase Photovoltaic Grid Connected Inverter for CMC Conceptualization and Mitigation Method. *Electronics* 2020, *9*, 1440.
- [15] Udovichenko, A.V.; Brovanov, S.V.; Grishanov, E.V.; Stennikova, S.M. A Five-Level Converter in a Three-Level Mode for Common-Mode Leakage Current Suppression in PV-Generation Systems. *Electronics* 2021, *10*, 2382.
- [16] Ashique, R.H.; Maruf, H.; Sourov, K.M.S.H.; Islam, M.; Islam, A.; Rabbani, M.; Islam, R.; Khan, M.M.; Shihavuddin, A. A Comparative Performance Analysis of Zero Voltage Switching Class E and Selected Enhanced Class E Inverters. *Electronics* 2021, *10*, 2226.
- [17] Wu, S.-T.; Chen, F.-Y.; Chien, M.-C.; Wang, J.-M.; Su, Y.-Y. A Hybrid Control Scheme with Fast Transient and Low Harmonic for Boost PFC Converter. *Electronics* 2021, *10*, 1848.
- [18] Cazacu, E.; Petrescu, L.-G.; Ioniță, V. Smart Predictive Maintenance Device for Critical In-Service Motors. *Energies* 2022, *15*, 4283.
- [19] Cazacu, E.; Groșanu, D.-V.; Petrescu, L. "Reactive Power Management in a Grid-Connected Photovoltaic Power Station: A Case-Study" The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty, vol.21, no.2, 2021, pp.53-58.
- [20] Da Silva, R.P.B.; Quadros, R.; Shaker, H.R.; da Silva, L.C.P. Analysis of the Electrical Quantities Measured by Revenue Meters Under Different Voltage Distortions and the Influences on the Electrical Energy Billing. *Energies* 2019, *12*, 4757.
- [21] Constantinescu, F.; Gheorghe, A.G.; Marin, M.E.; Taus, O.S. Harmonic balance analysis of home appliances power networks. In Proceedings of the 2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES), Oradea, Romania, 1–7 June 2017; pp. 256–260.
- [22] Constantinescu, F.; Rață, M.M.; Enache, F.R.; Vătășelu, G.; Ștefănescu, V.; Milici, D.; Aramă, I. Frequency domain models for nonlinear loads with firing angle control devices Part I—Measurements. In Proceedings of the 2019 15th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (ICEMES), Oradea, Romania, 13–14 June 2019.
- [23] Constantinescu, F.; Gheorghe, A.G.; Marin, M.E.; Vătășelu, G.; Ștefănescu, V.; Bodescu, D. New models for frequency do-main simulation of home appliances networks. In Proceedings of the 11-th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, Romania, 28–30 March 2019.
- [24] Enache, F.R.; Constantinescu, F.; Rață, M.; Vătășelu, G.; Ștefănescu, V.; Milici, D.; Aramă, I. Frequency domain models for nonlinear loads with firing angle control devices, Part II—Modeling. In Proceedings of the 6th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering, Galat, i, Romania, 18–20 October 2019.
- [25] Faifer, M.; Laurano, C.; Ottoboni, R.; Toscani, S.; Zanoni, M. Frequency-Domain Nonlinear Modeling Approaches for Power Systems Components—A Comparison. *Energies* 2020, *13*, 2609.
- [26] Díaz-Araujo, M.H.; Medina-Rios, A.; Madrigal-Martínez, M.; Balderas, A.C. Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Generation Systems in the Harmonic Domain. *Energies* 2019, *12*, 4785.
- [27] Tabora, J.M.; Tostes, M.E.D.L.; De Matos, E.O.; Soares, T.M.; Bezerra, U.H. Voltage Harmonic Impacts on Electric Motors: A Comparison between IE2, IE3 and IE4 Induction Motor Classes. *Energies* 2020, *13*, 3333.
- [28] Lumbreras, D.; Gálvez, E.; Collado, A.; Zaragoza, J. Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review. *Energies* 2020, *13*, 5792.
- [29] Mboving, C.A. Investigation on the Work Efficiency of the LC Passive Harmonic Filter Chosen Topologies. *Electronics* 2021, *10*, 896.
- [30] Petrushyn, V.; Horoshko, V.; Plotkin, J.; Almuratova, N.; Toigozhinova, Z. Power Balance and Power Factors of Distorted Electrical Systems and Variable Speed Asynchronous Electric Drives. *Electronics* 2021, *10*, 1676.
- [31] Junior, O.D.B.; Amorim, T.S.; Carletti, D.; Neto, A.F.; Encarnaçao, L.F. Design of an Enhanced FLC-Based Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters. *Electronics* 2020, *9*, 2052.

- [32] Gonçalves, J.; Valtchev, S.; Melicio, R.; Gonçalves, A.; Blaabjerg, F. Hybrid Three-Phase Rectifiers with Active Power Factor Correction: A Systematic Review. *Electronics* 2021, 10, 1520.
- [33] Sušin, D.; Nemeč, M.; Ambrožič, V.; Nedeljković, D. Limitations of Harmonics Control in Power Converters. *Electronics* 2019, 8, 739.
- [34] Gutiérrez, F.E.R.; Castillo, O.C.; Rivas, J.J.R.; González, R.O.; Sánchez, E.P.; Morales, L.G.G. Harmonics Reduction and Reactive Power Injection in Wind Generation Systems. *Electronics* 2021, 10, 1964.
- [35] Hăntilă, I. F. A method for solving nonlinear resistive networks, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 1979, 24, 2, pp. 217 - 226.
- [36] Hăntilă, I. F.; Maricaru, M.; Ciuceanu, R. M.; L. Corlan, L. Harmonic analysis of circuits with nonlinear resistive elements, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2012, 57, 4, pp. 333–340.
- [37] Vasilescu, G. M.; Hăntilă, I. F.; Maricaru, M.; Bârsan, I.; Stanciu, V. A new method for solving the periodic steady state of nonlinear circuits, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2014, 59, 4, pp. 339–349.
- [38] Hăntilă, I. F.; Constantinescu, F.; Gheorghe, A. G.; Nițescu, M.; Maricaru, M.; A new algorithm for frequency domain analysis of nonlinear circuits, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2009, 54, 1, pp. 57–66.
- [39] Hăntilă, I. F.; Maricaru, M.; Stănculescu, M.; Vasilescu, G. M. Method for analyzing three-phase networks with nonlinear resistive elements, *Rev. Roum. Sci. Techn. – Électrotechn. et Énerg.*, 2019, 64, 2, pp. 103–106.
- [40] Analog Devices, <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html> [accesat: Mai 12, 2022]
- [41] Hăntilă, I. F.; Vasile, N.; Demeter, E.; Marinescu, S.; Covrig, M. Metoda Picard-Banach. In *Câmpul electromagnetic staționar în medii neliniare*, Ed. ICPE, București, Romania, 1998, pp. 46-51, ISBN 973-98322-0-2;
- [42] Vasilescu, G.M.; Maricaru, M. An efficient procedure for solving non-linear problems in electrical engineering: Hăntilă Method, *Rev. Roum. Sci. Techn. Électrotechn. et Énerg.* 2019, 64, 187–194.
- [43] J. W. Eaton, <https://www.gnu.org/software/octave/> [accesat: Mai 12, 2022]
- [44] Mathworks, <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/thyristorpiecewiselinear.htm> [accesat: Mai 12, 2022]