



ROMÂNIA
**UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS”
DIN GALAȚI**



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
TINERETULUI
ȘI SPORTULUI

CERCETĂRI ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE ÎN SISTEMELE ELECTRICE

- Teză de doctorat –

- rezumat -

Conducător științific
Prof.dr.ing. Grigore FETECĂU

Doctorand,
ing. Ciprian Daniel BĂLĂNUȚĂ

Galați, 2012

C ă t r e

Universitatea “ Dunărea de Jos “ din Galați vă face cunoscut că în data de 22.10.2012, ora 10.00, în _____, sala Y106 din cadrul Facultatii ACIEE _____, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată: **”CERCETĂRI ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE ÎN SISTEMELE ELECTRICE”**, elaborată de domnul/doamna **BĂLĂNUTĂ CIPRIAN-DANIEL**, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - **Inginerie electrică.**

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- 1. Președinte:** **Conf.univ.dr.ing. Marian GĂICEANU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

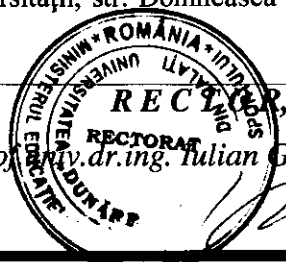
- 2. Conducător de doctorat:** **Prof.univ.dr.ing. Grigore FETECĂU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

- 3. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Alexandru BITOLEANU**
Universitatea din Craiova

- 4. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Gheorghe BĂLUTĂ**
Universitatea Tehnică “Gheorghe Asachi” din Iași

- 5. Referent oficial:** **Prof.univ.dr.ing. Toader MUNTEANU**
Universitatea “Dunărea de Jos” din Galați

Cu această ocazie vă transmitem rezumatul tezei de doctorat și vă invităm să participați la susținerea publică. În cazul în care doriți să faceți eventuale aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării, vă rugăm să le transmiteți în scris pe adresa Universității, str. Domnească nr. 47, 800008 - Galați, Fax - 0236 / 461353.


RECTORAT
Prof. univ. dr. ing. **Julian Gabriel BÎRSAN**
Julian Gabriel Bîrsan



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI
MINISTERUL MUNCII, FAMILIEI
ȘI PROTECȚIEI SOCIALE
AMPOSDRU



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
CERCETĂRII
ȘI SPORTULUI

OPOSDRU



UNIVERSITAS
GALATIENSIS

UNIVERSITATEA „DUNĂREA DE JOS” DIN GALAȚI

CERCETĂRI ȘI CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE ÎN SISTEMELE ELECTRICE

- Teză de Doctorat –

- Rezumat -

Conducător științific
Prof.dr.ing. Grigore FETECĂU

Doctorand,
ing. Ciprian Daniel BĂLĂNUȚĂ

Galați, 2012

CUPRINS

	Teza	Rezumat
INTRODUCERE	7	6
CAPITOLUL 1 STADIUL ACTUAL AL CUNOASTERII PRIVIND CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE ȘI FILTRELE ACTIVE	10	8
1.1 CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE	10	8
1.1.1 Indicatorii de calitate ai energiei electrice	11	8
1.1.1.1 <i>Continuitatea în alimentare</i>	12	-
1.1.1.2 <i>Frecvența tensiunii de alimentare</i>	13	-
1.1.1.3 <i>Goluri de tensiune și întreruperile de scurtă durată</i>	14	-
1.1.1.4 <i>Variațiile de tensiune și Flicker</i>	15	-
1.1.1.5 <i>Nesimetria de curent și de tensiune</i>	15	-
1.1.1.6 <i>Armonicile de curent și de tensiune</i>	16	-
1.1.2 Surse de perturbații	18	8
1.1.3 Soluții de îmbunătățire a calității energiei electrice	18	9
1.1.4 Standarde pentru reglementarea calității energiei electrice	19	9
1.1.4.1 <i>Standardul European SR EN 50160</i>	19	9
1.1.4.2 <i>Colecția de Standarde Europene EN 61000</i>	21	11
1.2 ANALIZA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE LA CONSUMATORI	22	11
1.2.1 Consumatori casnici	22	12
1.2.2 Clădire de birouri și laboratoare de studiu în domeniul ingineriei electrice	25	12
1.2.3 Consumatori industriali	27	12
1.2.3.1 <i>Din domeniul serviciilor auto</i>	27	12
1.2.3.2 <i>Din domeniul industriei siderurgice</i>	30	12
1.3 CLASIFICAREA FILTRELOR DE PUTERE	33	13
1.3.1 Filtre Pasive	33	13
1.3.2 Filtre Active	34	13
1.3.2.1 <i>Filtru activ paralel</i>	36	13
1.3.2.2 <i>Filtru activ serie</i>	37	13
1.3.2.3 <i>Filtru activ hibrid</i>	38	13
1.4 COMANDA FILTRULUI ACTIV PARALEL	40	14
1.4.1 Compensarea formei de undă folosind filtrarea în domeniul Frecvență	41	14
1.4.1.2 <i>Transformata Fourier și FFT (Fast Fourier Transform)</i>	42	14
1.4.1.3 <i>Tehnica de multiplicare sinusoidală</i>	43	14
1.4.1.4 <i>Transformata Fourier modificată</i>	43	14
1.4.2 Compensarea formei de undă folosind filtrarea în domeniul Timp	43	14
1.4.2.1 <i>Metoda puterilor instantanee (p-q)</i>	44	14
1.4.2.2 <i>Metoda algoritmului sincron</i>	44	14
1.4.2.3 <i>Metoda maximumului</i>	44	14
1.4.2.4 <i>Metoda secvenței pozitive</i>	44	14
1.4.2.5 <i>Metoda indirectă</i>	44	14
1.4.3 Tehnici de comandă	44	15
1.4.3.1 <i>PWM cu eșantionare periodică</i>	44	15
1.4.3.2 <i>PWM în bandă de histerezis</i>	45	15
1.4.3.3 <i>PWM cu semnal purtător triunghiular</i>	45	15
1.5 DIMENSIONAREA ELEMENTELOR PASIVE ALE FILTRULUI ACTIV	46	15
1.5.1 Stabilirea nivelului de tensiune pe bara de curent continuu	46	15
1.5.2 Dimensionarea inductivității de conectare	46	15
1.5.2.1 <i>Metoda pantei curentului prin filtrul activ</i>	46	15
1.5.2.2 <i>Metoda puterii de compensare</i>	47	15
1.5.3 Dimensionarea condensatorului de curent continuu (bara de c.c.)	47	16
1.5.3.1 <i>Metoda regimului tranzitoriu</i>	47	16

1.5.3.2	Metoda variațiilor de tensiune	48	16
1.5.3.3	Metoda puterii de compensare	48	16
CAPITOLUL 2	MODELAREA ȘI SIMULAREA METODELOR DE COMANDĂ A FILTRELOR ACTIVE DE PUTERE CU 3 BRAȚE CONECTATE ÎN SISTEME ELECTRICE DISTRIBUITE PRIN 3 FIRE	49	17
2.1	SURSA DE ALIMENTARE ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ	49	17
2.2	SARCINILE ELECTRICE	51	18
2.3	FILTRUL ACTIV DE PUTERE	53	19
2.3.1	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee (p-q)	55	19
2.3.1.1	Sarcina neliniară	58	20
2.3.1.2	Sarcina inductivă	60	20
2.3.2	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron (d-q)	62	21
2.3.2.1	Sarcina neliniară	63	22
2.3.2.2	Sarcina inductivă	65	22
2.3.3	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul maximumului	67	23
2.3.3.1	Sarcina neliniară	68	23
2.3.3.2	Sarcina inductivă	70	23
2.3.4	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul controlului indirect	71	24
2.3.4.1	Sarcina neliniară	74	25
2.3.4.2	Sarcina inductivă	76	25
2.3.5	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul sincronizării curentului cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii	78	26
2.3.5.1	Sarcina neliniară	81	26
2.3.5.2	Sarcina inductivă	83	27
2.4	CENTRALIZAREA REZULTATELOR	85	-
2.5	ANALIZA COMPARATIVĂ A METODELOR DE COMANDĂ	87	28
CAPITOLUL 3	CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA METODELOR DE COMANDĂ A FILTRELOR ACTIVE DE PUTERE CU 4 BRAȚE CONECTATE ÎN SISTEME ELECTRICE DISTRIBUITE PRIN 4 FIRE	89	29
3.1	SURSA DE ALIMENTARE ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ	90	30
3.2	SARCINILE ELECTRICE	91	30
3.3	FILTRUL ACTIV DE PUTERE	94	30
3.3.1	Dimensionarea elementelor filtrului activ	94	30
3.3.2	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee (p-q-0)	97	31
3.3.3	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron (d-q-0)	98	32
3.3.4	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul controlului indirect	99	32
3.3.5	Metoda de comanda dezvoltata pe principiul sincronizării curentului circulat cu componenta de secvența pozitivă a tensiunii	103	36
3.4	REZULTATE OBȚINUTE	104	37
3.4.1	Studiul 1 – punte redresoare necomandată și sarcina RL	104	37
3.4.1.1	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee	105	37
3.4.1.2	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron	107	38
3.4.1.3	Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului controlului indirect	109	39
3.4.1.4	Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului sincronizării curentului cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii	111	39
3.4.1.5	Centralizarea rezultatelor obtinute	113	-
3.4.2	Studiul 2 – rețea de calculatoare	116	40
3.4.2.1	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee	117	40
3.4.2.2	Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron	118	41
3.4.2.3	Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului de control indirect	120	42
3.4.2.4	Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului sincronizării curentului cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii	122	42
3.4.1.5	Centralizarea rezultatelor obținute	124	-

3.5 CONCLUZII	126	43
CAPITOLUL 4 CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA FILTRELOR ACTIVE DE PUTERE CU 4 BRAȚE	128	44
4.1 SURSA DE ALIMENTARE ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ	129	45
4.2 SARCINILE ELECTRICE	130	45
4.3 FILTRUL ACTIV DE PUTERE	131	46
4.3.1 Dimensionarea elementelor pasive ale filtrului activ	131	46
4.3.2 Bucla de sincronizare	131	-
4.3.3 Metoda de acordare a regulatorului PI	132	-
4.3.4 Metoda de obținere a impulsurilor de comandă	132	46
4.3.4.1 Histerezis cu bandă variabilă	132	46
4.3.4.2 PWM convertor 3 nivele de tensiune	133	47
4.3.5 Metoda de comandă	134	47
4.3.6 Rezultate obținute	135	48
4.3.6.1 Structura cu 2 nivele de tensiune	135	48
4.3.6.2 Structura cu 3 nivele de tensiune	138	49
4.3.7 Compararea rezultatelor	140	-
4.4 CONCLUZII	143	50
CAPITOLUL 5 CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂTĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE ÎN MICRO-REȚELELE ELECTRICE DE MICĂ PUTERE	144	51
5.1 METODA DE COMANDĂ	145	52
5.2 STUDIU DE CAZ	149	54
5.2.1 Micro-rețeaua electrică	149	54
5.2.2 Sarcina electrică	150	55
5.2.3 Dimensionarea elementelor componente ale CAP	153	56
5.2.4 Rezultate obținute	153	56
5.2.4.1 Cazul folosirii structurii cu 2 nivele de tensiune	154	56
5.2.4.2 Cazul folosirii structurii cu 3 nivele de tensiune	158	57
5.3 STAGIU EXTERN DE CERCETARE	162	59
5.4 CONCLUZII	166	62
CAPITOLUL 6 CONCLUZII SI CONTRIBUȚII	167	63
6.1 CONCLUZII FINALE ȘI PERSPECTIVE	167	63
6.2 CONTRIBUȚII	168	64
6.3 DISEMINAREA REZULTATELOR	170	65
6.4 MULȚUMIRI	172	67
BIBLIOGRAFIE selectivă	173	68

INTRODUCERE

Energia electrică este probabil cea mai importantă materie primă utilizată astăzi în comerț și industrie. Este un produs cu un caracter deosebit, deoarece trebuie să constituie un flux continuu, nu poate fi stocat în cantități mari și nu poate face subiectul unui control al calității înainte de a fi utilizat.

Problema calității energiei electrice a depășit domeniul de interes al specialiștilor, fiind privită, în prezent, ca o problemă de interes major. Echipamentele de filtrare capătă o importanță din ce în ce mai mare pentru furnizorii de energie electrică și clienții acestora.

Calitatea energiei electrice, eficiența energetică, cât și energia produsă din surse regenerabile sunt obiectivele de viitor. Ultimele cercetări au fost concentrate, în special, pe zona de producere a energiei verzi, mai puțin pe studiul eficientizării consumului ce conduce la necesitatea unei cantități mai mici de energie. Totuși, reducerea consumului este foarte importantă dar, trebuie luate măsuri pentru ca perturbațiile produse de consumatori să nu-i afecteze pe cei vecini. Astfel, trebuie asigurată o calitate ridicată a energiei electrice vândută consumatorilor. În consecință, cele trei direcții sunt strâns legate între ele:

- producerea energiei verzi;
- eficientizarea consumului;
- calitatea energiei.

Prezenta lucrare prezintă o dezvoltare a utilizării filtrelor active de putere, în vederea îmbunătățirii calității energiei electrice în sistemele electrice de putere distribuite pe 4 fire. De asemenea, s-a abordat și problema calității energiei electrice dintr-o micro-rețea electrică, prin dezvoltarea unui compensator activ de putere.

Teza de doctorat este structurată pe 6 capitole, astfel:

- Capitolul 1, în care sunt dezvoltate aspecte privind calitatea energiei electrice, indicatorii de calitate și limitele indicatorilor de calitate, extrase din standardele europene, SR EN 50160 și din colecția de standarde de compatibilitate electromagnetică, EN 61000. Sub forma unui studiu de caz, s-au prezentat măsurătorile parametrilor energiei electrice pentru diverși consumatori, obținându-se informații cu privire la calitatea energiei și la perturbațiile introduse în rețea de către aceștia. Sunt expuse definițiile filtrelor active de putere și descrise elementele componente ale unui filtru activ, descrierea metodelor de extragere a referinței, necesară în comanda filtrelor active atât în domeniul timp, cât și în domeniul frecvență; tehnici de comandă a dispozitivelor semiconductoare cât și algoritmi de comandă a filtrelor active. Acest capitol se încheie cu clasificarea filtrelor de putere, cu accentuarea filtrelor active de putere trifazate

- În Capitolul 2 se prezintă 5 metode de comandă, în domeniul timp, ale filtrelor active de putere utilizate în sistemele distribuite pe 3 fire. Acestea au fost folosite la comanda unui filtru activ de putere cu 3 brațe modelat în mediul de simulare Matlab/Simulink. Analiza a avut ca scop stabilirea metodelor care conduc la obținerea unor rezultate bune. S-a urmărit reducerea nivelului armonic și îmbunătățirea factorului de putere, iar aceste rezultate au

constituit punctul de plecare în dezvoltarea metodelor de comandă. Acestea urmând a fi implementate în comanda unui filtru activ de putere cu 4 brațe.

- În Capitolul 3 se prezintă două metode de comandă pentru filtrele active de putere cu 4 brațe. Metodele sunt dezvoltate pe structura celor utilizate în comanda filtrelor cu 3 brațe. Pentru a demonstra buna funcționare a metodelor propuse, s-au prezentat două studii de caz pentru care s-au ales sarcini reprezentative prin nivelul de poluare pe care îl introduc în sistemele electrice. Rezultatele obținute pentru indicatorii de calitate prin utilizarea metodelor propuse au fost comparate cu cele obținute prin utilizarea unor metode existente.

- Capitolul 4 dezvoltă utilizarea comenzii propuse prin folosirea acesteia pentru comanda unui filtru activ cu 4 brațe, dezvoltat pe o structură cu 3 nivele de tensiune. Scopul principal al acestui capitol este de a demonstra că metoda de comandă propusă, metoda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe, este funcțională și poate fi implementată cu succes pe structuri de tip multinivel.

- Capitolul 5 prezintă o modalitate de îmbunătățire a calității energiei electrice în micro-rețelele electrice, prin folosirea unui compensator activ de putere. Acest echipament permite creșterea puterii rețelei prin injectarea de energie electrică în punctul de conectare, primită de la o sursă secundară, și să asigure o bună calitate a energiei din micro-rețea. Se expun două modalități de implementare a unui compensator activ de putere cu 4 brațe, una pe structura cu 2 nivele de tensiune și cea de-a doua, pe structură cu 3 nivele de tensiune de tip NPC. Metoda de comandă folosită este dezvoltată în această lucrare, metoda indirectă pentru 4 brațe.

- Ultimul capitol structurează concluziile acestei teze de doctorat și, de asemenea, prezintă contribuțiile aduse, de autor, cercetării.

CAPITOLUL 1

STADIUL ACTUAL AL CUNOAȘTERII PRIVIND CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE ȘI FILTRELE ACTIVE DE PUTERE

1.1. CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE

Tabelul 1. 1 Componentele calității energiei electrice

Calitatea energiei electrice	Calitatea serviciului de alimentare		Înteruperi de lungă durată
	Calitatea tensiunii de alimentare	Avarii	Înteruperi de scurtă durată
			Goluri de tensiune
			Supratensiuni
			Abateri de frecvență
		Sarcini perturbatoare	Variații rapide de tensiune
			Flicker
	Nesimetrie		
	Calitatea comercială		Armonici
			Interarmonici
		Regimuri tranzitorii	
		Componenta continuă	

1.1.1. Indicatorii de calitate ai energiei electrice

Pentru a permite evaluarea nivelului de calitate a energiei electrice au fost definiți și sunt utilizați următorii indicatori principali privind:

- frecvența tensiunii de alimentare [GOL 01]:
- variațiile de tensiune [GOL 01]:
- golurile de tensiune [GOL 01]:
- întreruperile din rețeaua electrică [DUG 02]:
- Flicker-ul:
- regimul nesinusoidal din rețeaua electrică:
- interarmonicele:
- nesimetria în rețelele electrice:
- supratensiunile în rețelele electrice

1.1.2. Surse de perturbații

Tabelul 1. 2 Surse perturbatoare

Fenomen	Surse de perturbații
Goluri de tensiune	Scurtcircuitele
	Conectarea sarcinilor mari
	Pornirea motoarelor mari conectate la capătul liniei de alimentare
	Fluctuațiile de mare putere (în special de putere reactivă)

Înteruperile de scurtă durată	Comutările datorate scurtcircuitelor
Fluctuațiile de tensiune și efectul de Flicker	Cuptoarele cu arc
	Aparatele de sudură
	Boilere electrice folosite în industrie pentru generarea aburului
	Bateriile de condensatoare
	Centralele eoliene
	La nivelul de joasă tensiune: lifturile, pompe, ventilatoare, boilere, camere frigorifice, cuptoarele electrice, aerul condiționat – consumatoare de putere ce sunt conectate și deconectate ciclic sau neregulat
Nesimetria de curent și de tensiune	Tracțiunea electrică
	Cuptoarele cu arc
Armonicile de curent	Echipamentele cu miez magnetic (transformatoare, motoare, generatoare)
	Cuptoarele cu arc, aparatele de sudură, lămpile cu descărcări
	Echipamentele dotate cu electronică de putere

1.1.3. Soluții de îmbunătățire a calității energiei electrice

Tabelul 1. 3 Soluții de îmbunătățire a calității energiei electrice

Fenomen	Soluții
Goluri de tensiune	UPS (surse de energie neîntreruptibile)
	DVR (Dynamic Voltage Restorer)
	DySC (Dynamic Sag Correctors)
	Limitarea curentului de pornire al motoarelor Soft-Starter
	Filtre active de putere
Înteruperile de scurtă durată	UPS (surse de energie neîntreruptibile)
Fluctuațiile de tensiune și Ficker	Filtre active de putere
Nesimetria de curent și de tensiune	Încărcarea egală a fazelor
	Utilizarea schemei Steinmetz
	Utilizarea schemei Scott
	Utilizarea transformatoarelor stea triunghi
	Utilizarea transformatoarelor conectate în V
Armonicile de curent	Filtre pasive serie, paralel
	Folosirea conexiunilor stea/triunghi a transformatoarelor
	Filtre active de putere
Factor de putere scăzut	Baterii de condensatoare
	Filtre active de putere

1.1.4. Standarde pentru reglementarea calității energiei electrice

1.1.4.1. Standardul European SR EN 50160

Standardul European SR EN 50160 a fost aprobat de CENELEC la data 01.06.2007.

Tabelul 1. 4 Caracteristicile tensiunii conform SR EN 50160

Indicator	Prevederi SR EN 50160-2007
Frecvența	50 Hz \pm 1% (49,5 Hz – 50,5 Hz); pe durata a 99.5 % din an; 50 Hz $+4\%/-6\%$ (47 Hz – 52 Hz); pe durata a 100 % din timp.
Variația amplitudinii tensiunii	$U_n \pm 10\%$; pe durata a 95 % din săptămână; $U_n +10\%/-15\%$; pe durata a 100 % din timp.
Variații rapide (bruste)	$U_n \pm 5\%$; în general; $U_n \pm 10\%$, cu totul excepțional.
Variații rapide (flicker)	$P_{fl} < 1\%$; pe durata a 95 % din săptămână;
Goluri de tensiune	Valori indicative: cea mai mare parte a golurilor au o durată mai mică de 1 s cu o amplitudine sub 60 %
Întrepreri de scurtă durată	Valori indicative: între câteva zeci până la câteva sute pe an; 70 % dintre întrepreri au o durată mai mică de 1s
Întrepreri de lungă durată	Valori indicative: frecvența anuală a întreprerilor poate fi mai mică de 10 sau până la 50, durată mai mare de 3 minute
Supratensiuni temporare	Nu depășesc o valoare efectivă de 1,5kV
Supratensiuni tranzitorii	Nu depășesc o valoare de vârf de 6kV
Nesimetrie	2 %; 95 % din săptămână
Armonici	Limita pentru armonici până la rangul 40 și factor de distorsiune < 8%; 95 % din săptămână
Interarmonici	În studiu (nu există valori standard)
Tensiuni de semnalizare	Limitat conform curbei lui Meister; 99 % din zi

Tabelul 1. 5 Limitele procentuale ale armonicilor conform SR EN 50160

Armonici impare				Armonici pare	
Nu sunt multiplu de 3		Multiplu de 3			
Rangul h	Tensiunea relativă (U_h [%])	Rangul h	Tensiunea relativă (U_h [%])	Rangul h	Tensiunea relativă (U_h [%])
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6.. 24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

1.1.4.2. *Colecția de Standarde Europene EN 61000*

Tabelul 1. 6 Caracteristici ale tensiunii conform EN 61000-x-x

Indicator	Prevederi din colecția de standarde de compatibilitate electromagnetică seria 61000
Frecvența	2%
Variația amplitudinii tensiunii	±10% aplicată pentru 15 minute
Variații rapide (bruste)	3% normal 4% maximum
Variații rapide (Flicker)	$P_{st} < 1$ $P_{lt} < 0,8$ EN 61000-2-2 $P_{lt} < 0,65$ EN 61000-3-3
Goluri de tensiune	Urbane 1-4 pe lună EN 61000-2-2 Până la 30% pentru 10ms EN 61000-6-1,6-2 Până la 60% pentru 100ms EN 61000-6-1,6-2 Până la 60% pentru 1000ms EN 61000-6-2
Înteruperi de scurtă durată	95% reducere pentru 5s, EN 61000-6-1,6-2
Înteruperi de lungă durată	-
Supratensiuni temporare	-
Supratensiuni tranzitorii	±2kV , fază pământ, EN 61000-6-1,6-2 ±1kV , între faze, EN 61000-6-1,6-2
Nesimetrie	2% EN 61000-2-12
Armonici	THD < 8%
Interarmonici	0,2%

Tabelul 1. 7 Limitele procentuale ale armonicilor conform EN 61000-3-2

Armonici impare			
Nu sunt multiplu de 3		Multiplu de 3	
Rangul h	Tensiunea relativă (U_h [%])	Rangul h	Tensiunea relativă (U_h [%])
5	6	3	5
7	5	9	1,5
11	3,5	15	3
13	3	-	-
17	2	-	-

1.2. ANALIZA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE LA CONSUMATORI

Pentru studiul calității energiei electrice și a perturbațiilor introduse în rețea de către diverși consumatori s-au făcut măsurători în punctele de conectare a acestora la rețea. Înregistrările au fost realizate cu ajutorul analizorului trifazat de energie electrică, model CA 8334.

1.2.1. Consumatori casnici

Pentru consumatorii casnici măsurătorile au fost făcute în postul de transformare ce alimentează un cartier de locuințe, perioada de măsurare fiind de o zi.

Tabelul 1. 8 Valorile medii ale principalilor parametri ai energiei electrice

Tensiune de fază [V]	Curent absorbit [A]	Putere activă [kW]	Putere reactivă [kVAr]	Factor de putere	V _{PST} [%]	U _{unb} [%]	A _{unb} [%]	THD _u [%]	THD _i [%]
235	134	87	35	0,92	0,23	0,33	6,64	4,5	18,65

1.2.2. Clădire de birouri și laboratoare de studiu în domeniul ingineriei electrice

Pentru acest studiu măsurătorile au fost realizate la nivelul Tabloului Electric General (TEG), direct pe barele de alimentare. Principalii consumatori din această clădire sunt:

- 2 ascensoare pentru transport persoane, acționate cu motor asincron;
- PC-urile de lucru și standuri pentru studiu în domeniul ingineriei electrice.

Tabelul 1. 9 Valorile medii ale principalilor parametri ai energiei electrice

Tensiune de fază [V]	Curent absorbit [A]	Putere activă [kW]	Putere reactivă [kVAr]	Factor de putere	V _{PST} [%]	U _{unb} [%]	A _{unb} [%]	THD _u [%]	THD _i [%]
222	47	29	2	0,92	0,77	0,55	25,31	4	30

1.2.3. Consumatori industriali

1.2.3.1. Din domeniul serviciilor auto

Profilul companiei analizate este cel al serviciilor auto (vânzări, service).

Tabelul 1. 10 Valorile medii ale principalilor parametri ai energiei electrice

Tensiune de fază [V]	Curent absorbit [A]	Putere activă [kW]	Putere reactivă [kVAr]	Factor de putere	V _{PST} [%]	U _{unb} [%]	A _{unb} [%]	THD _u [%]	THD _i [%]
226	103	59	37	0,83	0,49	-	-	1,47	9,4

1.2.3.2. Din domeniul industriei siderurgice

Domeniul industriei siderurgice este un domeniu dezvoltat (principal) în zona de S-E a României. Compania în cadrul căreia s-a făcut acest studiu are ca principal obiect de activitate producerea și vânzarea produselor metalurgice (țevi, profile metalice).

Tabelul 1. 11 Valorile medii ale principalilor parametri ai energiei electrice

Tensiune de fază [V]	Curent absorbit [A]	Putere activă [kW]	Putere reactivă [kVAr]	Factor de putere	V _{PST} [%]	U _{unb} [%]	A _{unb} [%]	THD _u [%]	THD _i [%]
230	466	234	189	0,77	1,76	0,36	11	7,23	35,4

1.3. CLASIFICAREA FILTRELOR DE PUTERE

1.3.1. Filtre pasive

Filtrele serie realizează filtrarea prin conectarea, în serie cu sarcina, a unui circuit LC paralel. Configurația paralel a filtrului de armonici constă în conectarea în paralel cu sursa de alimentare a unui circuit LC serie.

1.3.2. Filtre active de putere

Filtrele active de putere sunt dispozitive relativ noi, bazate pe electronica de putere, folosite pentru eliminarea armonicilor și nu numai. Acestea au avantajul de a nu rezona cu sistemul electric. Astfel, ele pot fi folosite și în situațiile unde filtrele pasive nu pot funcționa cu succes datorită problemelor de rezonanță. [EWA 08], [BAR 00]

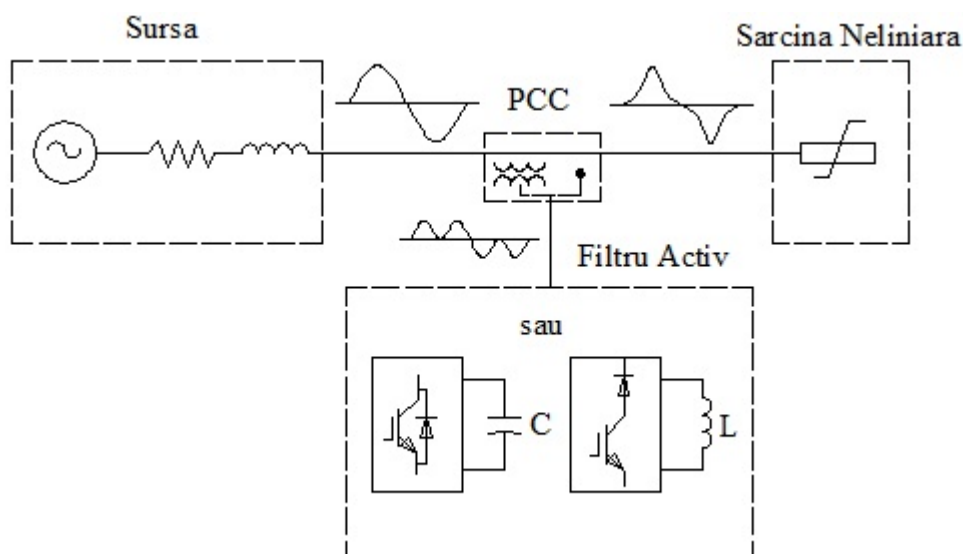


Figura 1. 34 Diagrama bloc a filtrelor active de putere

1.3.2.1. Filtru activ de putere paralel

Filtrul activ paralel este conceput pentru a fi conectat în paralel cu sarcina perturbatoare. Acesta detectează armonicile de curent și injectează în sistem curenți de compensare identici cu cei armonici dar în opoziție de fază [WOO 02], [PIC 02], [JIN 02].

1.3.2.2. Filtru activ de putere serie

Filtrul activ de putere serie este o sursă de tensiune, conectată în serie cu sursa de alimentare și cu sarcina și funcționează pe principiul izolării armonicilor.

1.3.2.3. Filtru activ hibrid

Combinarea filtrării active și filtrării pasive este aplicată cu succes pentru compensarea armonicilor. Configurația hibrid este adesea o soluție economică și cu rezultate mai bune decât filtrarea pur activă [HID 00], [SAN 02], [PAT 10], [SAL 10].

1.4. COMANDA FILTRULUI ACTIV DE PUTERE PARALEL

1.4.1. Compensarea formei de undă folosind filtrarea în domeniul frecvență

Algoritmii aparținând domeniului frecvență se bazează pe analiza Fourier aplicată semnalelor poluate (curent sau tensiune) pentru a extrage semnale de compensare.

1.4.1.1. Transformata Fourier și FFT (Fast Fourier Transform)

Folosind transformata Fourier rapidă, componenta armonică a semnalului poate fi extrasă prin eliminarea componentei fundamentale din semnalul prelucrat, apoi se aplică transformata inversă FFT pentru a obține semnalul final în domeniul timp.

1.4.1.2. Tehnica de multiplicare sinusoidală

Această metodă constă în multiplicarea semnalului analizat cu o sinusoidă de frecvență egală cu frecvența fundamentalei și integrarea rezultatului înmulțirii.

1.4.1.3. Transformata Fourier modificată

Principiul acestei metode este acela că numai componentă fundamentală a semnalului este calculată și folosită pentru separarea componentelor armonice ale semnalului (curent/tensiune) ce alimentează sarcina neliniară.

1.4.2. Compensarea formei de undă folosind filtrarea în domeniul timp

1.4.2.1. Metoda puterilor instantanee ($p-q$)

Principiul acestei metode are la bază transformarea sistemului de referință a-b-c în sistemul de referință α - β și calculul puterilor instantanee p și respectiv q [AKA 07].

1.4.2.2. Metoda algoritmului sincron

În acest caz, curenții reali sunt transformați în sistemul de referință sincron d-q. Acest sistem este sincronizat cu tensiunea sursei și se rotește cu aceeași frecvență [HID 00], [DIR 01], [SAN 02], [WOO 02], [PIC 02].

1.4.2.3. Metoda maximumului

Curentul deformat de sarcina poluantă este filtrat pentru a se extrage componenta fundamentală. Filtrul trece-bandă este acordat pe frecvența de 50 Hz, atenuarea semnalului de ieșire va fi egală cu 0, și defazajul va fi de 180° [MOR 95].

1.4.2.4. Metoda secvenței pozitive

Aceasta este o tehnică recentă propusă în 2003 de către W.G.Chang & T.-C. Shee [CHA 04]. Se bazează pe nevoia de a avea un curent echilibrat debitat de sursă, nedistorsionat și în fază cu secvența pozitivă a tensiunii sursei de alimentare [SAL 10], [BEN 06].

1.4.2.5. Metoda indirectă

Metoda indirectă este o strategie relativ nouă care nu necesită cunoașterea îndeaproape a spectrului curentului trasat de sarcina electrică. Algoritmii au fost propuși în lucrările [ROS 08]. Alte lucrări în care este abordată această metodă de comandă: [BAL 08], [BAL 10], [GUR 10], [GUR 11].

1.4.3. Tehnici de comandă

Majoritatea tehnicilor de comandă aplicate filtrelor active se bazează pe strategiile MLI (Modulație în lățime a impulsului - PWM) [HOL 94], [CAP 02], [TRZ 98].

1.4.3.1. PWM cu eșantionare periodică

Metoda eșantionării periodice permite comutarea componentelor semi-conductoare ale filtrului activ în timpul tranziției semnalului purtător, semnal dreptunghiular de frecvență fixă (frecvență de eșantionare).

1.4.3.2. PWM în bandă de histerezis

Metoda benzii de histerezis permite comutarea întrerupătoarelor filtrului activ atunci când eroarea dintre semnalul măsurat (curent sau tensiune) și cel de referință depășește o amplitudine impusă.

1.4.3.3. PWM cu semnal purtător triunghiular

Această metodă compară eroarea dintre semnalul (curent sau tensiune) măsurat și cel de referință cu o undă triunghiulară (purtătoare) de amplitudine și frecvență impusă.

1.5. DIMENSIONAREA ELEMENTELOR PASIVE ALE FILTRULUI ACTIV

1.5.1. Stabilirea nivelului de tensiune pe bara de curent continuu

Nivelul tensiunii de prag, pentru un filtru activ trifazat, trebuie să fie mai mare decât valoarea de vârf a tensiunii de linie a sistemului electric [GUO 10], adică:

$$U_{cc} > \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot E_m \quad (1.24)$$

1.5.2. Dimensionarea inductivității de conectare

1.5.2.1. Metoda pantei curentului prin filtrul activ

Această metodă este definită în [MOR 95] și are la bază impunerea ca, pentru o frecvență dată, panta curentului prin filtrul activ de putere i_{FA} să fie mai mică decât cea a semnalului triunghiular purtător ce definește frecvența de comutație. Panta semnalului purtător este definită de:

$$\chi = 4 \cdot \varepsilon \cdot f_s \quad (1.26)$$

unde: ε reprezintă amplitudinea semnalului triunghiular, f_s frecvența de comutație.

De unde:

$$L_{FA} = \frac{0.5 \cdot U_{cc} + U_{sm}}{4 \cdot \varepsilon \cdot f_s} \quad (1.28)$$

unde, U_{cc} , tensiunea din bara de curent continuu, U_{sm} valoarea maximă a tensiunii sursei de alimentare.

1.5.2.2. Metoda puterii de compensare

- al puterii de compensare;

- de satisfacere a cerințelor necesare compensării privind nivelul impulsurilor de curent;

Astfel, inductivitatea se alege între limitele de maximum și minim definite mai jos:

$$\frac{2U_{cc}T_s}{9\Delta i_{\max}} \leq L \leq \frac{4U_{cc}}{9 \cdot (10 \sim 20) f \cdot 2.3I_a^*} \quad (1.31)$$

unde,

- U_{cc} , tensiunea din bara de curent continuu;
- T_s , perioada de comutație;
- Δi_{\max} , abaterea maximum permisă față de referința de curent impusă;
- f , frecvența tensiunii fundamentale;
- I_a^* , valoarea efectivă a curentului de referință.

1.5.3. Dimensionarea condensatorului de curent continuu (bara de c.c.)

1.5.3.1. Metoda regimului tranzitoriu

Regimul tranzitoriu de funcționare al sarcinilor conectate conduce la apariția fluctuațiilor de tensiune pe bara de c.c., la bornele condensatorului [MOR 95].

$$C = \frac{I_{FA}}{2 \cdot \Delta u_{cc} \cdot \omega} \quad (1.35)$$

1.5.3.2. Metoda variațiilor de tensiune

Determinarea capacității se realizează pornind de la variațiile tensiunii continue de la bornele condensatorului [ENJ 92]:

$$C = \frac{\Delta I_{FA}}{\Delta u_{cc} \cdot \omega} \quad (1.37)$$

1.5.3.3. Metoda puterii de compensare

Modificările curbei de sarcină conduc la un necesar de energie pentru compensare mai mare sau mai mic, ceea ce implică o capacitate mai mare sau mai mică [GUO 10]. Deoarece un număr mare de capacități de diferite valori nu este economic, se dimensionează o capacitate minimă, ce poate satisface nivelul energetic pentru compensare. Astfel:

$$C_{\min} = \frac{S_c T}{\lambda (1 + \lambda) U_{cc}^2} \quad (1.38)$$

$$\lambda = \frac{\Delta U_{cc\max}}{U_{cc}} \quad (1.39)$$

unde:

- S_c , capacitatea de compensare (puterea de compensare) a filtrului activ;
- T , perioada ciclului de comandă, pentru menținerea condensatorului încărcat;
- U_{cc} , valoarea tensiunii continue;
- λ , abaterea tensiunii continue;
- $\Delta U_{cc\max}$, valoarea maximum admisă pentru tensiunea continuă.

CAPITOLUL 2

MODELAREA ȘI SIMULAREA METODELOR DE COMANDĂ A FILTRELOR ACTIVE DE PUTERE CU 3 BRAȚE CONECTATE ÎN SISTEME ELECTRICE DISTRIBUITE PRIN 3 FIRE

După colectarea informațiilor cu privire la filtrele active de putere din literatura de specialitate s-a început analiza metodelor de comandă. Astfel, în condiții de lucru identice, în mediul de programare Matlab/Simulink - SimPowerSystems, s-a modelat și simulat un sistem electric la care este racordat în paralel un filtru activ de putere (FAP). Pentru această analiză s-a folosit un sistem electric trifazat distribuit pe 3 fire ce alimentează o sarcină perturbatoare. În acest sistem, în paralel cu sarcina se cuplează un FAP implementat pe structură cu 3 brațe, figura 2.1.

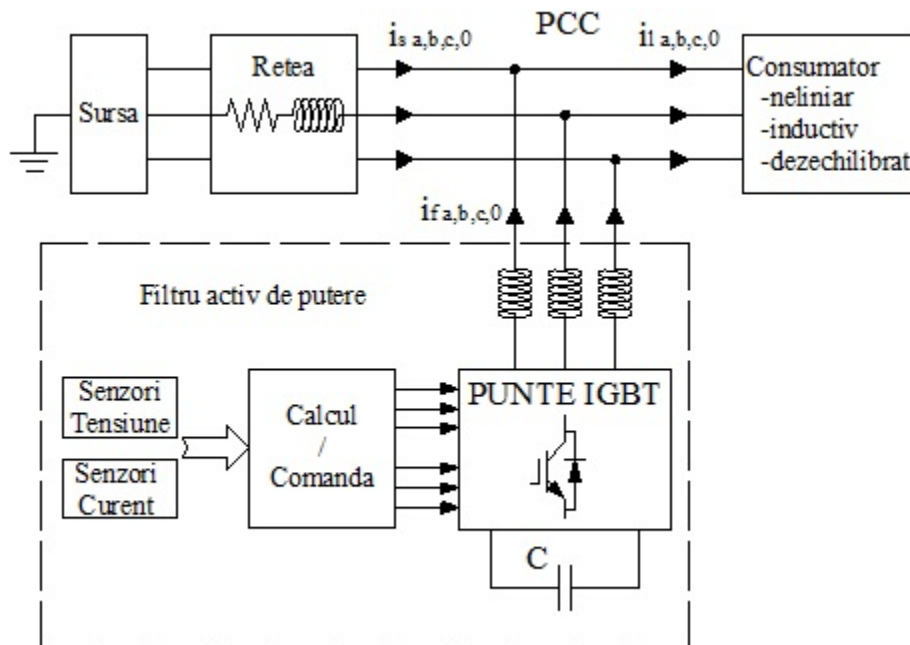


Figura 2. 1 Schema bloc a sistemului electric

2.1 SURSA DE ALIMENTARE ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ

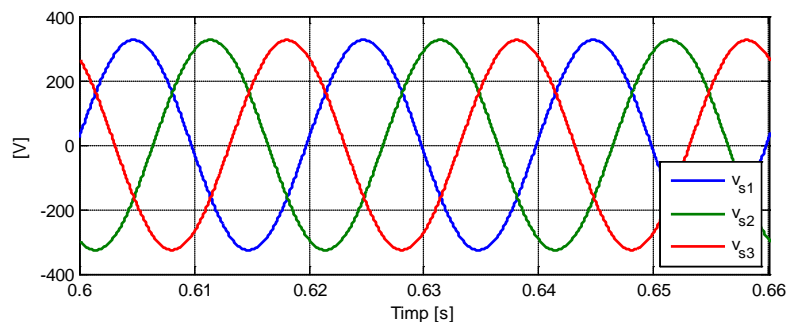


Figura 2. 2 Tensiunea de alimentare

Problemele de calitate a energiei electrice sunt cu atât mai mari cu cât puterea rețelei este mai mică. Pentru studiul prezentat în acest capitol s-a ales o rețea de putere redusă, putere limitată prin impedanța rețelei de alimentare.

2.2 SARCINILE ELECTRICE

S-au folosit două sarcini trifazate, conectate pe rând în sistemul electric. Acestea au fost alese pentru a putea analiza performanțele filtrului activ, cu privire la reducerea armonicilor injectate în sistem și la îmbunătățirea factorului de putere. Astfel, s-au creat:

- o sarcină neliniară, formată dintr-un redresor necomandat (punte de diode), ce alimentează o sarcină având $R = 30\Omega$, $L = 0.1mH$;
- o sarcină inductivă, echilibrată având $R = 13\Omega$, $L = 41.4mH$.

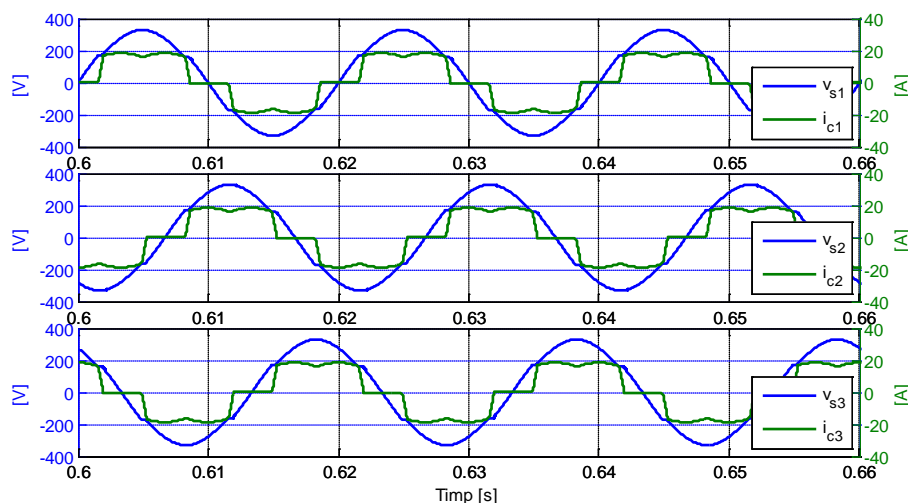


Figura 2. 4 Formele de undă ale tensiunii și curentului sarcinii neliniare

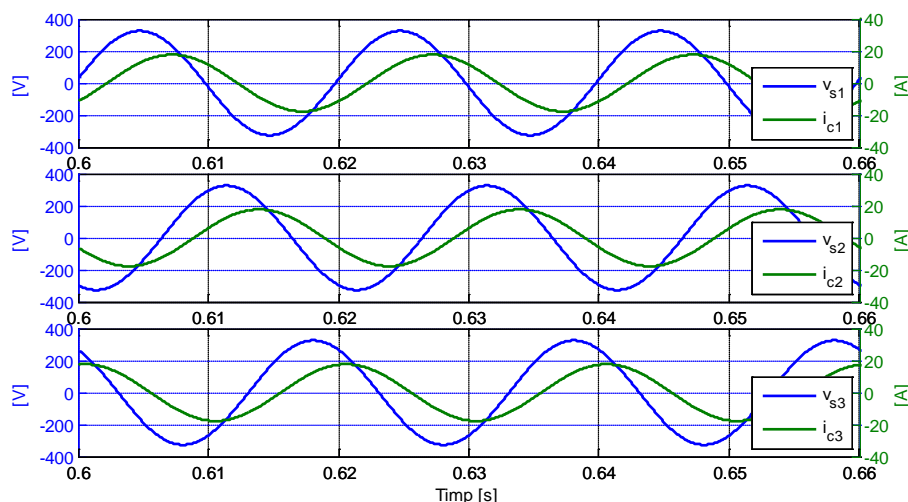


Figura 2. 6 Formele de undă ale tensiunii și curentului sarcinii inductive

În tabelul 2.1 sunt date valorile mărimilor electrice pentru sistemul creat. Nivelul THD_u și THD_i este extras din aplicația Matlab/Simulink, care oferă această informație prin descompunerea semnalelor cu ajutorul Transformatei Fourier. Valorile factorului de putere sunt calculate cu relația (2.5) aplicabilă numai pentru sistemele liniare:

$$PF = \frac{P_{\text{trifazat}}}{S_{\text{trifazat}}} \quad (2.5)$$

Tabelul 2. 1 Date de intrare

		Vs [V]	Ic [A]	Pc [kW]	Qc [kVAr]	PF	THD _u [%]	THD _i [%]
Studiul 1	Faza 1	230	14.4	3.192	0.084	-	3.39	27.88
	Faza 2	230	14.4	3.192	0.084	-	3.39	27.88
	Faza 3	230	14.4	3.192	0.084	-	3.39	27.88
Studiul 2	Faza 1	230	12.53	2.041	2.041	0.70	0	0
	Faza 2	230	12.53	2.041	2.041	0.70	0	0
	Faza 3	230	12.53	2.041	2.041	0.70	0	0

2.3 FILTRUL ACTIV DE PUTERE

Pentru îmbunătățirea indicatorilor de calitate ai energiei electrice s-a folosit un FAP dezvoltat pe o punte de IGBT-uri cu 3 brațe comandat prin 5 metode diferite. Analiza realizată a urmărit 3 indicatori de calitate:

- THD_u, factorul total de distorsiune armonică a tensiunii;
- THD_i (TDD), factorul total de distorsiune armonică a curentului;
- PF, factorul de putere.

Primul pas realizat, pentru o bună funcționare, a constat în dimensionarea elementelor FAP.

Alegerea tensiunii continue s-a realizat folosindu-se relația de calcul (1.24), unde:

- $E_m = 230V$, obținem $U_{cc} > 690V$, se alege $U_{cc} = 750V$.

Dimensionarea inductivității de filtrare s-a efectuat cu ajutorul relației de calcul (1.31) pentru cazul de față, astfel:

- $U_{cc} = 750V$, $\Delta i_{\max} = 2A$, $f_s = 25kHz$, obținem $L = 3mH$.

Dimensionarea capacității de stocare a energiei pentru bara de curent continuu s-a realizat cu ecuația (1.35) unde:

- $I_{FA} = 10A$, $\Delta v_{cc} = 7.5V$, rezultă o valoare a capacității de stocare de $C = 2000\mu F$, valoare standard.

Bucula de sincronizare cu tensiunea rețelei este construită pe baza descompunerii oricărui sistem nesimetric de tensiune într-o sumă de 3 sisteme simetrice: direct, invers și homopolar.

2.3.1 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee (p-q)

Principiul acestei metode are la bază transformarea sistemului de referință a-b-c în sistemul de referință α - β [HYO 02].

Puterile, activă și reactivă, sunt calculate astfel:

$$p(t) = v_{\alpha}(t) \cdot i_{\alpha}(t) + v_{\beta}(t) \cdot i_{\beta}(t) \quad (2.8)$$

$$q(t) = -v_{\alpha}(t) \cdot i_{\beta}(t) + v_{\beta}(t) \cdot i_{\alpha}(t) \quad (2.9)$$

Pentru FAP conectat paralel sunt necesari curenții de referință. Expresia curenților în funcție de puterile instantanee în planul α - β este dată de:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \left\{ \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \right\} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Curenții de referință exprimați în coordonate a-b-c, incluzând compensarea componentei de secvență 0, sunt:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

2.3.1.1 Sarcina neliniară

Modelarea filtrului activ de putere comandat prin metoda puterilor instantanee conectat în sistemul electric propus care alimentează o sarcină neliniară a condus la reducerea armonicilor până la obținerea unui $THD_{imed} = 2.71\%$ pe curent și $THD_{umed} = 1.54\%$ pe tensiune. Totodată, curentul recompus cu ajutorul filtrului activ este în fază cu tensiunea figura 2.16. Astfel, de la sursă se absoarbe numai putere activă.

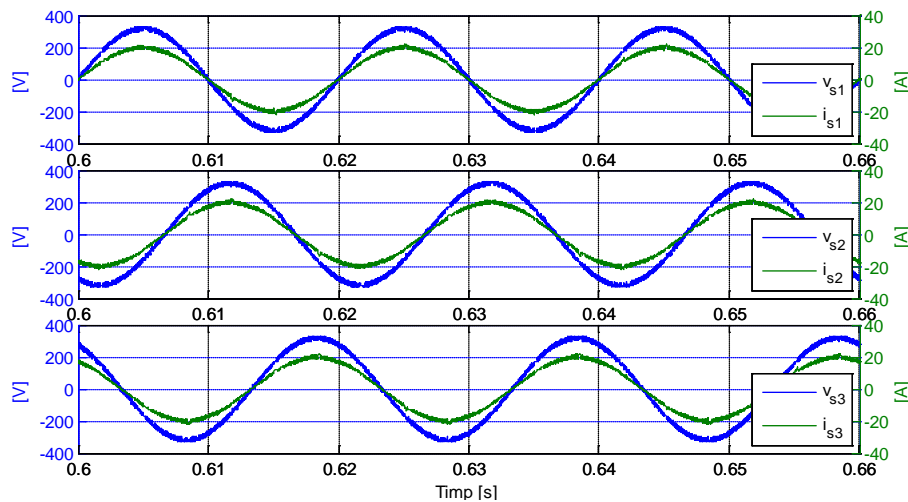


Figura 2. 16 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda p - q

2.3.1.2 Sarcina inductivă

În urma simulărilor realizate, s-a observat că unghiul de defazaj dintre tensiune și curent a fost diminuat, ceea ce a condus la obținerea unui factor de putere unitar, figura 2.20.

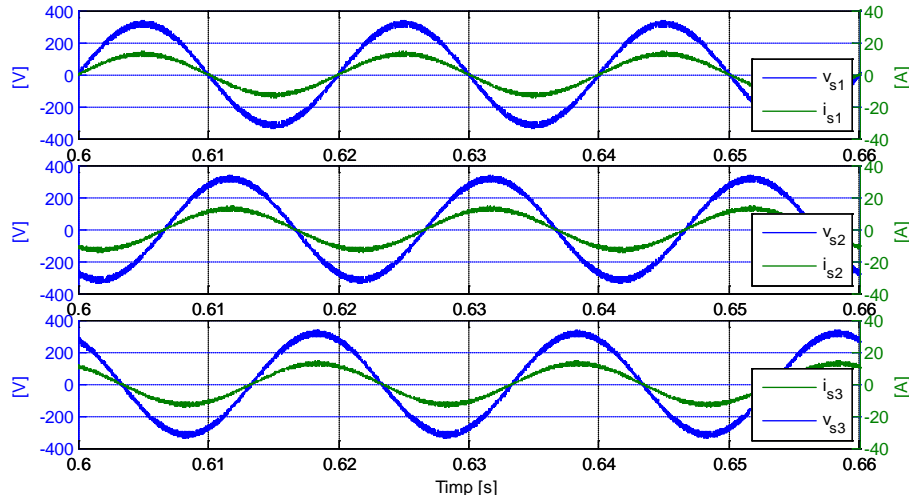


Figura 2. 20 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $p-q$

Tabelul 2. 3 Rezultate obținute prin metoda $p-q$

		V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	PF	THD_u [%]	THD_i [%]
Studiul 1	Faza 1	230	14.1	3.24	0.011	0.99	1.54	2.71
	Faza 2	230	14.1	3.24	0.011	0.99	1.54	2.71
	Faza 3	230	14.1	3.24	0.011	0.99	1.54	2.71
Studiul 2	Faza 1	231	9.02	2.08	0	1	1.82	3.22
	Faza 2	231	9.02	2.08	0	1	1.82	3.22
	Faza 3	231	9.02	2.08	0	1	1.82	3.22

2.3.2 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron (d-q)

Una dintre caracteristicile cele mai importante ale acestui algoritm este aceea de obținere a curenților de referință plecând direct de la curenții sarcinii neliniare, indiferent de tensiunea rețelei [HID 00], [DIR 01].

În acest caz, curenții reali sunt transformați în sistemul de referință sincron d-q. Această transformare este definită de:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Semnalele de referință exprimate în planul real a-b-c:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

2.3.2.1 Sarcina neliniară

Comparativ cu forma de undă a curentului absorbit înainte de conectarea filtrului activ figura 2.4, se observă o îmbunătățire majoră, o formă de undă a curentului absorbit aproape sinusoidală pentru o sarcină neliniară echilibrată cu $THD_{imed} = 1.80\%$, ceea ce face ca și tensiunea de alimentare să fie mai puțin perturbată, $THD_{umed} = 1.34\%$.

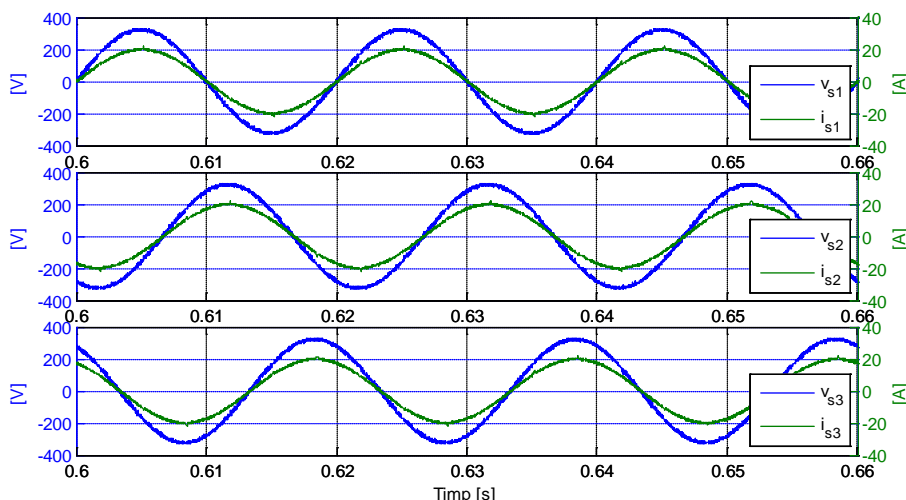


Figura 2. 25 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $d-q$

2.3.2.2 Sarcina inductivă

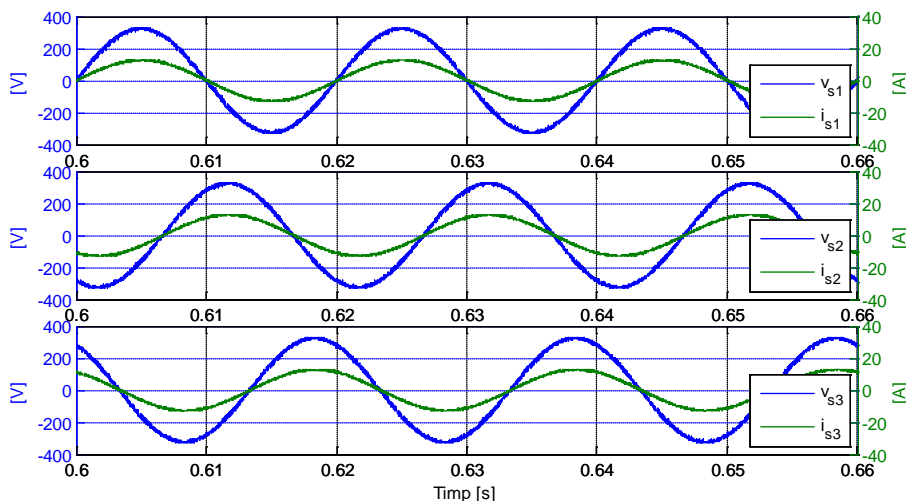


Figura 2. 30 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $d-q$

Tabelul 2. 5 Rezultate obținute prin metoda algoritmului sincron(dq)

		V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	PF	THD_u [%]	THD_i [%]
Studiul 1	Faza 1	230	14.1	3.24	0.056	0.99	1.34	1.80
	Faza 2	230	14.1	3.24	0.056	0.99	1.34	1.80
	Faza 3	230	14.1	3.24	0.056	0.99	1.34	1.80
Studiul 2	Faza 1	231	9.01	2.08	0.038	0.99	1.53	1.94
	Faza 2	231	9.01	2.08	0.038	0.99	1.53	1.94
	Faza 3	231	9.01	2.08	0.038	0.99	1.53	1.94

Având conectată în sistem o sarcină puternic inductivă care absoarbe un curent puternic defazat față de tensiunea de alimentare, $\cos \varphi = 0.70$, la cuplarea filtrului activ de la rețea se absoarbe numai putere activă, figura 2.30.

2.3.3 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul maximumului

Curentul deformat de sarcina poluantă este filtrat pentru a se extrage componenta fundamentală. Filtrul trece-bandă este acordat pe frecvență de 50 Hz, atenuarea semnalului de ieșire va fi egală cu 0 și defazajul va fi de 180° [MOR 95]. Astfel, ieșirea filtrului va fi egală cu fundamentala curentului sarcinii, dar în opoziție de fază. Dacă curentul sarcinii este însumat curentului de la ieșirea filtrului trece-bandă, se va obține forma de undă a curentului de referință, necesar doar pentru compensarea armonicilor de curent. Pentru a se asigura necesarul de putere reactivă, ieșirea filtrului trece-bandă trebuie să fie sincronizată cu tensiunea de fază corespunzătoare, astfel încât, curentul emis de filtrul activ să fie în fază cu tensiunea. Totodată, filtrul activ absoarbe putere activă necesară pentru acoperirea pierderilor datorate comutației și pentru a menține constantă tensiunea pe bara de curent continuu.

2.3.3.1 Sarcina neliniară

În condițiile unui sistem electric format prin conectarea unei sarcinii neliniare care filtrul activ de putere, conectat în paralel cu sarcina comandat prin metoda maximumului, reușește să reducă perturbațiile obținându-se o tensiune aproape sinusoidală, $THD_{umed} = 1.35\%$. Perturbațiile de curent au fost diminuate de la valoarea $THD_{imed} = 27.88\%$ la valoarea $THD_{imed} = 1.80\%$.

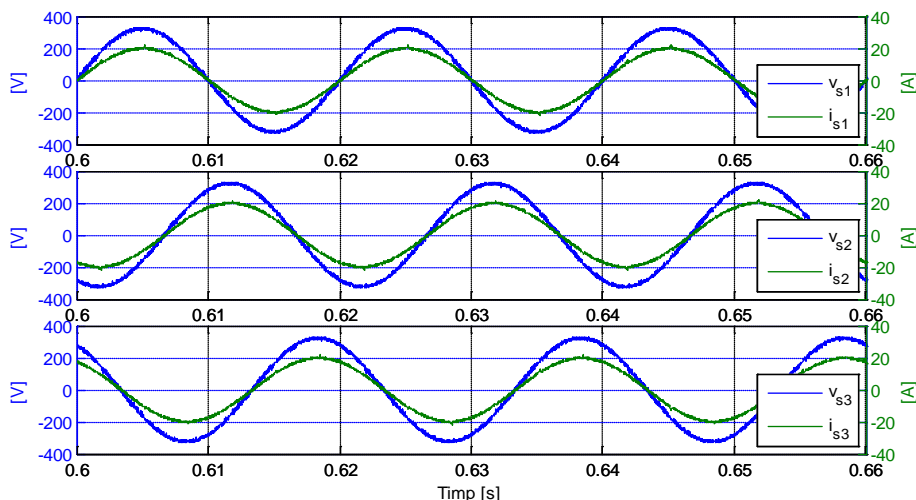


Figura 2. 36 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda maximumului

2.3.3.2 Sarcina inductivă

Din punct de vedere al factorului de putere putem afirma că, prin această metodă se reușește eliminarea consumului de energie reactivă din rețea, aspect ce poate fi observat și în figura 2.40.

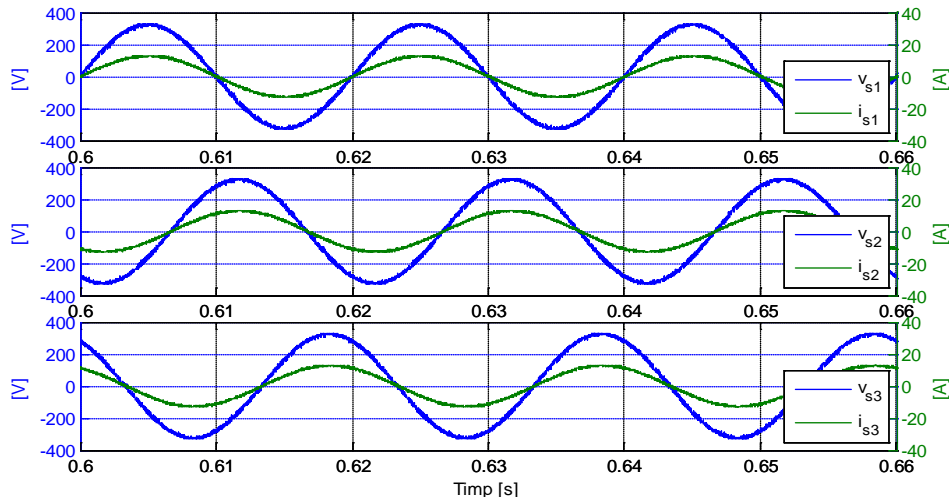


Figura 2. 40 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda maximumului

Tabelul 2. 7 Rezultate obținute prin metoda maximumului

		V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	PF	THD _u [%]	THD _i [%]
Studiul 1	Faza 1	230	14.1	3.24	0.057	0.99	1.35	1.80
	Faza 2	230	14.1	3.24	0.057	0.99	1.35	1.80
	Faza 3	230	14.1	3.24	0.057	0.99	1.35	1.80
Studiul 2	Faza 1	231	9.00	2.08	0.038	0.99	1.54	1.97
	Faza 2	231	9.00	2.08	0.038	0.99	1.54	1.97
	Faza 3	231	9.00	2.08	0.038	0.99	1.54	1.97

2.3.4 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul controlului indirect

Metoda indirectă este o strategie relativ nouă, care nu necesită cunoașterea detaliată a spectrului curentului trasat de sarcina electrică.

Algoritmul a fost propus în lucrarea [ROS 08] și constă în:

$$i_{sa}(t) = i_{La}(t) + i_{fa}(t) \quad (2.21)$$

Curentul electric absorbit de la rețea trebuie să fie sinusoidal și trebuie să aibă aceeași fază ca tensiunea. Componenta care trebuie compensată de filtrul activ este dată de:

$$\tilde{i}_{fa}(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) = \tilde{i}(t) \quad (2.24)$$

Se generează pentru intrarea de impunere a regulatorului de curent al fazei „a” a alimentării, semnalul:

$$i_a^*(t) = \varepsilon_{DC} \frac{v_a}{\sqrt{2}V} = \varepsilon_{DC} \sin \omega t \quad (2.26)$$

unde: V este valoarea efectivă a tensiunii de fază a alimentării, iar ε_{DC} ieșirea regulatorului tensiunii de pe capacitatea C a convertorului.

Impunerea ε_{DC} de la regulatorul RV_{DC} pentru încărcarea condensatorului „C” este transformată în referință pentru curent, astfel:

$$\begin{cases} i_{F1}^* = \varepsilon \sin \omega t \\ i_{F2}^* = \varepsilon \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ i_{F3}^* = \varepsilon \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (2.31)$$

2.3.4.1 Sarcina neliniară

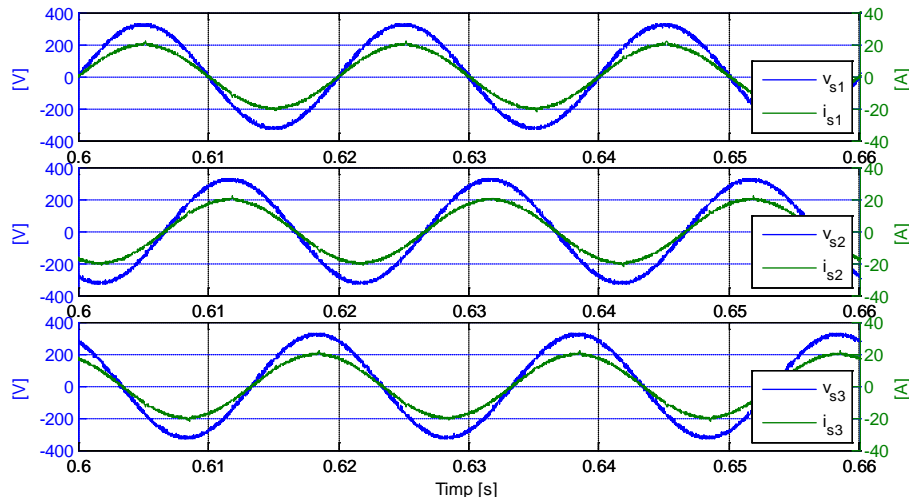


Figura 2. 47 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda indirectă

Filtrul activ de putere comandat prin metoda indirectă, conectat în paralel cu sarcina perturbatoare, conduce la absorbirea de la rețea a unui curent în fază cu tensiunea, figura 2.47.

2.3.4.2 Sarcina inductivă

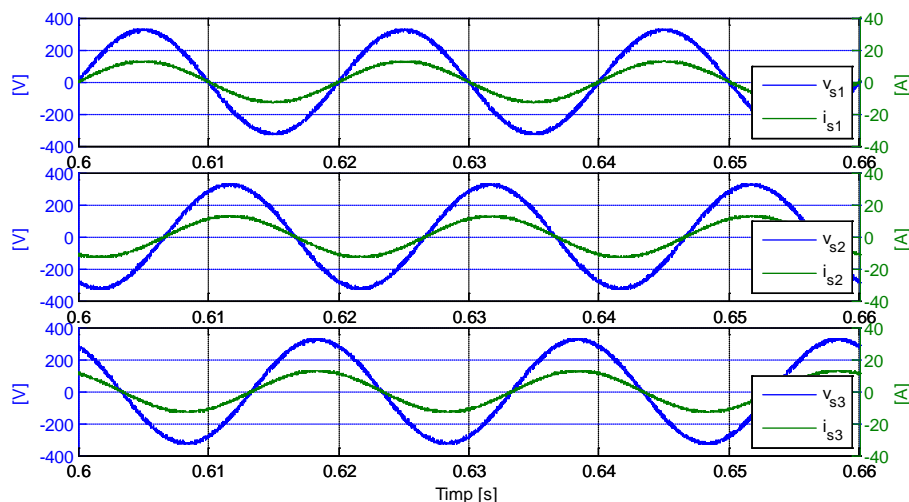


Figura 2. 51 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda indirectă

În ceea ce privește factorul de putere, această strategie de comandă este excelentă, deoarece reduce unghiul de defazaj dintre tensiune și curent și, astfel, îmbunătățește factorul de putere până la valoarea sa maximă ($\cos \varphi = 1$). Defazajul dintre tensiune și curent poate fi observat în figura 2.51. Practic, înainte de conectarea filtrului activ măsurătorile realizate în zona rețelei au arătat un factor de putere de $\cos \varphi = 0.70$, după conectarea filtrului, factorul de putere a fost îmbunătățit până aproape de valoare sa maximă, $\cos \varphi = 0.99$.

Tabelul 2. 9 Rezultate obținute prin metoda indirectă

		V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	PF	THD _u [%]	THD _i [%]
Studiul 1	Faza 1	230	14.09	3.238	0.013	0.99	1.41	1.70
	Faza 2	230	14.09	3.238	0.013	0.99	1.41	1.70
	Faza 3	230	14.09	3.238	0.013	0.99	1.41	1.70
Studiul 2	Faza 1	231	9.00	2.08	0.009	0.99	1.45	1.81
	Faza 2	231	9.00	2.08	0.009	0.99	1.45	1.81
	Faza 3	231	9.00	2.08	0.009	0.99	1.45	1.81

2.3.5 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul sincronizării curentului cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii

Aceasta este o tehnică recentă, propusă în 2003 de către W.G.Chang & T.-C. Shee [CHA 04]. Se bazează pe nevoia de a avea un curent echilibrat debitat de sursă, nedistorsionat și în fază cu secvența pozitivă a tensiunii sursei de alimentare [SAL 10]. În continuare această metodă va fi denumită “metoda secvenței pozitive”.

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} - I_{sm} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_f^+) \\ \sin(\omega t + \phi_f^+ - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + \phi_f^+ + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2. 32)$$

unde:

- I_{sm} , valoarea maximă a curentului de la sursă;
- ϕ_f^+ , argumentul secvenței pozitive obținută plecând de la transformata Fortescue, [IOR 08], a componentei fundamentale a tensiunii sursei de alimentare.

Cu:

$$P_c = P_s = \frac{3}{2} \cdot V_{mf}^+ \cdot I_{sm} \quad (2. 48)$$

Rezultă:

$$I_{sm} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_c}{V_{mf}^+} \quad (2. 49)$$

2.3.5.1 Sarcina neliniară

Se reușește reducerea nivelului armonic la $THD_{umed} = 1.30\%$ pentru tensiune și de la $THD_{imed} = 1.67\%$ pentru curent.

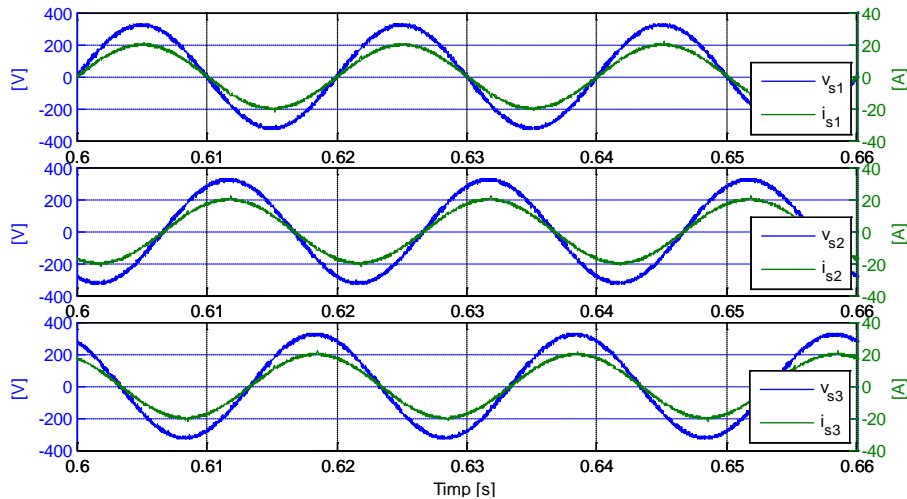


Figura 2. 57 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda secvenței pozitive

2.3.5.2 Sarcina inductivă

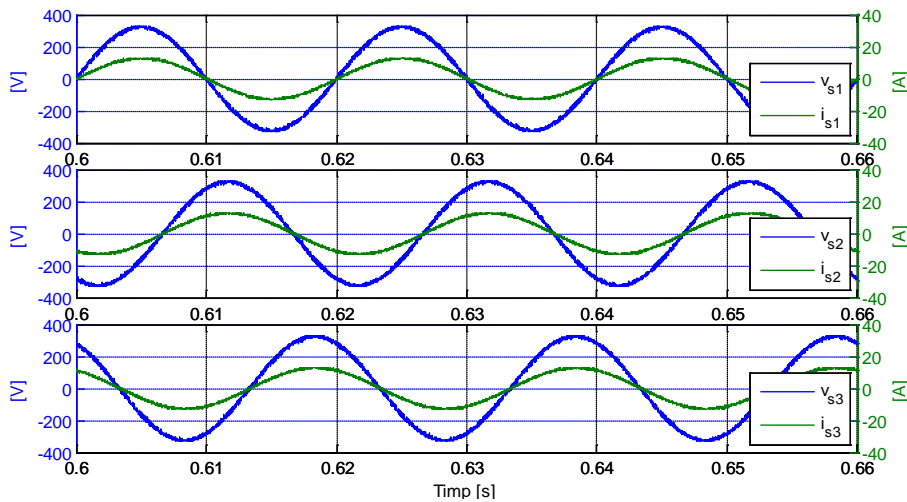


Figura 2. 61 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda secvenței pozitive

În figura 2.61 sunt prezentate evoluțiile tensiunii rețelei și a curentului absorbit din rețea, observându-se o bună compensare a unghiului de defazaj dintre tensiune și curent.

Tabelul 2. 11 Rezultate obținute prin metoda secvenței pozitive

		V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	PF	THD _u [%]	THD _i [%]
Studiul 1	Faza 1	230	14.1	3.24	0.055	0.99	1.30	1.67
	Faza 2	230	14.1	3.24	0.055	0.99	1.30	1.67
	Faza 3	230	14.1	3.24	0.055	0.99	1.30	1.67
Studiul 2	Faza 1	231	9.01	2.08	0.039	0.99	1.66	2.12
	Faza 2	231	9.01	2.08	0.039	0.99	1.66	2.12
	Faza 3	231	9.01	2.08	0.039	0.99	1.66	2.12

2.5 ANALIZA COMPARATIVĂ A METODELOR DE COMANDĂ

Pentru această analiză s-au considerat următoarele criterii:

- volum de calcul;
- număr dispozitive de măsură;
- rezultate obținute.

Tabelul 2. 13 Rezultate criterii de comparație

Metodă de comandă	Volum de calcul	Număr dispozitive de măsură	Rezultate obținute		
			THD _u	THD _i	PF
p-q	Mare	9	F bine	Bine	F bine
d-q	Mare	9	F bine	F bine	F bine
Maximum	Mediu	9	F bine	F bine	F bine
Control indirect	Mic	6	F bine	F bine	F bine
Secvență pozitivă	Mare	9	F bine	F bine	F bine

Primele două criterii sunt considerate a fi definatorii pentru analiza de cost a implementării unui filtru activ de putere comandat prin respectiva metodă de comandă. Astfel, necesitatea unui volum mare de calcul implică nevoia utilizării unui procesor mai „puternic”, puterea de calcul fiind direct proporțională cu valoarea financiară a echipamentului. Volumul de calcul este definit prin numărul de operații matematice necesar fiecărei metode de comandă. De asemenea, utilizarea unui număr mai mare de senzori de măsură implică creșterea costului de implementare.

Analizând rezultatele obținute în urma aplicării criteriilor de comparație, se poate afirma că, metoda cea mai bună, din punctul de vedere al costului de implementare raportat la rezultatele obținute, este metoda controlului indirect.

CAPITOLUL 3

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA METODELOR DE COMANDĂ A FILTRELOR ACTIVE DE PUTERE CU 4 BRAȚE CONECTATE ÎN SISTEME ELECTRICE DISTRIBUITE PRIN 4 FIRE

În acest capitol s-a făcut o analiză cu privire la calitatea energiei electrice în cadrul unui sistem electric trifazat distribuit prin 4 fire (3F+N). În figura 3.1 se prezintă schema bloc a sistemului electric folosit pentru prezentul studiu.

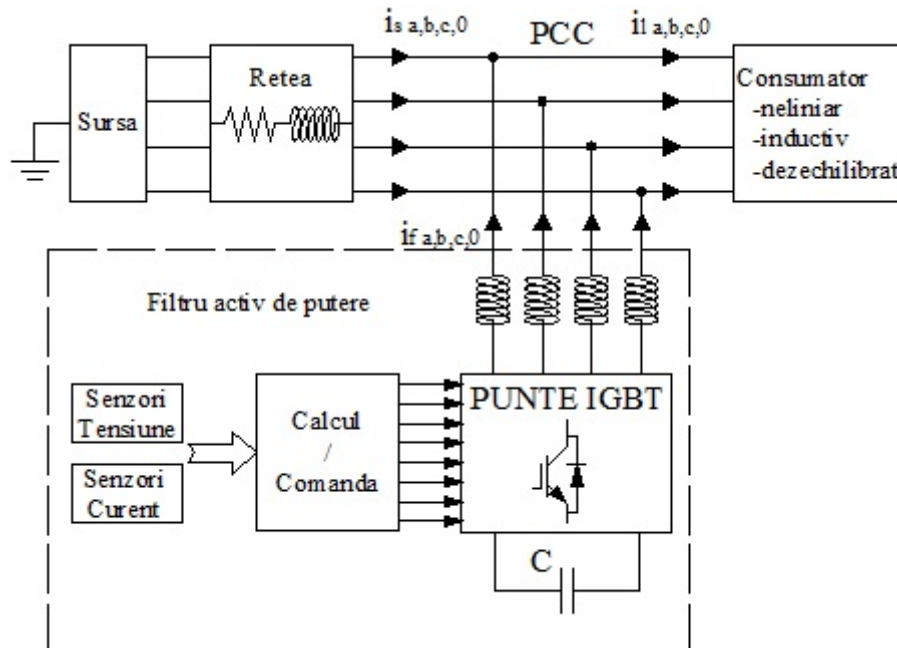


Figura 3. 1 Schema bloc a sistemului electric utilizat

Analizând stadiul actual al cercetărilor filtrelor active de putere implementate pe structura cu 4 brațe, s-a constatat că principalele metode de comandă folosite sunt p-q și, respectiv, d-q. Dar, după cum s-a putut observa în Capitolul 2, unde s-au studiat filtrele active cu 3 brațe, sunt și alte metode de comandă capabile de obținerea unor rezultate la fel de bune sau chiar mai bune în aceleași condiții de lucru. Astfel, pentru a putea comanda un filtru activ cu 4 brațe, în această teză s-au dezvoltat două noi metode de comandă. Detaliind, trebuie precizat că cele două metode inovate nu sunt dezvoltate de la zero, ci se pleacă de la cele existente pe 3 brațe. În consecință, comanda unui FAP cu 3 brațe prin metodele controlului indirect și cea a secvenței pozitive se dezvoltă pentru comanda filtrului activ cu 4 brațe.

Scopul acestui capitol este de a prezenta noile metode propuse pentru comanda unui FAP cu 4 brațe și de a evidenția performanțele filtrelor active de putere comandate prin metodele propuse. Acest lucru s-a realizat prin compararea rezultatelor obținute în urma simulărilor cu cele obținute prin utilizarea metodelor clasice p-q și, respectiv, d-q. Analiza sistemelor electrice distribuite prin 4 fire la care sunt conectate filtre active cu 4 brațe s-a făcut prin modelare și simulare în mediul de programare Matlab/Simulink – SimPowerSystems.

3.1 SURSA DE ALIMENTARE ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ

Pentru exemplul implementat s-a ales o sursă de tensiune trifazată, având valoarea efectivă de linie de 400V. Deoarece problemele majore privind calitatea energiei electrice sunt întâlnite în rețelele electrice de putere redusă, pentru studiul expus în acest capitol s-a limitat puterea rețelei folosindu-se o impedanță a rețelei de 2Ω :

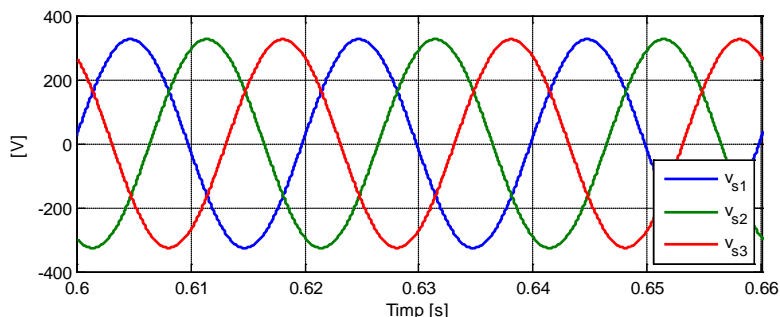


Figura 3. 2 Tensiunea de alimentare

3.2 SARCINILE ELECTRICE

În mediul de programare Matlab s-au modelat, folosindu-se blocurile din modulul SimPowerSystems, sarcinile:

- redresor necomandat (punte de diode), ce alimentează o sarcină, având $R = 30\Omega$, $L = 0.1mH$,
- sarcina RL dezechilibrată având: Faza 1 $R = 16\Omega$, $L = 50.9mH$, Faza 2 $R = 12\Omega$, $L = 38.2mH$, Faza 3 $R = 9\Omega$, $L = 28.6mH$
- rețea de calculatoare având: Faza 1 $R = 7\Omega$, Faza 2 $R = 16\Omega$, Faza 3 $R = 12\Omega$ și, în paralel cu acestea, conectate surse de curent pentru a injecta în sistem armonici asemenea echipamentelor reale.

Tabelul 3. 2 Date de intrare

		V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	THD_u [%]	THD_i [%]	V_{unb} [%]
Studiul 1	Faza 1	239.6	23	5.15	1.71	3.22	16.73	3.45
	Faza 2	235.3	26.12	5.51	2.53	3.29	14.98	
	Faza 3	215.4	28.79	5.55	2.66	3.60	13.50	
Studiul 2	Faza 1	219	34.01	5.67	0	45.62	65.61	10.2
	Faza 2	267	20.49	4.08	0	30.65	80.56	
	Faza 3	253	25.02	4.75	0	34.76	76.26	

3.3 FILTRUL ACTIV DE PUTERE

3.3.1 Dimensionarea elementelor filtrului activ

Pe baza relațiilor prezentate în Capitolul 1 au fost dimensionate elementele pasive ale filtrului activ:

- alegerea tensiunii continue se face folosindu-se ecuația (1.24), unde $E_m = 230V$, obținem $V_{cc} > 690V$, se alege $V_{cc} = 750V$. Menținerea tensiunii pe bara de curent continuu s-a făcut folosindu-se un regulator de tip PI acordat prin metoda Ziegler Nichols;
- dimensionarea inductivității de filtrare s-a făcut folosindu-se relația de calcul (1.31), astfel, pentru cazul de față unde: $V_{cc} = 750V$, $\Delta i_{max} = 5A$, $f_s = 25kHz$, obținem $L = 1mH$;
- dimensionarea capacității de stocare a energiei pentru bara de curent continuu s-a făcut folosindu-se relația de calcul (1.35) unde: $I_{FA} = 30A$, $\Delta v_{cc} = 15V$, rezultă o valoare a capacității de stocare de $C = 3800\mu F$, valoare standard.

Elementele pasive având valorile calculate conform detaliilor de mai sus au fost folosite pentru toate metodele de comandă. Astfel, principalii parametri folosiți la modelarea filtrelor active sunt prezentați în tabelul 3.3.

Tabelul 3. 3 Parametri utilizați

L_f [mH]	C [mF]	PI		Banda de histeresis	$U_{c.c. \text{ impus}}$ [V]
		K_p	K_i		
1	3.8	1	20	1	750

3.3.2 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee (p-q-0)

Principiul acestei metode are la bază transformarea sistemului de referință a-b-c în sistemul de referință α - β -0.

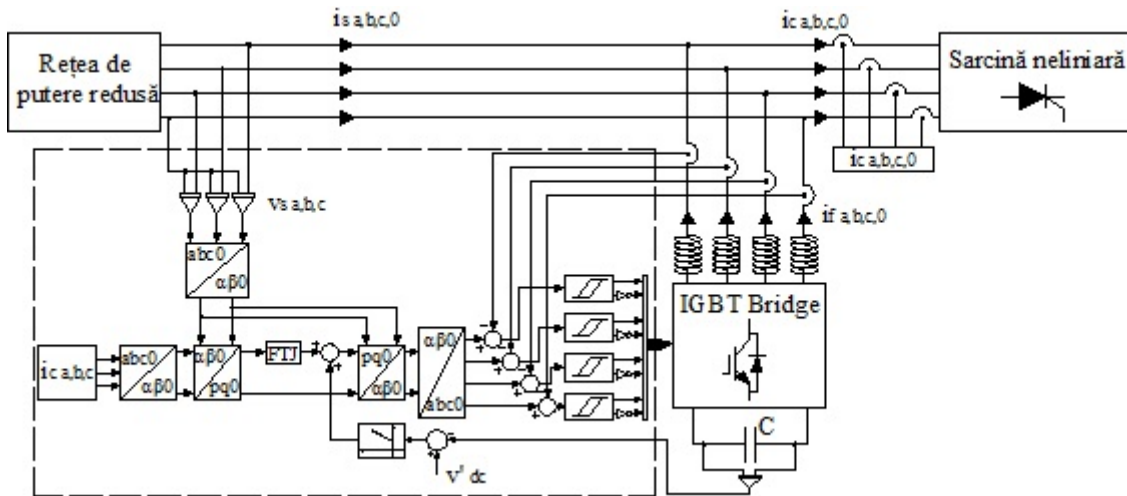


Figura 3. 11 Schema de comandă – metoda puterii instantanee (p-q-0)

Curenții de referință exprimați în coordonate a-b-c sunt:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_0 \\ i_a^* \\ i_b^* \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$i_0^* = i_a^* + i_b^* + i_c^* \quad (3.10)$$

Schema de comandă a FAP bazată pe metoda puterii instantanee (p-q-0) este prezentată în figura 3.11.

3.3.3 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron (d-q-0)

Semnalele de referință exprimate în planul real a-b-c:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ 0 & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

$$i_0^* = i_a^* + i_b^* + i_c^* \quad (3.16)$$

În figura 3.12 este prezentată schema bloc a sistemului considerat a fi baza construcției modelului de simulare, ce conține un filtru activ de putere comandat prin metoda algoritmului sincron (d-q-0).

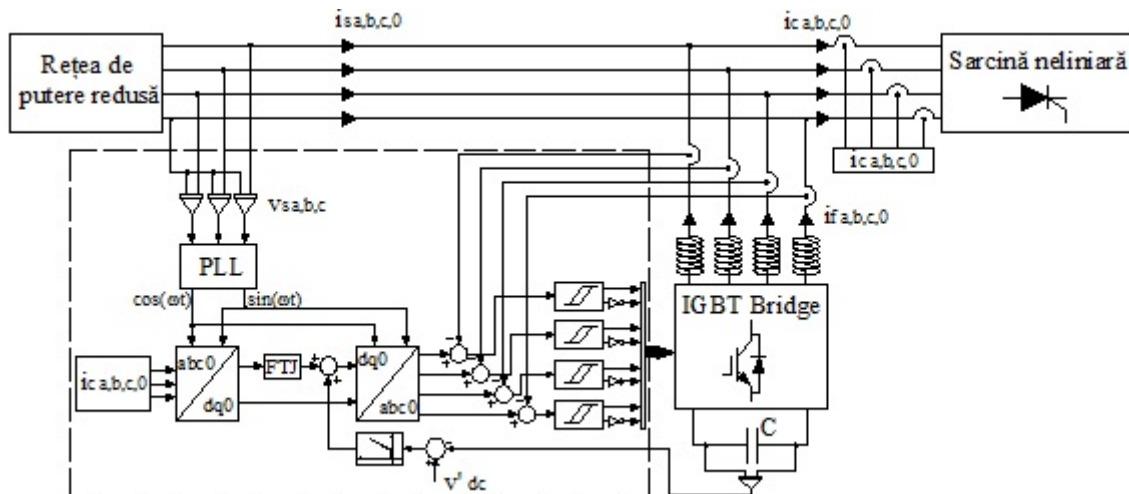


Figura 3.12 Schema de comandă - algoritm sincron (d-q-0)

3.3.4 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul controlului indirect

Metoda controlului indirect este o strategie relativ nouă propusă pentru prima dată în lucrarea [ROS 08], fiind un rezultat al muncii de cercetare desfășurate la Galați, în cadrul Facultății de Inginerie Electrică. Din momentul respectiv această metodă de comandă a fost dezvoltată avansându-se până la a fi utilizată pe un filtru activ cu 3 brațe, conectat în sisteme electrice cu 4 fire, folosindu-se o structură cu 2 capacități [GUR 11]. Structură care în exploatare nu oferă o stabilitate ridicată datorită încărcărilor diferite pe cele două capacități. Astfel, cercetările pe filtrele active de putere au continuat și autorul prezentei teze propune în [BAL 10] o extindere a comenzii indirecte, pentru ca aceasta să poată fi folosită în comanda filtrelor active cu 4 brațe. Filtre care oferă o mai mare stabilitate în funcționare, eliminând stresul ce poate apărea pe cele 2 capacități din zona de c.c.

Algoritmul propus constă în eliminarea curentului circulat prin conductorul de nul între sursă și punctul comun de conectare. Astfel, plasarea filtrului activ de putere între sursă și

sarcină determină eliminarea curentului între sursă și filtru, curentul de nul circulând doar între filtru și sarcină.

Curentul absorbit de o sarcina neliniară și inductivă poate fi descompus ca o sumă de curenți:

$$i_L(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (3.17)$$

unde:

- $i_L^1(t)$, este componenta activă a fundamentalei;
- $\sum_k i_{Lk}(t)$, este suma armonicilor superioare;
- $i_{Lq}(t)$, este componenta reactivă a fundamentalei.

La nivelul sursei de alimentare, curentul este definit prin relația:

$$i_s(t) = i_s^1(t) + \sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) \quad (3.18)$$

unde:

- $i_s^1(t)$, este componenta activă a fundamentalei;
- $\sum_k i_{sk}(t)$, este suma armonicilor superioare;
- $i_{sq}(t)$, este componenta reactivă a fundamentalei.

Cu:

$$i_s^1(t) + \sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (3.19)$$

Conectarea FAP și aplicarea Th. 1 Kirchhoff în PCC, figura 3.1, conduce la:

$$i_s(t) + i_f(t) = i_L(t) \quad (3.20)$$

Curentul electric prin FAP va fi:

$$i_f(t) = i_f^1(t) + \sum_k i_{fk}(t) \quad (3.21)$$

unde:

- $i_f^1(t)$, este componenta fundamentalei;
- $\sum_k i_{fk}(t)$, reprezintă suma armonicilor superioare.

$$i_s^1(t) + \sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) + i_f^1(t) + \sum_k i_{fk}(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (3.22)$$

Cu impunerea $\sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) \approx 0$, relația de calcul (3.22) devine:

$$i_s^1(t) + i_f^1(t) + \sum_k i_{fk}(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (3.23)$$

Pentru analiza fenomenelor ce se petrec la nivelul FAP, componenta fundamentală este descompusă într-o sumă de 3 componente:

$$i_f^1(t) = i_{fec}^1(t) + i_{fq}^1(t) - i_{fp}^1(t) \quad (3.24)$$

- $i_{fec}^1(t)$, componenta ce asigură echilibrarea curenților pe cele 3 faze. Componenta pozitivă sau negativă, în funcție de încărcarea fazei față de valoarea medie;
- $i_{fq}^1(t)$, componenta ce asigură compensarea energiei reactive;
- $i_{fp}^1(t)$, componenta ce înglobează pierderile pe componentele FAP. Componenta considerată a fi negativă indiferent de natura sarcinii.

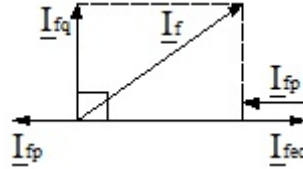


Figura 3. 13 Componenta fundamentală a curentului prin FAP

Pentru eliminarea perturbațiilor introduse în sistem de către sarcina neliniară și pentru a echilibra curenții pe cele 3 faze, se generează pe intrarea regulatorului de curent semnalul:

$$i^*(t) = \varepsilon_{cc} \frac{v}{\sqrt{2V}} = \varepsilon_{cc} \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.25)$$

unde,

- v , tensiunea de fază;
- V , valoarea efectivă a tensiunii de alimentare;
- ε_{cc} , ieșirea regulatorului de tensiune continuă a convertorului.

Impunerea de mai sus se compară cu valoarea măsurată a curentului electric absorbit de la rețea, i_s , rezultând pentru comanda filtrului pe faza a:

$$u_c^* = k(i^* - i_s) = k \left(i^* - i_L^1(t) - \sum_k i_{Lk}(t) - i_{Lq}(t) + i_f^1(t) + \sum_k i_{fk}(t) \right) \quad (3.26)$$

$$u_c^* = k \left(i^* - i_L^1(t) - \sum_k i_{Lk}(t) - i_{Lq}(t) + i_{fec}^1(t) + i_{fq}^1(t) - i_{fp}^1(t) + \sum_k i_{fk}(t) \right) \quad (3.27)$$

unde, k este amplificarea regulatorului.

Având în vedere că regulatorul este liniar, componentele sinusoidale ale sarcinii și filtrului se regăsesc în impunerea sinusoidală pentru acesta:

$$i^* = i_L^1 - i_{fec}^1(t) + i_{fp}^1(t) \quad (3.28)$$

Astfel, impunerea pe fază a filtrului activ va deveni proporțională cu componenta poluantă:

$$u_c^* = k \left(-\sum_k i_{Lk}(t) - i_{Lq}(t) + \sum_k i_{fk}(t) + i_{fq}^1(t) \right) \quad (3.29)$$

În regim staționar regulatorul anulează eroarea staționară:

$$\sum_k i_{fk}(t) + i_{fq}^1(t) = \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) \quad (3.30)$$

Așadar, FAP asigură compensarea nivelului poluant introdus de sarcină și echilibrarea curenților absorbiți de la sursă.

Impunerea ε_{cc} de la regulatorul RV_{cc} pentru încărcarea condensatorului „C” este transformată în referință de curent:

$$\begin{cases} i_a^* = \varepsilon_{cc} \cdot \sin \omega t \\ i_b^* = \varepsilon_{cc} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c^* = \varepsilon_{cc} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_0^* = 0 \end{cases} \quad (3.31)$$

Prin impunerea $i_0^* = 0$, rezultă:

$$u_{c0}^* = k \left(-i_{L0}^1(t) - \sum_k i_{L0k}(t) - i_{L0q}(t) + i_{f0}^1(t) + \sum_k i_{f0k}(t) \right) \quad (3.32)$$

unde, în regim staționar avem:

$$i_{f0}(t) = i_{L0}(t) \quad (3.33)$$

Astfel, circulația curentului de nul al sarcinii dezechilibrate se va face prin FAP.

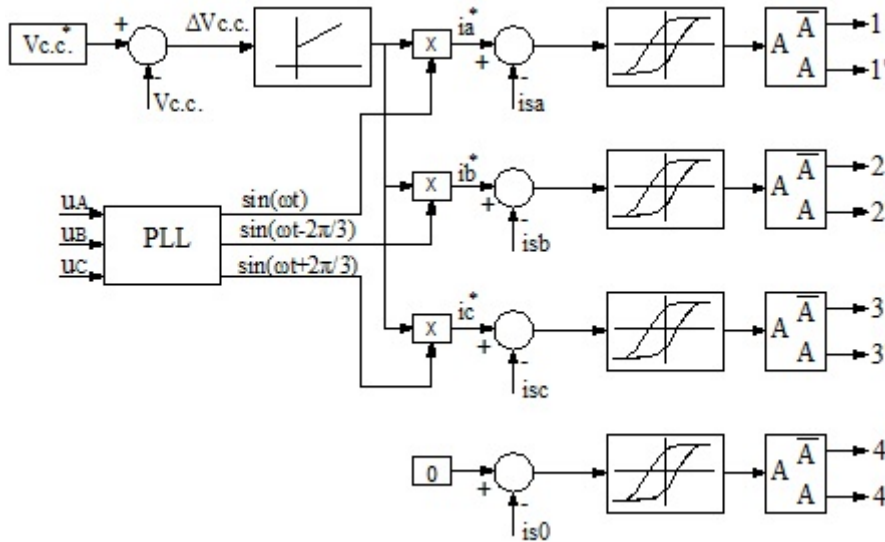


Figura 3.14 Strategia de comandă Control Indirect

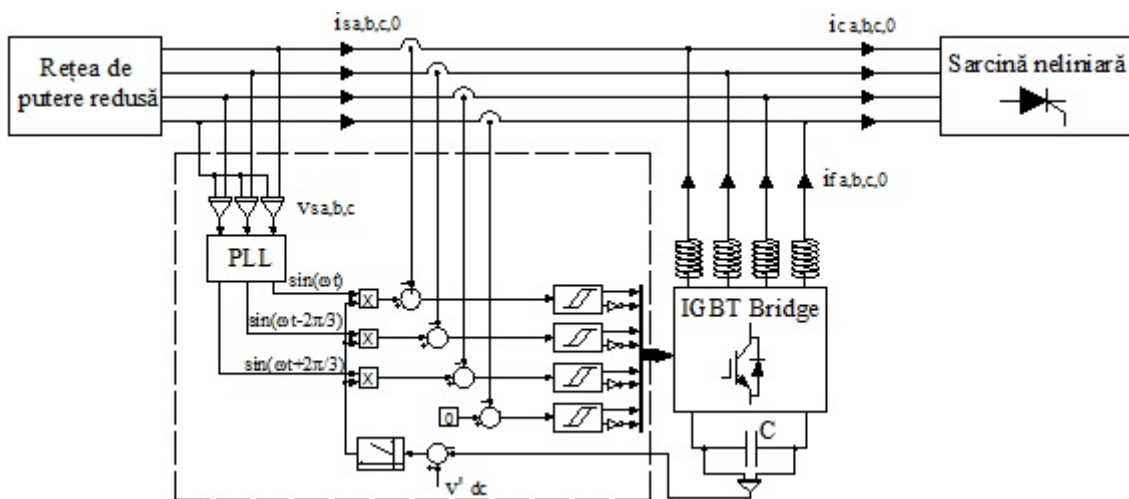


Figura 3.15 Schema de comandă – metoda indirectă

Modelul matematic este similar cu cel utilizat pentru comanda filtrelor active cu 3 brațe. Suplimentar, pentru brațul 4 se impune un curent egal cu 0. Această valoare a rezultat din

aceeași gândire de a controla indirect reducerea perturbațiilor produse de sarcina, prin impunerea curenților absorbiți de la sursă. Astfel, un curent echilibrat va fi circulat doar în momentul în care curentul prin conductorul de nul va deveni 0.

Filtrul activ comandat prin metoda indirectă va injecta în sistem un curent de forma celui circulat prin conductorul de nul, dar cu semn schimbat. Curentul prin conductorul de nul al sursei va fi 0, ceea ce conduce la o echilibrare a consumului de curent pe cele trei faze și la reducerea nesimetriei de tensiune.

Având la bază noul concept exprimat prin modelul matematic prezentat mai sus, s-a construit în Matlab/Simulink modelul de simulare din figura 3.15.

3.3.5 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul sincronizării curentului circulat cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii

În Capitolul 2 este prezentat modelul matematic ce stă la baza metodei de comandă secvență pozitivă, model ce asigură comanda unui filtru activ cu 3 brațe. Metoda de comandă ce are la bază componenta pozitivă nu a fost implementată până în prezent pentru comanda filtrelor active cu 4 brațe. Astfel, pentru brațul 4, cel la care este conectat firul de neutru, referința de curent se calculează însumând curenții de referință pentru cele 3 faze.

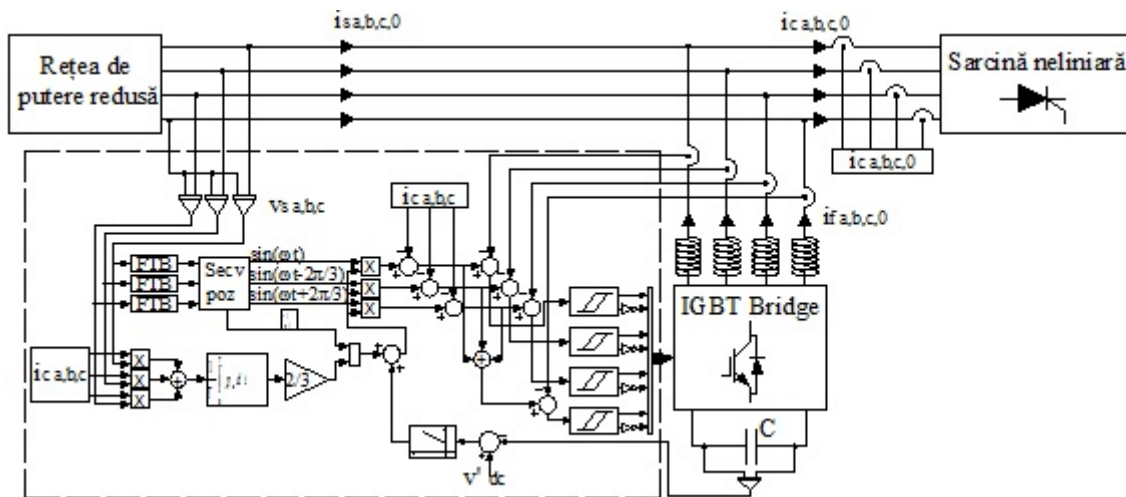


Figura 3. 16 Schema de comandă – metoda secvență pozitivă

Curenții trifazați ce se doresc a fi absorbiți de la sursă trebuie să fie în fază cu secvența pozitivă a tensiunii fundamentale a sursei. Aceștia din urmă vor fi dați de:

$$\begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} - I_{sm} \cdot \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi_f^+) \\ \sin(\omega t + \phi_f^+ - 2\pi/3) \\ \sin(\omega t + \phi_f^+ + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

$$i_0^* = i_a^* + i_b^* + i_c^* \quad (3.35)$$

unde:

- I_{sm} , valoarea maximă a curentului de la sursă;
- ϕ_f^+ , argumentul secvenței pozitive obținută plecând de la transformata Fortescue, [IOR 08], a componentei fundamentale a tensiunii sursei de alimentare.

$$I_{sm} = \frac{2}{3} \cdot \frac{P_c}{V_{mf}^+} \quad (3.36)$$

cu:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T p_{sf}^+(t) dt \quad (3.37)$$

se va obține:

$$P_c = P_s = \frac{3}{2} \cdot V_{mf}^+ \cdot I_{sm} \quad (3.38)$$

Schema de comandă a unui filtru activ cu patru brațe comandat prin metoda secvenței pozitive este prezentată în figura 3.16.

3.4 REZULTATE OBȚINUTE

3.4.1 Studiul 1 – punte redresoare necomandată și sarcina RL

Pentru acest studiu, în sistemul electric s-au conectat puntea trifazată necomandată și sarcina de tip RL. Formele de undă ale tensiunii de alimentare și ale curentului absorbit sunt prezentate în figura 3.17.

Se observă că, forma tensiunii de alimentare nu este sinusoidală. Mai precis, pentru acest caz, în care avem o rețea slabă, sarcina neliniară ce absoarbe un curent cu un $THD_i = 16.73\%$ produce o poluare armonică pe tensiune cuantificată prin nivelul armonic total la valoarea $THD_u = 3.22\%$. Totodată, datorită dezechilibrului de curent, apare și o nesimetrie a tensiunii cuantificată prin factorul de nesimetrie la valoarea $U_{unb} = 3.45\%$.

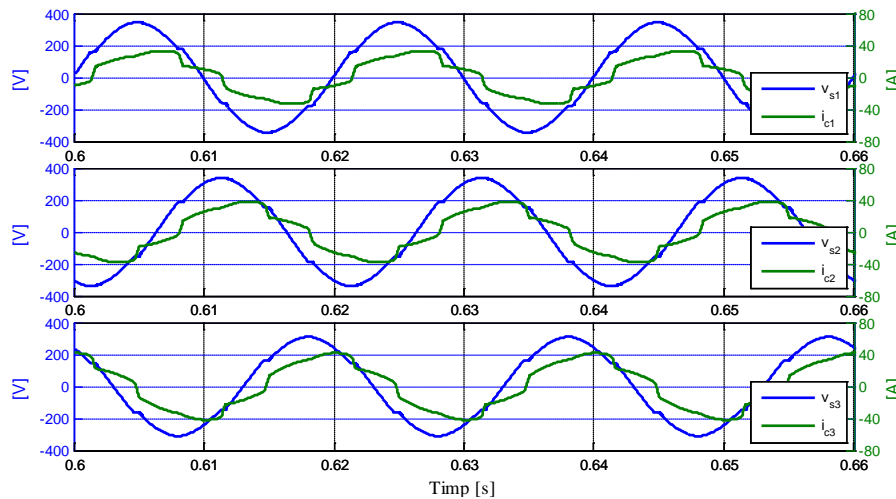


Figura 3.17 Formele de undă ale tensiunii și curentului

3.4.1.1 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee

Conectarea FAP în sistem a contribuit la:

- îmbunătățirea formei de undă a tensiunii de alimentare nivelul armonic fiind redus la valoarea $THD_u = 2.66\%$;
- ameliorarea formei de undă a curentului măsurat la nivelul sursei de alimentare $THD_i = 4.28\%$;
- reducerea curentului circulat prin conductorul de neutru;

- diminuarea energiei reactive absorbite din sistem, tensiunea și curentul măsurate la nivelul sursei de alimentare fiind în fază, $\cos \varphi = 1$, figura 3.22;
- reducerea nesimetriei pe tensiune de la valoarea $V_{unb} = 3.45\%$ la valoarea $V_{unb} = 2.05\%$.

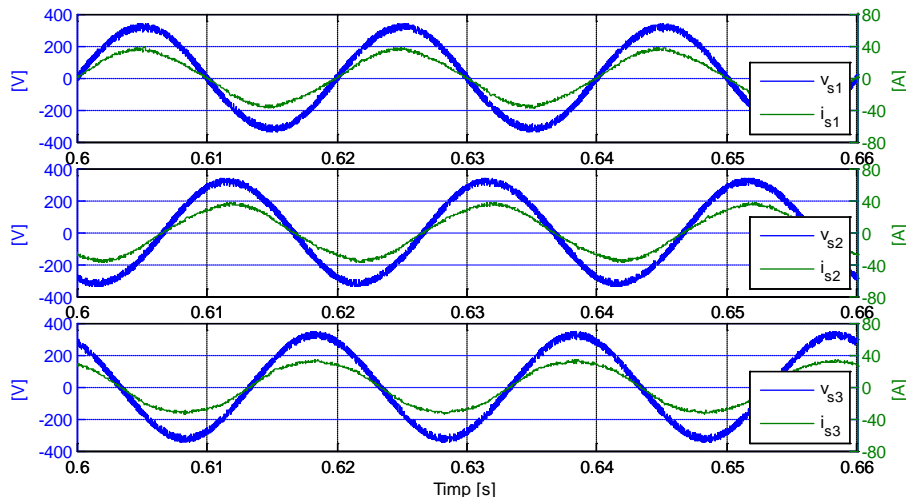


Figura 3. 22 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $p-q-0$

3.4.1.2 Metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron

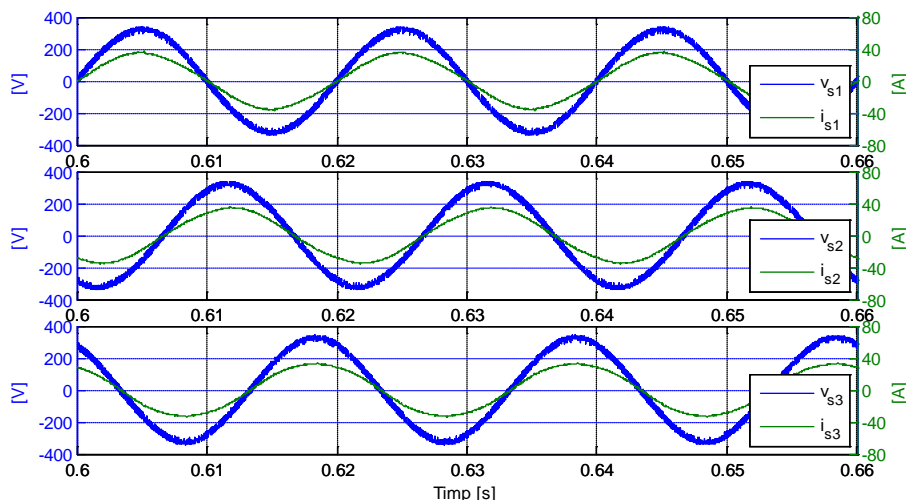


Figura 3. 27 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $d-q-0$

Conectarea filtrului activ de putere în sistem a contribuit la:

- îmbunătățirea formei de undă a tensiunii de alimentare nivelul armonic fiind redus la valoarea $THD_u = 2.69\%$;
- ameliorarea formei de undă a curentului măsurat la nivelul sursei de alimentare $THD_i = 2.87\%$;
- echilibrarea curentului pe cele trei faze și reducerea curentului circulat prin conductorul de neutru;

- diminuarea energiei reactive absorbite din sistem, tensiunea și curentul măsurate la nivelul sursei de alimentare fiind în fază, $\cos \varphi = 1$, figura 3.27;
- reducerea nesimetriei pe tensiune, de la valoarea $V_{unb} = 3.45\%$ la valoarea $V_{unb} = 1.75\%$.

3.4.1.3 Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului de control indirect

Având dezvoltat modelul matematic pentru acest nou algoritm s-au făcut teste pentru a evidenția calitățile comenzii, în condițiile unei rețele de putere redusă.

Analiza evoluției tensiunii de alimentare a arătat o diminuare a perturbațiilor de 76%, față de momentul în care în sistem nu era conectat filtrul activ de putere, ajungând la un $THD_u = 2.45\%$.

La măsurarea nivelului armonic de curent s-a obținut valoarea. Totodată, comanda indirectă, dezvoltată de către autor pentru a comanda unui filtru activ cu patru brațe prin impunerea unui curent de nul egal cu 0, permite reducerea până la valoarea 0 a curentului circulat pe firul de neutru între sursă și PCC.

Filtrul activ de putere, comandat prin metoda indirectă pentru 4 brațe conectat în paralel cu sarcina perturbatoare, conduce la absorbția de la rețea a unui curent în fază cu tensiunea, $\cos \varphi = 1$, figura 3.32.

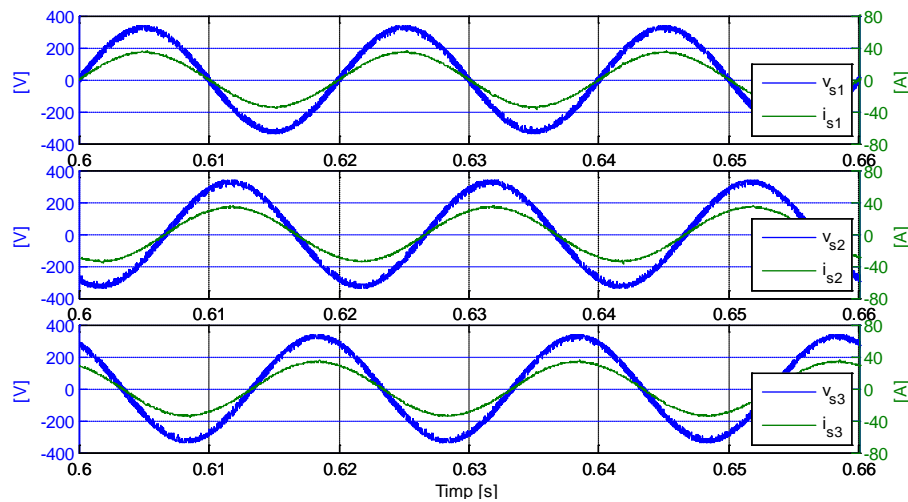


Figura 3. 32 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda indirectă

3.4.1.4 Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului sincronizării curentului cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii

Prin introducerea în sistem a unui FAP comandat prin metoda secvenței pozitive se obțin următoarele rezultate:

- îmbunătățirea formei de undă a tensiunii de alimentare nivelul armonic fiind redus la valoarea $THD_u = 2.46\%$;
- ameliorarea formei de undă a curentului măsurat la nivelul sursei de alimentare, $THD_i = 1.41\%$;

- echilibrarea curentului absorbit de la sursa de alimentare și reducerea curentului circulat prin conductorul de neutru;
- diminuarea energiei reactive absorbite din sistem; tensiunea și curentul măsurate la nivelul sursei de alimentare fiind în fază, $\cos \varphi = 1$, figura 3.37;
- reducerea nesimetriei pe tensiune de la valoarea $V_{umb} = 3.45\%$ la valoarea $V_{umb} = 1.5\%$.

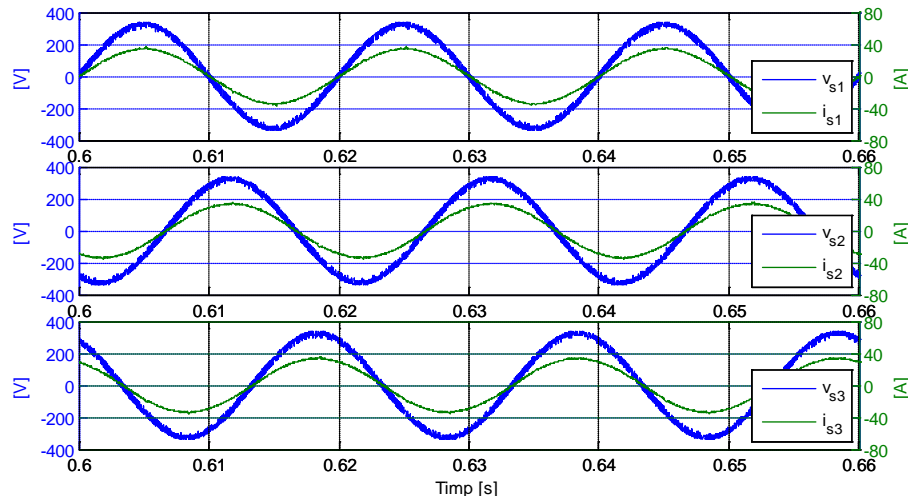


Figura 3. 37 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda secvenței pozitive

3.4.2 Studiul 2 – rețea de calculatoare

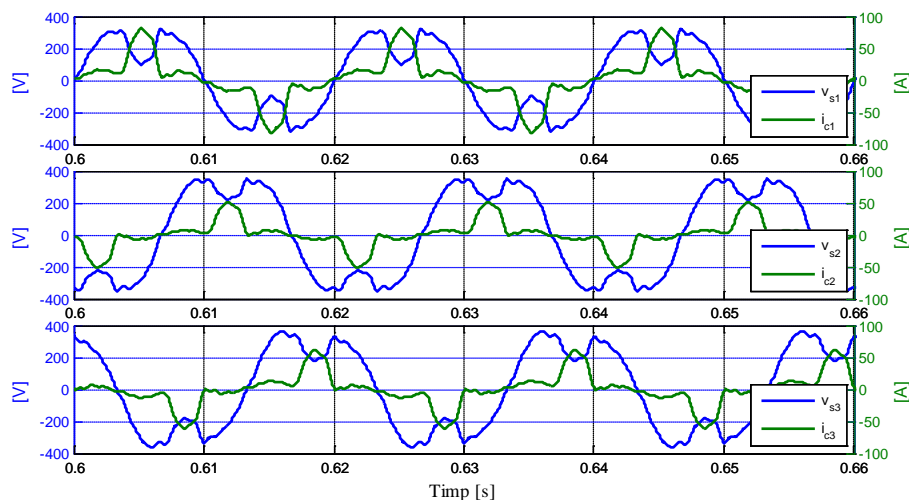


Figura 3. 43 Formele de undă ale tensiunii și curentului pentru Studiul 2

În cazul Studiului 2, de la rețeaua electrică se alimentează o rețea de calculatoare, descrisă în subcapitolul 3.2. Aceasta, în condițiile unei puteri reduse disponibile, produce importante perturbații ale tensiunii de alimentare, figura 3.43, având $THD_u = 45.62\%$, și cu o nesimetrie cuantificată la valoarea $V_{umb} = 10.2\%$.

3.4.2.1 Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului puterilor instantanee

Conectarea în sistem a FAP cu 4 brațe comandat prin metoda p-q-0 a condus la:

- îmbunătățirea formei de undă a tensiunii de alimentare nivelul armonic fiind redus la valoarea $THD_u = 4.29\%$, inițial având valoarea $THD_u = 45.62\%$;
- ameliorarea formei de undă a curentului măsurat la nivelul sursei de alimentare $THD_i = 19.39\%$;
- reducerea curentului circulat prin conductorul de neutru;
- reducerea nesimetriei pe tensiune, de la valoarea $U_{umb} = 10.2\%$ la valoarea $U_{umb} = 6\%$.

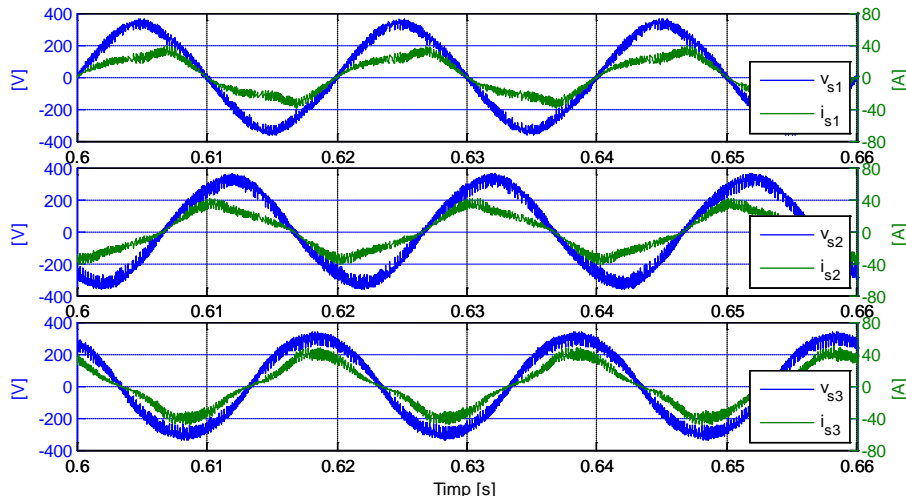


Figura 3. 48 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $p-q-0$

3.4.2.2 Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului algoritmului sincron

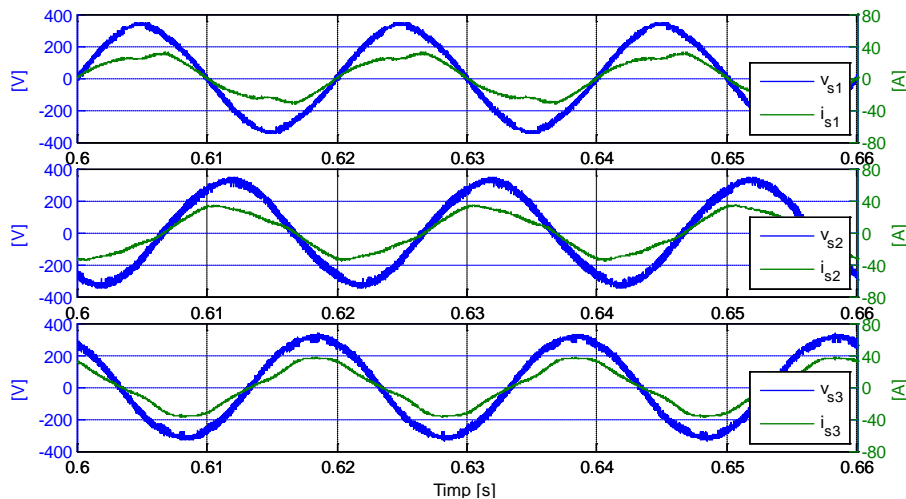


Figura 3. 53 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda $d-q-0$

Conectarea filtrului activ de putere în sistem a condus la:

- îmbunătățirea formei de undă a tensiunii de alimentare. Nivelul armonic fiind redus la valoarea $THD_u = 3.17\%$, inițial având valoarea $THD_u = 45.62\%$;
- ameliorarea formei de undă a curentului măsurat la nivelul sursei de alimentare, $THD_i = 13.53\%$;
- reducerea curentului circulat prin conductorul de neutru;

- reducerea nesimetriei pe tensiune, de la valoarea $V_{unb} = 10.2\%$ la valoarea $V_{unb} = 3.9\%$.

3.4.2.3 Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului de control indirect

Perturbațiile introduse în sistem, în cadrul studiului 2, au contribuit la poluarea semnificativă cu armonici a tensiunii de alimentare. Folosirea unui filtru activ cu 4 brațe comandat prin metoda propusă de autor în această teză a condus la reale îmbunătățiri. Astfel, nivelul armonicilor de tensiune a fost redus de la $THD_u = 45.62\%$ la $THD_u = 2.93\%$, reprezentând o reducere de până la 15 ori a valorii inițiale. Iar pe curent se asigură diminuarea armonicilor introduse în rețea, până la $THD_i = 3.07\%$. Totodată, nivelul de nesimetrie a fost redus de la 10.2%, valoarea inițială, la 3.1%.

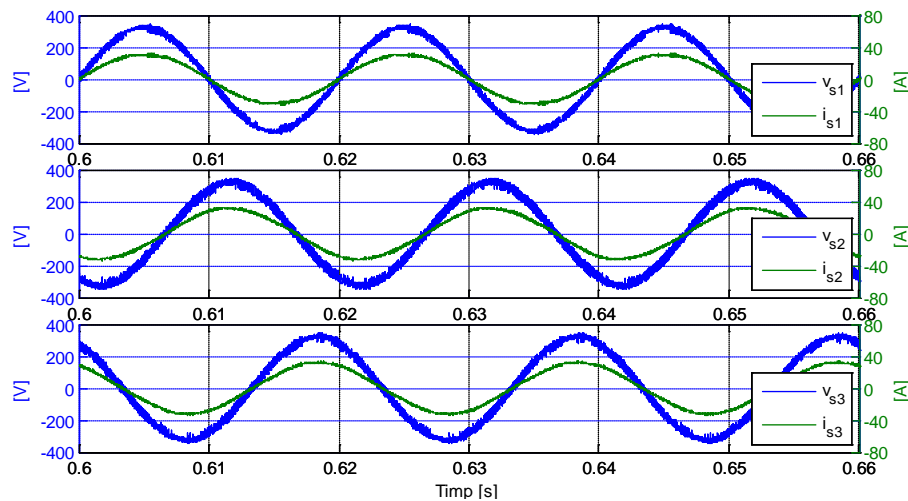


Figura 3. 58 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda indirectă

Prin reducerea nivelului armonic și obținerea unor forme de undă pentru tensiune și curent sinusoidale, din figura 3.58 se observă că tensiunea și curentul măsurate la nivelul rețelei sunt în fază, $\cos \varphi = 1$.

3.4.2.4 Metoda de comandă dezvoltată pe baza principiului sincronizării curentului cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii

Conectarea FAP în sistem a condus la:

- îmbunătățirea formei de undă a tensiunii de alimentare. Nivelul armonic fiind redus la valoarea $THD_u = 2.62\%$, inițial având valoarea $THD_u = 45.62\%$;
- ameliorarea formei de undă a curentului măsurat la nivelul sursei de alimentare $THD_i = 3.82\%$;
- diminuarea energiei reactive absorbite din sistem, tensiunea și curentul măsurate la nivelul sursei de alimentare fiind în fază, $\cos \varphi = 1$, figura 3.63;
- reducerea curentului circulat prin conductorul de neutru;
- reducerea nesimetriei pe tensiune, de la valoarea $V_{unb} = 10.2\%$ la valoarea $V_{unb} = 3.15\%$.

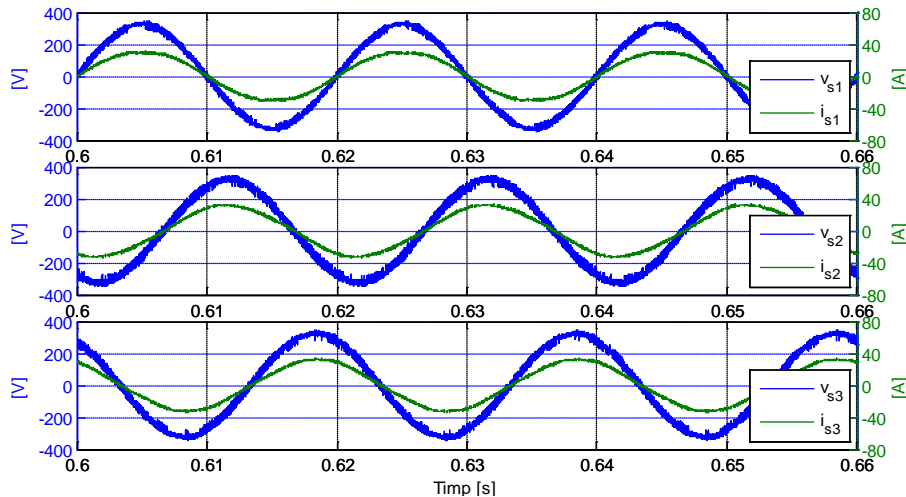


Figura 3. 63 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP comandat prin metoda secvenței pozitive

3.5 CONCLUZII

Acest capitol cuprinde o descriere completă a 4 metode de comandă a unui FAP cu 4 brațe. Dezbateră făcută prin prezentarea modelului matematic, a schemei bloc și a rezultatelor obținute, în urma modelării și simulării sistemului electric în mediul de programare Matlab/Simulink - SimPowerSystems.

Două dintre aceste metode sunt considerate metode clasice, datorită perioadei îndelungate de folosire a lor, iar celelalte 2 metode sunt nou propuse de către autor. Acestea din urmă sunt dezvoltări ale unor metode de comandă folosite în literatură, până la această lucrare, pentru comanda filtrelor active cu 3 brațe.

Pentru a se putea studia performanțele metodelor de comandă s-au realizat două studii. În primul, sarcina a fost gândită pentru a introduce o poluare medie în sistem, iar al doilea pentru a introduce un nivel al poluării ridicat în sistem. Poluare ce a condus la depășirea cu mult a limitelor acceptabile prin standardele în vigoare pentru indicatorii de calitate.

Analiza rezultatelor obținute în urma conectării în sistem a unui FAP cu 4 brațe a arătat că metodele propuse în această lucrare se ridică la nivelul celor existente. Mai mult, în condiții de funcționare cu un nivel ridicat al poluării utilizarea FAP comandat prin noile metode conduce la obținerea unor rezultate mai bune, privind indicatorii de calitate ai energiei electrice, decât în cazul folosirii metodelor clasice.

Rezultatele obținute în simulare arată că cele 2 metode dezvoltate de către autor sunt un câștig real în dezvoltarea filtrelor active de putere.

CAPITOLUL 4

CONTRIBUȚII LA DEZVOLTAREA FILTRELOR ACTIVE DE PUTERE CU 4 BRAȚE

Acest capitol prezintă o analiză privind îmbunătățirea calității energiei electrice în sistemele electrice distribuite prin 4 fire (3F+N), utilizând un FAP comandat prin metoda controlului indirect pentru 4 brațe, metodă propusă în aceasta teză. S-au folosit pentru construcția FAP două structuri de inverter, una cu 2 nivele și cea de-a doua cu 3 nivele de tensiune de tip Neutral Point Clamped (NPC). Schemele bloc pentru sistemele create sunt prezentate în figura 4.1 și, respectiv, figura 4.2.

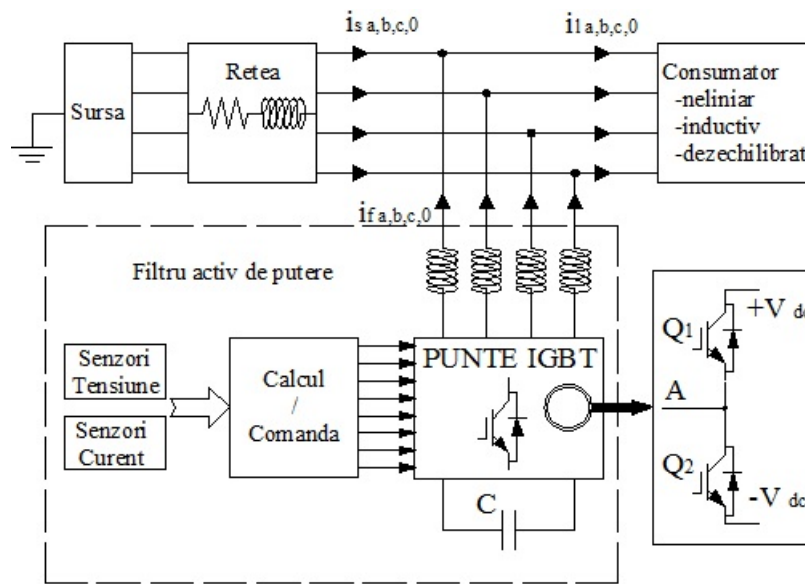


Figura 4. 1 Schema bloc a sistemului electric la care este racordat un FAP cu 2 nivele

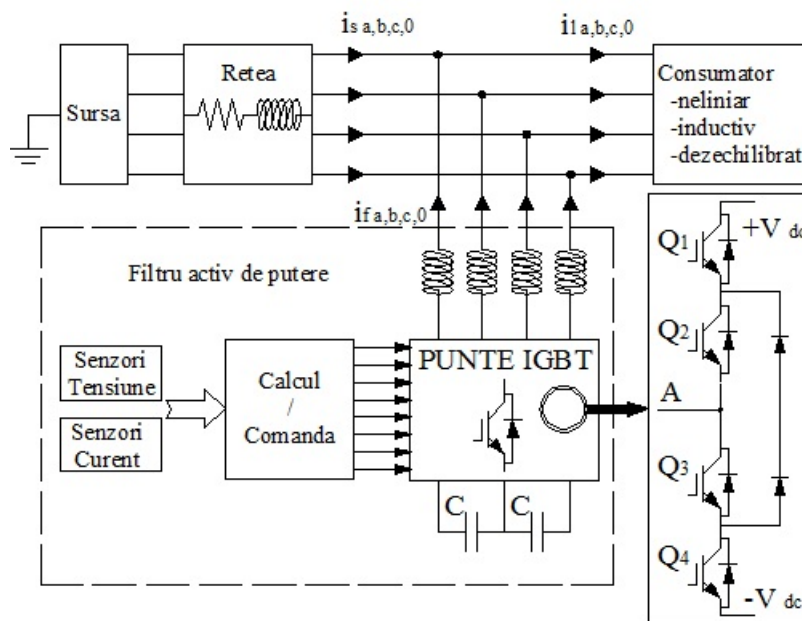


Figura 4. 2 Schema bloc a sistemului electric la care este racordat un FAP cu 3 nivele de tip NPC

Scopul acestui capitol este de a demonstra că metoda de comandă a FAP propusă în aceasta teză, controlul indirect dezvoltat pentru 4 brațe, este funcțională și pe structuri de tip multinivel. Iar, pentru a evidenția performanțele comenzii indirecte folosite pe o structură cu 3 nivele de tensiune, rezultatele obținute au fost comparate cu cele obținute de structura cu 2 nivele de tensiune. Analiza a fost făcută prin modelarea și simularea în mediul de programare Matlab/Simulink – SimPowerSystems.

4.1 SURSA DE ALIMENTARE ȘI REȚEAUA ELECTRICĂ

Pentru studiul implementat, s-a ales o sursă de tensiune trifazată cu $U_l = 400V$, iar rețeaua a fost modelată folosind o impedanță de $Z = 2\Omega$.

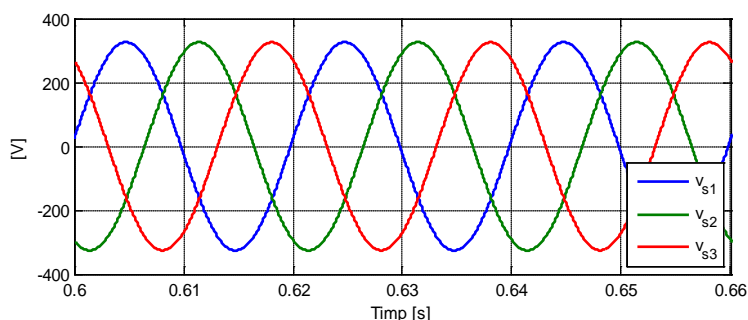


Figura 4. 3 Tensiunea de alimentare

4.2 SARCINILE ELECTRICE

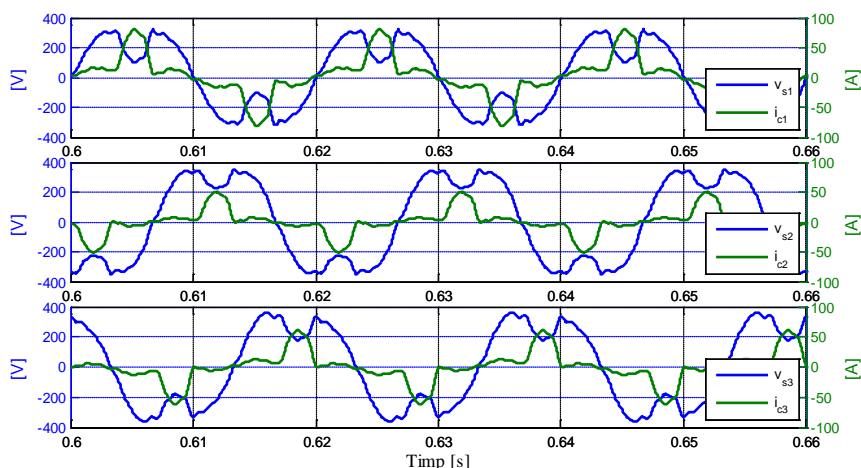


Figura 4. 4 Formele de undă ale tensiunii și curentului

Pentru prezentul studiu s-a modelat în mediul de programare Matlab/Simulink o sarcină ce reprezintă o rețea de calculatoare, definită pe larg în Capitolul 3.

Tabelul 4. 1 Date de intrare

	V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	THD_u [%]	THD_i [%]	U_{unb} [%]
Faza 1	219	34.01	5.67	0	45.62	65.61	10.2
Faza 2	267	20.49	4.08	0	30.65	80.56	
Faza 3	253	25.02	4.75	0	34.76	76.26	

Formele de undă ale curentului sunt prezentate în figura 4.4, tot în această figură se prezintă și formele de undă ale tensiunii de alimentare. Se poate observa cum alimentarea sarcinii puternic neliniară conduce la perturbarea formei de undă sinusoidale a tensiunii.

4.3 FILTRUL ACTIV DE PUTERE

Pentru îmbunătățirea calității energiei electrice s-au folosit două filtre active de putere, dezvoltate pe două structuri diferite de inverter cu 4 brațe, una având două nivele de tensiune, iar cea de-a doua trei nivele de tensiune (NPC). Filtrele active de putere au fost comandate prin metoda controlului indirect dezvoltat pentru comanda filtrelor cu 4 brațe.

4.3.1 Dimensionarea elementelor pasive ale filtrului activ

– alegerea tensiunii continue se face folosindu-se relația de calcul (1.24), unde $E_m = 230V$, obținem $V_{cc} > 690V$, se alege $V_{cc} = 750V$.

– dimensionarea inductivității de filtrare s-a făcut folosindu-se relația de calcul (1.31). Astfel, pentru cazul de față unde: $V_{cc} = 750V$, $\Delta i_{max} = 5A$, $f_s = 25kHz$, obținem $L = 1mH$.

– dimensionarea capacității de stocare a energiei pentru bara de curent continuu s-a realizat folosindu-se ecuația (1.35), unde: $I_{FA} = 30A$, $\Delta v_{cc} = 15V$, rezultă o valoare standard a capacității de stocare $C = 3800\mu F$, folosită pentru structura de filtru activ cu două nivele de tensiune și $C_1 = C_2 = 1900\mu F$, pentru structura de filtru activ cu trei nivele de tensiune.

4.3.4 Metoda de obținere a impulsurilor de comandă

Pentru structura de inverter cu două nivele de tensiune se folosește un histerezis cu bandă variabilă, iar pentru structura cu trei nivele de tensiune, se folosește compararea cu două semnale purtătoare și o matrice de stare.

4.3.4.1 Histerezis cu bandă variabilă

Deoarece blocul de histerezis care acceptă modificarea benzii în timp real nu există în biblioteca Matlab/Simulink, acesta a fost modelat, având la bază schema prezentată în figura 4.8.

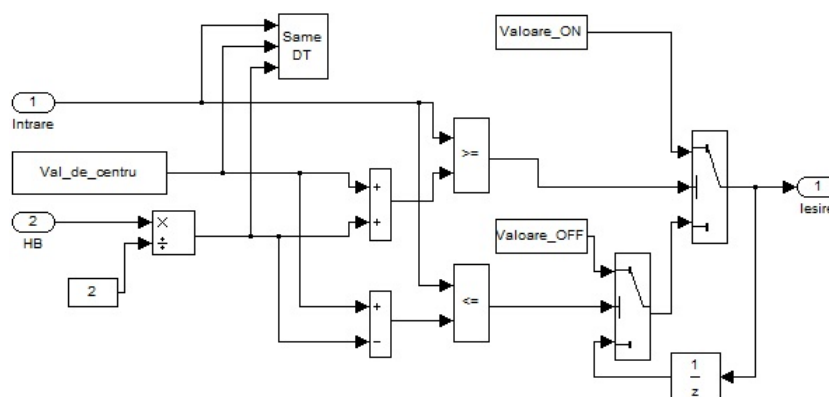


Figura 4. 8 Schema blocului de histerezis

Calculul benzii de histerezis s-a efectuat cu ajutorul relației (4.3), definită în lucrarea [KAL 05].

$$HB = \left\{ \frac{0.125V_{cc}}{f_c L} \left[1 - \frac{4L^2}{V_{cc}^2} \left(\frac{v_s}{L} + m \right)^2 \right] \right\} \quad (4.3)$$

unde:

- f_c este frecvența de comutație;
- $m = \frac{di_{ca}^*}{dt}$ este panta curentului de comandă.

4.3.4.2 PWM convertor 3 nivele de tensiune

Tabelul 4.3 Pulsuri de comandă în funcție de starea sistemului

Tensiunea de iesire	Starea	Pulsurile			
		Q ₁	Q ₂	Q ₃	Q ₄
$U_{cc}/2$	1	1	1	0	0
0	0	0	1	1	0
$-U_{cc}/2$	-1	0	0	1	1

Obținerea impulsurilor de comandă, necesare filtrului activ dezvoltat pe o structură de tip NPC, s-a efectuat comparând semnalul de referință impus filtrului cu 2 semnale triunghiulare purtătoare și o matrice de stare, tabelul 4.3 [SAL 11], [FLO 08].

4.3.5 Metoda de comandă

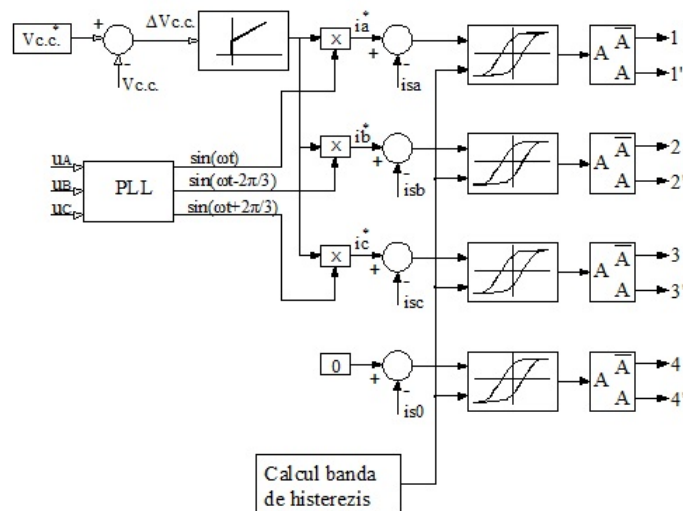


Figura 4.10 Strategia de comandă Controlul Indirect pentru structura cu 2 nivele de tensiune

Comanda folosită are la bază conceptul de control indirect dezvoltat pentru un FAP cu 4 brațe. Descrierea acestei metode de comandă s-a realizat pe larg în Capitolul 3. Aici se prezintă schemele bloc de comandă pentru cele două structuri implementate:

- în figura 4.10, comanda pentru structura cu 2 nivele de tensiune;
- în figura 4.11 comanda pentru structura cu 3 nivele de tensiune.

Diferența este dată de metoda de obținere a impulsurilor de comandă.

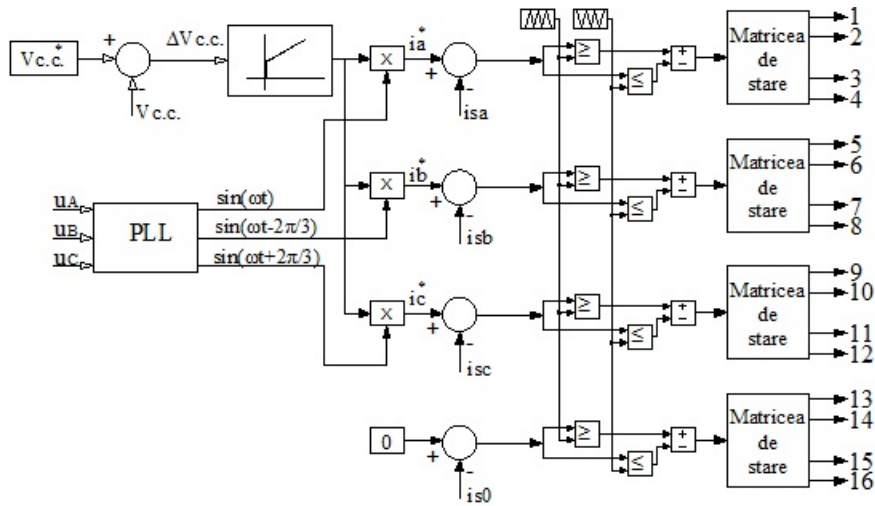


Figura 4. 11 Strategia de comandă Controlul Indirect pentru structura cu 3 nivele de tensiune

4.3.6 Rezultate obținute

4.3.6.1 Structura cu 2 nivele de tensiune

În cazul folosirii structurii cu 2 nivele de tensiune, FAP s-a parametrizat utilizându-se valorile din tabelul 4.4.

Tabelul 4. 4 Parametri utilizați la implementarea structurii cu 2 nivele de tensiune

Lf [mH]	C [mF]	PI		Banda de histerezis	U _{c.c.} impus [V]
		Kp	Ki		
1	3.8	0.5	20	Variabila $f_c = 20kHz$	750

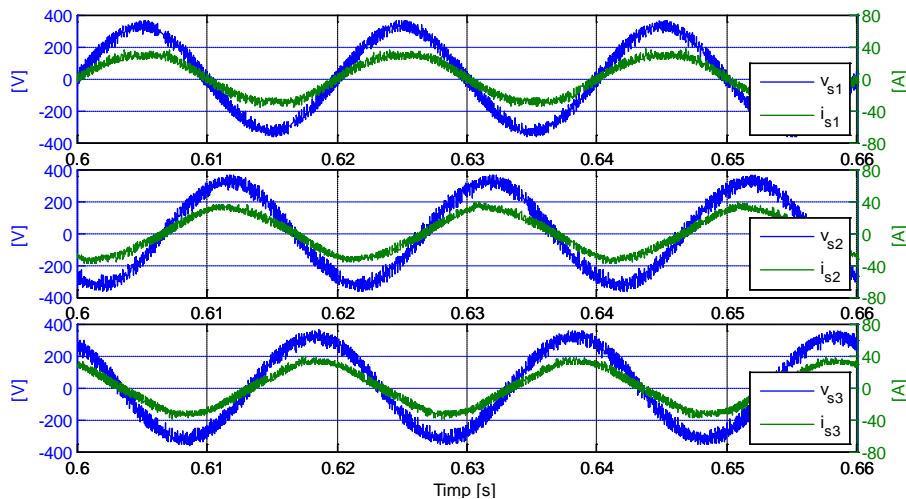


Figura 4. 14 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP cu 2 nivele

Folosirea filtrului activ de putere cu 4 brațe dezvoltat pe structură de inverter cu 2 nivele de tensiune și comandat prin metoda indirectă a condus la îmbunătățirea indicatorilor de calitate. În consecință:

- nivelul armonicilor de tensiune a fost redus până la valoarea $THD_u = 4.85\%$, valoare mai mică decât limita impusă prin standardele în vigoare, $THD_u = 8\%$;

- nivelul armonicilor de curent, care inițial a avut valoarea $THD_i = 75\%$, a fost diminuat până la $THD_i = 7\%$;
- nivelul de nesimetrie a fost redus de la valoarea 10.2% la 4%;
- curentul absorbit din rețea, devenit cvasi-sinusoidal, este în fază cu tensiunea de alimentare. Măsurând factorul de putere la nivelul sursei, obținem $\cos \varphi = 1$, figura 4.14.

Valorile indicatorilor de calitate măsurați pe fiecare fază sunt prezentați în tabelul 4.5.

Tabelul 4. 5 Date de ieșire pentru FAP cu 2 nivele de tensiune

Indicator calitate	THD _u [%]			THD _i [%]			PF			U _{unb} [%]
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
Structura cu 2 nivele de tensiune	4.88	4.91	4.85	7.31	7.01	6.62	0.99	0.99	0.99	4

4.3.6.2 Structura cu 3 nivele de tensiune

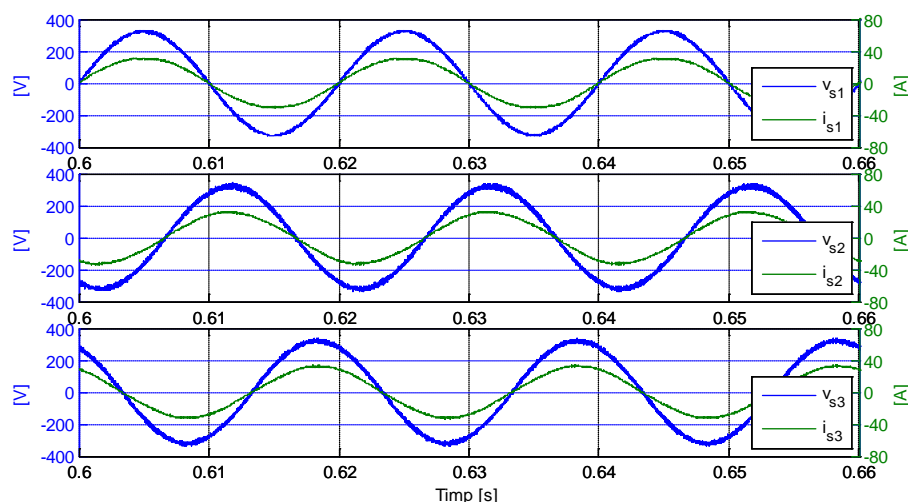


Figura 4. 19 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea FAP cu 3 nivele

Dacă înainte de conectarea FAP curentul de la sursa era puternic poluat cu armonici, $THD_i = 75\%$, după conectarea FAP acesta este practic „curățat”. Astfel, nivelul armonic măsurat după conectarea FAP a ajuns la valoarea $THD_u = 2.2\%$.

În figura 4.19 se prezintă, pe fiecare fază, formele de undă ale curentului și tensiunii de alimentare, măsurate la nivelul rețelei de alimentare. Astfel, se poate observa că unghiul de defazaj dintre tensiune și curent este nul.

Tabelul 4. 7 Date de ieșire pentru FAP cu 3 nivele de tensiune

Indicator calitate	THD _u [%]			THD _i [%]			PF			U _{unb} [%]
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
Structura cu 3 nivele de tensiune	1.82	2.54	2.43	2.83	2.61	2.42	0.99	0.99	0.99	1.3

În formă numerică, rezultatele obținute la conectarea în sistem a unui FAP comandat prin metoda indirectă și dezvoltat pe o structură de inverter cu 3 nivele de tensiune sunt prezentate în tabelul 4.7.

4.4 CONCLUZII

În acest capitol s-a prezentat o analiză comparativă a două filtre active de putere cu 4 brațe, comandate prin aceeași metodă de comandă construite pe două structuri, una de inverter cu 2 nivele de tensiune și cea de-a doua de inverter cu 3 nivele de tensiune (de tip NPC), ambele formate cu IGBT-uri. Metoda de comandă folosită a fost metoda indirectă pentru FAP cu 4 brațe propusă în aceasta teză care, după cum s-a prezentat în Capitolul 3, conduce la obținerea unor rezultate bune în privința îmbunătățirii indicatorilor de calitate ai energiei electrice.

Deoarece s-a dorit realizarea analizei pentru o situație în care FAP ar putea fi realizate fizic, s-a limitat frecvența de comandă la 20kHz. Pentru FAP cu 2 nivele de tensiune s-a dezvoltat blocul de histerezis, la care se poate modifica banda în timp real. Totodată, s-a implementat și dezvoltat, pentru o structură cu 4 brațe, o metodă de calcul în timp real a benzii de histerezis.

Cu modificările de rigoare aduse, s-au făcut simulări în mediul de programare Matlab/Simulink, rezultatele obținute fiind prezentate anterior.

După cum era de așteptat rezultatele obținute prin utilizarea unui FAP cu 4 brațe dezvoltat pe structura cu 3 nivele de tensiune sunt mai bune. Dar, prin prezenta analiza s-a demonstrat că metoda comenzii indirecte dezvoltată pentru 4 brațe, propusă în aceasta teză, poate fi implementată cu succes și pe structuri de tip multinivel.

Convertoarele multinivel sunt folosite în general pentru tensiuni ridicate deoarece, tensiunea este divizată pe capacitați. Un alt avantaj al structurii multinivel constă în forma de undă de la ieșirea convertorului, care are un conținut armonic mai redus. În acest capitol s-a expus faptul că o astfel de structură comandată prin metoda indirectă poate fi folosită cu succes și pe joasă tensiune, atât timp cât nu se ține cont de costurile de implementare.

CAPITOLUL 5

CONTRIBUȚII PRIVIND ÎMBUNĂȚIREA CALITĂȚII ENERGIEI ELECTRICE ÎN MICRO-REȚELELE ELECTRICE DE MICĂ PUTERE

În acest capitol se prezintă o metodă de îmbunătățire a calității energiei electrice dintr-o micro-rețea electrică, prin utilizarea unui Compensator Activ de Putere (CAP). Acesta este dezvoltat pe 4 brațe și comandat prin metoda indirectă propusă în această teză. CAP poate fi definit ca un dispozitiv implementat ca interfață între o sursă de energie electrică (regenerabilă sau nu) și un sistem electric de putere. Rolul acestuia este de a îmbunătăți calitatea energiei electrice și de a crește puterea electrică ce poate fi disponibilă în sistemul electric la care este conectat.

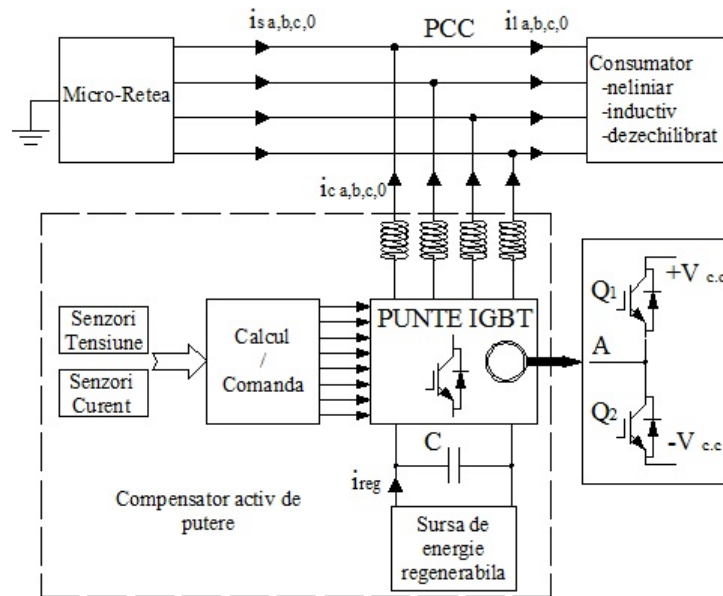


Figura 5. 1 Schema bloc a sistemului electric la care este racordat un CAP cu 2 nivele

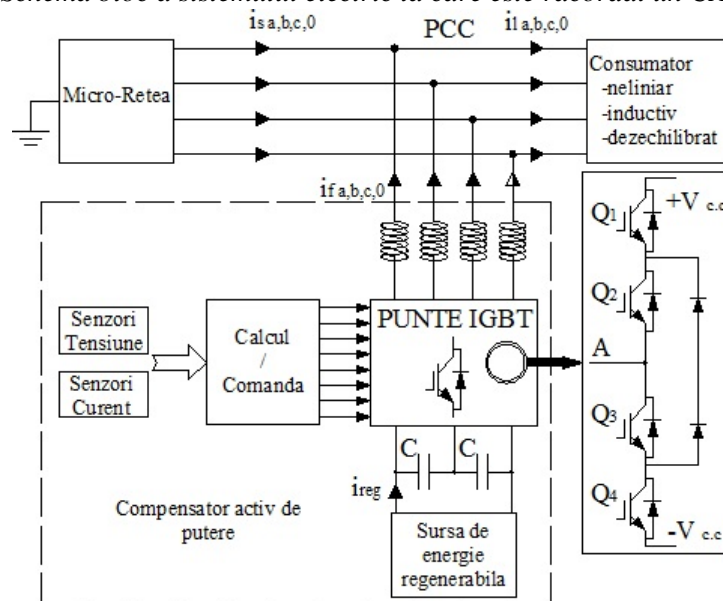


Figura 5. 2 Schema bloc a sistemului electric la care este racordat un CAP cu 3 nivele

Scopul acestui capitol este de a arata că, metoda de comandă controlul indirect dezvoltat pentru 4 brațe este o soluție pentru comanda CAP. Analiza a fost făcută prin modelarea și simularea în mediul de programare Matlab/Simulink.

5.1 METODA DE COMANDĂ

Pentru comanda CAP se propune metoda indirectă pentru 4 brațe.

Curentul absorbit de o sarcină neliniară, inductivă și dezechilibrată poate fi descompus ca o sumă de curenți:

$$i_L(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (5.1)$$

unde:

- $i_L^1(t)$, este componenta activă a fundamentalei;
- $\sum_k i_{Lk}(t)$, este suma armonicilor superioare;
- $i_{Lq}(t)$, este componenta reactivă a fundamentalei.

La nivelul sursei de alimentare, curentul este definit prin relația:

$$i_s(t) = i_s^1(t) + \sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) \quad (5.2)$$

unde:

- $i_s^1(t)$, componenta activă a fundamentalei;
- $\sum_k i_{sk}(t)$, suma armonicilor superioare;
- $i_{sq}(t)$, componenta reactivă a fundamentalei.

cu:

$$i_s^1(t) + \sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (5.3)$$

Conectarea CAP și aplicarea Teoremei. 1 Kirchhoff în PCC, figura 5.1, figura 5.2, conduce la:

$$i_s(t) + i_c(t) = i_L(t) \quad (5.4)$$

Curentul electric prin CAP va fi:

$$i_c(t) = i_c^1(t) + \sum_k i_{ck}(t) \quad (5.5)$$

unde:

- $i_c^1(t)$, componenta fundamentalei;
- $\sum_k i_{ck}(t)$, reprezintă suma armonicilor superioare.

$$i_s^1(t) + \sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) + i_c^1(t) + \sum_k i_{ck}(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Lq}(t) \quad (5.6)$$

Cu impunerea $\sum_k i_{sk}(t) + i_{sq}(t) \approx 0$, relația de calcul (5.6) devine:

$$i_s^1(t) + i_c^1(t) + \sum_k i_{ck}^1(t) = i_L^1(t) + \sum_k i_{Lk}^1(t) + i_{Lq}^1(t) \quad (5.7)$$

Pentru analiza fenomenelor ce se petrec la nivelul CAP, componenta fundamentală este descompusă într-o sumă de 4 componente:

$$i_c^1(t) = i_{creg}^1(t) + i_{cec}^1(t) + i_{cq}^1(t) - i_{cp}^1(t) \quad (5.8)$$

– $i_{creg}^1(t)$, componenta introdusă de sursa de energie regenerabilă conectată direct la bara de curent continuu a CAP. Energia introdusă în sistem de către sursa regenerabilă este folosită pentru echilibrarea curenților pe cele 3 faze și pentru a acoperi o parte din necesarul de energie al sarcinii. Astfel, distribuția acestei componente este neuniformă pe cele 3 faze, în funcție de nivelul dezechilibrului;

– $i_{cec}^1(t)$, componenta ce asigură echilibrarea curenților pe cele 3 faze. Componenta pozitivă sau negativă, în funcție de încărcarea fazei față de valoarea medie. Dacă echilibrarea curenților este realizată folosindu-se energia introdusă de sursa regenerabilă, această componentă ia valoarea 0;

– $i_{cq}^1(t)$, componenta ce asigură compensarea energiei reactive;

– $i_{cp}^1(t)$, componenta ce înglobează pierderile pe componentele CAP. Componenta considerată a fi negativă, indiferent de natura sarcinii.

Pentru eliminarea perturbațiilor introduse în sistem de către sarcina neliniară și pentru a echilibra curenții pe cele 3 faze, se generează pentru intrarea regulatorului de curent semnalul:

$$i^*(t) = \varepsilon_{cc} \frac{v}{\sqrt{2V}} = \varepsilon_{cc} \sin(\omega t + \varphi) \quad (5.9)$$

unde,

- v , tensiunea de fază;
- V , valoarea efectivă a tensiunii de alimentare;
- ε_{cc} , ieșirea regulatorului de tensiune continuă a convertorului.

Impunerea de mai sus se compară cu valoarea măsurată a curentului electric absorbit de la rețea, i_s , rezultând pentru comanda filtrului pe faza a :

$$u_c^* = k(i^* - i_s) = k \left(i^* - i_L^1(t) - \sum_k i_{Lk}^1(t) - i_{Lq}^1(t) + i_c^1(t) + \sum_k i_{ck}^1(t) \right) \quad (5.10)$$

$$u_c^* = k \left(i^* - i_L^1(t) - \sum_k i_{Lk}^1(t) - i_{Lq}^1(t) + i_{creg}^1(t) + i_{cec}^1(t) + i_{cq}^1(t) - i_{cp}^1(t) + \sum_k i_{fk}^1(t) \right) \quad (5.11)$$

unde, k este amplificarea regulatorului.

Având în vedere că regulatorul este liniar, componentele sinusoidale ale sarcinii și filtrului se regăsesc în impunerea sinusoidală pentru acesta:

$$i^* = i_L^1 - i_{creg}^1(t) - i_{cec}^1(t) + i_{fp}^1(t) \quad (5.12)$$

Astfel, impunerea pe fază a filtrului activ va deveni proporțională cu componenta poluantă:

$$u_c^* = k \left(-\sum_k i_{Lk}(t) - i_{Lq}(t) + \sum_k i_{fk}(t) + i_{fq}^1(t) \right) \quad (5.13)$$

În regim staționar regulatorul anulează eroarea staționară:

$$\sum_k i_{fk}(t) + i_{fq}^1(t) = \sum_k i_{Lk}(t) + i_{Laq}(t) \quad (5.14)$$

Așadar, CAP asigură compensarea nivelului poluant introdus de sarcina și echilibrarea curenților absorbiți de la sursă.

Impunerea ε_{cc} de la regulatorul RV_{cc} pentru încărcarea condensatorului „C” este transformată în referință de curent:

$$\begin{cases} i_a^* = \varepsilon_{cc} \cdot \sin \omega t \\ i_b^* = \varepsilon_{cc} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ i_c^* = \varepsilon_{cc} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3) \\ i_0^* = 0 \end{cases} \quad (5.15)$$

Prin impunerea, $i_0^* = 0$, rezultă:

$$u_{c0}^* = k \left(-i_{L0}^1(t) - \sum_k i_{L0k}(t) - i_{L0q}(t) + i_{c0}^1(t) + \sum_k i_{c0k}(t) \right) \quad (5.16)$$

unde, în regim staționar avem:

$$i_{c0}(t) = i_{L0}(t) \quad (5.17)$$

Astfel, circulația curentului de nul al sarcinii dezechilibrate se va face prin CAP.

5.2 STUDIU DE CAZ

Pentru a prezenta performanțele CAP comandat prin metoda propusă în Matlab/Simulink – SimPowerSystems, s-a implementat o micro-rețea la care s-a conectat o sarcină puternic neliniară, inductivă și dezechilibrată. În acest sistem se conectează un CAP care, în prima parte a experimentului nu injectează în sistem putere de la sursa regenerabilă, iar în cea de-a doua, sursa regenerabilă furnizează circa 50% din puterea necesară sarcinii.

5.2.1 Micro-rețeaua electrică

Micro-rețelele sunt rețele izolate sau nu, ce conțin mai multe surse de putere redusă ori foarte redusă și mai multe sarcini ce funcționează ca un sistem unitar, [LAS 02], [WEI 06], [BAR 07]. În general, sursele folosite într-o micro rețea asigură atât energia electrică, cât și energia termică, [PER 08]. Acest concept a căpătat o dezvoltare de amploare odată cu dezvoltarea surselor de energie regenerabilă, impulsionate de proiectele de mediu, de energie curată, energie verde [WEI 06], [SOL 11].

În exemplul de față, se consideră o sursă principală de tensiune trifazată cu $U_l = 400V$ și o sursă secundară conectată în sistem prin intermediul CAP.

Sursa de energie regenerabilă a fost dimensionată, în prezentul studiu, astfel încât să introducă în sistem o putere de 6kW. Aceasta este conectată direct în bara de curent continuu a CAP la tensiunea de 750V și injectează un curent constant de 8A. În realitate, puterea la

ieșirea sursei regenerabile depinde de diverși factori. Totuși, în acest caz s-a considerat că sursa injectează o putere constantă.

Pentru a limita puterea sursei principale s-a folosit o rețea modelată prin folosirea unei impedanțe de 2Ω . S-a ales această impedanță pentru a se putea crea condițiile unei micro-rețele de putere redusă, $\rho < 10$.

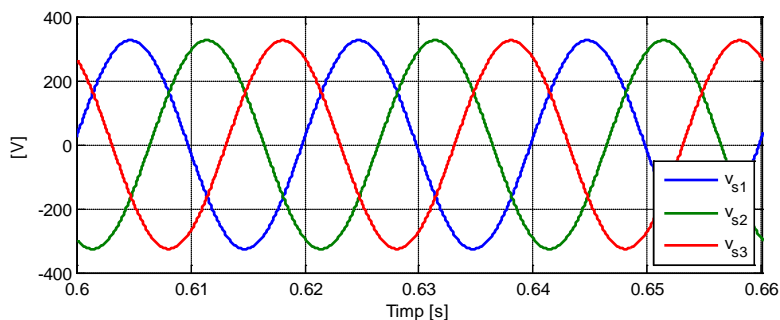


Figura 5. 5 Tensiunea de alimentare

5.2.2 Sarcina electrică

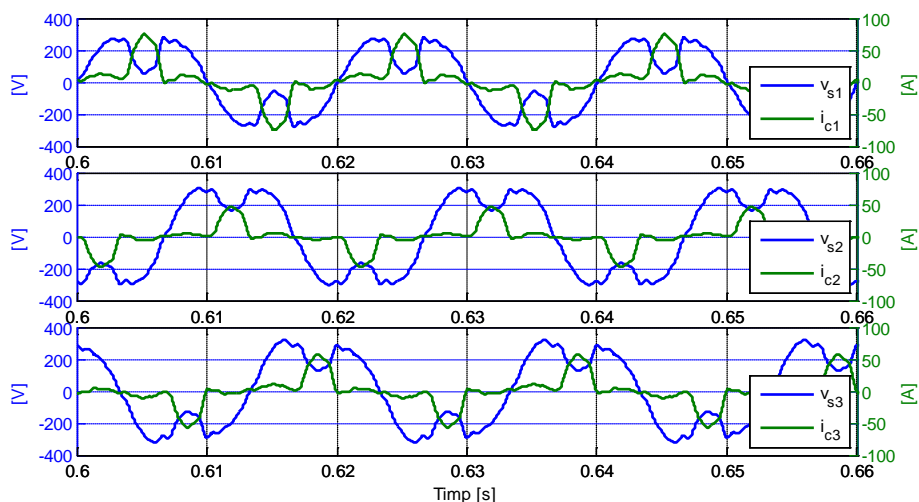


Figura 5. 11 Formele de undă ale tensiunii și curentului

S-a modelat în mediul de programare Matlab/Simulink o sarcină, definită pe larg în Capitolul 3, ce reprezintă o rețea de calculatoare.

Figura 5.11 prezintă formele de undă ale tensiunii de alimentare și ale curentului absorbit de sarcină pe fiecare fază.

În tabelul 5.1 se regăsesc informațiile cu privire la indicatorii energetici ai sistemului creat.

Tabelul 5. 1 Date de intrare

	V_s [V]	I_c [A]	P_c [kW]	Q_c [kVAr]	THD_u [%]	THD_i [%]	U_{unb} [%]
Faza 1	167	30.29	4	0	54.35	78.16	12.7
Faza 2	214	18.57	2.87	0	36.52	95.97	
Faza 3	200	22.56	3.35	0	41.41	90.85	

5.2.3 Dimensionarea elementelor componente ale CAP

Pe baza relațiilor prezentate în Capitolul 1, au fost dimensionate elementele pasive ale filtrului activ:

– alegerea tensiunii continue se face folosindu-se relația de calcul (1.24), unde $E_m = 230V$, obținem $V_{cc} > 690V$. Se alege $V_{cc} = 750V$.

– dimensionarea inductivității de filtrare s-a realizat folosindu-se relația de calcul (1.31). Astfel, pentru cazul de față unde: $V_{cc} = 750V$, $\Delta i_{max} = 5A$, $f_s = 25kHz$, obținem $L = 1mH$.

– dimensionarea capacității de stocare a energiei pentru bara de curent continuu s-a făcut folosindu-se ecuația (1.35) unde: $I_{FA} = 30A$, $\Delta v_{cc} = 15V$. Rezultă capacitatea de stocare de $C = 3800\mu F$, pentru structura de filtru activ cu două nivele de tensiune și $C_1 = C_2 = 1900\mu F$ pentru structura de filtru activ cu trei nivele de tensiune standard.

În acest studiu se folosește bucla de sincronizare bazată pe metoda de descompunere a sistemului electric, conform Fortescue și extragerea unghiului componentei pozitive.

Regulatorul PI, ce asigură menținerea capacității la nivelul de tensiune dorit, se acordează conform metodei Ziegler Nichols pentru bucla închisă.

Pentru obținerea impulsurilor de comandă aplicate IGBT-urilor se folosesc două metode. Metoda histerezisului cu banda variabilă implementată pentru structura de invertor cu 2 nivele de tensiune. Iar pentru structura cu 3 nivele de tensiune de tip NPC se folosește comparația cu 2 semnale triunghiulare purtătoare și o matrice de stare.

5.2.4 Rezultate obținute

Mai jos sunt prezentate rezultatele obținute în urma utilizării a două CAP dezvoltate pe structuri diferite și comandate prin aceeași metodă, cea indirectă dezvoltată pentru 4 brațe. În prima parte a experimentului CAP funcționează ca un FAP deoarece, sursa regenerabilă nu produce energie (anterior momentului $t=0.4s$), iar în a doua parte, sursa de energie regenerabilă oferă circa 50% din necesarul sarcinii (după $t=0.4s$).

5.2.4.1 Cazul folosirii structurii cu 2 nivele de tensiune

În cazul folosirii structurii cu 2 nivele de tensiune, filtrul activ de putere s-a parametrizat cu valorile din tabelul 5.2.

Tabelul 5. 2 Parametri utilizați la implementarea structurii cu 2 nivele de tensiune

L_f [mH]	C [mF]	PI		Banda de histerezis	$U_{c.c. \text{ impus}}$ [V]
		Kp	Ki		
1	3.8	0.5	20	Variabila $f_c = 20kHz$	750

Se remarcă faptul că energia produsă de sursa regenerabilă injectată prin CAP face ca nivelul tensiunii din sistemul electric să crească de la 195V la 209V. Creșterea tensiunii este liniară, fără apariția de șocuri. Analizând comparativ formele de undă ale tensiunii și curentului se poate observa că, unghiul de defazaj dintre tensiune și curent este nul, figura

5.18, ceea ce duce la obținerea, la nivelul sursei principale de alimentare, unui factor de putere unitar.

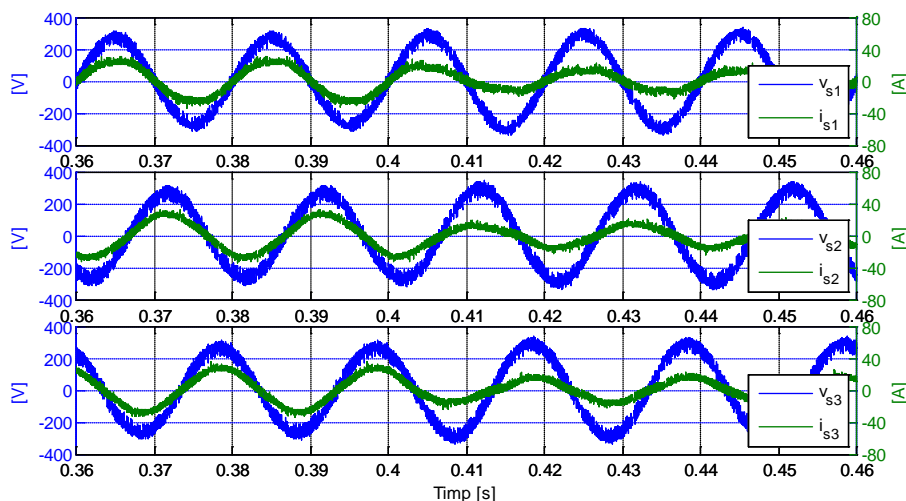


Figura 5. 18 Formele de undă ale tensiunii și curentului după conectarea CAP cu 2 nivele

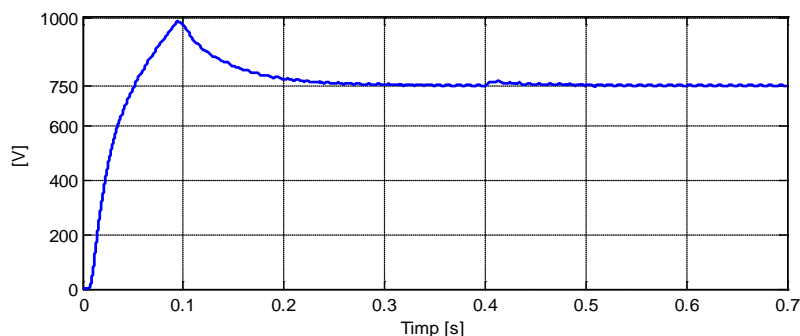


Figura 5. 21 Evoluția tensiunii pe bara de c.c. a CAP cu 2 nivele

Figura 5.21 indică evoluția tensiunii pe bara de c.c. a CAP. Se observă că, în condițiile date, tensiunea la bornele capacității ajunge și este menținută la valoarea impusă, 750V. În momentul cuplării sursei regenerabile apare un soc, dar este controlat rapid.

Valorile indicatorilor de calitate mășurați pe fiecare fază sunt prezentați în tabelul 5.3

Tabelul 5. 3 Date de ieșire pentru CAP cu 2 nivele de tensiune

Indicator	U [V]			THD _u [%]			THD _i [%]			PF			U _{unb} [%]
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
FAP	195	195	194	5.92	6.24	6.45	10.63	8.40	9.11	0.99	0.99	0.99	5
CAP	210	209	208	5.72	5.93	6.04	19.62	15.56	15.75	0.99	0.99	0.99	4.5

5.2.4.2 Cazul folosirii structurii cu 3 nivele de tensiune

Tabelul 5. 4 Parametri utilizați la implementarea structurii cu 3 nivele de tensiune

L _f [mH]	C [mF]		PI		f _c [kHz]	U _{c.c. impus} [V]
	C ₁	C ₂	K _p	K _i		
1	1.9	1.9	0.2	10	20	750

Pentru acest caz, filtrul activ de putere dezvoltat pe o structură de inverter cu 3 nivele de tensiune de tip NPC, a fost parametrizat cu valorile din tabelul 5.4.

Conectarea în sistem a CAP a condus la limitarea perturbațiilor armonice, curentul absorbit de la sursa principală fiind practic sinusoidal. Injecția de energie de la sursa regenerabilă conectată în sistem prin intermediul CAP face ca necesarul de curent de la sursa principală să se reducă considerabil. Analiza FFT a semnalelor de curent a demonstrat că nivelul armonic de curent este sub 5%.

Un alt plus al utilizării CAP comandat prin metoda indirectă propusă este reducerea nesimetriei de tensiune până sub limitele admise de 2%.

În figura 5.28 se regăsesc, pe fiecare fază în parte, formele de undă ale curentului și tensiunii de alimentare măsurate la nivelul rețelei de alimentare.

Ce trebuie remarcat este că, folosirea sursei de energie regenerabilă aduce o creștere a puterii micro-rețelei. Aceasta poate fi observată și prin creșterea tensiunii de alimentare. Practic, injecția a 6kW produși prin sursa regenerabilă face ca valoarea efectivă a tensiunii de fază să crească de la 195V la 208V. Așadar, puțin peste limita acceptată prin standardele de reglementare a nivelului de tensiune, 207V.

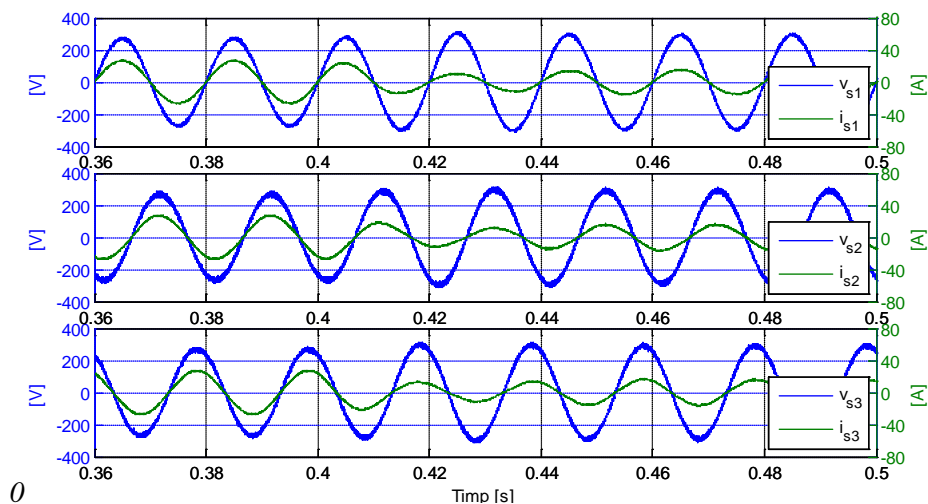


Figura 5. 28 Formele de unda ale tensiunii și curentului după conectarea CAP cu 3 nivele

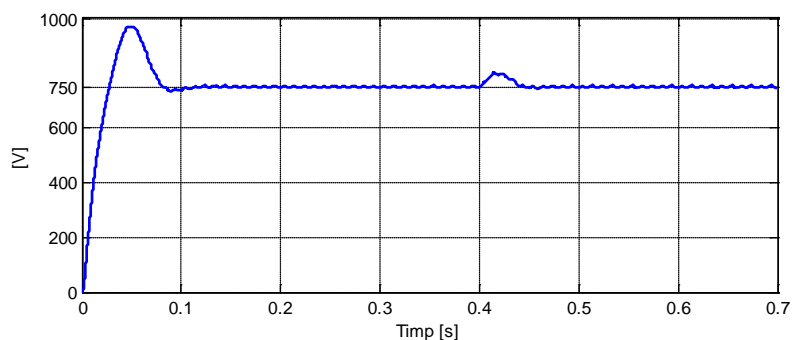


Figura 5. 31 Evoluția tensiunii pe bara de c.c. a CAP cu 3 nivele

Evoluția tensiunii pe bara de c.c este prezentată în figura 5.31. Se poate observa că perioada de încărcare a capacității este foarte scurtă și că după aceasta perioadă, nivelul tensiunii este menținut la valoarea impusa, 750V. În momentul în care sursa regenerabilă

începe să injecteze energie în sistem apare un soc. Acesta se reflectă printr-o ușoară oscilație la nivelul curentului.

În formă numerică, rezultatele obținute la conectarea în sistem a unui CAP comandat prin metoda indirectă și dezvoltat pe o structură de inverter cu 3 nivele de tensiune sunt prezentate în tabelul 5.5.

Tabelul 5. 5 Date de ieșire pentru CAP cu 3 nivele de tensiune

Indicator	U [V]			THD _u [%]			THD _i [%]			PF			U _{unb} [%]
	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
Structura	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	F1	F2	F3	
FAP	192	192	192	2.07	2.96	2.71	2.23	2.16	2.06	0.99	0.99	0.99	1.5
CAP	208	208	208	2.00	2.80	2.60	4.39	4.13	3.95	0.99	0.99	0.99	1.3

5.3 STAGIU EXTERN DE CERCETARE

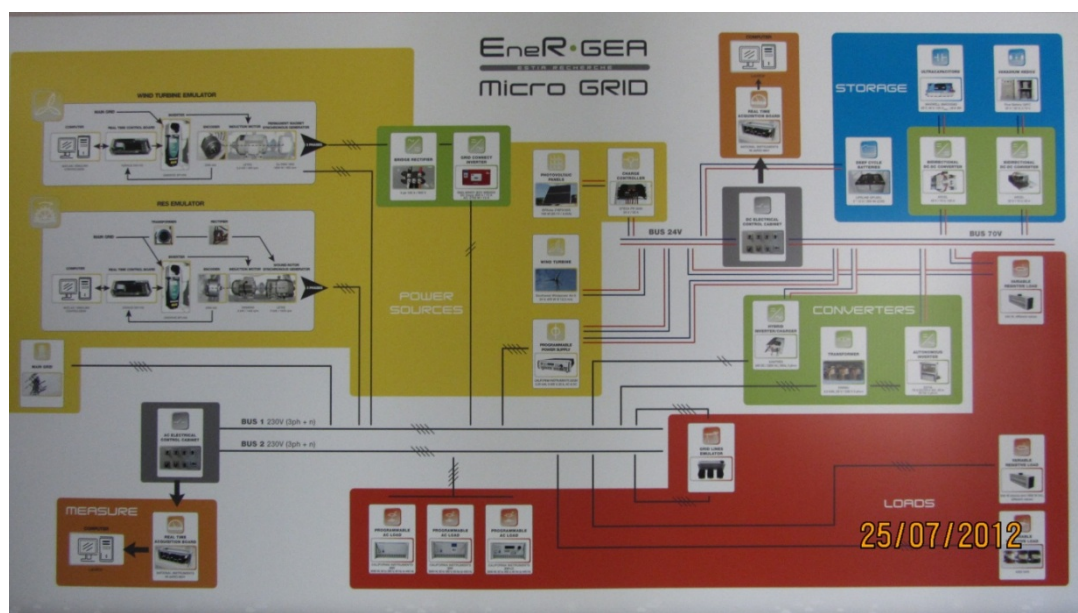


Figura 5. 32 Schema bloc a micro-rețelei existente în cadrul laboratorului ESTIA Research

În cadrul proiectului de cercetare științifică am efectuat un stagiu de cercetare, pe o perioadă de 4 luni, în laboratorul ESTIA Research din cadrul Ecole Supérieure des Technologies Industrielles Avancées (ESTIA), din localitatea Bidart, Franța. Scopul acestui stagiu a fost de a studia posibilitatea realizării și conectării unui CAP, dezvoltat pe structură cu 4 brațe și comandat prin metoda indirectă propusă, într-o micro-rețea de mică putere.

Micro-rețeaua este dezvoltată în jurul unui sistem electric de tip circular, distribuit pe două bare de curent alternativ, ce oferă posibilitatea de a realiza diverse scenarii. Ca și elemente componente ale micro-rețelei avem:

Surse de energie:

- panou fotovoltaic, montat în exterior pe acoperișul clădirii;
- eoliană de mică putere, montată la exterior;
- emulator eolian cu generator sincron cu magneți permanenți;
- emulator eolian cu generator sincron cu excitație separată;

- sursa de putere programabilă, de tip 2253i California Instruments;

Emulatoarele eoliene sunt antrenate de motoare asincrone, controlate prin intermediul convertizoarelor de frecvență UNIDRIVE.

Elemente de stocare a energiei:

- baterie de tip REDOX;
- acumulator cu acid;
- super-condensatori.

Elemente de conversie a energiei:

- invertor cu 4 brațe și structura cu 2 nivele de tensiune;
- invertor cu 4 brațe și structura cu 3 nivele de tensiune de tip NPC.

Alte elemente:

- sarcina programabilă, de tip 3091LD California Instruments;
- bobine cu diverse valori ale inductanței;
- rezistențe variabile;

Micro-rețeaua este gestionată prin folosirea unui sistem de calcul și a unei plăci de achiziție de tip SbRIO de la National Instruments.

Schema bloc a micro-rețelei este prezentată în figura 5.32.

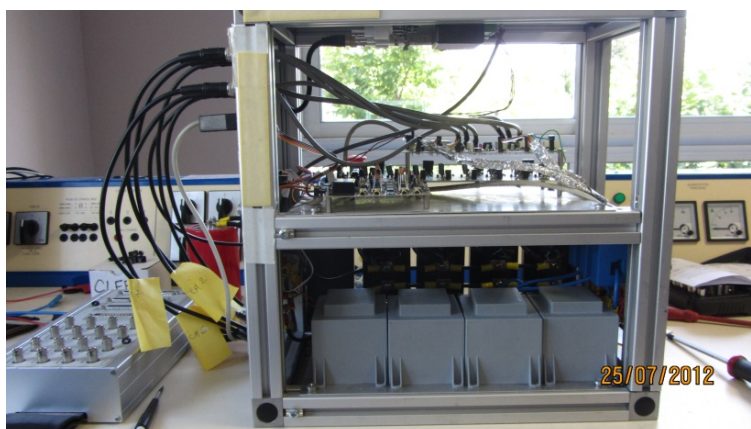


Figura 5. 33 Imagine de ansamblu invertor 4 brațe

Pentru atingerea obiectivului, s-a trecut la modificarea invertorului cu 4 brațe pentru ca acesta să poată fi folosit ca FAP. În imaginea din figura 5.33 este ilustrat invertorul cu 4 brațe. Trebuie menționat că, acesta este un prototip, elaborat în cadrul laboratorului ESTIA Research de către conf.dr.ing. Ionel VECHIU, ce poate suporta în configurația existentă o tensiune continuă de maximum 60V.

În cadrul laboratorului ESTIA, s-a încercat realizarea unui studiu folosindu-se o sarcina de 2kW, ce produce un THD de aproximativ 30%. Astfel, invertorul a suferit modificările:

- s-a calculat inductivitatea de filtrare de 3mH. Dimensionarea inductivității s-a realizat cu ajutorul softului "RALE Distribution and Power Transformer Design Software and Inductor Design Software" (ANEXA 4). Iar cu ajutorul dlui. Gimi Mihală, managerul S.C. L.G.M. EUTRONIC S.R.L., inductivitățile proiectate au fost produse în cadrul firmei, figura 5.34;

- pentru stocarea energiei din zona de c.c. a FAP, s-a ales un condensator produs de Itecond, de 3.9mF, tensiune maximă de 350V;

- s-a dimensionat divizorul de tensiune alternativă. Pentru ca sarcina programabilă să poată funcționa în regim neliniar, este necesară o tensiune minimă de 50 V. În acest scop, s-a dimensionat divizorul rezistiv pentru plaja de tensiune 0-100V;
- s-a dimensionat divizorul de tensiune continuă, astfel încât pentru plaja de 0-450V, acesta să ofere la ieșire 0-10V;
- s-a realizat punctul de conectare în avalul senzorilor de măsură a curentului, astfel încât să se poată aplica comanda indirectă;
- s-a introdus în sistem un întrerupător manual pentru cuplarea FAP;
- s-a realizat în dSPACE® interfața de comandă a FAP comandat prin metoda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe. Comanda fiind implementată cu ajutorul unei plăci dSPACE® 1103.

În figura 5.35 este prezentată imaginea FAP obținut prin modificările aduse inverterului existent.



Figura 5. 34 Imagine bobine de filtrare

Cu modificările aduse inverterului, s-au introdus datele elementelor fizice și s-au efectuat simulări în mediul de programare Matlab/Simulink, pentru a se putea observa eventualele probleme. Astfel, s-au soluționat următoarele:

- frecvența de comutație a IGBT-urilor existente este de maximum 25kHz. Ca și rezolvare, s-a implementat un regulator cu histerezis cu bandă variabilă, capabil de limitarea acesteia;
- șocul de curent apărut în momentul cuplării FAP. Pentru acesta s-a ales preîncărcarea capacității de c.c. O altă modalitate de limitare a constat în conectarea FAP în momentul în care tensiunea alternativă are valoarea maximă.

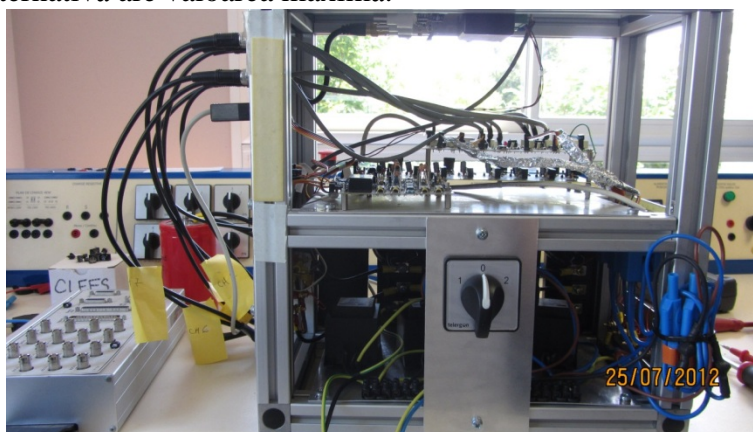


Figura 5. 35 FAP cu 4 brațe

Rezolvându-se problemele apărute, s-a continuat cu implementarea sistemului electric format din sursa programabilă, sarcina programabilă și FAP. Cum în urma analizei fișei tehnice a sursei programabile s-a constatat posibilitatea distrugerii acesteia, în cazul în care sensul curentului ar fi fost dinspre FAP spre aceasta, s-a renunțat la utilizarea ei și s-a încercat folosirea emulatorului eolian cu excitație separată. Problema întâlnită a constat în imposibilitatea de a fixa amplitudinea tensiunii la ieșirea generatorului, deoarece excitația separată era asigurată prin reglarea manuală a tensiunii. Astfel, s-a ales implementarea unui sistem de excitație automat, comandându-se dispozitivul ABB - UNITROL 1010, pentru generatorul existent.

Având în vedere că în perioada de 4 luni petrecută în stagiul de cercetare au apărut diverse probleme (parte din ele fiind soluționate), vor continua cercetările pentru implementarea CAP-ului, comandat prin metoda indirectă, într-o micro-rețea de putere redusă. Implementare realizabilă, datorită existenței unei strânse colaborări între cele două instituții de învățământ (Universitatea Dunărea de Jos Galați și ESTIA Bidart).

5.4 CONCLUZII

În prezentul capitol s-a prezentat un CAP dezvoltat pe o structura cu 4 brațe, comandat prin metoda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe, care permite conectarea în sistem a unei surse de energie regenerabile și asigură o calitate bună a energiei electrice.

De asemenea, s-a prezentat, sub forma unui studiu de caz, o analiză comparativă între două CAP dezvoltate pe structuri diferite. Una de invertor cu 2 nivele de tensiune și cealaltă de invertor cu 3 nivele de tensiune, comandate prin aceeași metodă, cea a controlului indirect dezvoltată pentru 4 brațe.

Analiza rezultatelor obținute arată că, ambele CAP folosite aduc reale îmbunătățiri ale indicatorilor de calitate ai energiei electrice, chiar și în condițiile în care se injectează și 50% din puterea necesară sarcinii. După cum era de așteptat, datorită structurii cu 3 nivele, rezultatele obținute implementând CAP dezvoltat pe o astfel de structură sunt mai bune.

În realitate, spre deosebire de studiul de caz prezentat, sursa regenerabilă nu produce o putere constantă, cunoscându-se faptul că producerea de energie electrică din surse regenerabile depinde de mai mulți factori care nu pot fi controlați (viteza vântului, radiația solară, etc.). În studiul de caz expus s-a considerat că puterea debitată de sursa regenerabilă este constată și injectată brusc începând cu momentul $t=0.4s$. Deoarece la conectarea sursei regenerabile nu s-au produs șocuri de tensiune și/sau curent, se consideră că CAP comandat prin metoda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe face față modificărilor aleatoare de putere ale sursei regenerabile.

Din cele prezentate mai sus, trebuie subliniat faptul că, prin folosirea în micro-rețelele electrice a unui dispozitiv de tip CAP, comandat prin metoda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe, constituie soluția optimă pentru îmbunătățirea calității energiei electrice și pentru cuplarea în sistem a altor surse de energie inclusiv, a surselor regenerabile.

În acest capitol s-a demonstrat că metoda de comandă indirectă dezvoltată pentru 4 brațe este o metodă ce poate fi implementată cu succes pe un dispozitiv de tip CAP, indiferent dacă acesta este dezvoltat pe o structură cu 2 nivele de tensiune sau multi-nivel.

CAPITOLUL 6

CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII

6.1 CONCLUZII FINALE

Calitatea energiei electrice constituie o problemă complexă și controversată. Complexitatea ei rezidă din multitudinea de factori ce o condiționează, din interdependența acestora, din lipsa unor metode și mijloace de obținere rapidă și, mai ales, precisă a informațiilor referitoare la unele mărimi ce o caracterizează. Abaterile indicatorilor de calitate ai energiei electrice determină daune la producători, operatorii de rețea, cât și la utilizatorii finali. Valorile limită ale nivelurilor admise ale perturbațiilor sunt stabilite pe baza unor studii privind daunele admisibile în condiții medii. Astfel, rezultă standardul calității energiei electrice livrată consumatorilor.

În Capitolul 1 se prezintă stadiul actual al problemelor de calitate a energiei electrice și al soluțiilor de îmbunătățire. Din subcapitolul 1.2, „Studiul calității energiei electrice la consumatori”, se observă că problemele de calitate ale energiei electrice implică mai mulți indicatori. Din acest motiv, abordarea unei singure soluții pentru rezolvarea problemelor ar fi indicată atât din punct de vedere tehnic, cât și economic. Rezultând, practic, o soluție de îmbunătățire prin utilizarea filtrelor active de putere, echipamente complexe care aduc îmbunătățiri mai multor indicatori.

După colectarea informațiilor cu privire la filtrele active de putere din literatura de specialitate în Capitolul 2 s-a început analiza metodelor de comandă. Astfel, în condiții de lucru identice, în mediul de programare Matlab/Simulink - SimPowerSystems, s-a modelat și simulat un sistem electric la care este racordat în paralel un filtru activ de putere. Pentru această analiză s-a folosit un sistem electric trifazat distribuit pe 3 fire, 3 faze fără nul, ce alimentează o sarcină perturbatoare. În acest sistem, în paralel cu sarcina se cuplează un FAP implementat pe structură cu 3 brațe. Scopul acestei analize a fost de a stabili metodele care conduc la obținerea unor rezultate bune, privind îmbunătățirea calității energiei electrice, pentru a avea un punct de plecare în dezvoltarea acestor metode de comandă și, în special, pentru a le implementa în comanda unui FAP cu 4 brațe ce a fost conectat într-un sistem distribuit pe 4 fire, 3 faze + nul.

Capitolul 3 cuprinde o descriere completă a 4 metode de comandă a unui FAP cu 4 brațe. Două dintre aceste metode sunt considerate metode clasice, datorită perioadei îndelungate de folosire a lor, iar celelalte 2 metode sunt nou propuse de către autor. Acestea din urmă sunt dezvoltări ale unor metode de comandă întâlnite în literatură, până la aceasta lucrare, pentru comanda filtrelor active cu 3 brațe. Rezultatele obținute prin simulare arată că cele 2 metode dezvoltate de către autor sunt un câștig real în dezvoltarea filtrelor active de putere.

În Capitolul 4 s-a prezentat o analiză comparativă a două filtre active de putere cu 4 brațe, comandate prin aceeași metodă de comandă construite pe două structuri, una de inverter cu 2 nivele de tensiune și cea de-a doua de inverter cu 3 nivele de tensiune (de tip NPC), ambele formate cu IGBT-uri. Pentru comanda lor s-a folosit metoda de comandă

indirectă pentru FAP cu 4 brațe propusă în aceasta teză. Deoarece s-a dorit realizarea analizei pentru o situație în care FAP ar putea fi realizate fizic, s-a limitat frecvența de comandă la 20kHz. Prin prezenta analiză s-a demonstrat că metoda de comandă indirectă dezvoltată pentru 4 brațe, propusă în aceasta teză, poate fi implementată cu succes și pe structuri de tip multinivel.

În cadrul Capitolului 5 s-a prezentat un Compensator Activ de Putere dezvoltat pe o structură cu 4 brațe, comandat prin metoda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe, care permite conectarea în sistem a unei surse de energie regenerabile și asigură o calitate bună a energiei electrice. În acest capitol s-a demonstrat că metoda de comanda indirectă dezvoltată pentru 4 brațe este o metodă ce poate fi implementată cu succes pe un dispozitiv de tip CAP, indiferent dacă acesta este dezvoltat pe o structură cu 2 nivele de tensiune sau multinivel.

În cadrul studiilor de caz create s-au urmărit indicatorii de calitate:

- variația amplitudinii tensiunii;
- nivelul total al armonicilor de tensiune, THD_u ;
- nivelul total al armonicilor de curent, THD_i ;
- factorul de putere, PF;
- nesimetria tensiunii de alimentare, U_{unb} .

În urma cercetării efectuate în cadrul acestei lucrări, în opinia autorului, se deschid următoarele perspective de dezvoltare:

- Implementarea practica a unui filtrului activ dezvoltat pe structura cu patru brațe astfel încât să se poată evidenția practic avantajele și dezavantajele structurii;
- Analiza eficienței unui compensator activ de putere dezvoltat pe o structură cu patru brațe;
- Implementarea experimentală a filtrelor active cu trei și respectiv patru brațe cu ajutorul plăcii de dezvoltare dSPACE 1103;
- Implementarea experimentală a filtrelor active cu trei și respectiv patru brațe cu ajutorul plăcii de dezvoltare sbRIO9632;
- Analiza posibilității de conectare a unei rețele de c.c. alimentate din zona de c.c. a filtrului activ de putere comandat prin metoda indirectă;
- Realizarea unui prototip de filtru activ de putere dezvoltat pe structura de inverter cu 3 nivele de tensiune.

6.2 CONTRIBUȚII

În opinia autorului contribuțiile aduse prin această lucrare sunt:

În Capitolul 1:

- efectuarea de măsurători pentru stabilirea stadiului actual al calității energiei electrice la diverși consumatori, considerați reprezentativi pentru zona de S-E a României;
- analiza rezultatelor obținute în urma măsurătorilor;
- colectarea și sintetizarea informațiilor întâlnite în literatura de specialitate.

În Capitolul 2:

- modelarea și simularea unui sistem electric de putere distribuit pe 3 fire ce conține un FAP, comandat prin 5 metode:
 - metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee (p-q);
 - metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron (d-q);
 - metoda de comandă dezvoltată pe principiul maximumului;

- metoda de comandă dezvoltată pe principiul de control indirect;
- metoda de comandă dezvoltată pe principiul sincronizării curentului circulat cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii.
- prezentarea rezultatelor numerice obținute în PCC;
- analiza comparativă a rezultatelor obținute cu cele 5 strategii de comandă modelate și simulate. Pentru această analiză s-au considerat următoarele criterii:
 - volum de calcul;
 - număr dispozitive de măsură;
 - rezultate obținute:
 - nivelul total al armonicilor de tensiune, THD_u ;
 - nivelul total al armonicilor de curent, THD_i ;
 - factorul de putere, PF.

În Capitolul 3:

- propunerea a două strategii de comandă a filtrelor active de putere:
 - metoda de comandă indirectă, dezvoltată pentru comanda unui FAP cu 4 brațe;
 - metoda de comandă ce are la bază principiul sincronizării curentului circulat cu componenta de secvență pozitivă a tensiunii, dezvoltată pentru comanda unui FAP cu 4 brațe.
- modelarea și simularea unui sistem electric de putere distribuit pe 4 fire ce conține un FAP, comandat prin metodele propuse și alte două metode prezentate în diverse lucrări:
 - metoda de comandă dezvoltată pe principiul puterilor instantanee (p-q-0);
 - metoda de comandă dezvoltată pe principiul algoritmului sincron (d-q-0).
- analiza rezultatele obținute cu cele două strategii de control, având în vedere următorii indicatori de calitate ai energiei:
 - nivelul total al armonicilor de tensiune, THD_u ;
 - nivelul total al armonicilor de curent, THD_i ;
 - factorul de putere, PF;
 - nesimetria tensiunii de alimentare, U_{unb} .
- analiza comparativă a rezultatelor obținute cu cele 4 strategii de comandă.

În Capitolul 4:

- modelarea și simularea unui sistem electric de putere distribuit pe 4 fire, ce conține un FAP dezvoltat pe două structuri de inverter (2 nivele, respectiv 3 nivele de tensiune, NPC), comandat prin metoda de comandă indirectă dezvoltată pentru comanda unui FAP cu 4 brațe;
- analiza rezultatele obținute cu cele două structuri;
- validarea prin simulare a bunei funcționari a unui FAP comandat prin metoda indirectă, dezvoltat pe o structura cu 4 brațe ,cu 3 nivele de tensiune de tip NPC

În Capitolul 5:

- modelarea și simularea unei micro-rețele electrice, ce conține un compensator activ de putere prin care se injectează energie de la o sursă regenerabilă;
- analiza rezultatelor obținute cu cele două structuri, având în vedere următorii indicatori de calitate a energiei:
 - variația amplitudinii tensiunii;
 - nivelul total al armonicilor de tensiune, THD_u ;
 - nivelul total al armonicilor de curent, THD_i ;
 - factorul de putere, PF;
 - nesimetria tensiunii de alimentare, U_{unb} .

- validarea prin simulare a bunei funcționării a unui CAP comandat prin metoda indirectă, dezvoltat pe o structură cu 4 brațe cu 2 respectiv 3 nivele de tensiune.

6.3 DISEMINAREA REZULTATELOR

LUCRĂRI ȘTIINȚIFICE COTATE ISI PROCEEDINGS:

1. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, “Control of 4-Leg Active Power Filter for Reactive Power and Unbalance Compensation”, 2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE), Issue Date: 16-18 Sept. 2010, On page(s): 183 – 186, ISBN: 978-1-4244-8406-5, Digital Object Identifier: 10.1109/ISEEE.2010.5628517
2. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Ionel VECHIU, Gelu GURGUIATU, “Improving Micro-Grid Power Quality Using Three-Phase Four-Wire Active Power Conditioners”, Proceedings of the 16th International Conference on System Theory, Control and Computing Joint Conference SINTES 16, SACCS 12, SIMSIS 16, ISBN 978-606-8348-48-3, 12 - 14 October, Sinaia, Romania
3. Gelu GURGUIATU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Toader MUNTEANU, “Reducing the Voltage Sags by Using Short-Term Storage Systems”, Proceedings of the 16th International Conference on System Theory, Control and Computing Joint Conference SINTES 16, SACCS 12, SIMSIS 16, ISBN 978-606-8348-48-3, 12 - 14 October, Sinaia, Romania

REVISTE BDI

4. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU and Olimpia GROZAVU, “Comparative Study of Three Phase 3-Leg Active Power Filters Connected to 4-Wire Electrical Systems”, Journal of Energy and Power Engineering 6 (2012) 1527-1535

REVISTE COTATE B+

5. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, Mihai OANĂ., “Improving the Power Factor at Unbalanced Consumers”, Revista Analele Universității “Dunărea de Jos” din Galați, Fascicula III, ELECTROTEHNICĂ ELECTRONICĂ AUTOMATICĂ INFORMATICĂ 2010, Volumul 33, Numărul 2, ISSN 1221-454X
6. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, „Three-Phase Active Power Filter Control Using Synchronous Reference System, Indirect and Maximum Method”, Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – Year 11 No. 3 (17), ISSN 1843-6188
7. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, „Three-Phase Active Power Filter Control Using Notch, Instantaneous P-Q Theory and Positive Sequence Method”, Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – Year 11 No. 3 (17), ISSN 1843-6188
8. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, “Comparation of Three Phase 4-Leg Shunt Active Filter Using Dq, Indirect and Maximum Control Method”, The Annals of “Dunarea De Jos” University of Galati, Fascicle III, Vol.34, No.1, 2011, ISSN 1221-454x, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics
9. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, “A New Solution to Improve the Power Quality în Lighting Systems”, Buletinul AGIR nr. 3/2012 iunie-august, pp. 665 – 670, ISSN 2247-3548
10. Toader MUNTEANU, Gelu GURGUIATU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, “Comparison Between Different Control Strategies For Shunt Active Power Filters”, Buletinul AGIR nr. 3/2012 iunie-august, pp. 385 – 390, ISSN 2247-3548

REVISTE NATIONALE

11. Gelu GURGUIATU, Emil ROSU, Toader MUNTEANU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Mihai OANCĂ, “*Comparison Between Different Control Strategies for Three Wire Active Power Filters*”, ISEEE Journal, 2010, pp 5-10, ISSN: 1844-8054

12. Mihai OANCĂ., Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, “*PLL Implementation Using FPGA for an Active Power Filter*”, ISEEE Journal, pp. 49-54, 2010, ISSN: 1844-8054

PARTICIPARE LA CONFERINTE INTERNATIONALE

13. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Toader MUNTEANU, Mariana Dumitrescu, Gelu Gurguiatu, Ciprian Vlad, „*Studies concerning the Quality of Electrical Energy into the Electromagnetic Supply Networks*” -- ISEE – 2008 The 2nd International Symposium on electrical and Electronics Engineering – September 12 – 13, 2008. Proceedings. Galati University Press ISSN 1842-8046.

14. Mariana DUMITRESCU, Toader MUNTEANU, Gelu GURGUIATU, Ciprian VLAD, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, “*Four-Wire Unbalanced Load Flow Simulation and Computation for a Power Delivery Network*”, University "Dunarea de Jos" of Galati, Romania IEEE 10th International Workshop "Computational Problems of Electrical Engineering" Waplewo, Poland 16-19 Sept 2009

15. Gelu GURGUIATU, Emil ROSU, Toader MUNTEANU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Elena RĂDUCAN, “*Active Power Filters Utilization To Increase Electrical Consumption Efficiency*”, The 10th Regional Energy Forum - FOREN 2010, June 13 – 17 2010, Neptun Olimp Romania

16. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, “*Comparison of Three Phase 4-leg Shunt Active Power Filter Algorithms*”, International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion, 8-10 September 2011 İstanbul, Turkey

17. Gelu GURGUIATU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Emil ROSU, Toader MUNTEANU, Mariana DUMITRESCU, Elena RADUCAN, “*Advanced Active Power Filter to Improve Power Quality*”, International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion, 8-10 September 2011 İstanbul, Turkey

18. Ionel VECHIU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ** and Gelu GURGUIATU, „*Three-Phase Four-Wire Active Power Conditioners for Weak Grids*”, 2012 International Conference on Power Science and Engineering ICPSE 2012 Hong Kong. December 29-30, 2012 – acceptata spre prezentare

PARTICIPARE LA CONFERINTE NATIONALE

19. **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECĂU, „*Studiu de caz: soluție pentru îmbunătățirea calității energiei electrice la un consumator industrial din domeniul siderurgic*”, AL IX-LEA SIMPOZION NAȚIONAL, CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE CEE 2011 Târgoviște, pp 174-182, 20-21 octombrie 2011

20. Gelu GURGUIATU, **Ciprian BĂLĂNUȚĂ**, Toader MUNTEANU, Mariana DUMITRESCU, „*Soluții pentru îmbunătățirea calității energiei în rețelele electrice*”, AL IX-LEA SIMPOZION NAȚIONAL, CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE CEE 2011 Târgoviște, pp 162-173, 20-21 octombrie 2011

6.4 MULȚUMIRI

Elaborarea acestei teze a fost realizată cu suportul financiar al proiectului POSDRU cod 88/1.5/S/61445 - Eficientizarea activității studenților din cadrul ciclului de studii doctorale-EFICIENT.

BIBLIOGRAFIE

- selectivă -

- [AKA 07] Hirofumi Akagi, Edson Hirokazu Watanabe and Mauricio Aredes, "Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning", IEEE PRESS, Wiley-Interscience A John Wiley&Sons, INC., Publication, ISBN 978-0-470-10761-4
- [BAL 08] Balanuta C., Munteanu T., Dumitrescu M., Gurguiatu G., Vlad C., „Studies concerning the Quality of Electrical Energy into the Electromagnetic Supply Networks” -- ISEE – 2008 The 2nd International Symposium on electrical and Electronics Engineering – September 12 – 13, 2008. Proceedings. Galati University Press ISSN 1842-8046.
- [BAL 10a] Balanuta C., Gurguiatu G., Munteanu T., Fetecau G. “Control of 4-leg active power filter for reactive power and unbalance compensation”, Publication ISEEE 2010.
- [BAL 10b] BĂLĂNUȚĂ C., GURGUIATU G., MUNTEANU T., FETECĂU G., OANCĂ M., “Improving the power factor at unbalanced consumers”, Revista Analele Universității “Dunărea de Jos” din Galați, Fascicula III, ELECTROTEHNICĂ ELECTRONICĂ AUTOMATICĂ INFORMATICĂ 2010, Volumul 33, Numărul 2, ISSN 1221-454X
- [BAL 11a] Ciprian BALANUTA, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECAU, „THREE-PHASE ACTIVE POWER FILTER CONTROL USING SYNCHRONOUS REFERENCE SYSTEM, INDIRECT AND MAXIMUM METHOD”, Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – Year 11 No. 3 (17), ISSN 1843-6188
- [BAL 11b] Ciprian BALANUTA, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECAU, „THREE-PHASE ACTIVE POWER FILTER CONTROL USING NOTCH, INSTANTANEOUS P-Q THEORY AND POSITIVE SEQUENCE METHOD”, Scientific Bulletin of the Electrical Engineering Faculty – Year 11 No. 3 (17), ISSN 1843-6188
- [BAL 11c] Ciprian BALANUTA, Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECAU, “COMPARASION OF THREE PHASE 4-LEG SHUNT ACTIVE FILTER USING DQ, INDIRECT AND MAXIMUM CONTROL METHOD”, The Annals of “Dunarea De Jos” University of Galati, Fascicle III, Vol.34, No.1, 2011, ISSN 1221-454x, Electrotechnics, Electronics, Automatic Control, Informatics
- [BAL 11d] “Comparison of Three Phase 4-leg Shunt Active Power Filter Algorithms”, BALANUTA Ciprian, GURGUIATU Gelu, MUNTEANU Toader, FETECAU Grigore, International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion, 8-10 September 2011 İstanbul, Turkey
- [BAL 11e] BALANUTA C., GURGUIATU G., MUNTEANU T., FETECAU G., „Studiu de caz: solutie pentru imbunatatirea calitatii energiei electrice la un consumator industrial din domeniul siderurgic”, AL IX-LEA SIMPOZION NAȚIONAL, CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE CEE 2011 Târgoviște, pp 174-182, 20-21 octombrie 2011
- [BAL 12] Ciprian BALANUTA , Gelu GURGUIATU, Toader MUNTEANU, Grigore FETECAU, “A NEW SOLUTION TO IMPROVE THE POWER QUALITY IN LIGHTING SYSTEMS”, Buletinul AGIR nr. 3/2012 iunie-august, pp. 665 – 670, ISSN 2247-3548
- [BAR 00] Barry W. Kennedy, Power Quality Primer, 0-07-150024-3, 2000
- [BAR 07] Barnes, M., Kondoh, J., Asano, H., Oyarzabal, J., Ventakaramanan, G., Lasseter, R., Hatziargyriou, N., Green, T., “Real-World MicroGrids-An Overview”, System of Systems Engineering, 2007. SoSE '07. IEEE International Conference on, 1-4244-1 160-2/07, 2007 IEEE.
- [CAP 02] S. L. Capitaneanu, “Optimisation de la fonction MLI d’un onduleur de tension deux niveaux”, *Thèse de Doctorat*, Institut National Polytechnique de Toulouse, Toulouse, France, Novembre 2002.

- [CHA 04] G.W. Chang & T.-C. Shee. "A novel reference compensating current strategy for shunt active power filter control", *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 19, No. 4, pp. 1751-1758, October 2004.
- [DIR 01] Dirk Detjen, Joep Jacobs, Rik W. De Doncker and Hans-Georg Mall, "A New Hybrid Filter to Dampen Resonances and Compensate Harmonic Currents in Industrial Power Systems With Power Factor Correction Equipment", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 16, NO. 6, NOVEMBER 2001
- [DUG 02] Dugan R.C., "Electrical Power Systems Quality", Second Edition, McGraw-Hill, 2002.
- [EWA 08] Ewald F. Fuchs, Mohammad A.S. Masoum, "Power Quality in Power Systems and Electrical Machines", Elsevier Inc. 2008, ISBN 978-0-12-369536-9.
- [FLO 08] Dan FLORICAU, Dragos KISCH, Ioan POPA, "TOTAL LOSS DISTRIBUTION IN THREE-LEVEL STACKED NPC CONVERTER", *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, No. 32, 2008; ISSN 1842-4805
- [GOL 01] Golovanov Carmen, Albu Mihaela, "Probleme moderne de măsurare în electroenergetică", Editura Tehnică, București, 2001.
- [GRE 05] Green, T.C.; Marks, J.H.; "Control techniques for active power filters," *IEE Proceedings-Electric Power Application*, Vol. 152, no. 2, pp. 369-381, 2005.
- [GUO 10] Guojun Tan, Xuanqin Wu, Hao Li, Meng Liu, "Novel Control Strategy for Multi-Level Active Power Filter without Phase-Locked-Loop", *Energy and Power Engineering*, 2010, 2, 262-270
- [GUR 10] GURGUIATU G., ROȘU E., MUNTEANU T., BĂLĂNUȚĂ C., RĂDUCAN E., "Active power filters utilization to increase electrical consumption efficiency", *The 10th Regional Energy Forum - FOREN 2010*, June 13 – 17 2010, Neptun Olimp Romania
- [GUR 11a] "Advanced Active Power Filter to Improve Power Quality", Gelu GURGUIATU, Ciprian BALANUTĂ, Emil ROSU, Toader MUNTEANU, Mariana DUMITRESCU, Elena RADUCAN, *International Aegean Conference on Electric Machines and Power Electronics & Electromotion*, 8-10 September 2011 İstanbul, Turkey
- [GUR 11b] Gelu GURGUIATU, Ciprian BALANUTA, Toader MUNTEANU, Mariana DUMITRESCU, „Soluții pentru îmbunătățirea calitatii energiei în rețelele electrice”, *AL IX-LEA SIMPOZION NAȚIONAL, CALITATEA ENERGIEI ELECTRICE CEE 2011 Târgoviște*, pp 162-173, 20-21 octombrie 2011
- [GUR 11c] GURGUIATU Gelu, "Contribuții privind controlul filtrelor active în vederea reducerii conținutului de armonici din rețelele electrice", *UNIVERSITATEA "DUNĂREA DE JOS" DIN GALAȚI*, Galați 2011, Teză de doctorat
- [HID 00] Hideaki Fujita, Takahiro Yamasaki, and Hirofumi Akagi, "A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 15, NO. 2, MARCH 2000.
- [HOL 94] J. Holtz, "Pulsewidth modulation for electronic power conversion", *Proc. of the IEEE*, vol. 82, pp. 1194–1214, August, 1994.
- [HYO 02a] Hyosung Kim, Frede Blaabjerg, and Birgitte Bak-Jensen, "Spectral Analysis of Instantaneous Powers in Single-Phase and Three-Phase Systems With Use of p–q–r Theory", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 17, NO. 5, SEPTEMBER 2002.
- [HYO 02b] Hyosung Kim, Frede Blaabjerg, Birgitte Bak-Jensen and Jaeho Choi, "Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p–q–r Theory", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 17, NO. 5, SEPTEMBER 2002
- [JIN 02] Jintakosonwit Pichai, Hirofumi Akagi, Hideaki Fujita, and Satoshi Ogasawara, "Implementation and Performance of Automatic Gain Adjustment in a Shunt Active Filter for Harmonic Damping Throughout a Power Distribution System", *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 17, NO. 3, MAY 2002.

- [KAL 05] Murat Kale, Engin Ozdemir, “An adaptive hysteresis band current controller for shunt active power filter”, *Electric Power Systems Research* 73 (2005) 113–119
- [LAS 02] R.H.Lasseter, Fellow, IEEE,” MicroGrids”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, 305 - 308 vol.1 Conference Publications
- [MOR 95] L. A. Morán, J. Dixon, & R. R. Wallace, “A three-phase active power filter operating with fixed switching frequency for reactive power and current harmonic compensation”, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 42, No. 4, pp. 402–408, August 1995.
- [PAT 10] Patricio Salmeron and Salvador P. Litran, A Control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Systems, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 25, NO. 7, JULY 2010
- [PER 08] E. Perea, J. M. Oyarzabal, R. Rodriguez, “Definition, evolution, applications and barriers for deployment of microgrids in the energy sector”, *Elektrotechnik & Informationstechnik* (2008) 125/12: 432–437. DOI 10.1007/s00502-008-0595-z
- [PIC 02] Pichai Jintakosonwit, Hideaki Fujita, and Hirofumi Akagi, “Control and Performance of a Fully-Digital-Controlled Shunt Active Filter for Installation on a Power Distribution System”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 17, NO. 1, JANUARY 2002
- [ROS 08] E. Rosu, M. Culea, T. Dumitriu, T. Munteanu, R. Paduraru: “Active Power Filter with Indirect Control for Line-Frequency Controlled Rectifiers”, Publication ISEEE 2008.
- [SAL 10] Patricio Salmeron and Salvador P. Litran, A Control Strategy for Hybrid Power Filter to Compensate Four-Wires Three-Phase Systems *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 25, NO. 7, JULY 2010
- [SAL 11] Chennai Salim, Benchouia M.T, Goléa A, and S.E. Zouzou, “Shunt Active Filter based on three-level (NPC) Inverter using Current and DC Voltage Artificial Neural Network Controllers”, *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)* Vol. 1 (2011) No. 1, pp. 523-528 ISSN 2078-2365
- [SAN 02] Sangsun Kim, and Prasad N. Enjeti, “A New Hybrid Active Power Filter (APF) Topology”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 17, NO. 1, JANUARY 2002.
- [SOL 11] Q. Fu, A. Solanki, L. F. Montoya, Student Members, IEEE, A. Nasiri, Senior Member, IEEE, V. Bhavaraju, Senior Member, IEEE, T. Abdallah, and D. Yu, Senior Member, IEEE, “Generation Capacity Design for a Microgrid for Measurable Power Quality Indexes” 978-1-4577-2159-5/12, 2011 IEEE
- [TRZ 98] A. M. Trzynadlowski, “Introduction to modern power electronics”, Chapter 2, pp. 65-91, & Chapter 7, pp. 273-364, Ed. John Wiley & Sons, New York, 1998.
- [WEI 06] Yun Wei Li, Student Member, IEEE, D. Mahinda Vilathgamuwa, Senior Member, IEEE, and Poh Chiang Loh, Member, IEEE, “A Grid-Interfacing Power Quality Compensator for Three-Phase Three-Wire Microgrid Applications”, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 21, NO. 4, JULY 2006
- [WOO 02] Woo-Cheol Lee, Taek-Kie Lee, and Dong-Seok Hyun A Three-Phase Parallel Active Power Filter Operating With PCC Voltage Compensation With Consideration for an Unbalanced Load, *IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS*, VOL. 17, NO. 5, SEPTEMBER 2002.