



UNIUNEA EUROPEANĂ



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



OIPOSURU



UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA

ȘCOALA DOCTORALĂ DE ȘTIINȚE INGINEREȘTI

FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ

DEPARTAMENTUL DE INGINERIE ELECTRICĂ, ENERGETICĂ ȘI AEROSPATIALĂ



Ing. Dinuț-Lucian POPA

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂTĂȚIREA
CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE PRIN
FILTRARE ACTIVĂ LA CONSUMATORI
DEFORMANȚI DIN SISTEMUL
ENERGETIC**

**Conducător științific:
Prof. univ. dr. ing. Petre-Marian NICOLAE**

Craiova - 2015

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ

ANUNȚĂ:

SUSȚINEREA PUBLICĂ A TEZEI DE DOCTORAT INTITULATE

**“CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂȚĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI
ELECTRICE PRIN FILTRARE ACTIVĂ LA CONSUMATORI
DEFORMANȚI DIN SISTEMUL ENERGETIC”**,

elaborate de domnul **POPA Dinuț-Lucian**, în vederea obținerii titlului științific de doctor în Domeniul *Inginerie electrică*, va avea loc în ziua de **11 decembrie 2015**, la ora 10.00, în Sala de Consiliu a Facultății de Inginerie Electrică.

Componența comisiei de doctorat este următoarea:

PREȘEDINTE: Prof. univ. dr. ing. **Marian CIONTU**
Universitatea din Craiova

**CONDUCĂTOR
ȘTIINȚIFIC:** Prof. univ. dr. ing. **Petre-Marian NICOLAE**
Universitatea din Craiova

**MEMBRI
REFERENȚI:** Prof. univ. dr. ing. **Liviu-Mario KREINDLER**,
Universitatea Politehnică din București,
Facultatea de Inginerie Electrică

Prof. univ. dr. ing. **Dumitru TOADER**
Universitatea Politehnică Timișoara,
Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică

Prof. univ. dr. ing. **Ion VLAD**
Universitatea din Craiova

CUPRINS

Introducere..... 11

**Capitolul 1. Stadiul actual în domeniul definirii mărimilor
cu care se poate caracteriza calitatea energiei electrice..... 110**

1.1. Mărimi ce pot caracteriza calitatea energiei electrice..... 1 10

1.1.1. Indicatori de calitate a energiei electrice 1 10

1.1.2. Puteri în regim deformant și/sau nesimetric 1 21

1.1.2.1. Definiții ale puterilor în domeniul frecvență 1 22

1.1.2.2. Definiții ale puterilor în domeniul timp..... 1 32

1.1.2.3. Definiții ale puterilor în domeniul timp-
frecvență, cu ajutorul transformatei discretă
Wavelet (DWT) 1 36

1.1.2.4. Concluzii și observații personale privind teoriile
puterilor 1 41

1.1.3. Factorul de putere în regim sinusoidal și deformant 1 42

1.1.4. Tendințe privind monitorizarea calității enegiei electrice 2 45

1.2. Standarde și ghiduri cu privire la limitarea regimului
deformant, a nesimetriilor și a variațiilor în sistemele
electroenergetice 2 47

**Capitolul 2. Utilizarea filtrelor active în procese de
compensare statică și dinamică..... 350**

2.1. Clasificarea filtrelor de putere din sistemele energetice..... 3 51

2.2.1. Filtre pasive de putere..... 3 52

2.2.2. Filtre active de putere 3 55

2.2. Tipuri de convertoare utilizate pentru filtrele active 3 58

2.3. Filtre active pure	4	59
2.4. Filtre active hibride.....	4	61
2.5. Echipamente de condiționare unificată a calității puterii (UPQC)	4	62
2.6. Selectarea topologiei filtrului de putere.....	5	63

Capitolul 3. Simularea, modelarea numerică și analiza funcționării unor consumatori deformați în prezența și în absența unor echipamente de compensare activă 6.....65

3.1. Simularea unui redresor cu tiristoare industrial, complet comandat, în condiții de distorsiune a tensiunilor, cu și fără echipamente de compensare activă.....	6	65
3.1.1. Simularea compensării cu filtru activ de putere	8	81
3.1.2. Topologia cu invertor dublu în paralel a filtrului activ	8	85
3.1.3. Simularea compensării cu filtru pasiv de putere	8	90
3.2. Concluzii privind simulările	9	92

Capitolul 4. Comanda filtrelor active de putere..... 9.....93

4.1. Comanda filtrelor active de putere.....	9	93
4.1.1. Obținerea curenților de referință.....	9	97
4.1.2. Controlerul de curent pentru filtrul activ	11	110
4.2. Utilizarea platformelor specializate de tip dSPACE în comanda filtrelor active (hardware și software)	12	117

Capitolul 5. Implementarea pe o platforma dSPACE a unor algoritmi de detecție în timp real a curenților fundamentali de referință pentru filtrul activ în vederea comparării performanțelor acestora în condițiile unor tensiuni distorsionate și nesimetrice 13.....124

5.1. Construirea unui consumator neliniar ce deformează formele de undă ale curenților și tensiunilor din PCC.....	13	.....126
5.2. Descrierea platformei dSPACE 1103	13	.....131
5.3. Compararea algoritmilor de detecție a curenților de referință fundamentali.....	13	.....134
5.4. Rezultate și concluzii privind performanțele algoritmilor de detecție	14	.....141

**Capitolul 6. Verificări experimentale privind compensarea
distorsiunii armonice și a factorului de putere la un sistem
de acționare cu variator de tensiune continuă și motor de
c.c., utilizând un filtru activ de putere 15.....145**

6.1. Evaluarea impactului sistemului de acționare asupra rețelei.....	15	.....146
6.2. Teste experimentale privind compensarea totală de sarcină cu filtru activ de putere, în regim static și dinamic....	15	.....150
6.2.1. Teste experimentale privind compensarea totală de sarcină cu filtru activ de putere, în regim static. Testarea modului corect de compensare	15	.....150
6.2.2. Teste experimentale privind compensarea totală de sarcină cu filtru activ de putere, în regim dinamic	15	.....152

Capitolul 7. Concluzii și contribuții 15.....156

7.1. Concluzii	15	.....156
7.2. Contribuții personale.....	17	.....159

Bibliografie..... 19.....169

Introducere - importanța și actualitatea temei

În ultimii ani calitatea energiei electrice a devenit o problemă semnificativă din cauza creșterii exponențiale a numărului consumatorilor neliniari ce absorb curenți distorsionați, odată cu dezvoltarea electronicii de putere.

Soluțiile de îmbunătățire a calității energiei electrice și perfecționarea acestora reprezintă un subiect actual de mare interes pe plan mondial ce încă nu a fost epuizat.

În această teză accentul a fost pus pe filtrele active de putere ca și soluție de creștere a calității energiei electrice, datorită performanțelor superioare față de celelalte soluții.

Rezultatele tezei pot contribui la îmbunătățirea performanțelor filtrelor active de putere și la îndeplinirea unor obiective conform politicilor de promovare ale programelor pentru utilizarea eficientă a energiei electrice în condiții de securitate crescută.

Capitolul 1. Stadiul actual în domeniul definirii mărimilor cu care se poate caracteriza calitatea energiei electrice

În primul capitol sunt analizate și interpretate mărimile cu care se poate caracteriza calitatea energiei electrice:

- indicatorii privind variația în timp a tensiunii de alimentare (flicker, severitatea golurilor de tensiune), privind gradul de nesimetrie al tensiunilor (factorul de disimetrie și asimetrie), respectiv privind regimul deformant (THD, factorul de distorsiune individual, TDD, factorii de vârf și formă, factorul de influență TIF);
- definițiile în domeniul timp, frecvență și respectiv timp-frecvență (cu ajutorul transformatei Wavelet discretă) ale puterilor în regim deformant și/sau nesimetric;
- factorul de putere în regim deformant și/sau nesimetric.

De asemenea, sunt prezentate principalele standarde și ghiduri naționale (elaborate de ANRE) și internaționale (IEEE 519/1992 și standardele Comitetului Electrotehnic Internațional) cu privire la limitarea regimului deformant, a nesimetriilor și a variațiilor în sistemele electroenergetice [STD519].

În scopul comparării definițiilor puterilor potrivit teoriilor Budeanu, a puterilor instantanee $p-q$ [AKA1] și conform Std. IEEE 1459-2010 [STD1459] a fost realizată modelarea prin coduri MATLAB și simulări MATLAB/Simulink a unor configurații de sisteme trifazate cu sarcini liniare rezistive și inductive, echilibrate și dezechilibrate, și tensiuni de alimentare simetrice și nesimetrice. A fost demonstrat că pentru sistemele trifazate cu tensiuni nesimetrice și consumator rezistiv, puterea reactivă totală conform teoriei $p-q$ nu este nulă cum ar trebui să fie în sisteme fără elemente reactive, contrar teoriilor Budeanu și

Std. IEEE 1459. Totodată, deși s-ar putea defini un factor de putere pe baza valorilor medii ale puterilor instantanee p , q și a puterii instantanee complexe s , autorul nu face acest lucru, dovadă că teoria p - q a fost dezvoltată pentru comanda echipamentelor active de compensare, și nu pentru a fi utilizată ca o teorie a puterilor, ca un instrument de evaluare și îmbunătățire a calității energiei electrice.

La teoria Fryze [CZA2], un avantaj este că nu introduce o a patra definiție a puterilor (puterea deformantă), însă sunt identificate și dezavantaje:

- puterea reactivă definită nu oferă informații despre modalitatea de a compensa total sarcina, deși factorul de putere poate fi adus la unitate prin diminuarea până la zero a puterii reactive, și nu satisface întotdeauna condiția ca suma puterilor reactive într-un nod al sistemului să fie nulă;
- nesimetria și distorsiunea tensiunilor de alimentare sunt împrumutate de curentul de referință fundamental ce se dorește a fi obținut în urma compensării active;
- nu este posibilă compensarea doar a distorsiunii armonice, ci a întregului curent neactiv.

Fiecare teorie are propria concepție pentru definirea puterii reactive, însă autorul tezei consideră că cele mai corecte sunt în domeniul timp pentru că sunt foarte importante pentru analiza și proiectarea sistemelor electrice: teoria Budeanu, teoria conform Std. IEEE 1459/2010 ce recomandă folosirea conceptului lui Budeanu cu mici corecții, și teoria CPC [CZA4] (teoria componentelor fizice ale curentului, en: Current Physical Components) ce descompune curentul și respectiv puterile pe baza unor componente cu o interpretare fizică a fenomenelor ce au loc în sistemele dezechilibrate ce funcționează în regim deformant.

Ca și tendințe privind monitorizarea calității energiei electrice au fost identificate:

- înlocuirea aparatelor tradiționale electro-magnetice proiectate pentru formele de undă sinusoidale cu noi echipamente versatile, cu acuratețe mare, capabile să măsoare mărimile electrice definite pe baza unor modele matematice avansate, echipamente ce folosesc microprocesoare sau procesoare digitale de semnal;
- utilizarea indicilor și puterilor definiți pe baza transformatei Wavelet, singura tehnică ce poate fi aplicată pentru o evaluare completă a calității energiei electrice în regim tranzitoriu, deoarece regimurile tranzitorii sunt asociate cu forme de undă nestaționare, astfel încât nu pot fi aplicate definițiile componentelor de putere bazate pe transformata Fourier. Descompunerea semnalului cu DWT poate furniza

informații importante în procesul de diagnoză a unui echipament electric, prin localizarea precisă în timp a componentelor corespunzătoare benzilor de frecvență în care este divizat semnalul [NIC3], [NIC4].

Capitolul 2. Utilizarea filtrelor active în procese de compensare statică și dinamică

În capitolul al 2-lea este făcută o prezentare a filtrelor de putere utilizate în procesele de compensare statică și dinamică.

Au fost identificate limitările filtrelor pasive față de cele active:

- performanțe foarte slabe ale filtrării în regim dinamic al sarcinii sau la conectări/deconectări ale filtrelor;
- degradarea semnificativă a performanței filtrării cu scăderea impedanței sursei;
- compensarea fixă sau supracompensarea puterii reactive pe fundamentală cu filtre pasive, la modificarea sarcinii sau la funcționarea cu sarcină redusă;

Filtrele active de putere sunt soluții de compensare eficiente și cu un răspuns dinamic rapid, ce au posibilitatea de a compensa separat regimul deformant, puterea reactivă, nesimetria curenților și a tensiunilor.

Principalele avantaje ale filtrelor active de putere sunt:

- adaptarea automată la fluctuațiile și profilul armonic al sarcinilor din rețea;
- compensarea puterii reactive poate fi totală sau parțială, în funcție de puterea nominală a inverterului filtrului activ, și se face rapid și continuu, fără fenomene tranzitorii;
- pot compensa foarte multe ordine armonice în același timp, ceea ce pentru filtrele pasive s-ar traduce prin foarte multe celule de filtrare.
- performanța filtrării nu se degradează semnificativ cu scăderea impedanței sursei, ca în cazul filtrelor pasive.

Este realizată o clasificare a echipamentelor de filtrare activă după topologie, cu prezentarea principiului de funcționare, a avantajelor și a dezavantajelor fiecăreia:

- *filtră pasivă*, formate din elemente pasive (baterii de condensatoare, bobine și uneori rezistoare) (Fig. 2.1(a)).
- *filtră activă pură* – conțin doar invertoare cu elemente semiconductoare de putere (de obicei IGBT-uri) (Fig. 2.1(b), (c), (f));
- *filtră hibridă*, formate prin cuplarea invertoarelor cu filtre pasive de putere (Fig. 2.1(d), (e)).

Sunt prezentate două configurații de invertoare pentru filtrele active: unul simplu, folosit

în mod tradițional, de la care se pot obține pe fiecare fază 2 nivele de tensiune, respectiv unul pe 3 nivele, cu punct neutru comun, ce poate fi utilizat la nivele mai mari de tensiune.

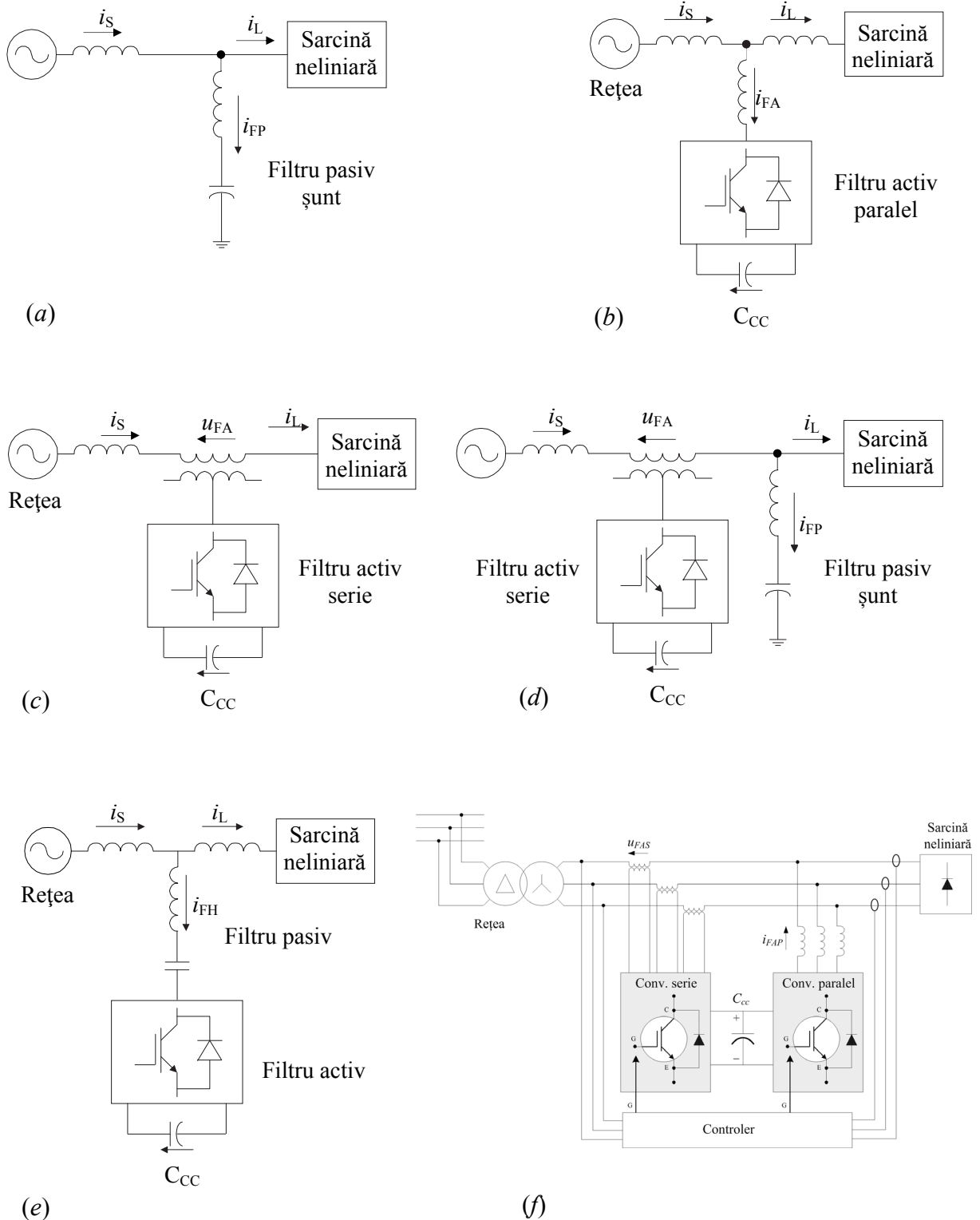


Fig. 2.1. Topologii ale filtrelor de putere:
a) filtru pasiv; b) filtru activ tip șunt (paralel); c) filtru active tip serie; d) filtru hibrid format din filtru activ serie și filtru pasiv șunt; e) filtru hibrid paralel; f) filtru activ cu conexiune mixtă (echipament de condiționare unificată a calității - UPQC).

Selectarea soluției de filtrare funcție de necesități poate fi făcută conform Tab. 2.1. Astfel pot fi abordate două direcții:

- compensarea în primul rând a efectelor nedorite introduse de către sarcina neliniară (compensarea curenților deformanți și a puterii reactive);
- compensarea în primul rând a problemelor rețelei de alimentare (distorsiunea armonică, nesimetria și fenomenele de flicker și vârfuri de comutație (en: voltage notches) a tensiunilor în punctul comun de cuplare (PCC)).

TAB. 2.1. ALEGEREA SOLUȚIEI DE FILTRARE ACTIVĂ LA PROBLEMELE DE CALITATE A ENERGIEI:

Conexiunea filtrului	Funcții oferite pentru compensarea de sarcină	Funcții oferite pentru compensarea problemelor rețelei de alimentare
Șunt (filtru activ sau hibrid paralel)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Filtrarea curentului armonic ▪ Compensarea factorului de putere ▪ Compensarea nesimetriilor de curent ▪ Compensarea flicker-ului 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Filtrarea indirectă a distorsiunii tensiunii, prin intermediul filtrării distorsiunii curentului care circulă prin impedanța rețelei ▪ Compensarea indirectă a nesimetriilor de tensiune, prin intermediul simetrizării curenților absorbiți de sarcină
Serie (filtru activ serie)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Compensarea flicker-ului 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Filtrarea directă a distorsiunii tensiunii ▪ Compensarea nesimetriilor de tensiune
Mixtă (filtru hibrid sau UPQC)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Filtrarea curentului armonic ▪ Compensarea factorului de putere* ▪ Compensarea nesimetriilor de curent* ▪ Compensarea flicker-ului 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Filtrarea directă a distorsiunii tensiunii ▪ Compensarea nesimetriilor de tensiune

*funcție valabilă numai pentru echipamente de condiționare unificată a calității (UPQC).

În final este sintetizată de autor o modalitate de selecție a topologiei echipamentelor de filtrare activă în funcție de nivelul de putere sau de tensiune și în funcție de prioritatea problemelor ce se doresc a fi rezolvate. În opinia autorului, selectarea topologiei filtrului de putere se face în ordinea următoare:

1. În funcție de nivelul de putere sau de tensiune al sistemului electric:

a. *La joasă tensiune:*

- la puteri mici se preferă filtre active pure cu invertor simplu, cu două nivele de tensiune datorită simplității și flexibilității (Fig. 2.1(b)).
- la puteri mari se pot adopta filtre active cu mai multe invertoare în paralel (în configurație *master-slave*, unde unitatea *master* conține partea de comandă), filtre active cu invertoare multi-nivel sau filtre hibride cu conexiune mixtă

(Fig. 2.1(d)) sau paralelă (Fig. 2.1(e)).

b. La medie tensiune se pot adopta:

— filtre active multi-nivel;

— filtre hibride cu conexiune mixtă (Fig. 2.1(d)) sau paralelă (Fig. 2.1(e)).

2. În funcție de prioritatea problemelor ce se doresc a fi rezolvate:

a. *Compensarea efectelor nedorite introduse de către sarcina neliniară* (filtrarea curentului armonic, compensarea factorului de putere, compensarea nesimetriilor de curent) se poate face cu:

— filtre active pure tip șunt (Fig. 2.1(a));

— filtre hibride cu conexiune paralelă (Fig. 2.1(e)).

Compensarea acestor efecte nedorite introduse de sarcină duce la o compensare indirectă, parțială sau totală, a problemelor de calitate ale rețelei.

b. *Compensarea problemelor de calitate ale rețelei* (filtrarea distorsiunii armonice a tensiunii, compensarea nesimetriilor de tensiune, blocarea circulației curenților armonici spre rețea, îmbunătățirea stabilității tensiunii) se poate face cu:

— filtre hibride cu conexiune mixtă (Fig. 2.1(d));

— filtre active pure tip serie, dacă nu se dorește filtrarea curenților armonici (Fig. 2.1(c)).

c. *Compensarea tuturor problemelor de calitate ale sistemului electric*, pentru cerințe de calitate înaltă, se poate face cu echipamente UPQC (Fig. 2.1(f)).

Capitolul 3. Simularea, modelarea numerică și analiza funcționării unor consumatori deformanți în prezența și în absența unor echipamente de compensare activă

În cadrul acestui capitol au fost efectuate diferite simulări în mediul MATLAB/Simulink privind funcționarea unui redresor cu tiristoare industrial, complet comandat, în condiții de distorsiune a tensiunilor, cu și fără echipamente de compensare activă.

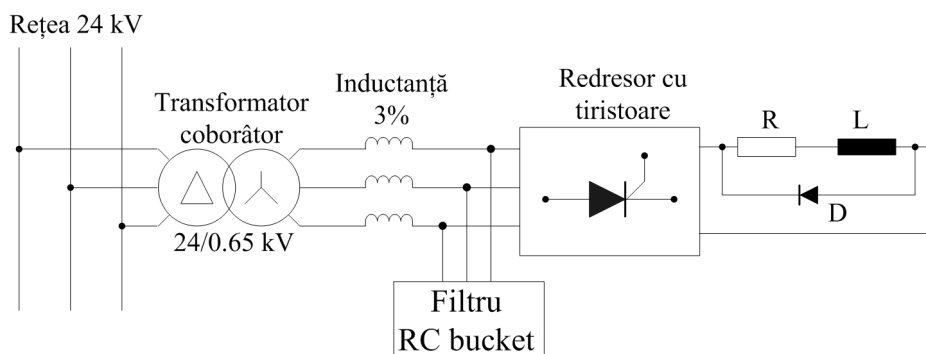


Fig. 3.2. Schema de principiu a redresorului cu tiristoare simulat.

În cadrul simulărilor este evidențiată influența elementelor componente:

- inductanța sarcinii de c.c. – are consecințe pozitive asupra riplului de curent continuu redresat și a distorsiunii curentului absorbit din rețea (Fig. 3.4);
- prezența diodei antiparalel (dioda de fugă) – reducerea riplului de tensiune continuă redresată, creșterea valorii curentului și tensiunii redresate peste unghiul de aprindere al tiristoarelor de 60° , creșterea ușoară a factorului de putere (Fig. 3.7);
- inductanța înfășurării secundare a transformatorului – valori semnificative ale acesteia cauzează apariția unor vârfuri de comutație (en: notches) în tensiunile din secundarul transformatorului (Fig. 3.12), cu efecte negative asupra duratei de viață.

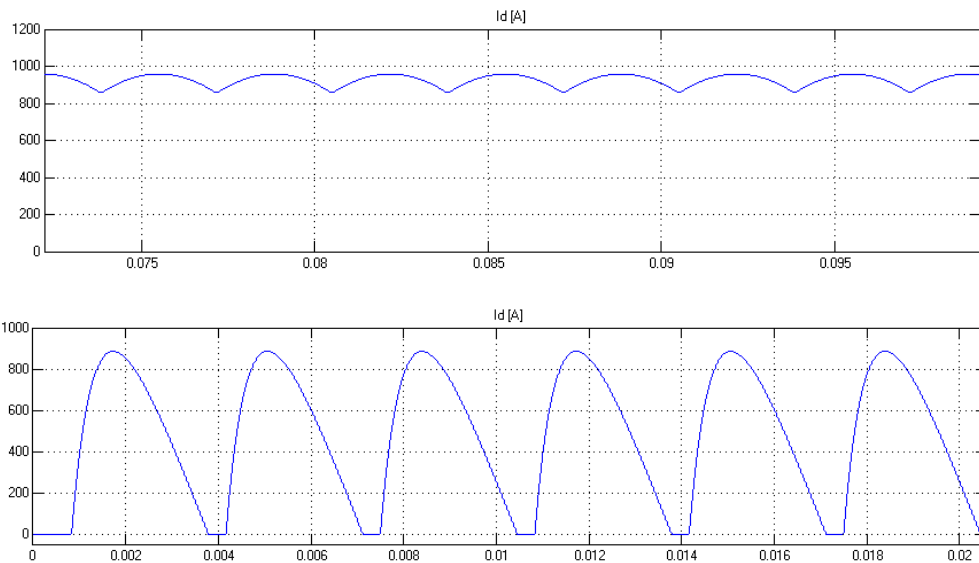


Fig. 3.4. Tensiunea și curentul redresat în cazul unui unghi de comandă mai mare de 60° și al unei inductanțe de sarcină semnificativă (sus) și cu o constantă de timp foarte mică (jos).

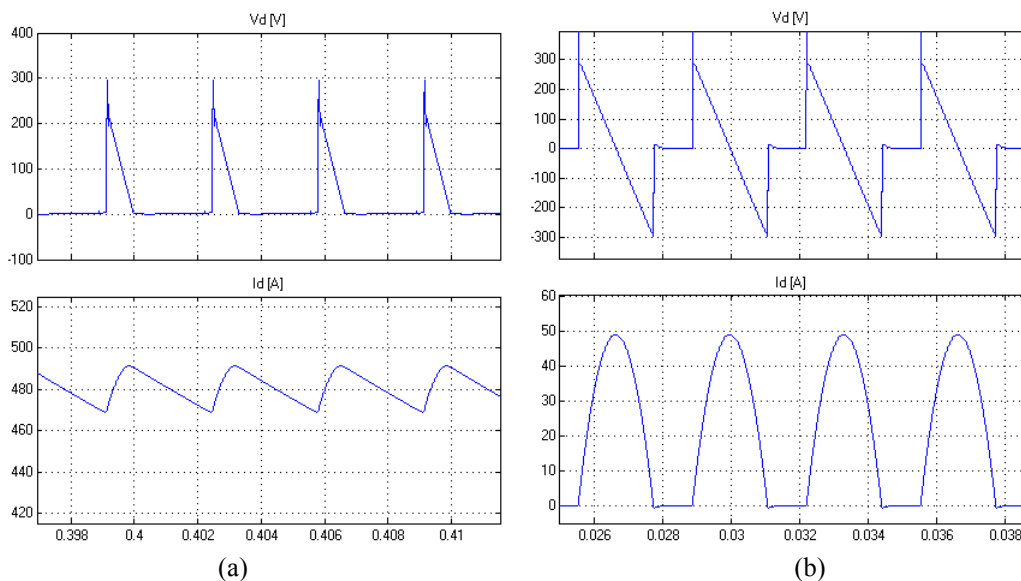


Fig. 3.7. Efectele utilizării diodei de descărcare - tensiunea și curentul redresat: a) cu dioda de fugă; b) fără diodă de fugă.

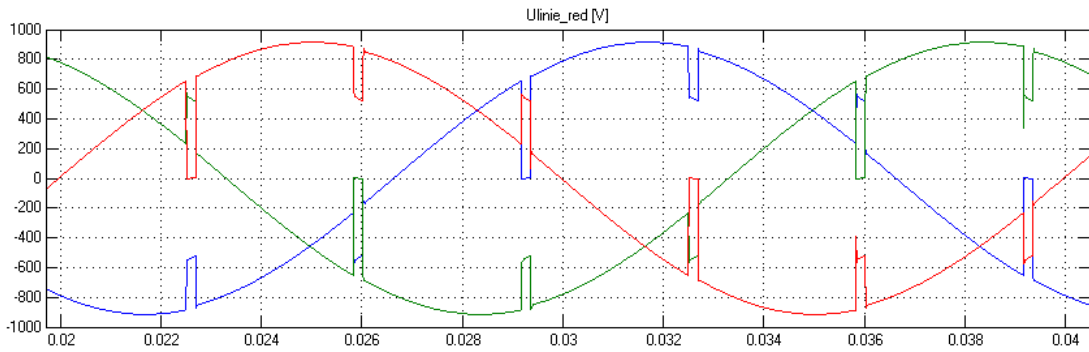


Fig. 3.12. Formele de undă ale tensiunilor de linie la bornele redresorului.

Sunt testate două soluții de compensare: activă și pasivă.

La compensarea cu filtru activ, deoarece au fost obținute rezultate nesatisfăcătoare în ceea ce privește riplul de tensiune, prin scăderea inductanței datorită cerințelor de variație mare a curentului prin filtrul activ într-un timp foarte scurt, a fost realizat un prototip de filtru activ cu o structură cu două invertoare montate în paralel, ce împart condensatorul de pe barele de curent continuu (Fig. 3.20) plecând de la soluția prezentată în [ASI1].

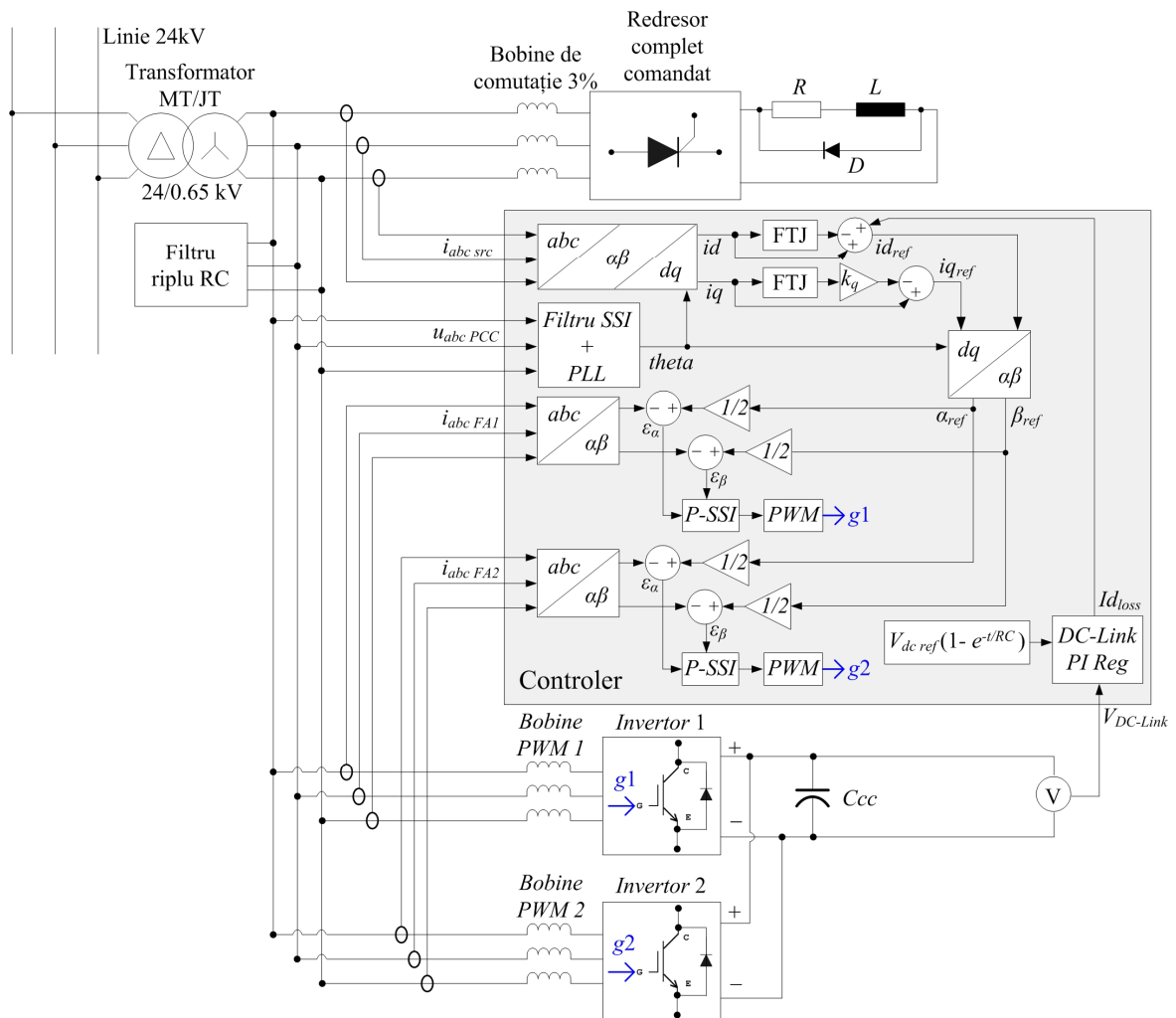


Fig. 3.20. Reprezentarea schematică a topologiei cu inverter dublu în paralel, împreună cu algoritmul de comandă.

Circuitul de comandă al filtrului activ propus necesită un singur set de senzori de măsură de curent pentru detecția curentului de sarcină, bucla de reacție pentru cele două invertoare fiind directă (en: feed-forward) [POP3]. Sistemul de comandă al filtrului activ este construit cu componente din biblioteca de tip discret a Simulink, astfel putând fi implementat într-o configurație hardware în timp real dacă este descărcat într-o platformă de dezvoltare de tip dSPACE.

Este dovedită superioritatea soluției cu inverter dublu, în ceea ce privește distorsiunea armonică totală și poluarea rețelei cu riplu de comutație, soluție apreciată ca fiind cea mai performantă pentru compensarea regimului deformant introdus de consumatorii neliniari de putere mare și tensiune mică, unde intervin limitările legate de inductanța bobinelor PWM în relație cu necesitatea injectării unui curent de valori mari și cu variații rapide.

Este testat răspunsul dinamic al celor două soluții de compensare, dovedind superioritatea filtrului activ și limitările în aplicarea filtrării pasive la sarcini neliniare fluctuante. Este demonstrat prin simulare că performanța filtrului pasiv este slabă în acest caz și se degradează consistent la mărirea unghiului de aprindere al tiristoarelor.

Este testat răspunsul dinamic al celor două soluții de compensare (filtrare activă și pasivă), dovedind superioritatea filtrului activ.

Este demonstrat că este obligatorie instalarea unor bobine de reactanță pentru a reduce vârfurile de comutație ce apar pe formele de undă ale tensiunilor, indiferent de metoda de compensare, activă sau pasivă. Instalarea bobinelor de comutație este necesară atât pentru funcționarea eficientă a filtrului activ, cât și pentru satisfacerea limitelor recomandate de Std. IEEE 519/1992 privind adâncimea vârfurilor de comutație [STD519].

Capitolul 4. Comanda filtrelor active de putere

În capitolul 4 a fost realizat un studiu al metodelor de comandă digitală a filtrelor active de putere. Este preferată comanda digitală pe bază de procesoare digitale de semnal (en: DSP - Digital Signal Processor) și procesoare reprogramabile cu matrice logice (en: FPGA - Field Programmable Gate Array) deoarece, față de cele analogice, oferă [SIR1]:

- *flexibilitate* - algoritmul poate fi modificat foarte ușor prin rescrierea codului, fără modificări fizice ale dispozitivului.
- *fiabilitate* - controlerele digitale au mult mai puține componente fizice.
- *stocare și transmisie flexibilă a informațiilor* - informațiile privind funcționarea filtrului activ pot fi ușor configurate pentru vizualizare, alertă și stocare.
- *precizie ridicată* - rezultatele calculelor sunt foarte precise.

Sunt analizați principalii algoritmi de obținere a curenților de referință pentru filtrul

activ, optimizându-le funcționarea în vederea creșterii robusteții pentru combaterea problemelor ce pot apărea din cauza unor tensiuni distorsionate și/sau nesimetrice în PCC.

a) *Obținerea curenților de referință prin utilizarea integratoarelor de semnal sinusoidal* (en: SSI - Sinusoidal Signal Integrator);

SSI-ul (Fig. 4.4) este un algoritm ce extrage curentul sinusoidal acordat pe frecvența de interes (în cazul de față frecvența fundamentală) din curentul sarcinii, cu eroare zero în condiții de regim staționar) [BOJ1], [YUA1].

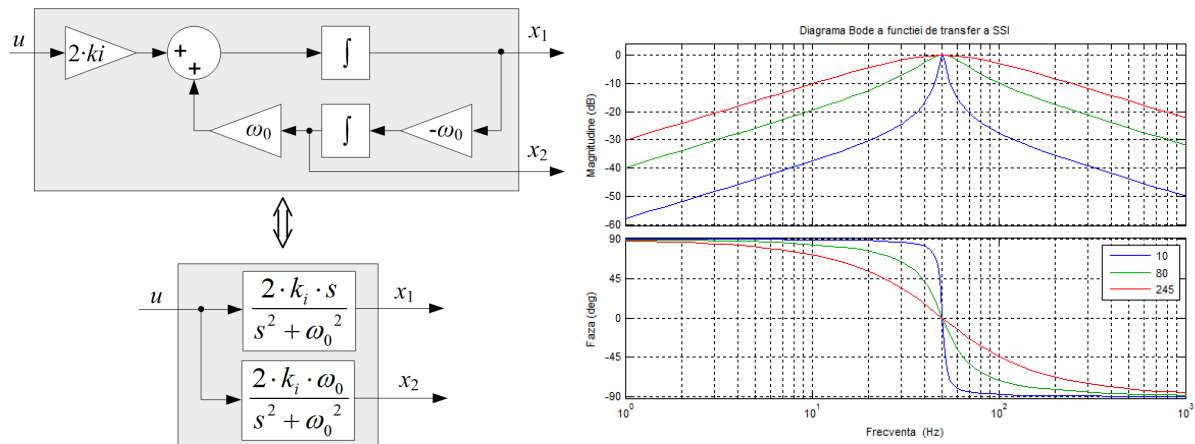


Fig. 4.4. Schema echivalentă, funcția de transfer în domeniul Laplace și diagrama Bode a unui SSI.

Filtrul SSI este un sistem de ordinul 2. Este detaliată implementarea digitală în controlere prin intermediul unor modele cu variabile de stare.

Acest algoritm nu folosește în determinarea curenților de referință fundamentali semnalele de tensiune din PCC, însă performanțele lor sunt un compromis între distorsiunea armonică totală a semnalului de la ieșire și răspunsul dinamic la fluctuațiile curenților de sarcină.

Compensarea factorului de putere pe fundamentală nu este posibilă fără algoritmi adiționali.

b) *Obținerea curenților de referință prin utilizarea teoriei puterilor instantanee p-q*

Algoritmul *p-q* determină conținutul armonic prin extragerea puterilor instantanee oscilante pe baza unor filtre digitale (de obicei trece-jos). Puterile instantanee sunt calculate folosind curenții de sarcină și tensiunile din PCC în sistemul de coordonate $\alpha\beta$ [AKA1].

Frecvența de tăiere a filtrelor digitale este aleasă astfel încât să se evite interferențele între variația de putere la schimbarea curentului de sarcină și frecvențele celor mai mici ordine armonice ce urmează a fi compensate [AKA1], [POP1], [NIC7].

Problemele algoritmului *p-q* cauzate de distorsiunea și nesimetria tensiunilor din PCC pot fi atenuate prin utilizarea unui detector de secvență pozitivă fundamentală, detaliat în acest capitol.

c) *Obținerea curenților de referință prin utilizarea sistemului de referință sincron $d-q$ aliniat cu vectorul de tensiune al rețelei*

Sistemul de referință sincron (rotitor) $d-q$ aliniat cu vectorul de tensiune din PCC (en: $d-q$ SRF – Synchronous Reference Frame) este un algoritm similar cu cel $p-q$, conținutul armonic fiind extras din componentele oscilante ale curenților i_d (direct) și i_q (în cuadratură) obținuți din curenții de sarcină în coordonate $\alpha\beta$ și faza vectorului de tensiune obținută pe baza unui detector cu buclă de blocare în fază (en: PLL - Phase Locked Loop) [BOJ1], [LIM2]. Pot fi folosite aceleași filtre trece-jos ca și la teoria $p-q$.

Pentru a desensibiliza detectorul de fază PLL față de distorsiunea și nesimetria tensiunilor din PCC este folosit un filtru de secvență pozitivă fundamentală pe bază de SSI.

La algoritmii $p-q$ și $d-q$ compensarea factorului de putere este posibilă fără algoritmi adiționali.

d) *Obținerea curenților de referință prin utilizarea transformatei Fourier discretă (DFT)*

DFT este o transformare pentru semnale discrete ce extrage din semnalul în domeniul timp spectrul în domeniul frecvență, prin amplitudinea și faza armonicii selectate. DFT folosește tampoane de memorie pentru a stoca un număr de eșantioane conținute într-o perioadă sau semiperioadă a frecvenței fundamentale (Fig. 4.16) [KOM1].

Curentul de referință fundamental bazat pe transformata Fourier discretă are avantajul de a fi o sinusoidă pură, pentru semi-perioade simetrice ale ferestrei DFT, însă are și dezavantaje: necesitatea unui spațiu de memorie mare pentru a stoca eșantioanele achiziționate și putere de calcul mare pentru DSP [ASI2].

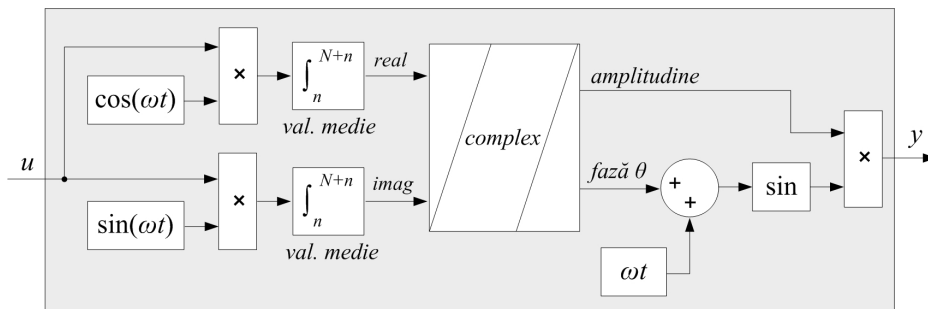


Fig. 4.16. Schema echivalentă a algoritmului DFT.

Compensarea factorului de putere pe fundamentală se poate face prin aplicarea DFT la tensiunile din PCC, pentru obținerea informației privind faza, fapt ce poate mări considerabil timpul de execuție pentru DSP, mai ales dacă este necesară și extragerea componentelor simetrice de secvență directă.

De asemenea sunt analizate controlerile de curent pentru filtrul activ:

- controlerul de curent ce folosește metoda benzii de histerzis;
- controlerul de curent ce folosește metoda undei portante triunghiulară cu regulator P-SSI, PI-MRI sau PI-RES.

În partea finală a capitolului este prezentată utilizarea platformelor specializate de tip dSPACE pentru comanda filtrelor active de putere (Fig. 4.23), platforme software/hardware destinate pentru a facilita interfața dintre modelele MATLAB/Simulink și echipamentele fizice, în timp real.

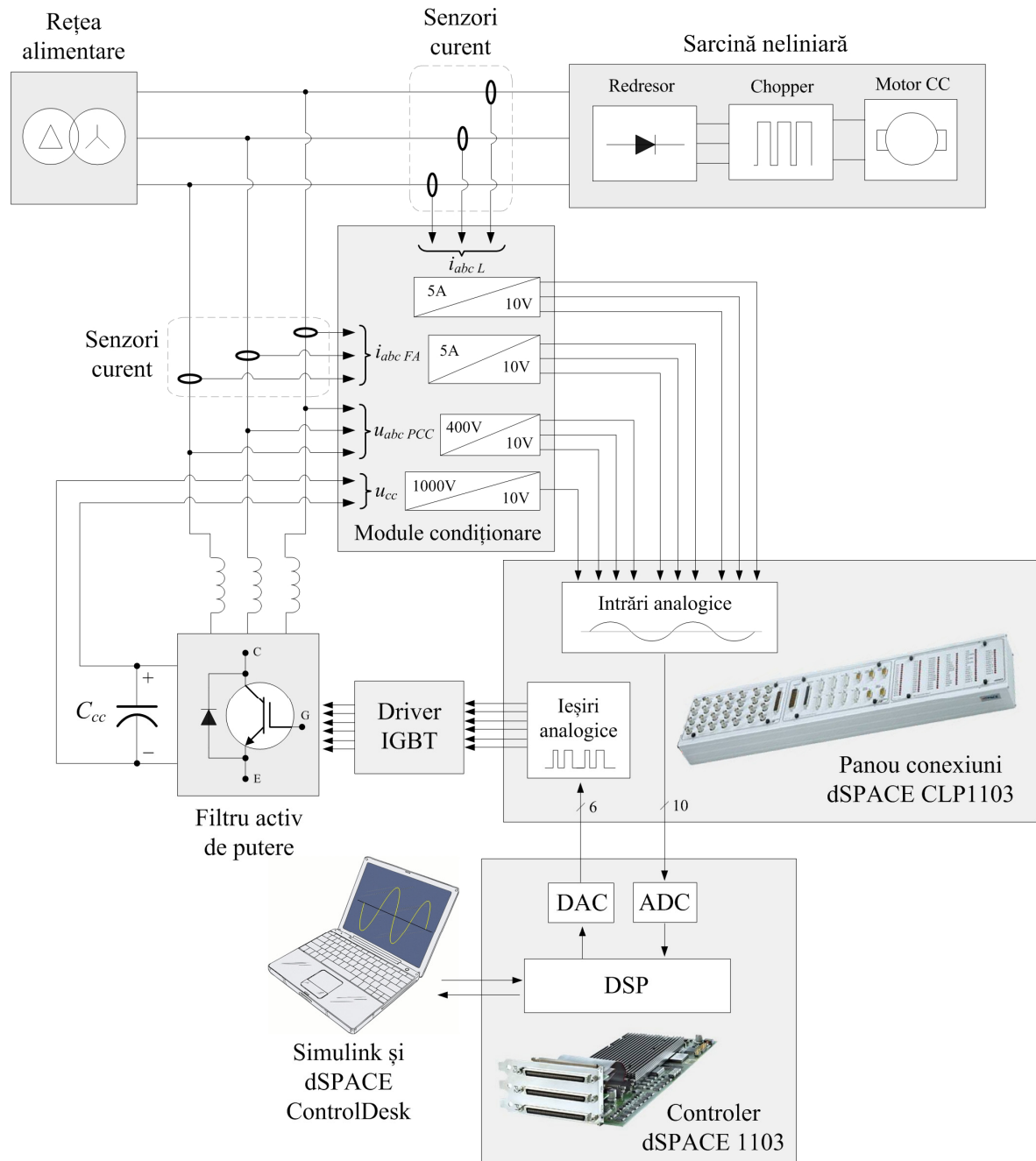


Fig. 4.23. Schema tipică de realizare a unui sistem de comandă al unui filtru activ cu ajutorul platformei dSPACE 1103.

Capitolul 5. Implementarea pe o platforma dSPACE a unor algoritmi de detecție în timp real a curenților fundamentali de referință pentru filtrul activ în vederea comparării performanțelor acestora în condițiile unor tensiuni distorsionate și nesimetrice

Capitolul 5 prezintă rezultatele experimentale obținute prin implementarea pe o platforma dSPACE a celor mai utilizați algoritmi recenți de detecție în timp real a curenților fundamentali de referință pentru filtrul activ, în vederea comparării performanțelor acestora în condițiile unor tensiuni distorsionate (cu vârfuri de comutație) și nesimetrice (disimetrizate la o valoare a factorului de nesimetrie de 27%). Sunt utilizate mai multe criterii de performanță și două configurații ale sarcinii, inductivă și rezistivă (Fig.5.1).

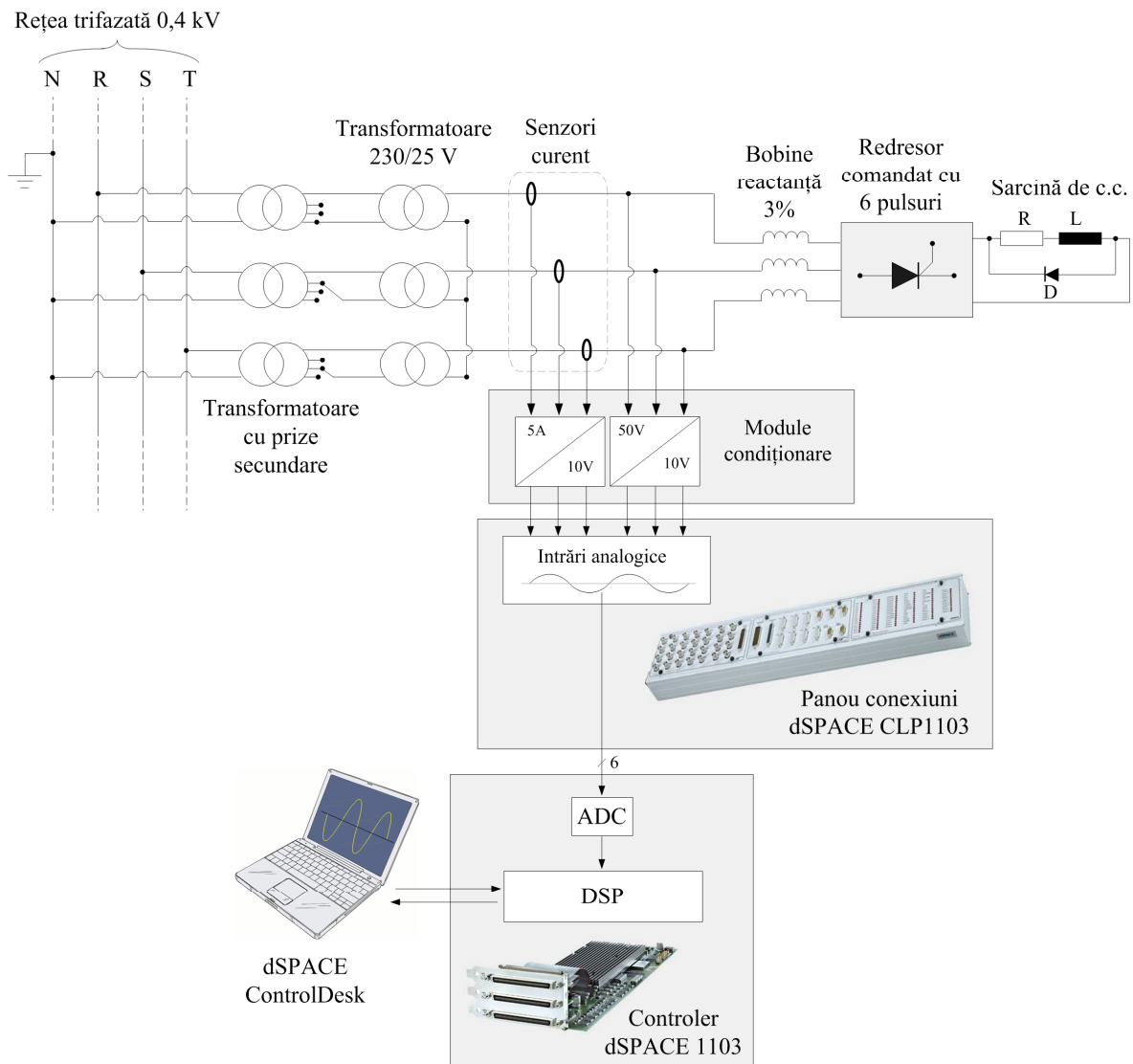


Fig. 5.1. Schema echivalentă a platformei experimentale pentru testarea algoritmilor în timp real cu dSPACE.

Rezultatele importante privind performanțele algoritmilor sunt centralizate în Tab. 5.2,

respectiv Tab. 5.3.

TABEL 5.2
REZULTATELE PERFORMANTELOR ALGORITMILOR DE DETECTIE A CURENTELOR DE REFERINȚĂ
FUNDAMENTALI - SARCINĂ INDUCTIVĂ

Algoritm	Timp de stabilizare [ms]	THDI _{ref} * [%]	Supracreștere [%]	Factor nesimetrie I _{ref} [%]	Timp execuție DSP [μs]	Posibilitatea compensării puterii reactive**
SSI	24,5	3,5	0	0,4	5,1	nu
SSI+	24,5	2,56	0	0,8	5,2	nu
<i>p-q</i> IRP	24,2	3,83	4.3	1	6,3	da
<i>d-q</i> SRF	24,2	0,88	4.3	0,5	5,1	da
DFT	10	0,87	0	3	7,4	nu

*ca medie pe cele trei faze

**fără algoritmi adiționali

TABEL 5.3
REZULTATELE PERFORMANTELOR ALGORITMILOR DE DETECTIE A CURENTELOR DE REFERINȚĂ
FUNDAMENTALI - SARCINĂ REZISTIVĂ

Algoritm	THDI _{ref} * [%]	Factor nesimetrie I _{ref} [%]
SSI	7,9	0,6
SSI+	6	1,1
<i>p-q</i> IRP	6,5	1,5
<i>d-q</i> SRF	2,9	0,9
DFT	7,36	4,2

*ca medie pe cele trei faze

Pe baza rezultatelor au fost desprinse mai multe concluzii:

- cu toate că algoritmul DFT ar putea obține o sinusoidă pură dacă sarcina ar absorbi curenți cu semi-perioade egale, în general acest lucru nu se întâmplă în realitate, ceea ce poate duce la curenți de referință fundamentali cu distorsiune armonică nesatisfăcătoare. Dezavantajele majore ale acestuia sunt imposibilitatea de a compensa puterea reactivă fără algoritmi adiționali (care ar mări timpul de execuție și nevoia de resurse de memorie pentru eșantioane), timpul de execuție mare, (cel mai mare dintre algoritmi) și imposibilitatea de a compensa nesimetria curenților.
- algoritmi SSI, SSI+ și *p-q* oferă o distorsiune armonică nesatisfăcătoare a curenților de referință fundamentali extrași, în condițiile de test date.
- **cel mai bun algoritm per total este cel bazat pe sistemul de referință sincron *d-q***, considerând atât testul cu sarcină inductivă cât și pe cel cu sarcină rezistivă,

deoarece obține curenți de referință fundamentali cu o distorsiune și o nesimetrie scăzută, poate compensa puterea reactivă și are un timp de execuție mic pentru DSP.

Capitolul 6. Verificări experimentale privind compensarea distorsiunii armonice și a factorului de putere la un sistem de acționare cu variator de tensiune continuă și motor de c.c., utilizând un filtru activ de putere

Capitolul 6 prezintă rezultatele experimentale obținute la testarea performanțelor unui filtru activ de putere, efectuate pe ștandul de probe a mașinilor electrice al Facultății de Inginerie Electrică (Fig. 6.1).

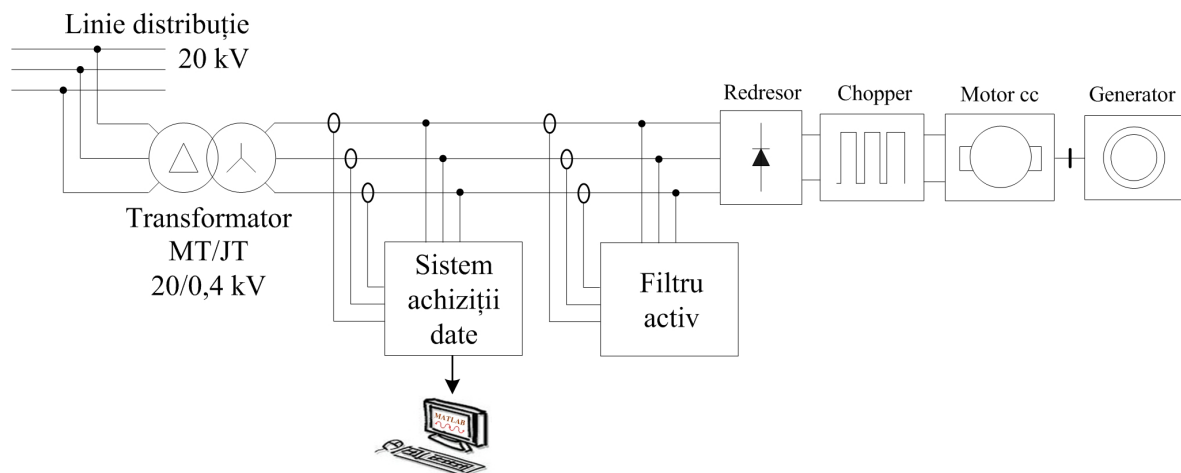


Fig. 6.1. Schema simplificată a platformei experimentale.

Este dovedit faptul că această soluție de filtrare oferă condiții de protecție a sursei de alimentare și a consumatorilor sensibili la perturbații, prin diminuarea distorsiunii armonice a curenților absorbiți de sarcinile neliniare (și implicit a tensiunilor armonice) și reducerea pierderilor prin îmbunătățirea factorului de putere, cu performanțe foarte bune atât în regim staționar cât mai ales în regim dinamic (față de soluția clasică de filtrare pasivă).

De asemenea, pe baza rezultatelor experimentale s-a dovedit că modul corect de compensare totală a sarcinii este întâi compensarea armonicilor superioare și apoi compensarea puterii reactive pe fundamentală.

Capitolul 7. Concluzii și contribuții

Capitolul 7 prezintă concluziile și contribuțiile autorului.

Cele mai importante **concluzii privind calculul indicilor și al puterilor** în regim deformant și/sau nesimetric sunt:

- metodele de definire a puterilor în domeniul timp (teoria $p-q$ Akagi, teoria Fryze) sunt folositoare pentru dezvoltarea controlerelor echipamentelor de compensare activă a sarcinii, iar cele în domeniul frecvență (teoria Budeanu, Std. IEEE 1459,

teoria CPC) sunt foarte utile în inginerie pentru analiza și proiectarea sistemelor electrice.

- definițiile indicilor și puterilor, reformulate folosind transformata Wavelet discretă, pot fi folositoare pentru evaluarea calității energiei electrice în regim tranzitoriu, unde nu pot fi aplicate definițiile componentelor de putere bazate pe FFT.

Concluziile importante privind simulările compensării regimului deformant introdus de redresorul cu tiristoare industrial sunt:

- este demonstrat că instalarea unor bobine de reactanță este obligatorie pentru a reduce vârfurile de comutație ce apar pe formele de undă ale tensiunilor și a permite funcționarea eficientă a soluției de compensare, fie activă fie pasivă;
- este dovedită superioritatea topologiei de filtru activ cu invertor dublu propuse, în ceea ce privește distorsiunea armonică totală și poluarea rețelei cu riplu de comutație, soluție apreciată ca fiind cea mai performantă pentru compensarea regimului deformant introdus de consumatorii neliniari de putere mare și joasă tensiune, unde intervin limitările legate de inductanța bobinelor PWM în relație cu necesitatea injectării unui curent de valori mari și cu variații rapide;
- este testat răspunsul dinamic al soluțiilor de compensare activă și pasivă, dovedind superioritatea filtrului activ și limitările în aplicarea filtrării pasive la sarcini neliniare fluctuante.

Cele mai importante **concluzii privind testele experimentale** sunt:

a) *la testele performanțelor algoritmilor de detecție a curentului fundamental de referință în condițiile unor tensiuni distorsionate și nesimetrice:*

- cel mai bun algoritm per total, considerând atât testul cu sarcină inductivă cât și pe cel cu sarcină rezistivă, este algoritmul bazat pe sistemul de referință sincron $d-q$, deoarece obține curenți de referință fundamentali cu o distorsiune și o nesimetrie scăzută, poate compensa puterea reactivă și are un timp de execuție mic pentru DSP;
- instalarea bobinelor de netezire a comutațiilor dimensionate la o impedanță de 3-5% este o soluție foarte bună pentru această problemă: reduc eficient distorsiunea armonică totală a tensiunii și astfel permit funcționarea eficientă a unui filtru activ de putere, în eventualitatea instalării.

b) *la testele experimentale privind performanțele în regim dinamic ale filtrului activ de putere:*

- filtrul activ oferă condiții de protecție a sursei de alimentare și a consumatorilor

- sensibili la perturbații, prin diminuarea distorsiunii armonice a curenților absorbiți de sarcinile neliniare (și implicit a tensiunilor armonice) și reducerea pierderilor prin îmbunătățirea factorului de putere, cu performanțe foarte bune atât în regim staționar cât mai ales în regim dinamic, față de soluția clasică de filtrare pasivă;
- modul corect de compensare totală a sarcinii este întâi compensarea armonicilor superioare și apoi compensarea puterii reactive pe fundamentală.

Ca și **contribuții** importante se pot enumera:

a) *Contribuții metodologice:*

- analiza și interpretarea mărimilor cu care se poate caracteriza calitatea energiei electrice, prin observații personale pe parcursul prezentării lor, prin modelări și simulări MATLAB/Simulink a unor configurații de sisteme trifazate cu sarcini liniare rezistive și inductive, echilibrate și dezechilibrate, și tensiuni de alimentare simetrice și nesimetrice și prin implementarea în coduri MATLAB a formulelor de calcul a unor mărimi (indici de calitate, puteri), în scopul analizei sistemelor simulate sau a sistemelor din cadrul testelor experimentale;

b) *Contribuții teoretice:*

- realizarea unei clasificări a indicatorilor de calitate ai energiei electrice pe categorii;
- realizarea unei clasificări a definițiilor puterilor în regim deformant și/sau nesimetric, în domeniul frecvență, în domeniul timp și în domeniul timp-frecvență (prin utilizarea analizei Wavelet);
- realizarea unei clasificări și analiza definițiilor factorului de putere în regim deformant și/sau nesimetric;
- sintetizarea unei modalități de selecție a topologiei echipamentelor de filtrare activă în funcție de nivelul de putere sau de tensiune și în funcție de prioritatea problemelor ce se doresc a fi rezolvate;
- analiza și clasificarea metodelor de obținere a curenților de referință și a controlerelor de curent pentru filtrul activ;

c) *Contribuții aplicative:*

- rezultatele studiului experimental privind algoritmi de extragere în timp real a curentului fundamental de referință contribuie la comparațiile existente în literatura de specialitate prin testarea acestor algoritmi în condițiile unor tensiuni distorsionate și nesimetrice și pot fi foarte folositoare pentru dezvoltatorii de controlere pentru filtre active de putere, sisteme de generare distribuită și alte echipamente ce au

nevoie de sincronizare cu rețeaua.

- rezultatele testelor experimentale privind reducerea vârfurilor de comutație prezente pe formele de undă ale tensiunilor din secundarele transformatoarelor de alimentare a redresorului complet comandat cu tiristoare confirmă faptul că instalarea bobinelor de netezire a comutațiilor dimensionate la o impedanță de 3-5% sunt o soluție foarte bună pentru această problemă, reducând eficient distorsiunea armonică totală a tensiunii, permițând funcționarea eficientă a unui filtru activ de putere și încadrarea în limitele standardului IEEE 519/1992.
- rezultatele testelor experimentale privind compensarea totală de sarcină cu filtru activ de putere pot confirma calitățile acestuia de a proteja sursa de alimentare și consumatorii sensibili la perturbații, prin diminuarea distorsiunii armonice a curenților absorbiți de sarcinile neliniare (și implicit a tensiunilor armonice) și reducerea pierderilor prin îmbunătățirea factorului de putere, cu performanțe foarte bune atât în regim staționar cât mai ales în regim dinamic (față de soluția clasică de filtrare pasivă). A fost demonstrat faptul că modul corect de compensare totală a sarcinii este întâi compensarea armonicilor superioare și apoi compensarea puterii reactive pe fundamentală.

d) *Contribuții software:*

- au fost dezvoltate și implementate în cadrul algoritmilor de comandă filtre digitale exponențiale (plecând de la modelarea încărcării condensatorului printr-un rezistor), o soluție originală prin care se poate genera referința pentru tensiunea de pe condensatorul din barele de curent continuu a inverterului filtrului activ și se poate obține un timp de răspuns mai bun pentru regulatorul tensiunii condensatorului din barele de c.c. ale inverterului. De asemenea, aceste filtre digitale exponențiale au fost utilizate pentru curentul de referință prin filtrul activ la activarea compensării, pentru a fi evitați curenții bruști asupra rețelei.
- a fost propusă, modelată și testată în mediul Simulink o soluție de compensare activă performantă, viabilă pentru sistemele de mare putere și joasă tensiune, ce constă într-un filtru activ cu inverter dublu în paralel și bobine de netezire a comutațiilor. Filtrul activ împarte curentul armonic la jumătate între invertoare, păstrând identic conținutul armonic, și în același timp au semnalele triunghiulare portante de comandă defazate la 180° pentru a obține o scădere a cerințelor de răspuns la variații

bruște ale curentului pentru bobinele PWM și o reducere semnificativă a riplului de comutație.

- au fost realizate, optimizate și implementate pe platforma de dezvoltare hardware dSPACE filtre digitale trece-jos și trece-bandă rezonante din cadrul algoritmilor de comandă ai filtrelor active prin intermediul unor modele cu variabile de stare, cu ajutorul instrumentului MATLAB de proiectare și analiză a filtrelor analogice și digitale și a funcțiilor de conversie din domeniul continuu "s" în cel discret "z" prin intermediul calcului simbolic.
- au fost realizate, implementate pe o platforma hardware dSPACE, optimizate și testate în vederea comparării performanțelor acestora în condițiile unor tensiuni distorsionate și nesimetrice 5 algoritmi diferiți de detecție a curenților fundamentali de referință pentru filtrul activ.

Rezultatele obținute pe perioada derulării tezei au fost diseminate în cadrul conferințelor internaționale și prin publicarea de lucrări științifice în reviste de prestigiu.

Bibliografie selectivă:

- [AKA1] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe, Mauricio Aredes, *Instantaneous power theory and applications to power conditioning*, Wiley 2007.
- [ASI1] L. Asiminoaei, C. Lascu, I. Boldea, "Performance Improvement of Shunt Active Power Filter With Dual Parallel Topology", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 22, No. 1, 2007, pp. 247–259.
- [ASI2] L. Asiminoaei, F. Blaabjerg, S. Hansen, "Detection is key - Harmonic detection methods for active power filter applications", *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. XIII, no. 4, 2007, p. 22–33.
- [BOJ1] R. I. Bojoi, G. Griva, V. Bostan, M. Guerriero, F. Farina, F. Profumo, "Current control strategy for power conditioners using sinusoidal signal integrators in synchronous reference frame", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 20, No. 6, 2005, pp. 1402–1412.
- [CZA2] L. S. Czarnecki, "Budeanu and Fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltage and currents". *Electrical Engineering* 80 (1997), pp. 359-367, Springer-Verlag, 1997.
- [CZA4] Czarnecki L. S., *Dynamic, power quality oriented approach to theory and compensation of asymmetrical systems under nonsinusoidal conditions*. *European Transactions on Electrical Power*, vol. 5, pp. 347–358, 1994.
- [KOM1] T. Komrska, J. Zak, Z. Peroutka, "Reactive power and harmonic currents compensation in traction systems using active power filter with DFT-based current reference generator", *13th European Conference on Power Electronics and Applications EPE '09*, 2009, pp. 1–10.
- [LIM2] L. Limongi, R. Bojoi, G. Griva, A. Tenconi, "Comparing the Performance of Digital Signal Processor-Based Current Controllers for Three-Phase Active Power Filters", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Vol. 3, No. 1, 2009, pp. 20–31.
- [NIC3] Nicolae, I.-D.; Chiva, A.; Nicolae, P.-M.; Nicolae, M.-S., "Techniques to accelerate power quality analysis based on DWT," in *2014 International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)*, pp. 1-5, 23-25 Oct. 2014, DOI: 10.1109/ICATE.2014.6972625.

- [NIC4] I.-D. Nicolae, P.-M. Nicolae, **D. L. Popa**, "Using Discrete Wavelet Transform to analyze quasi-stationary three-phase systems," in 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), pp. 102-106, 25-28 May 2014, DOI: 10.1109/ICHQP.2014.6842818.
- [NIC7] P. M. Nicolae, **D. L. Popa**, M. S. Nicolae, I. D. Nicolae, "Instantaneous Power Theory applied to Power Conditioning under Distorted Mains Voltages: a MATLAB/Simulink Approach", 2014 International Power Electronics Conf. (IPEC-Hiroshima 2014 - ECCE-ASIA), 2014, pp. 2996–3001.
- [POP1] **D. L. Popa**, P. M. Nicolae, "Improving the Shunt Active Power Filter Control Methods under Distorted and Unbalanced Grid Voltages", Annals of University of Craiova: Electrical Engineering Series, ISSN 1842-4805, Nr. 38/2014, pp. 28-36.
- [POP3] **D. L. Popa**, P. M. Nicolae, "Issues with high power shunt active filters operating with distorted mains voltages. Dual inverter topology," in 2015 9th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), pp. 704-709, 7-9 May 2015, DOI: 10.1109/ATEE.2015.7133891.
- [SIR1] Ioana - Gabriela Sîrbu, "Prelucrarea numerică a semnalelor în ingineria electrică, Editura Universitaria", Craiova, 2014, ISBN 978-606-14-0799-6.
- [STD1459] IEEE Std 1459-2010, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 2010.
- [STD519] IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", 1992.
- [YUA1] X. Yuan, W. Merk, H. Stemmler, and J. Allmeling, "Stationary-frame generalized integrators for current control of active power filters with zero steady-state error for current harmonics of concern under unbalanced and distorted operating conditions," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 38, no. 2, pp. 523–532, Mar. 2002.