

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ÎN ELECTROMECHANICĂ,
MEDIU ȘI INFORMATICĂ INDUSTRIALĂ

Ing. Felicia Năstăsoiu

CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE ȘI
CONVERTOARELE STATICE
- Rezumat -

Conducător științific:
Prof. univ. dr. ing. Alexandru BITOLEANU

CRAIOVA
~ 2009 ~

CUPRINS

1.	NOȚIUNI FUNDAMENTALE.....	1
1.1	Introducere în problematica calității energiei electrice	1
1.2	Degradarea calității energiei electrice: origini-caracteristici-definiții.....	2
1.2.1	Generalități	2
1.2.2	Golurile de tensiune și întreruperile.....	2
1.2.2.1	Surse ale golurilor de tensiune și întreruperilor.....	3
1.2.2.2	Efecte ale golurilor de tensiune și întreruperilor	3
1.2.2.3	Soluții pentru ameliorarea golurilor de tensiune și întreruperilor	3
1.2.3	Armonicile și interarmonicile.....	3
1.2.3.1	Surse de armonici și interarmonici	4
1.2.3.2	Efecte ale armonicilor și interarmonicilor.....	5
1.2.3.3	Soluții de reducere a armonicilor.....	5
1.2.4	Supratensiunile	5
1.2.4.1	Cauzele de apariție a supratensiunilor.....	5
1.2.4.2	Efectele provocate de supratensiuni.....	6
1.2.4.3	Soluții pentru ameliorarea supratensiunilor	6
1.2.5	Fluctuațiile de tensiune	6
1.2.5.1	Surse ale fluctuațiilor de tensiune.....	6
1.2.5.2	Efecte ale fluctuațiilor de tensiune.....	7
1.2.5.3	Soluții pentru ameliorarea fluctuațiilor de tensiune.....	7
1.2.6	Dezechilibre.....	7
1.2.6.1	Surse de dezechilibre	7
1.2.6.2	Efecte ale nesimetriei tensiunilor.....	7
1.2.6.3	Soluții pentru evitarea nesimetriilor.....	7
2.	ARMONICI GENERATE DE CONVERTOARELE STATICE DE PUTERE.....	8
2.1	Teoria armonicilor	8
2.1.1	Seriile Fourier și metodele analitice	8
2.1.1.1	Seriile Fourier	9
2.1.1.2	Simetria undelor.....	10
2.1.1.3	Transformata Fourier	10
2.1.1.4	Transformata Fourier discretă	10
2.2.1	Parametrii regimului deformant.....	11
2.2	Armonici generate de convertoarele statice de putere.....	12
2.2.1	Armonici generate de redresoarele comandate.....	12
2.2.1.1	Conținutul de armonici.....	14
2.2.2	Armonici generate de convertoarele statice indirecte de tensiune și frecvență	19
2.2.2.1	Influența energetică a filtrului din circuitul intermediar	20
2.2.2.2	Alimentarea de la un redresor monofazat	20
2.2.2.3	Alimentarea de la un redresor trifazat.....	23
2.3	Rezultate experimentale.....	25
3.	PUTERI ÎN CURENT ALTERNATIV NESINUSOIDAL.....	30
3.1	Legătura dintre conceptul de calitate a energiei electrice și teoria puterilor în sistemele electrice.....	30
3.2	Comparație între teoria puteri reactive instantanee p-q și teoria componentelor fizice ale curentului.....	31

3.2.1	Introducere.....	31
3.2.2	Teoria p- q. Curenții activi și reactivi	32
3.2.3	Teoria componentelor fizice pentru circuitele trifazate (CPC)	33
3.2.4	Interpretarea corectă a teoriei puterii p-q	36
3.3	Studii de caz	36
3.3.1	Prezentarea rezultatelor analitice pentru o sarcină pur rezistivă	36
3.3.1.1	Cazul teoriei p-q.....	36
3.3.1.2	Soluția pentru teoria componentelor fizice ale curentului	38
3.3.1.3	Soluția în cazul interpretării corecte a teoriei puterii p-q.....	38
3.3.2	Rezultate Simulink.....	39
3.3.3	Tensiune sinusoidală și sarcină dezechilibrată.....	44
3.3.4	Teoria componentelor fizice ale curentului când sursa de alimentare este nesinusoidală	46
3.3.4.1	Soluția analitică.....	46
3.3.4.2	Analiză Simulink	49
3.4	CPC și curent nesinusoidal prin comandă	51
4.	MIJLOACE DE COMPENSARE A ARMONICILOR.....	56
4.1	Generalități.....	56
4.2	Filtre pasive.....	58
4.2.1	Introducere.....	58
4.3	Filtre active	59
4.3.1	Filtru activ paralel.....	60
4.3.2	Filtru activ serie	60
4.3.3	Filtre active hibride	61
4.4	Metode de calcul a curenților de referință	62
4.4.1	Calculul curenților de referință folosind transformata Fourier	65
4.4.2	Metoda puterii instantanee	67
4.4.3	Metoda detectării sincrone	69
4.4.4	Metoda sistemului rotitor sincron.....	71
4.4.5	Compararea curentului prescris	73
4.4.5.1	Compararea curenților de referință calculați	75
4.4.6	Alte metode de calcul a curenților de referință	76
4.5	Analiza influenței tensiunii de pe condensatorul de sarcină asupra factorului de distorsiune armonică.....	76
4.5.1	Calculul condensatorului de compensare.....	76
4.5.2	Preîncărcarea condensatorului.....	78
4.5.3	Influența tensiunii de pe condensatorul de compensare asupra factorului de distorsiune a curentului	80
4.6	Rezultate experimentale.....	83
5.	CONCLUZII FINALE.....	91
5.1	Contribuțiile autorului	93
BIBLIOGRAFIE.....		94
ANEXE.....		100

Scopul lucrării de față este de a genera cunoștințe legate de calitatea energiei, modelarea convertoarelor statice, înțelegerea profundă a problemelor create de generarea armonicilor în sistemul de alimentare cât și de a furniza soluții viabile pentru a elimina efectele negative ale consumatorilor neliniari.

În capitolul 1 se face o introducere în problematica calității energiei electrice și se prezintă pe larg perturbațiile electromagnetice care duc la degradarea calității energiei electrice.

Mai întâi se face o scurtă descriere a ceea ce înseamnă energia electrică și se definește termenul de calitate a energiei electrice. Calitatea energiei electrice a devenit o problemă deoarece tot mai mulți consumatori sunt afectați de golurile, întreruperile de tensiune, armonicile, produse de noile echipamente utilizate în electronica de putere. Apoi detaliat, pentru fiecare perturbație electromagnetică se prezintă:

- o definiție a perturbației respective;
- sursele care cauzează o astfel de perturbație;
- efectele pe care le produce aceasta asupra echipamentelor;
- soluții de ameliorare a acestor perturbații.

În capitolul 2 se prezintă armonicile generate de convertoarele statice de putere.

În prima parte se face o descriere a seriilor Fourier, care stabilesc o relație matematică între funcția timp și domeniul frecvențelor. Seria Fourier are una din următoarele trei forme: trigonometrică, armonică și exponențială. Transformatele Fourier, atât transformata Fourier clasică cât și cea discretă, oferă posibilitatea de a analiza o funcție sau o formă de undă în domeniul timp și în domeniul frecvenței.

În continuare se analizează, în două subcapitole separate, armonicile generate de redresoarele comandate și respectiv armonicile generate de convertoarele statice indirecte de tensiune și frecvență.

Sistemele de acționare cu motoare de curent continuu și redresoare comandate constituie o importantă sursă de poluare armonică, atât prin prisma răspândirii lor, cât și prin armonicile generate. Armonicile produse de convertoarele statice apar datorită asimetriei la construcție, timpilor de comutație, imprecizia la deschiderea instantanee a tiristoarelor.

Pentru determinarea tuturor influențelor, s-a simulat funcționarea sistemului la sarcină nominală pentru trei valori ale unghiului de comandă (30° , 45° și 60°), obținând formele de undă pentru curenții din primarul și secundarul transformatorului și pentru tensiunea din secundarul transformatorului, precum și spectrele de armonici corespunzătoare. Pentru validarea rezultatelor obținute din simulare, s-au făcut experimente pe un sistem de acționare similar cu cel folosit în schemele de simulare și s-au obținut formele de undă prezentate în (Fig.1).

În ceea ce privește armonicile generate de convertoarele statice indirecte, o atenție deosebită a fost acordată influenței energetice a filtrului din circuitul intermediar. S-au analizat două cazuri de alimentare a circuitului intermediar: i) de la un redresor monofazat necomandat și ii) de la un redresor trifazat necomandat. Pentru diferite valori ale inductivității și capacității din circuitul intermediar, s-a reprezentat forma de undă a curentului din primarul transformatorului și spectrul de armonici corespunzător. Aceste valori au o influență și asupra regimului de curent întrerupt al redresorului.

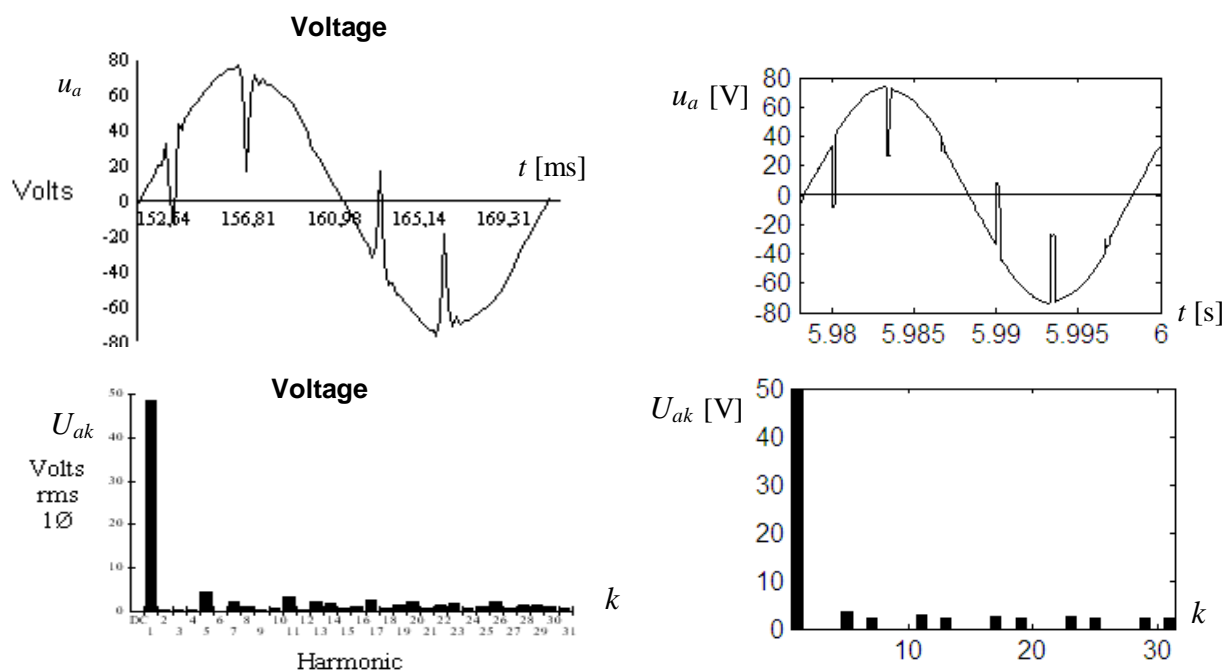


Fig. 1 Forma de undă a tensiunii din secundarul transformatorului și spectrul de armonici corespunzător, experimentale (stânga) și obținute prin simulare (dreapta), pentru unghiul de comandă de 60°

Capitolul 3 prezintă legătura dintre calitatea energiei și teoria puterilor, ca urmare a problemelor generate de armonici în sistem. Preocupările privind fenomenele legate de puteri au evoluat de la simple observații pasive, la încercări active de îmbunătățire a acestor aspecte. Pentru îmbunătățirea calității energiei electrice cât și pentru îmbunătățirea factorului de putere se folosesc filtre rezonante și filtre active. În mediile științifice internaționale, există o susținută dezbateră privind definirea puterilor în regim nesinusoidal. Se contestă, în special, puterea deformantă introdusă de Budeanu în anul 1927. Teoria componentelor fizice ale curentului (CPC), elaborată de prof. Czarnecki, deși este prezentată ca o contribuție decisivă și definitivă la definirea puterilor în regim nesinusoidal, prezintă serioase deficiențe de aplicare în sistemele în care curentul este sursa regimului deformant și nu tensiunea.

În prima parte se prezintă suportul teoretic al celor trei metode de descompunere a componentelor curentului și anume: teoria p-q, teoria componentelor fizice ale curentului și interpretarea corectă a teoriei p-q.

În dezvoltarea teoriei componentelor fizice ale curentului, legătura cu fenomenele fizice de putere a fost prima grijă, ceea ce nu este cazul teoriei p-q. Proprietățile puterilor în circuite trifazate cu tensiuni și curenți sinusoidali sunt determinate de trei fenomene independente: (i) – transfer permanent de energie între sursa de alimentare și sarcină, fenomen asociat cu puterea activă P; (ii) – prezența elementelor reactive în sarcină, fenomen asociat cu puterea reactivă Q; (iii) – asimetria curentului de alimentare datorită sarcinii dezechilibrate, fenomen asociat puteri deformante D. Teoria puterii reactive instantanee p-q se bazează numai pe două mărimi de putere, pe puterea activă instantanee p și puterea reactivă instantanee q, care sunt asociate cu fenomene complet diferite din circuit. Interpretarea corectă a teoriei p-q definește trei curenți care au legătură cu fenomenele fizice care apar în circuit.

Pe baza suportului teoretic și folosind mediul Matlab-Simulink, se face o analiză comparativă a acestor metode. **Au fost analizate următoarele studii de caz: a)-tensiune sinusoidală și sarcină pur rezistivă nesimetrică; b)-tensiune sinusoidală și sarcină dezechilibrată; c)-tensiune nesinusoidală și sarcină neliniară nesimetrică; d)-tensiune**

sinusoidală și sarcină neliniară simetrică. În continuare în (Fig. 2), se prezintă formele de undă ale curenților de pe faza R, pentru cazul când tensiunea este sinusoidală și sarcina dezechilibrată.

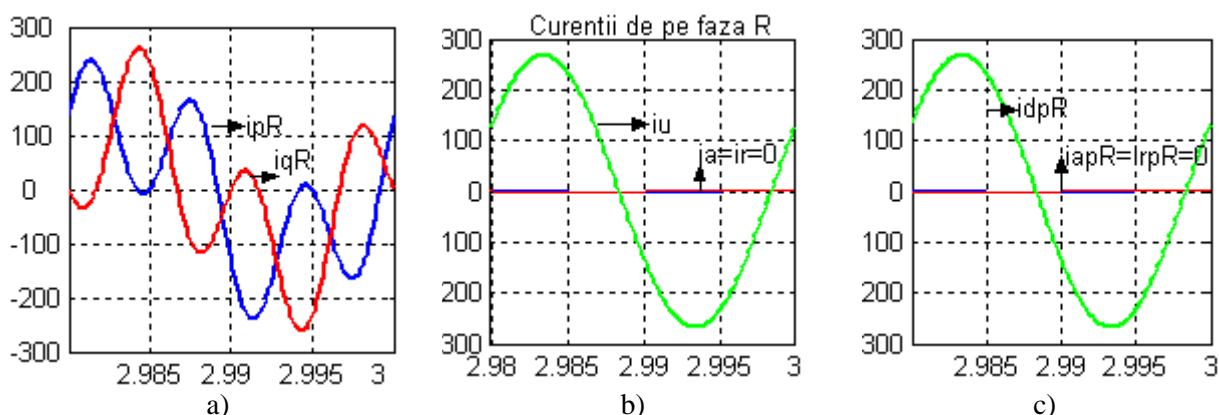


Fig.2 Reprezentarea grafică a curenților de pe faza R: a) teoria p-q; b) teoria componentelor fizice ale curentului; c) interpretarea corectă a teoriei p-q

Pentru acest tip de sarcină conform teoriei CPC și interpretării corecte a teoriei p-q, apare doar curent dezechilibrat, deoarece această sarcină are puterea activă și reactivă nulă. Conform teoriei p-q, deși P și Q sunt nule, apare curent activ și reactiv (Fig. 2a), ceea ce nu este corect.

Având în vedere rezultatele obținute prin analiza acestor exemple se desprind următoarele concluzii:

- teoria componentelor fizice ale curentului este aplicată cu succes pentru circuitele cu tensiuni și curenți sinusoidali;
- această teorie dă rezultate corecte când tensiunea este nesinusoidală și sarcină neliniară nesimetrică;
- CPC dă rezultate eronate când este aplicată în cazul unei tensiuni sinusoidale și sarcină neliniară simetrică;
- teoria p-q definește doi curenți, care au semnificații diferite de curentul activ, respectiv reactiv dați de CPC, deși au aceeași denumire;
- componenta activă definită în cazul ultimei teorii analizate, reprezintă componenta activă a curentului de sarcină numai în cazul când tensiunea este sinusoidală indiferent de tipul de sarcină.

Capitolul 4 intitulat „Mijloace de compensare a armonicilor”, prezintă principalele metode de reducere a armonicilor, baza punându-se pe filtrele active.

Dintre diferitele topologii de filtre active prezentate, cea care a fost aleasă a fost inverterul de tensiune comandat în curent, deoarece acesta oferă un raport optim cost-calitate.

O atenție deosebită în acest capitol se acordă metodelor de calcul a curenților de referință a unui filtru activ. Astfel s-au analizat patru metode de calcul: metoda Fourier cu extragerea fundamentalei în domeniul frecvenței și metoda puterii instantanee, metoda detectării sincrone și respectiv metoda sistemului rotitor sincron în domeniul timpului. Pentru fiecare metodă analizată folosind mediul Matlab-Simulink s-a realizat blocul de calcul al curenților de referință și apoi acest bloc a fost integrat într-un model Simulink a cărui sarcină s-a păstrat constantă și s-a urmărit corectitudinea curentului prescris prin valoarea factorului de distorsiune a curentului obținut la rețea. Pe baza graficelor rezultate din schemele de simulare se pot trasa următoarele concluzii:

-atât metodele de calcul în domeniul frecvenței cât și în domeniul timpului, prescriu un curent care este urmărit de curentul real al filtrului;

-metoda care prescrie cel mai corect curentul de referință este metoda Fourier cu extragerea fundamentalei, pe baza căreia se obține un curent la rețea care are THDI=0.05 %;

În continuare se evidențiază influența tensiunii de pe condensatorul de compensare asupra factorului de distorsiune a curentului obținut la rețea. Pentru aceasta s-a realizat un model Simulink, în care s-au modificat pe rând factorul de distorsiune al sarcinii și valoarea efectivă a curentului sarcinii, obținându-se dependența $THDI=f(U_c)$, din (Fig. 3).

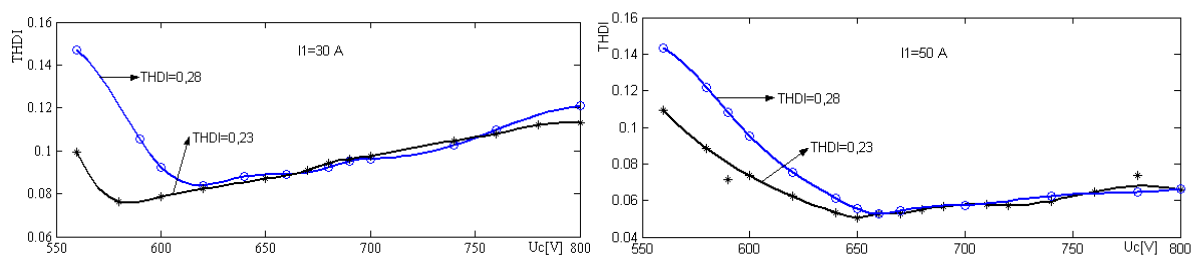


Fig. 3 Evoluția factorului de distorsiune în funcție de tensiunea de pe condensator, pentru două valori ale curentului de sarcină

Din graficele prezentate în (Fig. 3), concluzia cea mai importantă este că există un optim al tensiunii condensatorului de compensare la care se obține un minim al factorului de distorsiune armonică a curentului rețelei. Valoarea optimă a tensiunii de pe condensatorul de compensare crește pe măsură ce valoarea efectivă a curentului sarcinii crește.

Pentru verificarea, existenței unei valori optime a tensiunii de pe condensatorul de compensare, s-au realizat determinări experimentale folosind o sarcină neliniară și filtrul activ existente în laboratorul de Acționări Electrice din cadrul Facultății de Inginerie în Electromecanică, Mediu și Informatică Industrială. Rezultatele experimentale au constat în prelevarea formelor de undă ale curentului sarcinii deformante și a curentului la rețea după punerea în funcțiune a filtrului activ. Cazurile analizate sunt prezentate în tab. 1.

Tabelul 1. Factorii de distorsiune ai curentului deformant și ai curentului rețelei

U_c [V]	600	625	650	675	700
THDI _s [%]	110	110	110	110	110
THDI[%]	45	42,7	36,8	37,16	42
PTHD[%]	43	39,7	35	33,2	40,4

Pe baza rezultatelor experimentale, se obține dependența factorului de distorsiune armonică în funcție de valoarea tensiunii de pe condensatorul de compensare (Fig. 4).

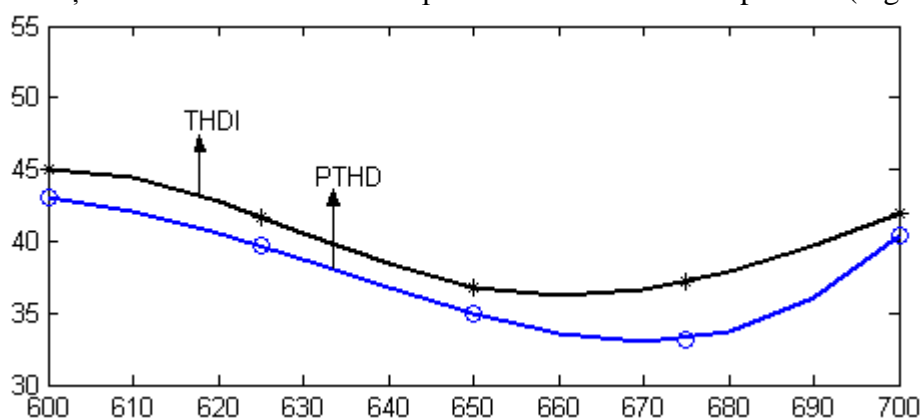


Fig. 4 Dependența factorilor de distorsiune în funcție de valoarea tensiunii pe condensatorul de compensare (experimental)

Concluzii:

-întotdeauna există o valoare optimă a tensiunii pe condensatorul de compensare, care minimizează factorul de distorsiune a curentului la rețea;

- pentru cazurile analizate, minimul factorului total de distorsiune armonică se obține pentru $U_c=650$ V, iar valoarea cea mai mică a factorului parțial de distorsiune armonică se obține pentru $U_c=675$ V;

- în cazul rezultatelor experimentale, valoarea factorului de distorsiune armonică este influențată de existența unei familii de armonici dată de frecvența de comutație a filtrului.

Contribuțiile autorului se referă la prelucrarea sub formă adecvată și interpretarea dezvoltărilor teoretice existente, unele aflate încă în dezbateră comunității științifice.

O sinteză a contribuțiilor este prezentată în continuare:

1. O sintetizare a principalelor perturbații ce afectează calitatea energiei electrice, prin evidențierea surselor, a efectelor și a soluțiilor existente pentru ameliorarea efectelor negative;
2. Modelarea, sub mediul Matlab-Simulink, a sistemului de acționare cu motor de curent continuu și redresor trifazat în punte complet comandat și evidențierea, pe această cale, a armonicilor generate și verificarea, prin măsurători experimentale, a rezultatelor obținute prin simulare;
3. Elaborarea modelului Simulink a ansamblului convertor static indirect de tensiune și frecvență cu modulație în durată cu circuit intermediar și sarcină RLC și analiza influenței filtrului din circuitul intermediar, asupra armonicilor din rețeaua de alimentare;
4. Efectuarea unor studii de caz, comparativ, între teoria fazorială a puterilor și teoria componentelor fizice ale curentului (CPC), ca principale teorii ale puterilor și componentelor curentului în regim nesinusoidal, aflate în dispută în comunitatea științifică;
5. Evidențierea limitei de aplicare a teoriei CPC, când deformarea curentului este produsă de convertoarele statice;
6. Evidențierea aplicabilității și obținerii de rezultate corecte, în toate cazurile analizate, prin aplicarea teoriei fazoriale a puterilor, în maniera corectă propusă în lucrările al căror principal autor este domnul prof. dr. ing. Alexandru Bitoleanu;
7. Realizarea unei sinteze, elaborarea de modele Simulink adecvate și studiul comparativ al principalelor metode de calcul al curentului de referință în cazul filtrelor active paralele;
8. Elaborarea unui model Simulink al filtrului activ paralel cu tranzistoare IGBT, simularea funcționării acestuia și evidențierea unor particularități importante subliniate recent în literatura de specialitate;
9. Efectuarea unei analize, bazate pe studiu experimental, a unui filtru activ paralel și verificarea existenței unei valori optime a tensiunii prescrise pe condensatorul de compensare.

Bibliografie selectivă

- [1] **Abaali H., Lamchich M.T., Raoufi M.**, *Shunt Power Active Filter Control under Non Ideal Voltages Conditions*, International Journal of Information Technology Vol. 2 No. 3, 2005.
- [3] **Akagi H., Nabae A.**, *The p-q Theory in Three-Phase Systems Under Non-Sinusoidal Conditions*, ETEP, 1993, Vol. 3, No.1.
- [12] **Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Dobriceanu M., Nastasoiu Felicia**, *Analysis Of Some Current Decomposition Methods: Comparison And Case Studies*, Revue Roumaine de Science et Tehnique, nr. 2, (ISI), 2009-în curs de apariție.
- [13] **Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Dobriceanu M., Nastasoiu Felicia**, *Current Decomposition Methods Based on p-q and CPC Theories for Active Filtering Reasons*, WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Issue 10, Vol. 7, October 2008, ISSN 1109-2374, pp. 869-878, IDEX INSPEC.
- [14] **Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Dobriceanu M., Nastasoiu Felicia**, *Current Decomposition Methods Based on p-q and CPC Theories*, 6th IASME/WSEAS Int. Conf. On Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment, Rhodes (Greece), August 20-22, 2008, pp. 202-207, ISSN 1790-5109 IDEX ISI (ISI WEB of Science).
- [26] **Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Nastasoiu Felicia, Suru V.**, *Current Decomposition for Active Filtering Reasons: Part 1 – p-q Theory and Physical Components Theory*, Proceeding on the 14th National Conference Of Electrical Drives, Timisoara, Sept. 25-26, pp. 31-34, Special Issue ISSN 1582-7194, 2008, Romania.
- [16] **Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Nastasoiu Felicia**, *Current Decomposition for Active Filtering Reasons: Part 2 – Case Studies*, Proceeding on the 14th National Conference Of Electrical Drives, Timisoara, Sept. 25-26, pp. 209-212, Special Issue ISSN 1582-7194, 2008, Romania.
- [17] **Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Nastasoiu Felicia, Suru V.**, *Analysis Of Some Current Decomposition Methods: Comparison And Case Studies*, SNET'08, Univ. Politehnica din Bucuresti, ISBN 978-606-521-045-5, 5-7 Iunie, pp. 259-264, 2008.
- [28] **Czarnecki L.S.**, *Comparison of instantaneous reactive power p-q theory with theory of the current's physical components*, Springer-Verlag 2002.
- [31] **Czarnecki L.S.**, *Current's Physical Components in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 1: Single-Phase Linear Circuits*, Electric Power Quality and Utilization Journal, vol. XI, No. 2, 2005.
- [32] **Czarnecki L.S.**, *Current's Physical Components in circuits with nonsinusoidal voltages and currents, Part 2: Three-Phase Three-Wire Linear Circuits*, Electric Power Quality and Utilization Journal, Vol. XXII, No. 1 2006.
- [41] **Ferracci Ph.**, *La qualité de l'énergie électrique*, Cahier Technique Schneider n° 199.
- [58] **Moleykutty G., Kartik Prasad Basu**, *Modeling and Control of Three-Phase Shunt Active Power Filter*, American Journal of Applied Sciences 5, pp. 1064-1070, 2008.
- [59] **Moleykutty G., Kartik Prasad Basu**, *Three Phase Shunt Active Power Filter*, American Journal of Applied Sciences 5, pp. 909-916, 2008.
- [62] **Popescu Mihaela, Bitoleanu A.**, *Energetica sistemelor de acționare cu motoare asincrone și convertoare statice indirecte*, Editura Mediamira, Cluj – Napoca, 2004.
- [74] **Zainal Salam, Tan Perng Cheng, Awang Jusoh**, *Harmonics Mitigation Using Active power Filter: A Technological Review*, ELECTRIKA, Vol. 8, No. 2, 2006.