

UNIVERSITATEA "DUNĂREA DE JOS" DIN GALAȚI
FACULTATEA DE AUTOMATICĂ CALCULATOARE
INGINERIE ELECTRICĂ ȘI ELECTRONICĂ



**Contribuții privind controlul filtrelor active
în vederea reducerii conținutului
de armonici din rețelele electrice**

- Rezumatul tezei de doctorat -

Ing. Gelu GURGUIATU

**Coordonator științific,
Prof. dr. ing. Emil Mina ROȘU**

- Galați 2011 -

ROMÂNIA
MINISTERUL EDUCAȚIEI, CERCETĂRII, TINERETULUI ȘI SPORTULUI
UNIVERSITATEA DUNĂREA DE JOS DIN GALAȚI

Strada Domnească nr. 47, cod poștal 800008
Galați, România
E-mail: rectorat@ugal.ro



Tel.: (+4) 0336-130.109; 0336-130.108; 336-130.104
Fax: (+4) 0236 - 461.353
www.ugal.ro

C7449/2-08-2011

Către

Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați vă face cunoscut că în data de _____, ora _____, în _____, va avea loc susținerea publică a tezei de doctorat intitulată : "CONTRIBUȚII PRIVIND CONTROLUL FILTRELOR ACTIVE ÎN VEDEREA REDUCERII CONȚINUTULUI DE ARMONICI DIN REȚELELE ELECTRICE", elaborată de domnul/doamna ing. GURGUIATU GELU, în vederea conferirii titlului științific de doctor în Domeniul de doctorat - Inginerie electrică.

Comisia de doctorat are următoarea componență :

- 1. Președinte:** Prof.univ.dr.ing. Dorel AIORDĂCHIOAIE
Decan – Facultatea de Automatică, Calculatoare, Inginerie Electrică și Electronică
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- 2. Conducător de doctorat:** Prof.univ.dr.ing. Emil ROȘU
Universitatea "Dunărea de Jos" din Galați
- 3. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Nicolae GOLOVANOV
Universitatea POLITEHNICA din București
- 4. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Florin IONESCU
Universitatea POLITEHNICA din București
- 5. Referent oficial:** Prof.univ.dr.ing. Emil CEANGĂ
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 7461353


Prof. dr. ing. Viorel MÎNZU

SECRETAR DOCTORAT,

Ing. Luiza AXINTE

Soției mele Monica

MULȚUMIRI

Doresc să-mi exprim pe această cale considerația și recunoștința pentru conducătorul științific, domnul Prof. dr. ing. Emil Mina ROȘU, căruia îi mulțumesc pentru îndrumarea și sprijinul constant pe toată durata de pregătire a tezei.

Alese mulțumiri adresez domnului Prof. dr. ing. Toader MUNTEANU, care alături de echipa MECENER a făcut posibilă implementarea experimentală a soluțiilor propuse în cadrul tezei.

Mulțumirile și recunoștința mea se îndreaptă de asemenea către domnul maître de conférences Ionel VECHIU care a avut un aport important la realizarea tezei.

În același timp vreau să adresez mulțumiri colegilor din cadrul Departamentului de Automatică și Inginerie Electrică, în special domnilor Cristian VASILACHE și Ciprian BĂLĂNUȚĂ, care au fost alături de mine pe toată perioada de pregătire a tezei.

CUPRINS

Introducere.....	1
Cap. 1 Stadiul actual al cunoașterii în construcția și controlul filtrelor active de putere .3	
1.1. Concluzii privind stadiul actual al cunoașterii relativ la filtrele active de putere	3
Cap. 2 Structura și comanda filtrelor active de putere de tip paralel cu trei brațe.....5	
2.1. Topologia filtrelor active paralel.....	5
2.1.1. Topologie de filtru activ – inverter cu sursă de tensiune	5
2.1.2. Topologie de filtru activ – inverter sursă de curent	6
2.1.3. Topologie filtru activ – inverter cu sursă de tensiune divizată	6
2.2. Determinarea inductivităților L_f	7
2.3. Determinarea capacităților C_1 și C_2	8
2.4. Concluzii.....	11
Cap. 3 Contribuții la modelarea și simularea structurilor de comandă a filtrelor active de putere cu 3 fire..... 12	
3.1. Comanda filtrelor active utilizând conceptul de putere instantanee - PQ.....	13
3.1.1. Descrierea modelului matematic.....	13
3.1.2. Rezultate numerice.....	14
3.2. Comanda filtrelor active utilizând transformata DQ.....	15
3.2.1. Descrierea modelului matematic.....	15
3.2.2. Rezultate numerice.....	16
3.3. Comanda filtrelor active prin metoda separării componentelor poluante (SCP)	17
3.3.1. Descrierea modelului matematic.....	17
3.3.2. Rezultate numerice.....	18
3.4. Comanda filtrelor cu invertoare trifazate de tensiune utilizând controlul indirect (CI)20	
3.4.1. Descrierea modelului matematic.....	20
3.4.2. Rezultate numerice.....	22
3.5. Studiu comparativ privind rezultatele filtrelor active cu 3 fire modelate și simulate ...	24
3.5.1. Reducerea regimului deformant.....	24
3.5.2. Curentul absorbit de la sursă.....	25
3.5.3. Corectarea factorului de putere	26
3.6. Concluzii	27
Cap. 4 Contribuții la modelarea și simularea structurilor de comandă a filtrelor active de putere cu 4 fire..... 28	
4.1. Comanda filtrelor active cu 4 fire utilizând conceptul de putere instantanee - PQ.....	28
4.1.1. Modelul matematic	29
4.1.2. Rezultate numerice.....	30
4.2. Comanda filtrelor active cu 4 fire utilizând transformata DQ	31
4.2.1. Modelul matematic	32
4.2.2. Rezultate numerice.....	32
4.3. Comanda filtrelor cu invertoare trifazate de tensiune utilizând controlul indirect extins (CIE).....	33
4.3.1. Modelul matematic	34
4.3.2. Rezultate numerice.....	36
4.4. Studiu comparativ privind rezultatele filtrelor active cu 3 brațe și 4 fire.....	37
4.4.1. Reducerea regimului deformant.....	38

4.4.2.	Curentul absorbit de la sursă.....	39
4.4.3.	Corectarea factorului de putere.....	39
4.5.	Concluzii.....	40
Cap. 5	Contribuții la diversificarea aplicabilității filtrelor active de putere.....	42
5.1.	Utilizarea energiilor regenerabile pentru îmbunătățirea calității energiei electrice.....	42
5.1.1.	Injecția de energie din sursa regenerabilă având o sarcină inductivă.....	43
5.2.	Echilibrarea curentului absorbit de la sursă în cazul consumatorilor fără conductor de neutru.....	44
5.3.	Echilibrarea curentului absorbit de la sursă în cazul consumatorilor cu conductor de neutru.....	45
5.4.	Echilibrarea tensiunilor în punctul de conexiune comună în cazul consumatorilor fără conductor de neutru.....	46
5.5.	Echilibrarea tensiunilor în punctul de conexiune comună în cazul consumatorilor cu conductor de neutru.....	47
5.6.	Concluzii.....	48
Cap. 6	Stand experimental de dezvoltare a soluțiilor de îmbunătățire a calității energiei electrice.....	49
6.1.	Stand experimental.....	49
6.2.	Sistemul de achiziție și control.....	51
6.3.	Rezultate experimentale.....	51
6.3.1.1.	Compensarea regimului deformant.....	53
6.3.1.2.	Corectarea factorului de putere.....	54
6.4.	Concluzii.....	56
Cap. 7	Concluzii și perspective.....	58
Bibliografie.....		61

Introducere

Energia electrică este o marfă pe care o cumpărăm cu toții așa cum ne este ea furnizată de către operatorul de furnizare. Spre deosebire de toate celelalte mărfuri, la care ne punem problema calității acestora la achiziționare și avem posibilitatea de a alege, în ceea ce privește calitatea energiei electrice această trebuie să fie o preocupare atât a operatorului de furnizare cât și a consumatorului final deopotrivă. De asemenea, dacă la orice alte produse putem spune despre calitate că ridică prețul acestora, în cazul energiei electrice se poate spune că respectând anumite standarde de calitate, prețul acesteia reflectat în bugetul consumatorului poate chiar să scadă.

În vederea eficientizării consumului de energie electrică luarea unor măsuri unilaterale poate afecta defavorabil calitatea energiei electrice iar rezultatele la nivel global pot fi defavorabile atât pentru furnizorul de energie electrică dar și pentru consumator.

În ceea ce privește calitatea energiei electrice, indiferent cum aceasta este percepută: calitatea produsului energie electrică, calitatea serviciului de alimentare cu energie electrică, calitatea sistemului automat ierarhizat în care se produce energia electrică, ea este apreciată pe baza indicatorilor de calitate, indicatori de calitate ce pot fi specifici sau globali.

Calitatea alimentării cu energie electrică este influențată de două grupe de fenomene: fenomene aleatoare (supratensiuni tranzitorii, întreruperi de scurtă și lungă durată, goluri de tensiune) și fenomene permanente și semipermanente (variații rapide sau lente de tensiune, nesimetrii de curent și tensiune, armonici). Dintre acestea, printre cele mai frecvent întâlnite și cu efecte mai importante sunt: prezența armonicilor de curent și a armonicilor de tensiune precum și nesimetriile tensiunilor și curenților de alimentare.

Problema calității energiei electrice nu mai este percepută doar la un nivel consumatorilor mari ci aceasta capătă contur inclusiv la puteri reduse ale consumatorilor conectați sau neconectați în sistemul electric. Mai mult decât atât, aceasta este importantă chiar acolo unde producția de energie electrică este locală formându-se așa numitele rețele izolate.

Producerea de energie electrică din surse regenerabile capătă contur nu numai în rețelele izolate ci și acolo unde se utilizează rețeaua electrică națională iar potențialul regenerabil este generos. În acest mod se naște ideea utilizării de energie electrică obținută din surse regenerabile și suplinită din sursa clasică, atunci când sursa regenerabilă nu este disponibilă.

Se disting așadar trei categorii de rețele electrice: rețeaua electrică națională care este caracterizată de o putere de scurtcircuit foarte mare, rețele electrice izolate la care toată energia tranzitată este produsă local și la care puterea de scurtcircuit este limitată și rețelele electrice hibride în care se regăsesc interconectate celelalte două tipuri.

Indiferent de tipul de rețea existentă, echipamentele electrice care utilizează energia tranzitată prin aceste rețele sunt aceleași din punctul de vedere al parametrilor de intrare (tensiune nominală, frecvență nominală, formă de undă etc.). Pornind de la această accepțiune este evident că limitele de variație a indicatorilor de calitate sunt aceleași, în toate tipurile de rețea electrică, pentru o funcționare corespunzătoare a receptoarelor electrice.

Cele două concepte respectiv de eficientizare a consumului și de utilizare de energie regenerabilă, acolo unde este posibil, pot conduce la un cost al energiei electrice substanțial redus.

În acest context, cercetarea prezentată în continuare reprezintă o contribuție la dezvoltarea sistemelor cu structură de filtre active, ca sisteme integratoare, ameliorând deopotrivă o bună parte a

indicatorilor de calitate a energiei electrice atât în rețele fără conductor de neutru cât și în rețele cu conductor neutru.

Cercetarea prezentată în continuare este structurată pe șapte capitole:

În primul capitol se prezintă stadiul actual al cunoașterii în ceea ce privește construcția și controlul filtrelor active care au rolul de a reduce nivelul armonic din rețelele electrice. De asemenea se face referire la cauzele care produc regimul deformant dar și la limitele admise raportate la normativele în vigoare. Soluțiile disponibile astăzi sunt trecute în revistă și clasificate după mai multe criterii.

Având în vedere că la încercările prezentate în această lucrare s-a utilizat o punte trifazată cu trei brațe respectiv șase comutatoare statice în cel de al doilea capitol au fost prezentate topologiile și tehnicile de comandă cunoscute și utilizate la sistemele cu funcție de filtre active.

De asemenea, în cadrul aceluiași capitol s-a propus o nouă metodă de calcul a elementelor pasive din cadrul filtrelor active. Aceste elemente sunt capacitățile din partea de c.c. a filtrului activ și inductivitățile de conectare la rețea a acestuia. Metoda de calcul propusă se bazează pe principiul conservării energiei electrice.

În capitolul trei sunt modelate și simulate utilizând mediul MATLAB/SymPowerSystem rețeaua electrică, sarcina deformantă cât și filtrul activ. În cadrul filtrului activ sunt utilizate patru tehnici de comandă: tehnica puterilor instantanee (PQ); tehnica referințelor sincrone (DQ); tehnica separării componentei poluante (SCP); tehnica denumită control indirect (CI). Toate tehnicile amintite sunt modelate și simulate pentru sisteme trifazate fără conductor de neutru.

În cea de a doua parte a capitolului sunt analizate și prezentate strategiile de comandă implementate din punct de vedere al rezultatelor obținute în rețeaua electrică.

În capitolul patru sunt prezentate dezvoltările tehnicilor de comandă de la sistemele trifazate fără conductor de neutru la sistemele trifazate cu conductor de neutru. Astfel sunt analizate rezultatele utilizării filtrelor active în sisteme trifazate cu conductor de neutru prin simulare. Strategiile de comandă simulate sunt: strategia puterilor instantanee (PQ); strategia referințelor sincrone (DQ); strategia controlului indirect extins (CIE).

De asemenea, sunt analizate din punct de vedere electric efectele implementării filtrelor active în rețelele electrice cu conductor de neutru.

Capitolul cinci pune în evidență ameliorarea altor indicatori de calitate a energiei electrice în condițiile utilizării filtrelor active cum ar fi echilibrarea curenților absorbiți de la sură și echilibrarea tensiunilor în punctul de conexiune comună (P_{CC}). De asemenea, în acest capitol se propune valorificarea resurselor regenerabile prin intermediul filtrului activ care capătă denumirea de condiționar de rețea.

Realizarea standului experimental este prezentată în cadrul capitolului șase. Acesta poate genera în condiții de laborator diverse regimuri de funcționare pentru diverse tipuri de sarcini. De asemenea, în cadrul standului experimental, prin conceptul „Hardware In the Loop” (HIL) s-a realizat și filtrul activ care permite implementarea diverselor strategii de comandă pentru a putea fi evaluate. Comanda filtrului activ s-a realizat utilizând mediul de programare grafic LabVIEW.

De asemenea sunt prezentate rezultatele obținute pe standul experimental.

În final, principalele contribuții aduse cunoașterii prin această lucrare cât și perspectivele deschise sunt sintetizate în capitolul de concluzii și perspective.

Cap. 1 Stadiul actual al cunoașterii în construcția și controlul filtrelor active de putere

Filtrele active de putere sunt echipamente electronice capabile să reducă regimul deformant și absorbția de putere reactivă întâlnite în rețelele electrice de transport și distribuție a energiei electrice. Regimul deformant se regăsește în rețelele electrice datorită consumatorilor neliniari conectați la acestea.

Din punct de vedere al topologiei filtrelor active de putere acestea sunt clasificate în două mari categorii:

- filtre active de putere pentru rețele fără conductor de neutru;
- filtre active de putere pentru rețele cu conductor de neutru.

Din punct de vedere al tehnicilor de comandă pentru filtrele active de putere acestea se clasifică după două mari criterii:

- filtre active de putere cu comandă în buclă deschisă;
- filtre active de putere cu comandă în buclă închisă.

În lucrarea de față se consideră pentru analiză și dezvoltare structurile de filtre active de putere cu comandă în buclă închisă.

În această direcție, au fost analizate strategiile de comandă atât pentru filtrele active fără conductor de neutru cât și pentru filtrele active cu conductor de neutru.

Strategiile simulate și analizate în cadrul acestei lucrări sunt: Strategia PQ (Comanda filtrelor active utilizând conceptul de putere instantanee); strategia DQ (Comanda filtrelor active utilizând transformata DQ); strategia SCP (Comanda filtrelor active utilizând separarea componentelor poluante).

Au fost dezvoltate și fundamentate matematic strategiile CI (control indirect) și CIE (control indirect xtins)

1.1. Concluzii privind stadiul actual al cunoașterii relativ la filtrele active de putere

În acest capitol se prezintă stadiul actual al cunoașterii în ceea ce privește construcția și controlul filtrelor active.

Pornind de la problemele reale cu care se confruntă rețelele electrice la care sunt conectați consumatorii neliniari, de-a lungul timpului s-au propus diverse soluții pentru remedierea acestora. Problemele despre care se face vorbire, se referă strict la eficiența conversiei energiei.

De asemenea, s-au prezentat în acest capitol indicatorii de calitate a energiei electrice și limitele admise pentru aceștia.

Atât pentru regimul nesimetric, cât și pentru cel deformant, definițiile din normativele românești sunt în concordanță cu normele europene. De asemenea, definirea parametrilor, corelată cu probabilitatea de realizare a valorilor (95%, respectiv 99%), este în concordanță cu normele internaționale.

Problema evaluării urmărilor suprapunerii efectelor mai multor consumatori ca și "împărțirea" nivelului de planificare între consumatori rămâne în atenția specialiștilor în domeniu.

De remarcat că normativul PE 143/94 specifică necesitatea existenței unui aparat care să permită determinarea parametrilor utili caracterizării calității energiei electrice.

„Curățarea” rețelelor electrice de curenții armonici se poate face prin două metode:

- construind consumatori care absorb curent sinusoidal din rețea;
- utilizând filtre, alături de consumatorii neliniari, care elimină distorsiunea armonică din rețea.

Cea de a-II-a abordare prezintă interes pentru lucrarea de față deoarece este evidentă preocuparea cercetătorilor pentru dezvoltarea acestor filtre, dintr-un motiv lesne de înțeles – în momentul de față există și se construiesc în continuare consumatori care nu absorb un curent sinusoidal din rețea.

Parcurgând punctele de vedere, din care diverși cercetători au abordat problematica filtrelor active, și de asemenea multitudinea de probleme de calitate a energiei electrice existente în rețelele electrice, rezultă necesitatea dezvoltării filtrelor active ca o soluție integratoare. Această soluție integratoare, trebuie să aducă în limitele prevăzute de normative nu numai un singur indicator de calitate ci un număr cât mai mare de astfel de indicatori.

Dezvoltarea filtrelor active pentru ca acestea să devină o soluție pentru îmbunătățirea globală a calității energiei electrice și nu numai a unui indicator al acesteia, se poate face prin strategia de control a filtrului activ.

Indicatorii de calitate a energiei electrice care trebuie aduși în limitele prevăzute de normativele în vigoare se referă în special la: controlul THD_U și THD_I ; controlul tranzitului de energie reactivă; echilibrarea curenților absorbiți din sistemele trifazate, echilibrarea tensiunilor în P_{CC} ; reducerea efectului de flicker și nu în ultimul rând la utilizarea resurselor regenerabile (Gelu, Ionel și Toader 2011).

Dacă prin conceptul de calitate a energiei electrice se înțelege nu numai indicatorii acesteia, ci și condiția ca o parte din energia consumată să fie produsă local din diverse surse regenerabile atunci strategia de comandă a filtrului activ trebuie să înglobeze această condiție.

Aceste sisteme integratoare trebuie să fie utilizabile atât în rețele electrice naționale cât și în microrețele care capătă o dezvoltare importantă în ultima perioadă (Ionel, Gelu și Emil 2010).

Cap. 2 Structura și comanda filtrelor active de putere de tip paralel cu trei brațe

Conceptul de filtru activ paralel a fost introdus pentru prima dată în anul 1976 de către L. Gyugyi și E.C. Strycula (Gyugyi & Strycula, 1976).

Astăzi există pe piață o varietate destul de mare de filtre active care au diverse structuri de comandă și care rezolvă diverse tipuri de probleme în rețelele electrice așa cum s-a arătat la capitolul anterior.

Structura de comandă a unui filtru activ paralel generează în timp real referința de curent pentru puntea de putere care sintetizează acea formă de undă de curent. Altfel spus, un filtru activ paralel a fost propus în special pentru a elimina spectrul de armonici a curentului absorbit de la rețeaua electrică.

În Figura 2-1 este prezentată o structură de filtru activ paralel.

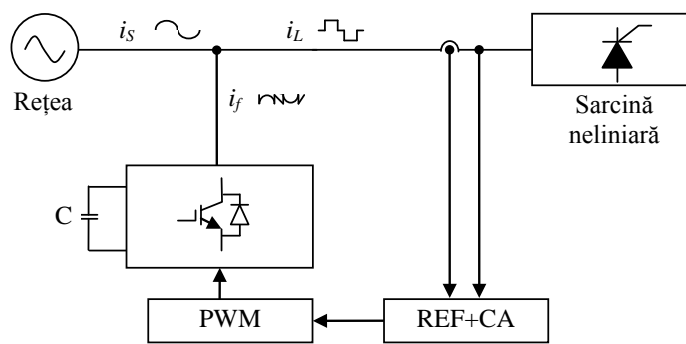


Figura 2-1 Structura unui filtru activ paralel

2.1. Topologia filtrelor active paralel

Filtrele active paralel utilizează în componența lor un bloc de putere realizat din comutatoare statice. În capitolul de față se vor prezenta structurile utilizate pentru puntea de putere din cadrul unui filtru activ de putere.

Filtrele active paralel utilizează două structuri de invertoare:

- Structură de inverter cu sursă de tensiune (VSI);
- Structură de inverter cu sursă de curent (CSI).

2.1.1. Topologie de filtru activ – inverter cu sursă de tensiune

Structura de filtru activ care utilizează convertor cu sursă de tensiune (VSI – Voltage Source Inverter) este realizată dintr-o punte cu 6 IGBT-uri (Insulated Gate Bipolar Tranzistor) S1÷S6 și o capacitate C așa cum se arată în Figura 2-2. Trebuie subliniat că nu este utilizată nici o sursă de energie în partea de c.c. ci doar un element de stocare a energiei electrice – în cazul de față capacitatea C . Aceasta derivă din faptul că principalul rol al filtrului activ este acela de a funcționa ca un compensator. Altfel spus, dacă se neglijează pierderile aferente încărcării condensatorului C și comutațiilor statice, atunci principiul conservării energiei guvernează transformarea de energie în cadrul filtrului activ.

Puntea comandată cu un semnal PWM (Pulse Width Modulation) va genera armonici de curent în jurul frecvenței de comutație și multiplilor acesteia. Dacă această frecvență de comutație este suficient de mare acești curenți armonici nedorți pot fi ușor filtrați prin utilizarea unui filtru pasiv de tip L,

RC, LC, RLC etc.

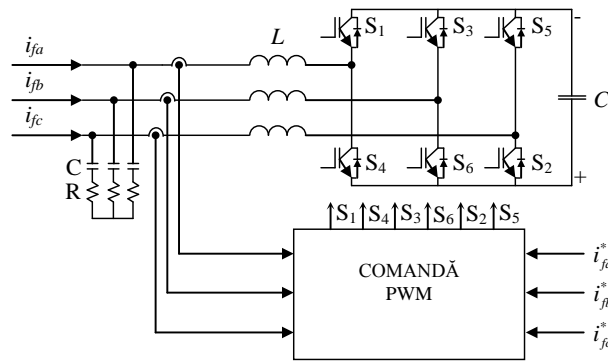


Figura 2-2 Topologie de filtru activ – inverter sursă de tensiune

2.1.2. Topologie de filtru activ – inverter sursă de curent

Structura de filtru activ care utilizează inverter sursă de curent (CSI – Current Source Inverter) este realizată dintr-o punte trifazată cu șase comutatoare statice S1÷S6 și o inductivitate L așa cum se arată în Figura 2-3. Elementul de stocare a energiei în acest caz este inductivitatea L.

La fel ca la VSI curenții de comutație pot fi filtrați cu filtre pasiv de tip RC, LC, RLC etc.

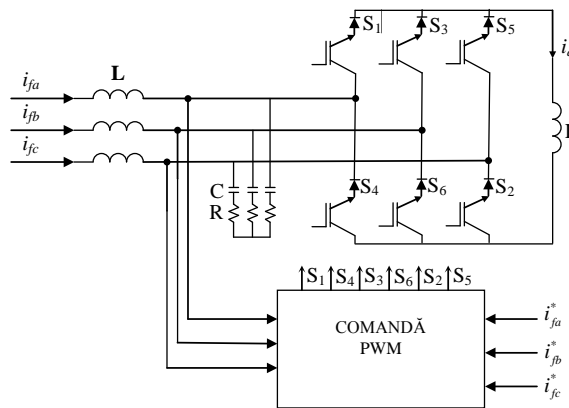


Figura 2-3 Topologie de filtru activ – inverter sursă de curent

2.1.3. Topologie filtru activ – inverter cu sursă de tensiune divizată

Topologia filtrului activ – inverter cu sursă de tensiune suportă o ușoară dezvoltare prin divizarea capacității C în C_1 și C_2 așa cum se arată în Figura 2-5 (Aredes, 1996). Prin această dezvoltare rămâne aceeași punte cu șase IGBT-uri și trei brațe, comanda ei fiind aceeași ca în cazul capacității unitare. Spre deosebire de aceasta, noua topologie permite obținerea unui filtru activ cu patru fire ceea ce îl face utilizabil și în rețelele electrice care au patru fire respectiv cele trei linii și neutrul.

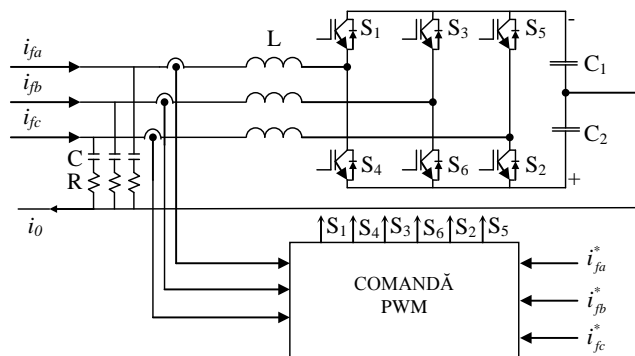


Figura 2-4 Topologie filtru activ – inverter cu sursă de curent divizată

2.2. Determinarea inductivităților L_f

Inductivitățile de filtrare L_f a armonicilor superioare, generate de comutația convertorului, influențează în două moduri funcționarea filtrului activ:

1. Conferă convertorului caracterul ridicător de tensiune, boost, adică valoarea maximă a tensiunii de linie a alimentării \hat{U}_{ac} , și tensiunea de la bornele condensatorului V_{DC} îndeplinesc condiția:

$$V_{DC} \geq \hat{U}_{ac} \quad (\text{Ec. 2-1})$$

În concret se adoptă:

$$V_{DC} \geq U_s \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 1,3 \quad (\text{Ec. 2-2})$$

unde U_s reprezintă valoarea efectivă a tensiunii de fază, iar 1,3 o rezervă de 30%, rezervă recomandată de literatura de specialitate (Zhang, 1998). Caracterul boost al convertorului este favorabil deoarece ca urmare a creșterii tensiunii pe condensator scade valoarea capacității necesare.

2. Ca urmare a faptului că s-a adoptat reglarea tip histerezis pentru curenți, inductivitățile de filtrare vor determina gradientul curentului din filtrul activ și, implicit undulațiile acestuia, undulații care determină frecvența de comutație și THD-ul pentru o bandă de histerezis, HB, dată. O inductivitate mică va conduce la un gradient de curent și frecvențe de comutație mari, deci la o bună filtrare. O inductivitate mare și un gradient mic de curent determină frecvențe de comutație mici și o filtrare modestă. Mai mult, precizia reglării cu histerezis poate fi afectată ca urmare a limitării variațiilor curenților filtrului pentru o bandă de histerezis impusă. Frecvența de comutație fiind variabilă, în calculul inductivității de filtrare se impune, în condițiile cele mai defavorabile, ca frecvența de comutație reală f_c să îndeplinească condiția

$$f_c \leq f_c^M \quad (\text{Ec. 2-3})$$

ultima reprezentând frecvența maximă admisă, adoptată la valoare de 15kHz.

Schema simplificată a filtrului activ este prezentată în Figura 2-8, unde L_σ este inductivitatea de dispersie a sursei de alimentare, iar V_I tensiunea de fază la ieșirea inverterului de forma din Figura 2-9. În aceste condiții tensiunea la bornele bobinei L_f este dată de relația:

$$V_L = U_s - V_I \quad (\text{Ec. 2-4})$$

Având în vedere forma tensiunii la ieșirea inverterului, Figura 2-9, și luând în calcul cazul cel mai defavorabil, în jurul valorii maxime a tensiunii de alimentare, pentru o perioadă de comutație tensiunea și curentul prin bobina de filtrare sunt prezentate în Figura 2-10. Rezultă că tensiunea la bornele bobinei poate lua succesiv doua valori extreme:

$$V_{LM} = \sqrt{2}U_s - \left(-\frac{2}{3}V_{DC}\right) \quad (\text{Ec. 2-5})$$

$$V_{Lm} = \sqrt{2}U_s - \left(\frac{2}{3}V_{DC}\right) \quad (\text{Ec. 2-6})$$

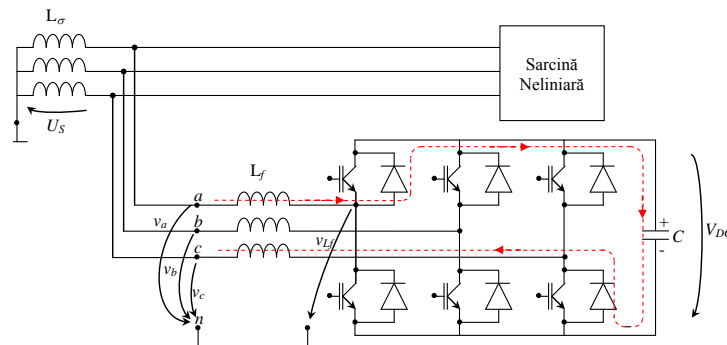


Figura 2-5 Schema simplificată a filtrului activ

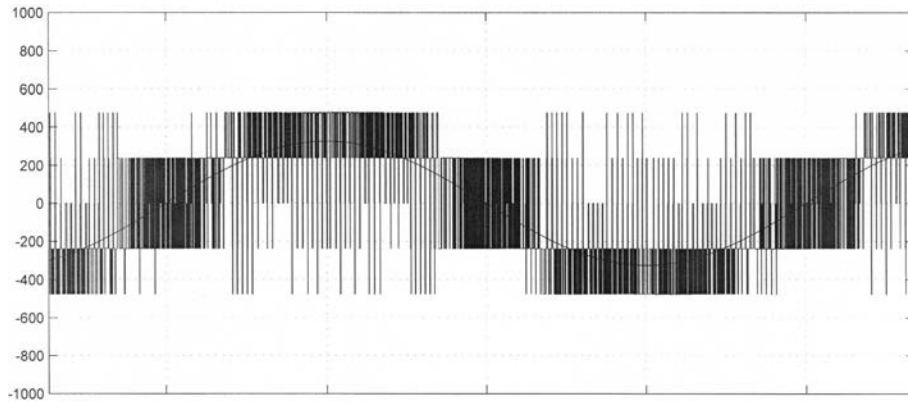


Figura 2-6 Tensiunea la ieșirea inverterului

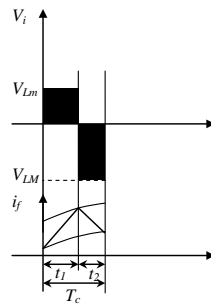


Figura 2-7 Tensiunea și curentul pentru bobina de filtrare

Ecuția de bilanț energetic, considerând circuitul ideal și tensiunile invariabile pe perioada de comutație T_C , are forma:

$$V_{LM} \cdot t_1 - V_{LM} \cdot t_2 = 0 \quad (\text{Ec. 2-7})$$

La ecuația de bilanț se adaugă evident:

$$t_1 + t_2 = T_C \quad (\text{Ec. 2-8})$$

unde: T_C – reprezintă perioada de comutație.

Se rezolvă sistemul de ecuații determinându-se t_1 și t_2 .

Bobina de filtrare se determină din ecuația de echilibru electric scrisă sub forma:

$$L_F \frac{di}{dt} = V_L \quad (\text{Ec. 2-9})$$

unde gradientul de curent se aproximează prin ondulația de curent la ieșirea filtrului, calculată pentru unul din cele două cazuri la limită din Figura 2-10 în forma:

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{\Delta i}{t_1} \quad (\text{Ec. 2-10})$$

Din ecuațiile de mai sus se obține:

$$L_F = \frac{V_{LM} \cdot t_1}{\Delta i} \quad (\text{Ec. 2-11})$$

2.3. Determinarea capacităților C_1 și C_2

Pentru alegerea tensiunii la bornele condensatoarelor C_1 și C_2 respectiv V_{DC} se folosește proiecția vectorului tensiune în sistemul de coordonate α - β (Zhang, 1998). Acesta are lungimea de $\frac{2}{3}V_{DC}$. În

condițiile unei sarcini echilibrate, vectorul de comandă descrie cercul de rază $\frac{1}{\sqrt{3}}V_{DC}$ Figura 2-11.

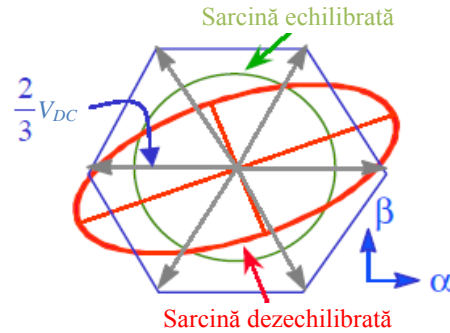


Figura 2-8 Criteriu de alegere a tensiunii V_{DC}

Considerând 30% rezervă, pentru regimurile tranzitorii pentru o sursă cu tensiunea de fază de 230V putem calcula tensiunea necesară pentru circuitul intermediar astfel:

$$V_{DC} = 230 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 1,3 = 732V \quad (\text{Ec. 2-12})$$

Astfel putem alege tensiunea $V_{DC}=750V$ considerând că este suficient pentru controlul utilizat (Zhang, 1998).

Curentul prin neutru i_n are următoarea expresie:

$$i_n = I_{nm} \cos(\omega t + \varphi_0) = 3I_0 \cos(\omega t + \varphi_0) \quad (\text{Ec. 2-13})$$

unde:

I_{nm} – este valoarea maximă a curentului de neutru;

I_0 – valoarea maximă a curentului de secvență homopolară.

Astfel riplul tensiunii pe fiecare condensator datorat curentului de neutru este exprimat astfel:

$$\Delta U_{C1} = \Delta U_{C2} = \frac{3I_0}{4\omega C_1} = \frac{1}{2} \Delta U_C \quad (\text{Ec. 2-14})$$

unde:

$\Delta U_{C1}; \Delta U_{C2}$ – reprezintă tensiunile la bornele condensatoarelor C_1 respectiv C_2 ;

ΔU_C – variația maximă admisă a tensiunii V_{DC} .

Se poate determina valoarea minimă a condensatorului C impusă de secvența homopolară a curentului de sarcină.

$$C = \frac{3I_0}{2\omega \Delta U_C} \quad (\text{Ec. 2-15})$$

unde:

$$C = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (\text{Ec. 2-16})$$

Dacă impunem $C_1=C_2$ atunci obținem:

$$C_1 = C_2 = \frac{C}{2} \quad (\text{Ec. 2-17})$$

Pentru determinarea capacității C se poate utiliza o metodă bazată pe bilanțul de puteri.

În funcție de aplicația pentru care este dezvoltat filtrul activ, capacitatea necesară înmagazinării de energie trebuie dimensionată corespunzător.

Capacitatea C are un dublu rol în funcționarea filtrului. Pe de o parte trebuie să asigure energia necesară generării componentei armonice de compensare, iar pe de altă parte să asigure o tensiune V_{DC} cu ondulații cât mai mici, pentru a nu influența funcționarea filtrului activ.

Pentru primul rol se calculează energia înmagazinată în capacitatea C cu

$$W_c = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{DC}^2 \quad (\text{Ec. 2-18})$$

Puterea corespunzătoare este:

$$P_c = \frac{dW_c}{dt} = C \cdot V_{DC} \cdot \frac{dU_c}{dt} = C \cdot V_{DC} \frac{\Delta U_c}{t_1} \quad (\text{Ec. 2-19})$$

unde:

$V_{DC} = 750 \text{ V}$ așa cum s-a stabilit anterior;

t_1 - perioada de conducție pe durata căruia se furnizează de către filtru un puls de tensiune V_{Lm} , pentru realizarea undulației de curent comandate. Se aproximează:

$$dU_c \approx \Delta U_c \quad (\text{Ec. 2-20})$$

și se impune undulația ΔU_c dorită.

Puterea P_c este furnizată sarcinii atunci când este nevoie, în funcție de comanda aplicată filtrului, trebuind să acopere puterea solicitată în condițiile cele mai defavorabile, cum sunt cele din Figura 2-10. Evident:

$$P_c = \frac{1}{2} V_{Lm} \Delta i \quad (\text{Ec. 2-21})$$

unde Δi – reprezintă undulația de curent admisa la calculul bobinei de filtrare.

Din Ec. 2-22 și Ec. 2-23 rezultă:

$$C = \frac{V_{Lm} \Delta i t_1}{2 V_{DC} \Delta U_c} \quad (\text{Ec. 2-22})$$

Pentru cea de a doua situație, capacitatea este un filtru C plasat la ieșirea unui redresor PWM în schemă cu 6 pulsuri în punte trifazată. Utilizând filtrarea de tip C de la redresoarele necomandate (Ionescu F., 1998) capacitatea se poate calcula cu relația:

$$C \geq \frac{2}{p \omega k_{pl} R} \quad (\text{Ec. 2-23})$$

unde $p=6$ este numărul de pulsuri ale convertorului, $\omega=314$ pulsația sursei de alimentare,

$$k_{pl} = \frac{2}{p^2 - 1} \quad (\text{Ec. 2-24})$$

factorul de pulsație al convertorului, iar

$$R = \frac{V_{DC}}{\Delta i} \quad (\text{Ec. 2-25})$$

reprezintă sarcina echivalentă a redresorului.

Capacitatea C se încarcă între 2 brațe ale convertorului, cu parcurgerea a doua bobine L_f . Pulsația de rezonanță a acestui circuit este:

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{2L_f C}} \quad (\text{Ec. 2-26})$$

apropiată de pulsația primei armonici, de ordinul 6, $\omega_p = 1884$. Pentru a se evita rezonanța dar și pentru a îmbunătăți performanțele filtrului se adopta de obicei :

$$\omega_o = \frac{\omega_p}{2 \dots 5} \quad (\text{Ec. 2-27})$$

Se adopta $\omega_o = 628$ și se calculează:

$$C = \frac{1}{2L_f \omega_o^2} \quad (\text{Ec. 2-28})$$

Evident, din cele două valori calculate se adoptă valoarea cea mai mare, care va asigura îndeplinirea ambelor condiții impuse.

2.4. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate topologiile utilizate la dezvoltarea filtrelor active cât și tipurile de comandă a acestora.

Topologiile prezentate au în vedere doar punțile trifazate cu trei brațe respectiv șase comutatoare statice. Elementul de stocare a energiei, în cazul de față capacitatea C , joacă un rol foarte important deoarece permite obținerea de filtre active cu conductor de neutru sau fără conductor de neutru. Astfel, domeniul de utilizare a acestora poate fi extins de la sisteme trifazate fără conductor de neutru la sisteme trifazate cu conductor de neutru fără a se interveni asupra punții.

De asemenea, în cadrul acestui capitol se propune utilizarea modulației de tip PWM cu histerezis pentru realizarea simulărilor și a experimentelor din capitolele următoare, având în vedere avantajele pe care le prezintă acest tip de modulație și obiectivul acestei lucrări.

Obiectivul acestei lucrări fiind acela de a valida o nouă metodă de calcul a referinței pentru comanda filtrelor active cu trei brațe impune utilizarea unui tip de modulație simplă dar cu o dinamică foarte bună.

În concluzie se va utiliza modulația de tip PWM cu histerezis la toate modelele dezvoltate și prezentate în capitolele următoare.

Contribuțiile aduse prin acest capitol se concretizează în două direcții:

- Analizând funcționarea inverterului s-a determinat valoarea inductivității de conectare la rețea a filtrului activ. S-a arătat că valoarea și corelarea acesteia cu frecvența de comutație a comutatoarelor statice și cu banda de histerezis a reguletoarelor de curent joacă un rol foarte important în rezultatele filtrelor active.

- De asemenea din analiza funcționării inverterului s-a determinat valoarea capacității necesară funcționării filtrului activ. S-a arătat că această capacitate face diferența între filtrele active cu și fără conductor de neutru. De asemenea, s-a determinat această capacitate ținând cont de dublul rol pe care îl îndeplinește: element de stocare de energie și filtru pentru undulațiile tensiunii continue.

Prin determinarea elementelor pasive aferente filtrului activ, prezentate mai sus, s-a făcut posibilă modelarea și simularea acestora. Rezultatele obținute astfel sunt prezentate în capitolele următoare.

Cap. 3 Contribuții la modelarea și simularea structurilor de comandă a filtrelor active de putere cu 3 fire

În capitolul de față se propune simularea tehnicilor de comandă pentru un filtru activ de putere de tip paralel cu 3 brațe și 3 fire dedicate sistemelor trifazate echilibrate. Se prezintă patru tehnici de control a filtrelor active de putere prin simularea acestora în mediul SimPowerSystem din Matlab. Acestea sunt: comanda filtrelor active utilizând conceptul puterilor instantanee (PQ); comanda filtrelor active utilizând transformarea d-q (DQ); comanda filtrelor active prin metoda separării componenteii poluante (SCP); comanda filtrelor active utilizând controlul indirect (CI).

Forma de undă a curentului absorbit de sarcina neliniară pentru care se vor testa strategiile de comandă amintite, este prezentat în Figura 3-1 pentru cele trei faze.

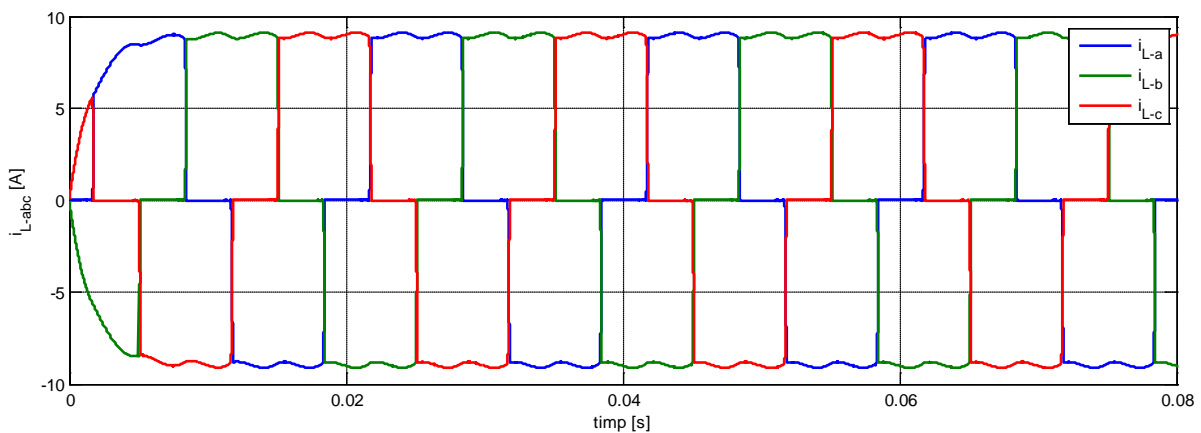


Figura 3-1 Forma de undă a curentului absorbit de consumatorul neliniar

În Figura 3-2 se prezintă spectrul de armonici pentru curentul absorbit de redresorul necomandat din cadrul modelului prezentat mai sus.

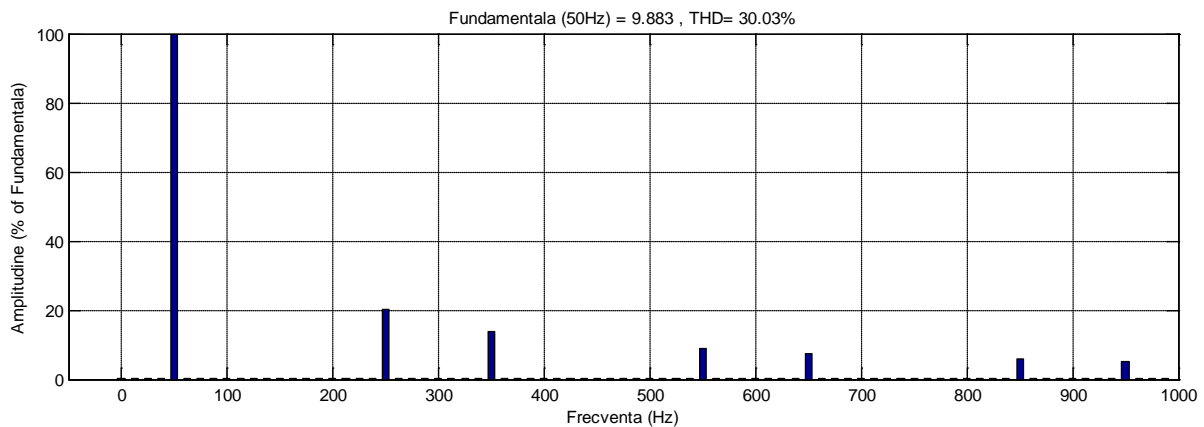


Figura 3-2 Spectrul de armonici a curentului absorbit de sarcina neliniară

Pornind de la curenții prezentați în Figura 3-1 se vor modela în continuare patru strategii de comandă pentru filtrul activ de putere cu scopul de a reduce valoarea distorsiunilor armonice de curent. Cea de a IV a strategie (Controlul Indirect) este o strategie nouă și fundamentată matematic în cadrul lucrării de față.

3.1. Comanda filtrelor active utilizând conceptul de putere instantanee - PQ

În Figura 3-3 este prezentată topologia unui filtru activ de putere cu 3 brațe și 3 fire. În blocul „Comandă” se regăsesc implementate strategiile de comandă, în cazul de față strategia PQ Figura 3-4.

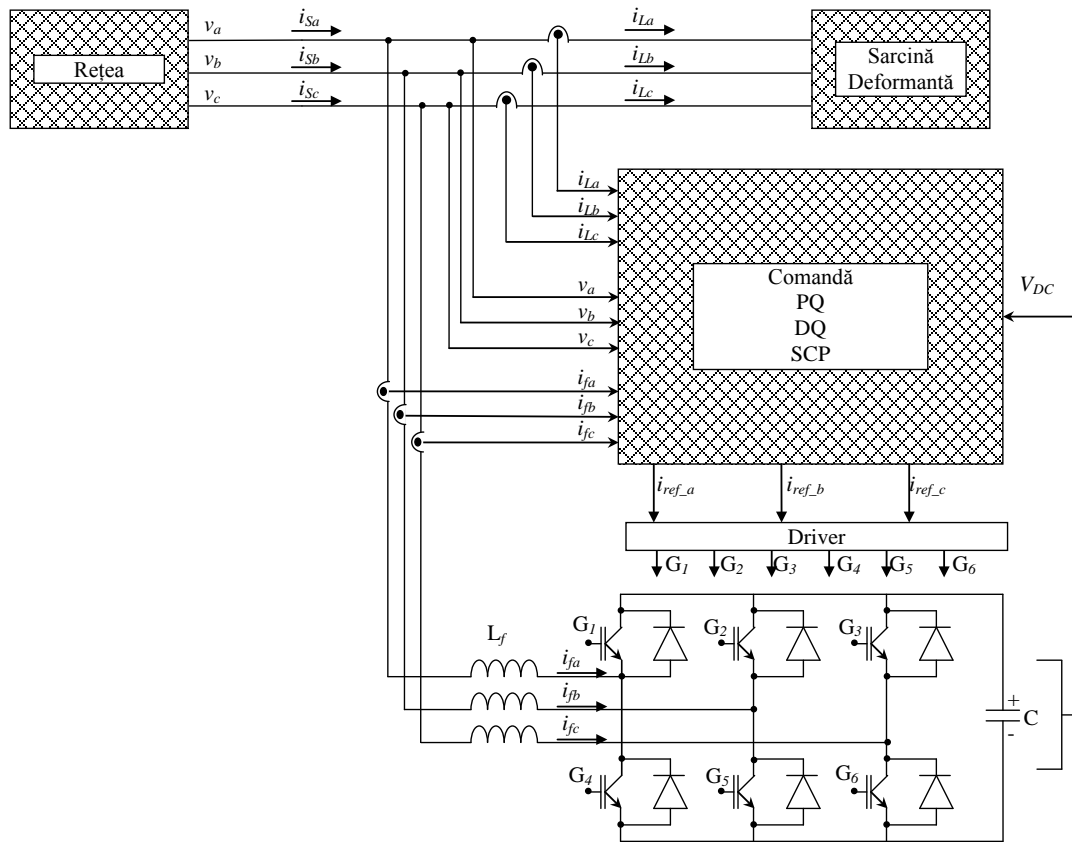


Figura 3-3 Topologie FA utilizată la comanda filtrelor active prin conceptul puterilor instantanee

3.1.1. Descrierea modelului matematic

Schema de comandă este prezentată în Figura 3-4. Regulatorul PI permite, pe baza variației tensiunii de la bornele condensatorului C , compensarea pierderilor din acesta (Fodor, Delarue, Ionescu, & Floricău, 1997).

Acordarea regulatorului PI atât în cadrul acestui model cât și în cadrul celorlalte modele simulate în această lucrare s-a făcut utilizând metoda experimentală Ziegler-Nichols (Ceangă, Nichita, Protin, & Cutululis, 2001)

Valoarea medie a puterii active a rețelei se extrage cu ajutorul unui FTJ sau a unui circuit de mediere, pentru ca apoi, prin scăderea din valoarea instantanee, să se obțină componenta alternativă a acesteia. Această componentă este cea care intervine în calculul curenților de referință pentru filtrul activ.

Strategia de comandă utilizând conceptul puterilor instantanee necesită mijloace de calcul destul de importante.

Componenta corespunzătoare puterii reactive nu este modificată, deoarece se dorește și compensarea factorului de putere, aceasta fiind cea de-a doua componentă care intervine în calculul curenților de referință ai filtrului activ. Dacă se dorește doar compensarea armonicilor, nu și a factorului de putere, se poate utiliza un FTJ ca în cazul componente active (Alfonso, Couto, & Martins, 2000).

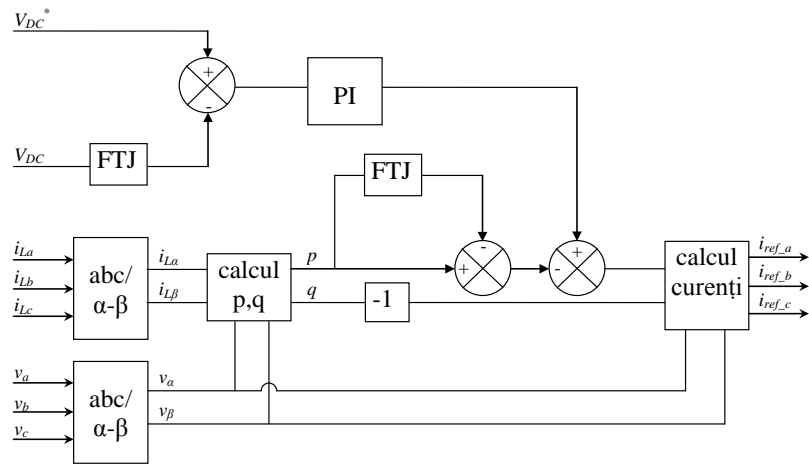


Figura 3-4 Comanda filtrului activ prin controlul puterilor instantanee

3.1.2. Rezultate numerice

Utilizând referința de curent în coordonate $\alpha\text{-}\beta$ și aplicând transformarea inversă Clarke se obțin cei trei curenți de referință i_{ref_a} ; i_{ref_b} ; i_{ref_c} .

Curenții de referință în coordonate carteziene i_{ref_a} , i_{ref_b} , i_{ref_c} sunt prezentați în Figura 3-5.

Acești curenți reprezintă referința pentru filtrul activ de putere, cu alte cuvinte curentul care trebuie absorbit de filtrul activ.

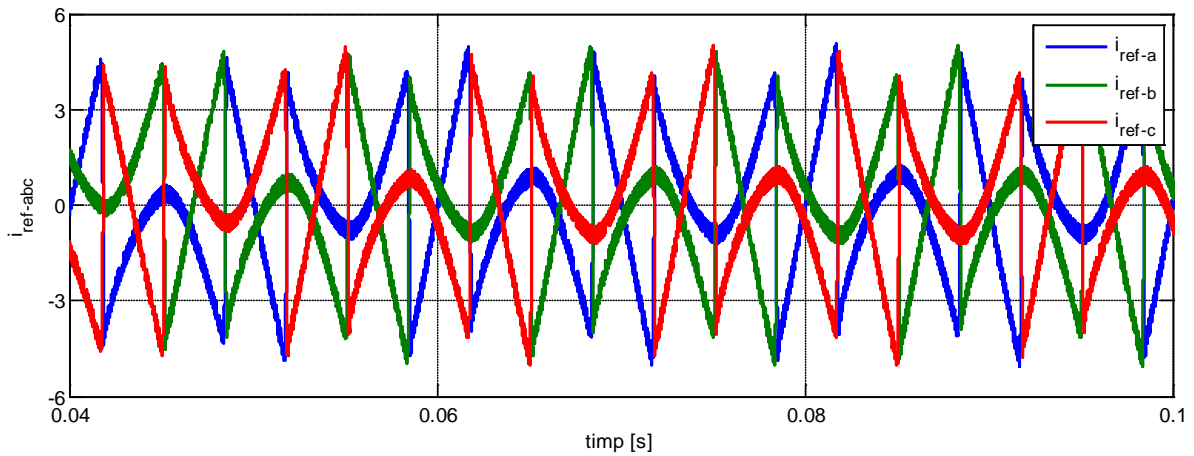


Figura 3-5 Curentul de referință $i_{ref-abc}$

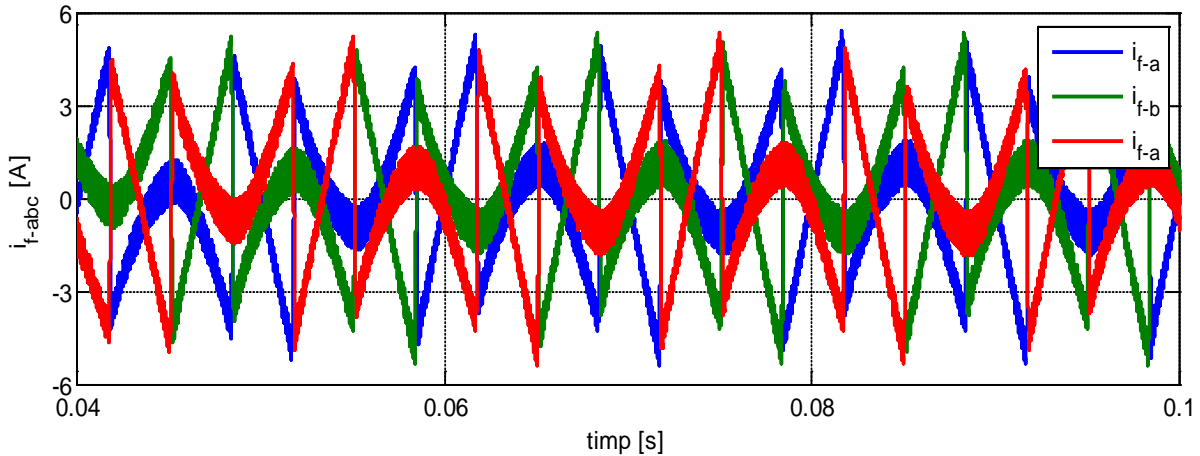


Figura 3-6 Curentul absorbit de filtrul activ

În urma comenzii blocului de putere din cadrul filtrului activ, acesta absoarbe un curent așa cum este prezentat în Figura 3-6.

De asemenea, în punctul comun de conexiune, forma curentului absorbit de la sursă va fi cea prezentată în Figura 3-7. Forma tensiunii în P_{CC} , se poate observa în Figura 3-7.

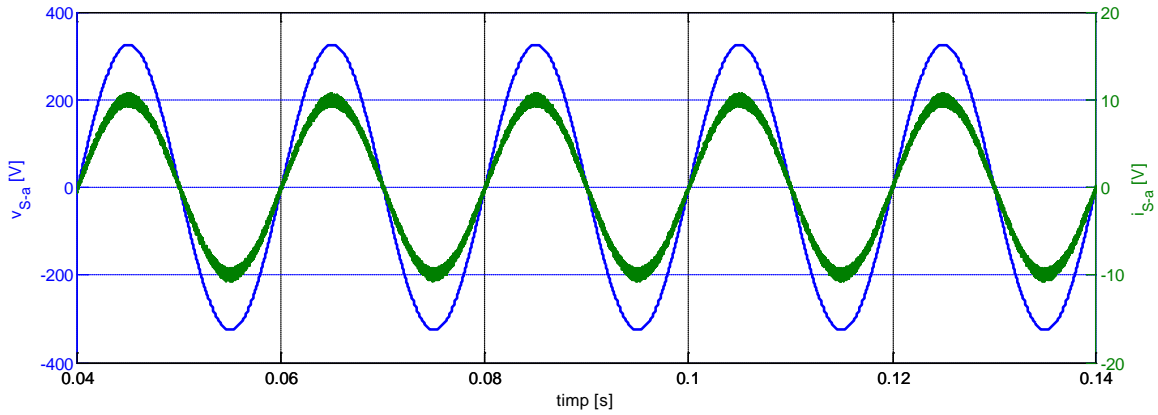


Figura 3-7 Tensiunea și curentul văzute de rețea pentru o fază

Analiza FFT a curentului absorbit de la rețea este prezentată în Figura 3-8. Se observă o reducere semnificativă a THD_1 respectiv de la valoarea $THD_1 = 30,03\%$ (Figura 3-1) la valoarea $THD_1 = 2,08\%$ ceea ce demonstrează funcționalitatea metodei.

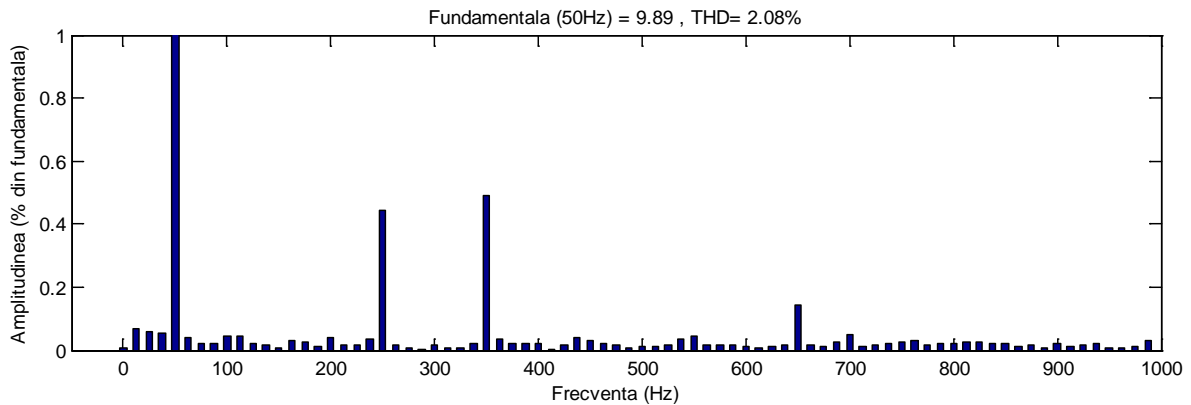


Figura 3-8 Analiza Fourier a curentului i_{Sabc}

3.2. Comanda filtrelor active utilizând transformata DQ

Pentru implementarea unui filtru activ utilizând strategia DQ în Figura 3-3 se va modifica blocul „Comandă” în concordanță cu această strategie.

3.2.1. Descrierea modelului matematic

Această metodă este cunoscută și sub denumirea de ”*algorithm bazat pe sisteme de referință sincrone*” (Bojoi, Giovani, Valeriu, Maurizio, Francesco, & Francesco, 2005).

Dacă faza componentelor $\cos(\omega t)$ și $\sin(\omega t)$ este ajustată cu ajutorul unei bucle PLL astfel încât axa d să aibă aceeași fază ca și faza tensiunii v_{an} , atunci componenta continuă I_{Ld} din sistemul $d-q$ reprezintă fundamentală curentului activ, iar I_{Lq} reprezintă fundamentală curentului reactiv.

Deoarece componentele alternative ale curenților în sistemul $d-q$ corespund curenților armonici ai sarcinii, prin eliminarea componentelor I_{Ld} și I_{Lq} din i_{Ld} și i_{Lq} se obține, după aplicarea

transformărilor inverse, referința pentru filtrul activ. Astfel, se poate impune compensarea doar a regimului deformant sau doar a regimului reactiv sau compensarea ambelor regimuri. Schema de comandă pentru compensarea ambelor regimuri este prezentată în Figura 3-9.

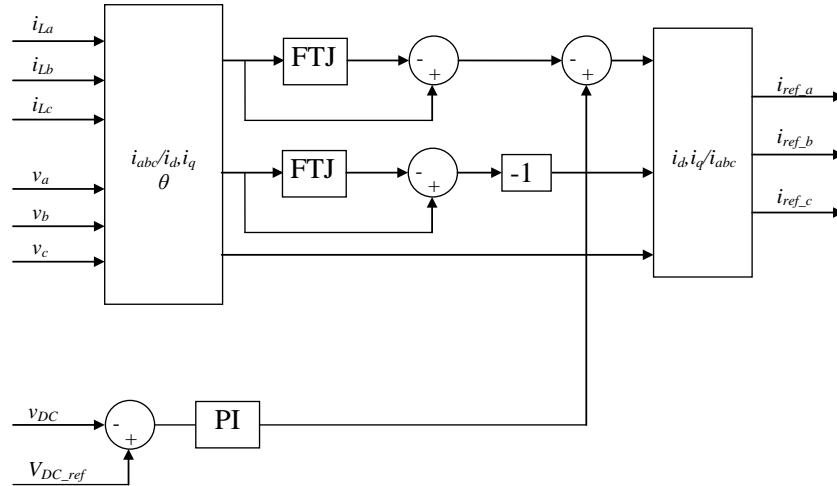


Figura 3-9 Comanda filtrelor active utilizând transformata d-q

3.2.2. Rezultate numerice

Prin utilizarea strategiei de comandă utilizând transformata d-q se calculează curentul de referință care este prezentat în Figura 3-10.

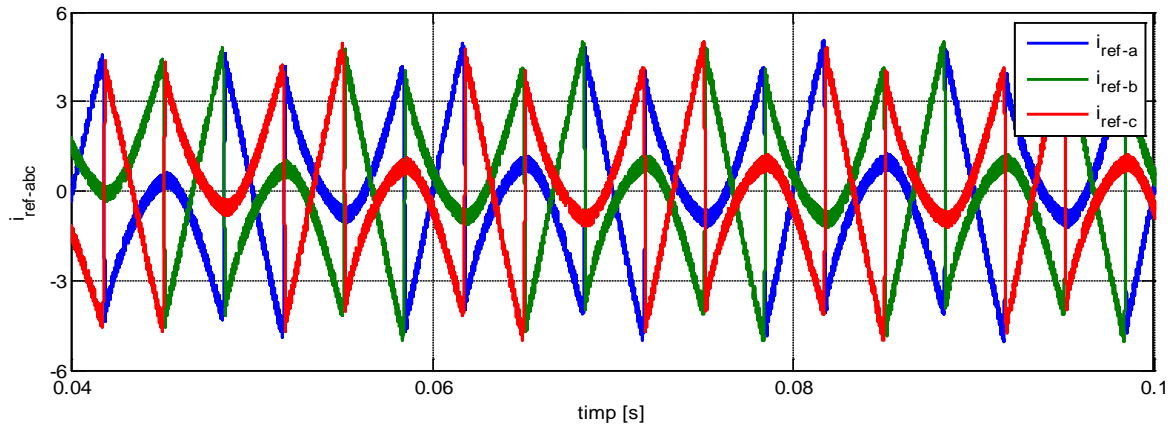


Figura 3-10 Referința de curent pentru cele trei faze – $i_{ref-abc}$

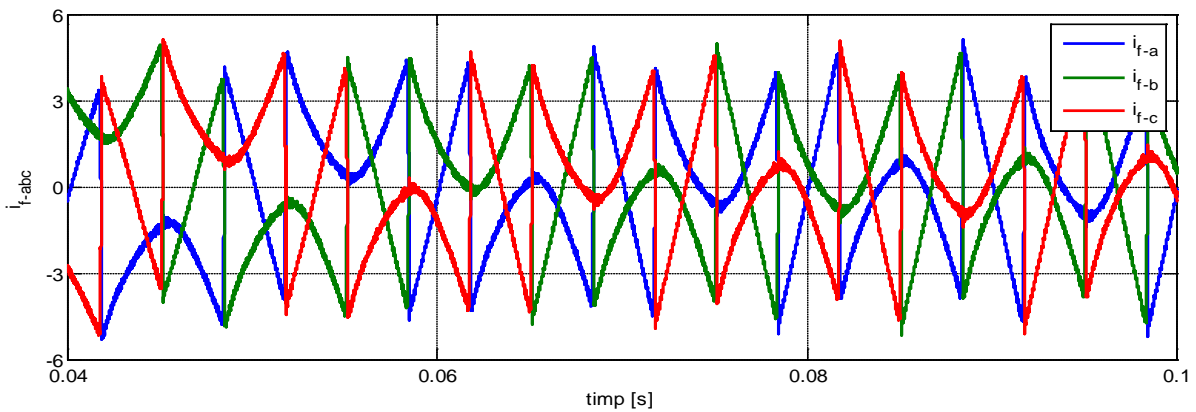


Figura 3-11 Curentul absorbit de filtrul activ

Curentul absorbit de filtrul activ este prezentat în Figura 3-11. În consecință, curentul absorbit de filtrul activ însumat cu cel absorbit de consumatorul neliniar vor face ca forma curentului absorbit de la sursă să fie sinusoidală. Acest lucru este ilustrat în Figura 3-12.

În Figura 3-12 sunt prezentate tensiunea și curentul pentru faza *a*, care după cum se observă sunt mult mai apropiate de forma sinusoidală decât în situația în care filtrul activ lipsește. Pe celelalte trei faze curentul și tensiunea sunt la fel din punct de vedere al formei de undă.

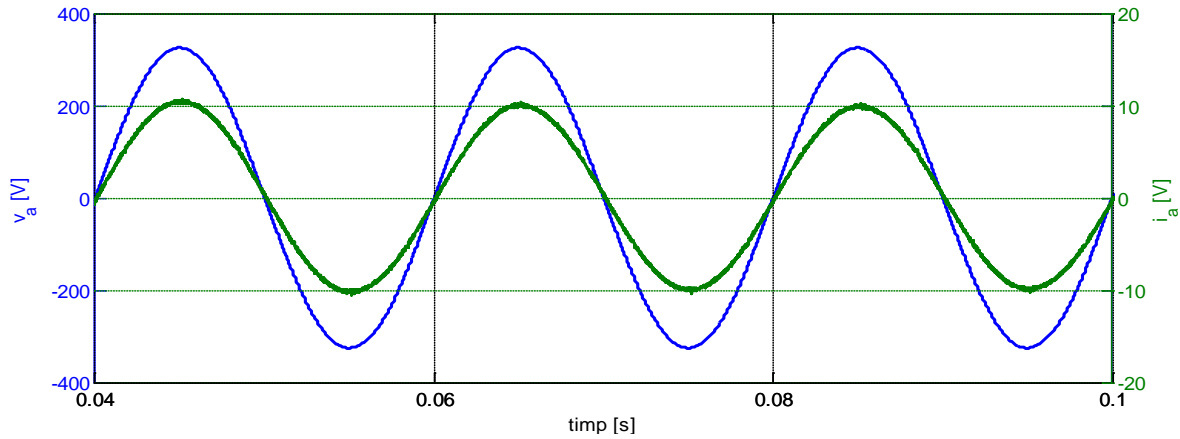


Figura 3-12 Tensiunea și curentul văzute de rețea

În Figura 3-13 este prezentat indicatorul THD_1 (deformarea formei de unda pentru curent) care scade de la 30,03% (Figura 3-1) în condițiile neutilizării filtrului la valoarea de 1,72% în condițiile utilizării filtrului modelat și simulat aici.

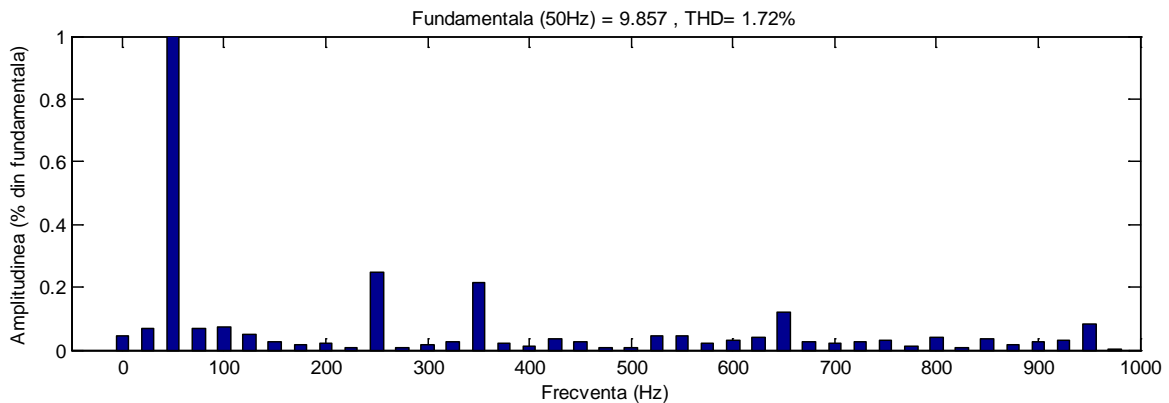


Figura 3-13 Analiza Fourier a curentului de sursă

3.3. Comanda filtrelor active prin metoda separării componentelor poluante (SCP)

Pentru implementarea unui filtru activ utilizând strategia SCP în Figura 3-3 se va modifica blocul „Comandă” în concordanță cu această strategie.

3.3.1. Descrierea modelului matematic

Această tehnică de comandă este bazată direct pe principiul filtrajului activ (Ionescu F., 1998). Ea se aplică atunci când sarcina este trifazată și echilibrată.

În Figura 3-14 este prezentată schema de comandă pentru un filtru activ de putere care utilizează tehnica de comandă denumită „separarea componentei poluante”. Cele trei referințe i_{fa}^* , i_{fb}^* , i_{fc}^* sunt aplicați reguletoarelor cu histerezis care comandă comutatoarele statice de putere astfel încât curentul absorbit de filtru să fie cel impus.

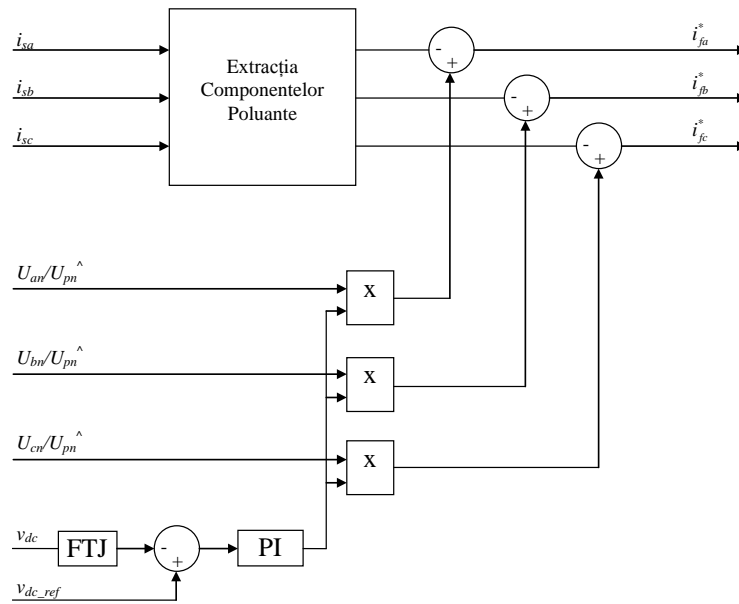


Figura 3-14 Comanda prin extragerea componentei poluante

3.3.2. Rezultate numerice

Pornind de la modelul matematic prezentat anterior s-a modelat și simulat filtrul activ comandat folosind principiul enunțat mai sus.

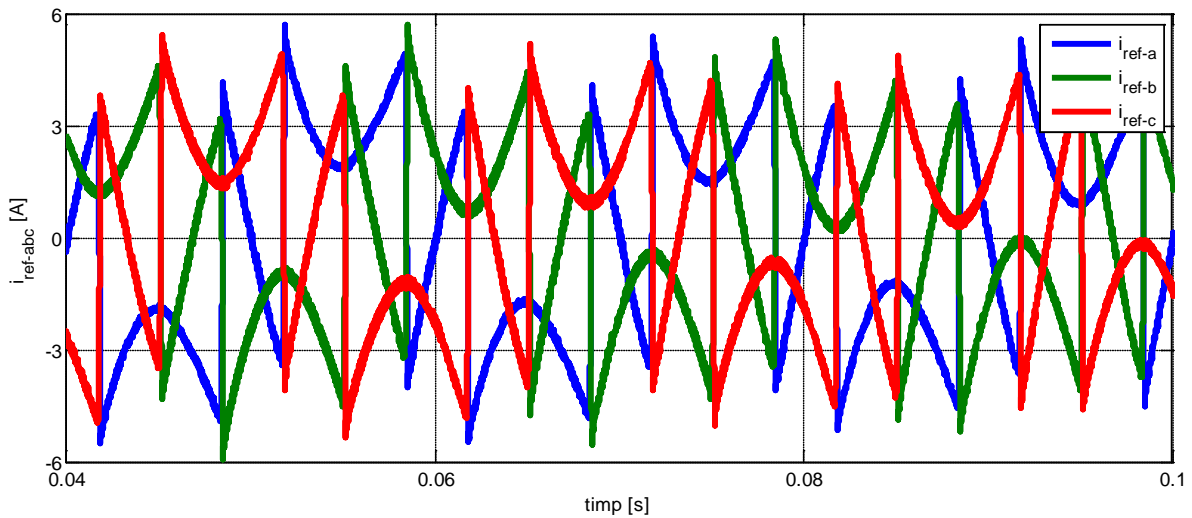


Figura 3-15 Referința de curent i_{ref_abc}

După filtrarea informației de curent pentru fiecare fază se obține componenta poluantă. Cu alte cuvinte, aceasta este componenta de curent care trebuie eliminată astfel încât forma curentului absorbit de la sursă să devină sinusoidală.

La sintetizarea acestui curent s-a luat în considerare o compensare totală, ceea ce include atât compensarea regimului deformant cât și corectarea factorului de putere. Factorul de putere impus este factorul de putere unitar.

În Figura 3-16 este prezentat curentul generat de filtrul activ, curent obținut utilizând tehnica separării componentei poluante. Se poate observa că referința (Figura 3-15) este urmărită fidel de curentul absorbit de filtrul activ.

Cei doi curenți - curentul de filtru și curentul de sarcină - însumați ne oferă în punctul comun de conexiune o absorbție sinusoidală de la rețea.

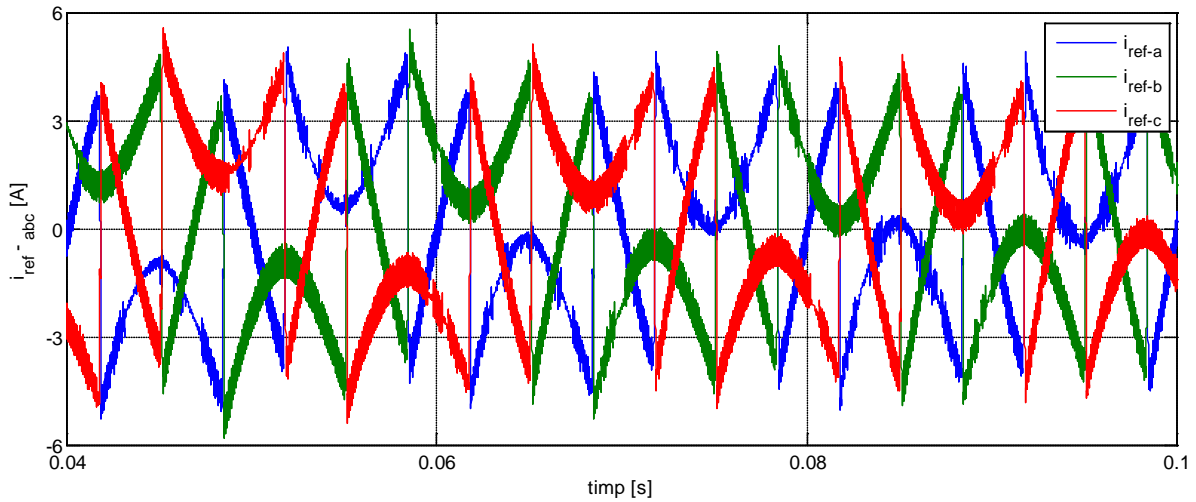


Figura 3-16 Curentul absorbit de filtrul activ i_{f-abc}

În Figura 3-17 se prezintă tensiunea și curentul pentru faza a .

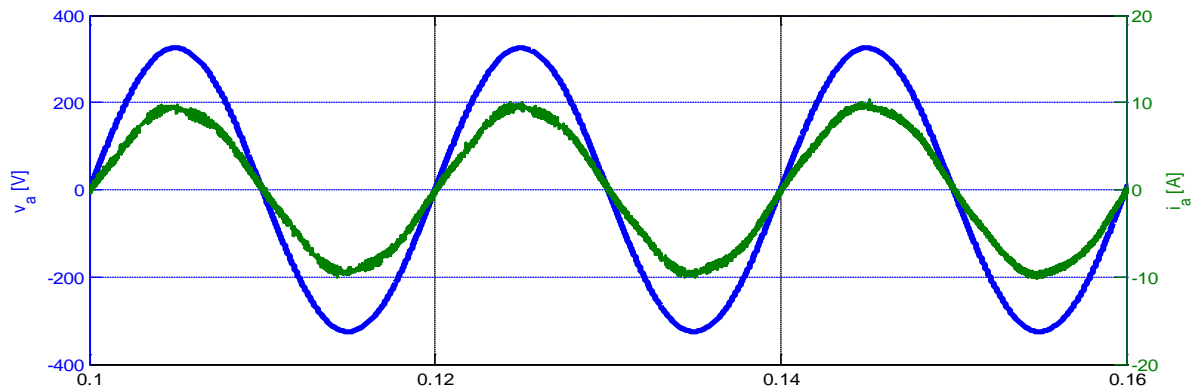


Figura 3-17 Tensiunea și curentul văzute de rețea

În Figura 3-18 este prezentat indicatorul THD_1 (deformarea formei de undă pentru curent) care scade de la 30,03% (Figura 3-1) în condițiile neutilizării filtrului activ la valoarea de 2,91% în condițiile utilizării unui filtru modelat și simulat în acest paragraf.

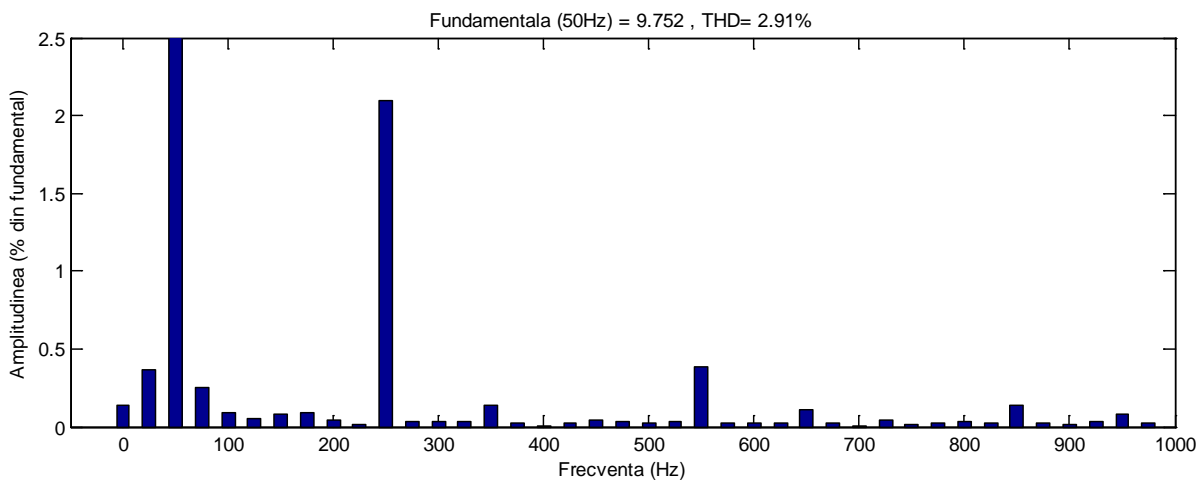


Figura 3-18 Analiza Fourier a curentului de sursă

3.4. Comanda filtrelor cu invertoare trifazate de tensiune utilizând controlul indirect (CI)

În Figura 3-19 este prezentată topologia unui filtru activ comandat utilizând conceptul controlului indirect (CI).

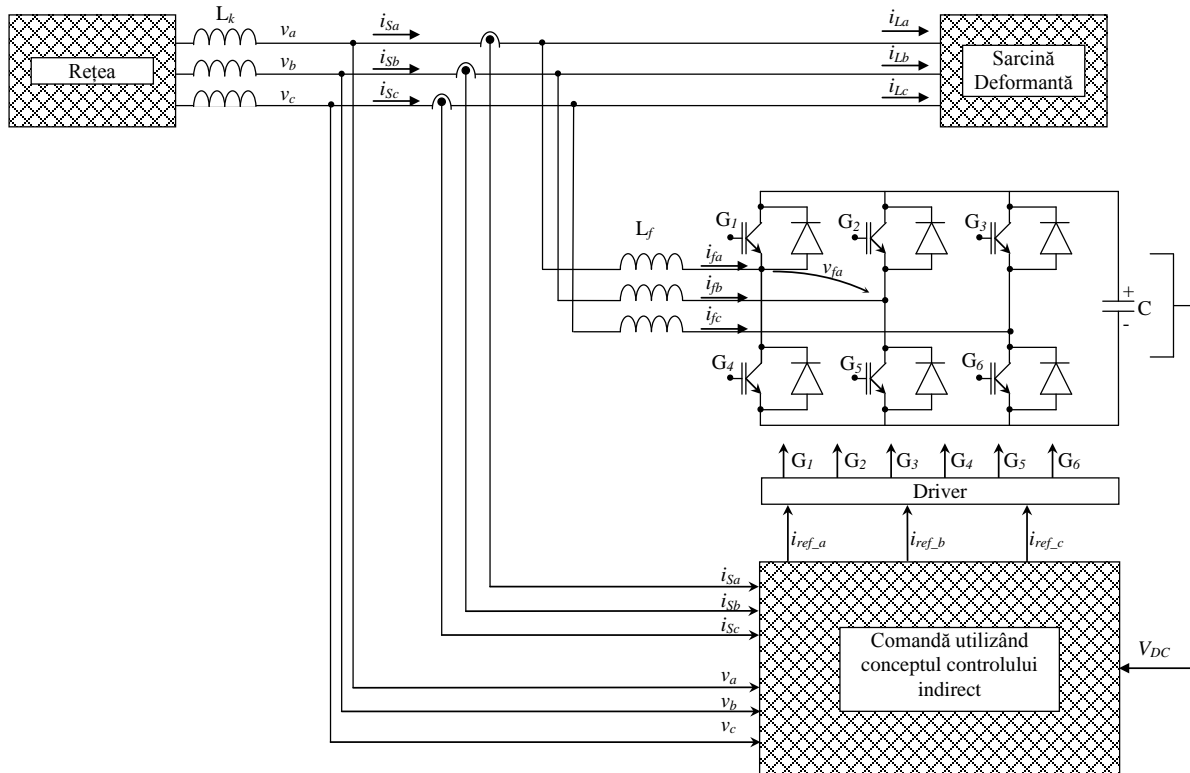


Figura 3-19 Topologie filtru activ comandat utilizând controlul indirect

3.4.1. Descrierea modelului matematic

Strategia numită *control indirect* a fost propusă pentru prima dată în (Rosu E., 2009). Această strategie este una care nu necesită cunoașterea spectrului curentului absorbit de sarcina neliniară.

Topologia unui filtru activ de putere utilizând tehnica de control indirect este prezentată în Figura 3-19, nefiind diferită esențial de structura clasică. Diferențele constau în numărul și tipul de semnale achiziționate: sistemul trifazat de tensiuni de alimentare și de curenți absorbiți și tensiunea pe capacitatea convertorului.

Curentul total absorbit pe faza *a* de la sursă este:

$$i_{sa}(t) = i_{La}(t) + i_{fa}(t) \quad (\text{Ec. 3-1})$$

Curentul pe faza *a* absorbit de sarcina neliniară este:

$$i_{La}(t) = i_{La}^1(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) \quad (\text{Ec. 3-2})$$

unde:

$i_{La}^1(t)$ – este componenta activă a fundamentalei;

$\sum_k i_{Lak}(t)$ – este suma armonicilor superioare;

$i_{Laq}(t)$ – este componenta reactivă a fundamentalei.

Pe de altă parte curentul prin filtru va fi:

$$i_{fa}(t) = i_{fa}^1(t) + \tilde{i}_{fa}(t) \quad (\text{Ec. 3-3})$$

unde:

$i_{fa}^1(t)$ – are aceeași semnificație ca și $i_{La}^1(t)$;

$\tilde{i}_{fa}(t)$ – reprezintă componenta armonică a curentului filtrului.

Curentul 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:

$$\tilde{i}_{fa}(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) = \tilde{i}(t) \quad (\text{Ec. 3-4})$$

Din (Ec. 3-1)÷ (Ec. 3-4) rezultă:

$$i_{sa} = i_{La}^1 + i_{fa}^1 + \tilde{i} \quad (\text{Ec. 3-5})$$

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

$$i_a^*(t) = \varepsilon_{DC} \frac{V_a}{\sqrt{2}V} = \varepsilon_{DC} \sin \omega t \quad (\text{Ec. 3-6})$$

unde V este valoarea efectivă a tensiunii de fază a alimentării, iar ε_{DC} ieșirea regulatorului tensiunii de pe capacitatea C a convertorului. Impunerea de mai sus se compară cu valoarea măsurată a curentului absorbit de la rețea i_{sa} rezultând pentru comanda filtrului pe faza a

$$u_{ca}^* = k(i_a^* - i_{sa}) = k(i_a^* - \tilde{i} - i_{La}^1 - i_{fa}^1) \quad (\text{Ec. 3-7})$$

unde k este amplificarea regulatorului.

Componentele sinusoidale ale sarcinii și filtrului, regulatorul fiind liniar, se regăsesc evident în impunerea sinusoidală pentru regulator, adică

$$i_a^* = i_{La}^1 + i_{fa}^1 \quad (\text{Ec. 3-8})$$

Cu această remarcă rezultă impunerea pentru faza „a” a filtrului activ sub forma:

$$u_{ca}^* = -k\tilde{i} = -k(\tilde{i}_{fa}(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t)) \quad (\text{Ec. 3-9})$$

adică proporțională cu componenta poluantă. În regim staționar regulatorul, dacă este corect proiectat, anulează eroare staționară la intrare, adică:

$$\tilde{i}_{fa}(t) = -(\sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t)) \quad (\text{Ec. 3-10})$$

deci filtrul va genera chiar componenta poluantă necesară sarcinii neliniare.

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

$$\begin{aligned} i_a^* &= \varepsilon_{DC} \sin(\omega t) \\ i_b^* &= \varepsilon_{DC} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c^* &= \varepsilon_{DC} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{aligned} \quad (\text{Ec. 3-11})$$

unde funcțiile sinus se realizează cu bucle PLL și achiziția tensiunilor rețelei.

Pentru controlul curenților se pot utiliza regulatoare cu histerezis cu o bandă de reglare corelată cu frecvența de comutație maxim admisă și performanțele dorite sau regulatoare clasice de tip PI.

Abordarea acestei metode de control are câteva avantaje certe:

- Elimină calculul, sub o formă sau alta, a componentei poluante, ceea ce va îmbunătăți dinamica și precizia compensării;
- Compensarea propriu-zisă depinde esențial de proiectarea regulatoarelor de curent, putându-se realiza o compensare performantă și pentru regimuri dinamice;
- Achiziția datelor din proces nu ridică probleme deosebite, mai ales ca volumul lor scade;
- Metoda se poate implementa atât numeric cât și analogic.

Schema de comandă este prezentată în Figura 3-20.

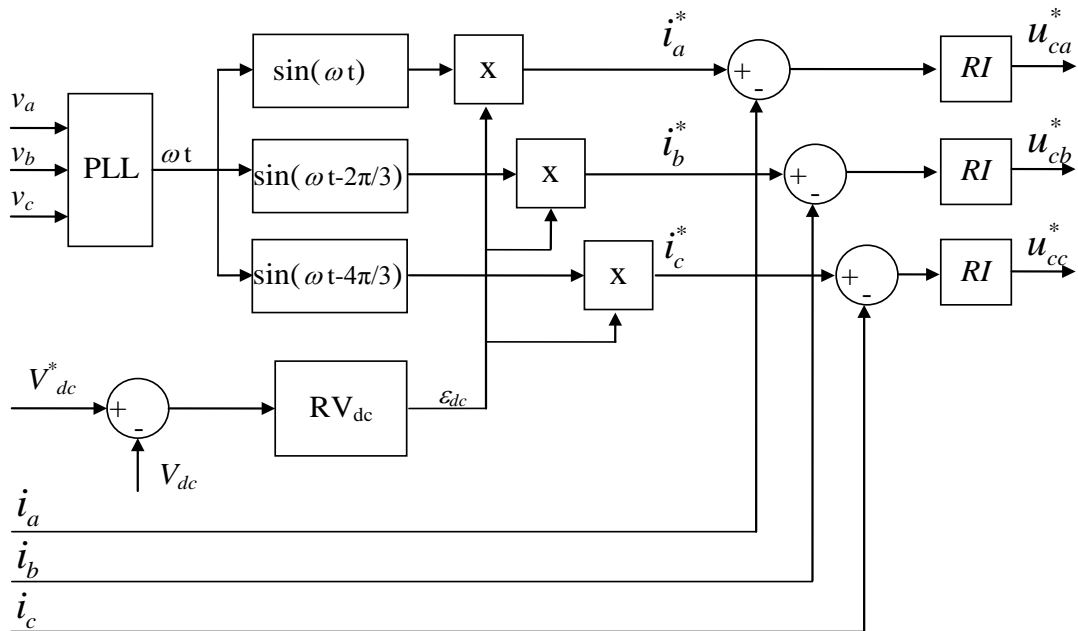


Figura 3-20 Strategia de comandă Control Indirect

3.4.2. Rezultate numerice

Pornind de la funcția „sinus” și impunând încărcarea condensatorului ca și la celelalte modele se obține referința de curent pentru filtrul activ. Această referință de curent se determină pornind de la curentul absorbit de la sursă și nu de la curentul absorbit de sarcină. În acest mod nu prezintă interes spectrul armonic al curentului absorbit de sarcină. Impunând forma curentului de rețea să fie sinusoidală fără a face o analiză a curentului de sarcină se obține un control indirect.

În același mod se elimină o serie de calcule necesare determinării fundamentalei curentului absorbit de sarcină.

Curentul de referință cu care se compară curentul absorbit de la sursă se prezintă în Figura 3-21, curent care da această dată este un curent sinusoidal.

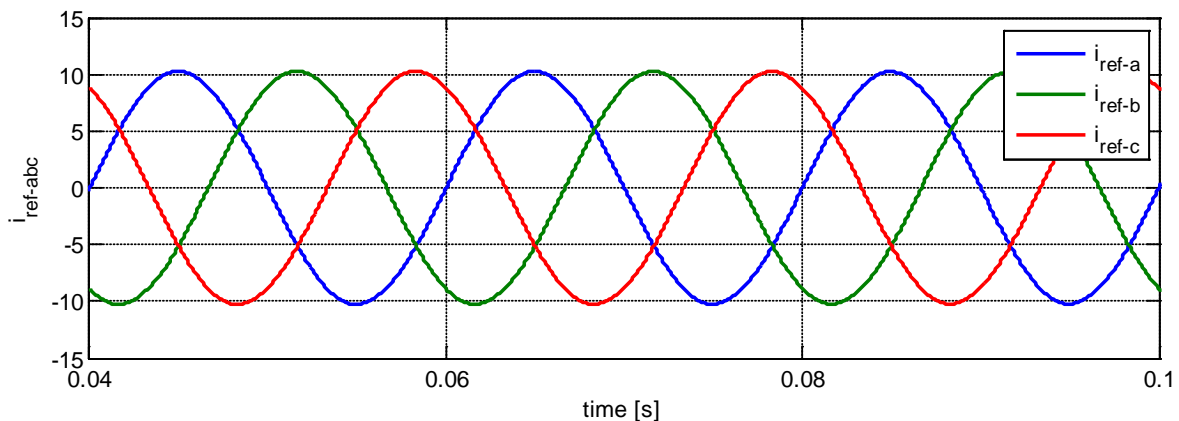


Figura 3-21 Curenții de referință i_{ref_abc}

Curenții absorbiți de filtrul activ sunt prezenți în Figura 3-22. În consecință curentul generat de filtrul activ însumat cu cel absorbit de consumatorul neliniar vor face ca forma curentului absorbit de la sursă să fie sinusoidală.

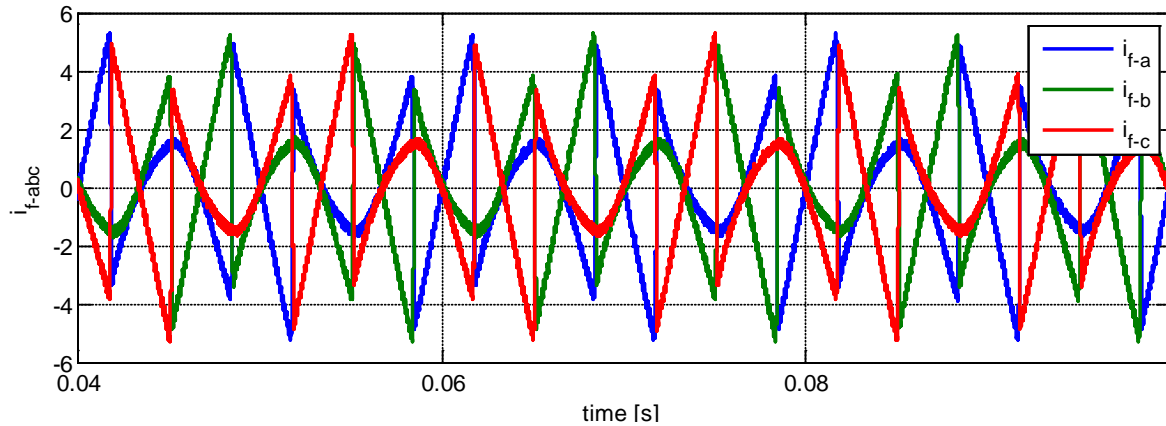


Figura 3-22 Curenții absorbiți de filtrul activ – i_{f-abc}

În Figura 3-23 sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea și curentul pe faza a , care după cum se observă, sunt mult mai apropiate de forma sinusoidală decât în situația în care filtrul activ lipsește. De asemenea se poate observa defazajul nul între tensiune și curent, ceea ce semnifică și o compensare a puterii reactive adică o corectare a factorului de putere la valoarea unitară.

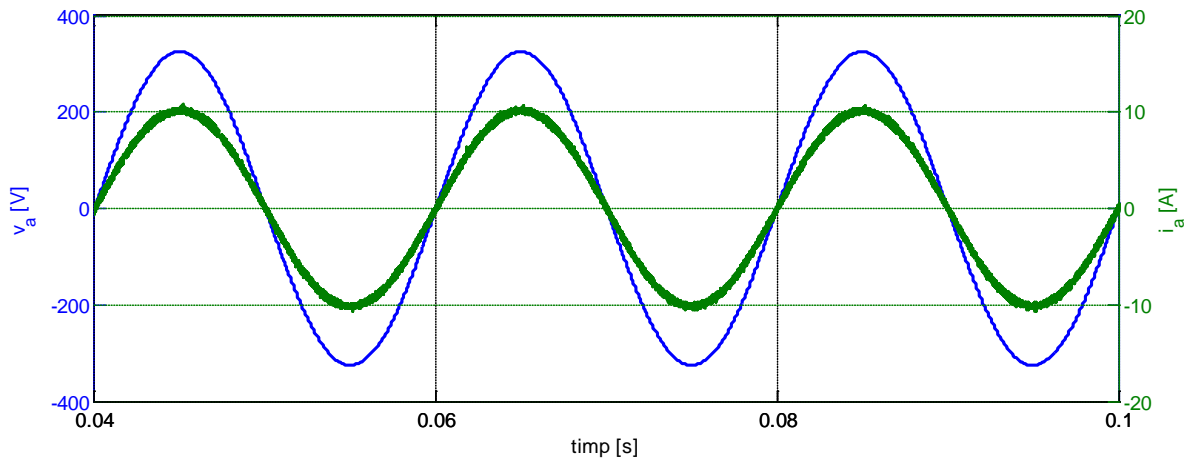


Figura 3-23 Tensiunea și curentul pe faza a i_{s-a}

În Figura 3-24 este prezentat indicatorul THD_1 (deformarea formei de unda pentru curent) care scade de la 30,03% (Figura 3-1) în condițiile neutilizării filtrului la valoarea de 1,95% în condițiile utilizării filtrului modelat în acest paragraf.

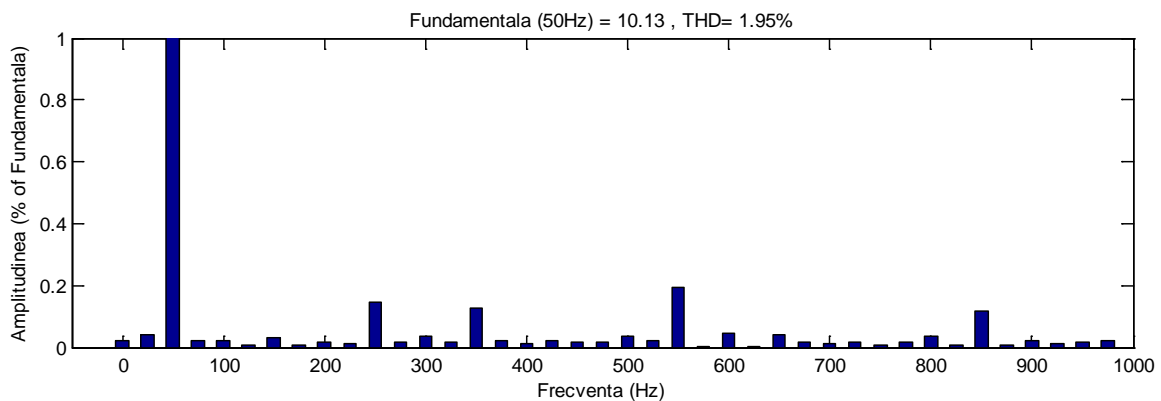


Figura 3-24 Analiza FFT a curentului absorbit de la sursă

În ceea ce privește răspunsul dinamic al controlului indirect acesta se prezintă în Figura 3-25. În Figura 3-25 a) este prezentat curentul absorbit de sarcina neliniară care crește de la valoarea de 9A la 18A. Se poate observa în Figura 3-25b) că forma de undă nu suportă nici o modificare în ceea ce privește spectrul de armonici.

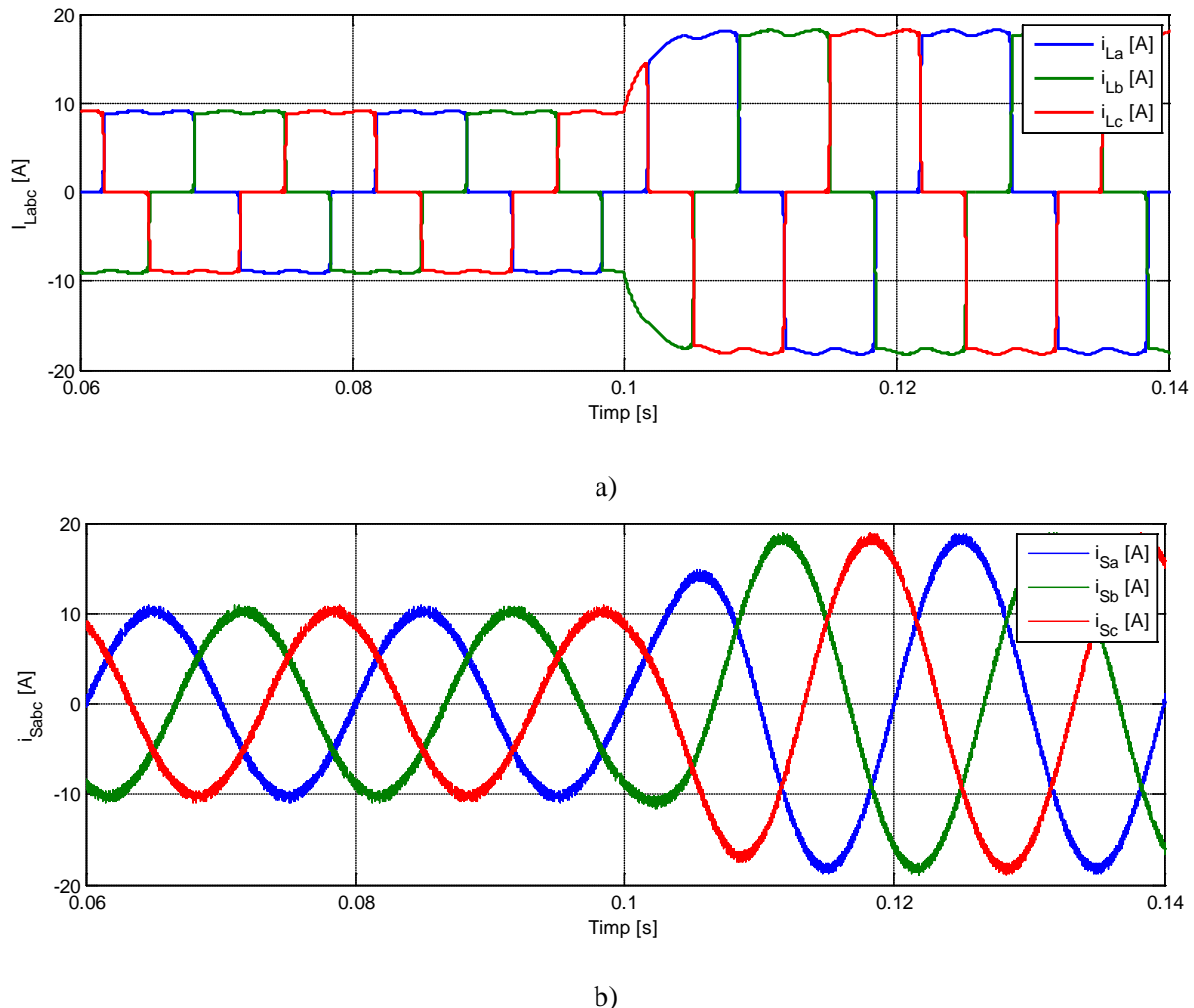


Figura 3-25 Comportamentul dinamic al controlului indirect

3.5. Studiu comparativ privind rezultatele filtrelor active cu 3 fire modelate și simulate

Filtrele active cu 3 fire sunt destinate utilizării în rețelele electrice unde există consumatori trifazați fără conductor de neutru.

Controlul filtrelor active cu 3 fire pornește de la premiza conform căreia consumatorul este un consumator trifazat și echilibrat.

Indicatorii de calitate care sunt cei mai afectați în condițiile întâlnite în practică sunt: THD_I (deformarea curentului); THD_V (deformarea tensiunii); PF (factorul de putere). De asemenea, mai pot fi menționate: efectul de flicker și golurile de tensiune.

În continuare se va prezenta o comparație între indicatorii de calitate a energiei electrice obținuți prin simularea filtrelor active controlate cu cele patru strategii de control prezentate în paragrafele anterioare.

3.5.1. Reducerea regimului deformant

Pentru punerea în evidență a reducerii regimului deformant prin utilizarea celor patru strategii de comandă s-a simulat o sarcină deformantă cu o putere de aproximativ 5kVA. Sarcina deformantă este un redresor necomandat trifazat format dintr-o punte redresoare cu șase diode și o sarcină rezistiv-

-inductivă în partea de c.c.

Curentul absorbit de sarcina deformantă este prezentat în Figura 3-1.

Se observă că sarcina este simetrică, absorbind același curent pe toate cele trei faze, ceea ce permite utilizarea unui filtru activ cu trei fire și trei brațe. În Figura 3-2 se prezintă spectrul de armonici a curentului absorbit de sarcina deformantă. Valoarea totală a distorsiunilor armonice (THD_1) este calculată la 30.03%.

Prin utilizarea celor patru strategii de comandă, se obțin valori ușor diferite pentru distorsiunea armonică a curentului absorbit de la rețea în condițiile în care parametrii care caracterizează atât rețeaua electrică de alimentare cât și sarcina, rămân neschimbați.

Deși toate cele patru strategii de comandă sunt capabile să reducă semnificativ valoarea distorsiunii armonici, totuși datorită algoritmilor de calcul diferiți, valoarea acesteia se diferențiază de la o strategie de control la alta așa cum se prezintă în Figura 3-26.

De asemenea, se poate observa că spectrul de armonici după filtrare este diferit de la o strategie de comandă la alta.

În cazul strategiei PQ se observă o atenuare mai puternică pentru armonică 5 decât pentru armonică 7, ambele rămânând ușor peste 0,4%. Armonică 11 este redusă sub 0,2%.

În cazul strategiei DQ se observă o atenuare progresivă în spectrul de armonici, armonicile 5 și 7 depășesc ușor valoarea de 0,2% iar celelalte armonici nu depășesc valoarea de 0,2%.

Strategia SCP conferă o atenuare puternică pentru armonicile superioare armonicile 5, aceasta rămânând la o valoare de aproximativ 2%.

Tehnica de control CI oferă o atenuare aproximativ uniformă pentru toate armonicile importante reușind să le atenueze sub valoarea de 0,2%.

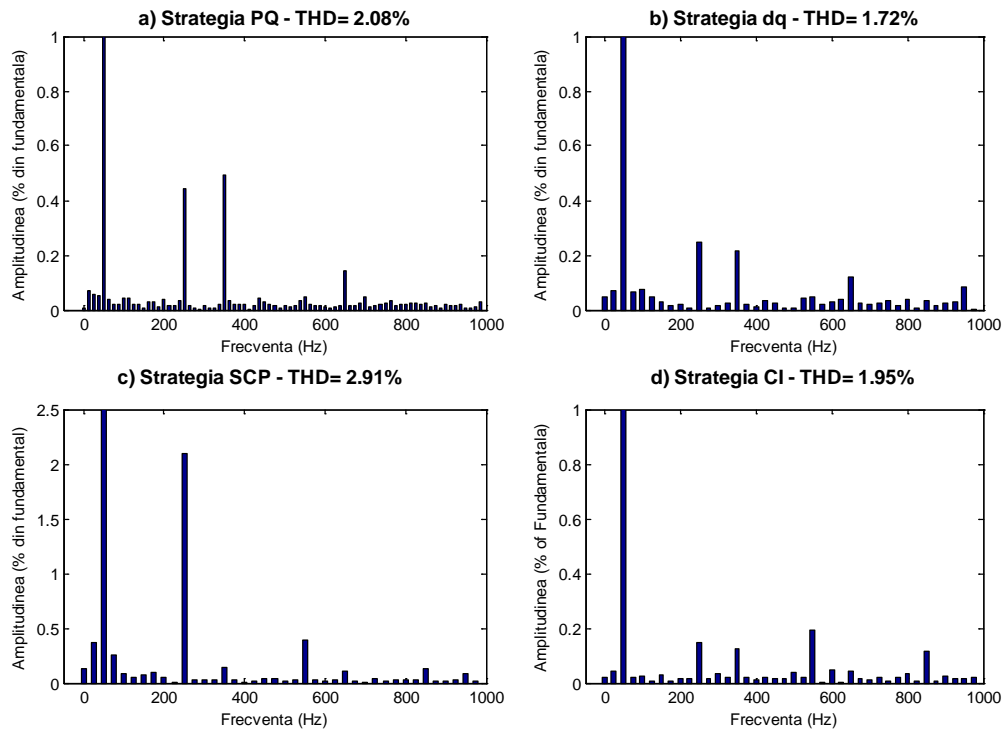


Figura 3-26 THD_1 obținut în urma utilizării celor patru strategii de control

3.5.2. Curentul absorbit de la sursă

Al doilea criteriu de comparație pentru cele patru strategii de comandă îl reprezintă valoarea curentului absorbit de la rețea la compensarea regimului deformant.

În Figura 3-27 sunt prezentați curenții absorbiți de la rețea în cele patru cazuri studiate, cu evidențierea valorii maxime ale amplitudinilor.

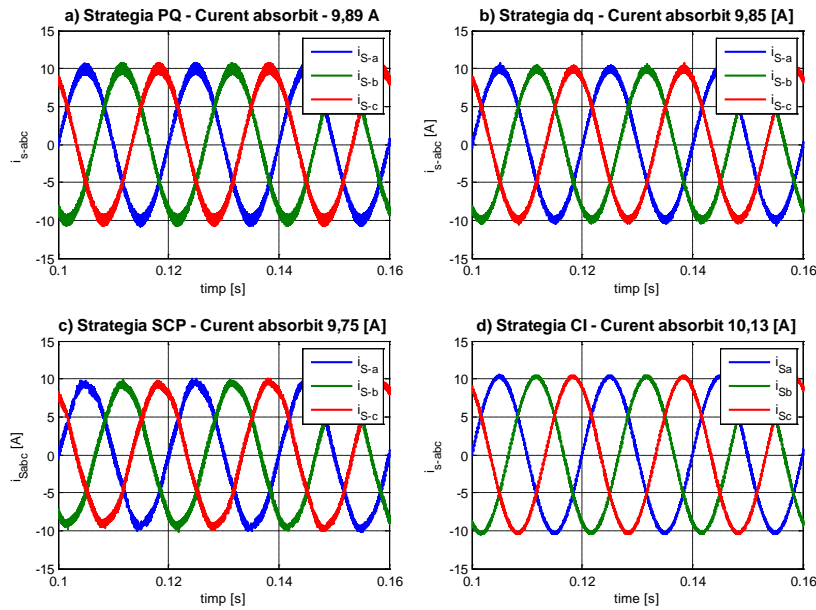


Figura 3-27 Curenții absorbiți de la rețea

3.5.3. Corectarea factorului de putere

Indicatorul de calitate a energiei electrice care poartă numele de factor de putere este un indicator reglementat atât la nivel european (EN50160, 1998) cât și la nivel național (PE143, 1994). Valoarea neutrală a factorului de putere în ambele cazuri este stabilită la valoarea $PF=0,92$. Aceasta este valoarea considerată optimă pentru tranzitul de energie electrică. La această valoare a factorului de putere pierderile sunt minime iar sistemul este stabil. Evident, cu cât valoarea factorului de putere se apropie mai mult de valoarea unitară cu atât pierderile în liniile de transport a energiei electrice sunt mai mici.

S-a simulat o sarcină rezistiv-inductivă a cărei factor de putere natural este 0,61.

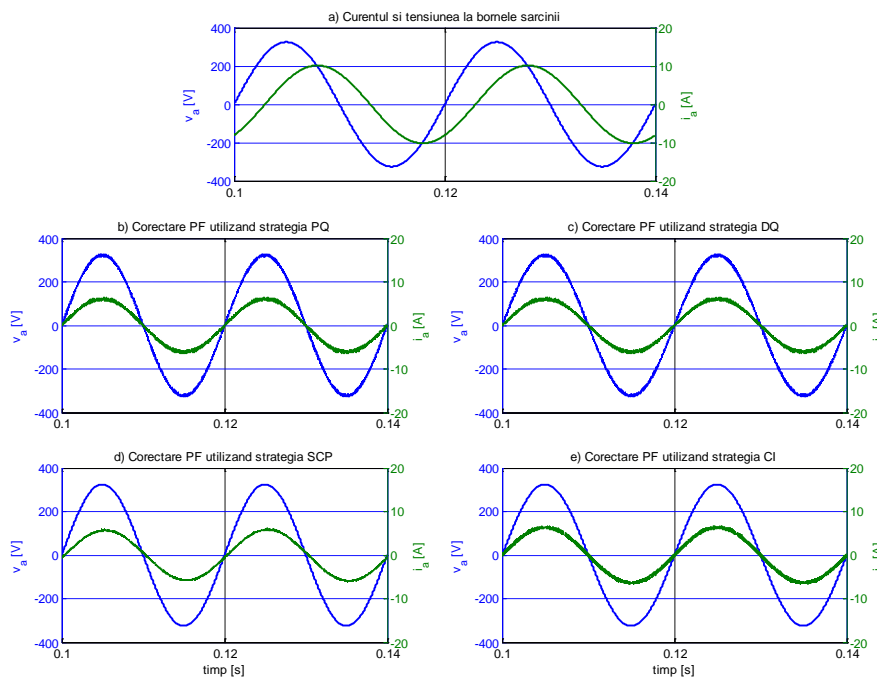


Figura 3-28 Corectarea factorului de putere

Este evident că indiferent de strategia de comandă utilizată se poate obține un factor de putere unitar. De asemenea, valoarea factorului de putere țintă (valoarea care se dorește a fi obținută) poate fi modificată.

De asemenea se poate observa în Figura 3-30 că amplitudinea curentului de sursă este mai mică decât amplitudinea curentului de sarcină în toate cele patru cazuri, ceea ce implică și o diminuare semnificativă a pierderilor energetice în lanțul de alimentare a sarcinii cu energie electrică.

3.6. Concluzii

În cadrul acestui capitol au fost prezentate, modelate și analizate patru tehnici de comandă pentru controlul filtrelor active cu trei brațe fără conductor de neutru. Analiza a fost făcută având la bază criteriile legate strict de comportamentul electric al ansamblului rețea - consumator - filtru activ.

Cele patru tehnici de comandă au fost modelate pentru a compensa armonicile de curent generate de o sarcină deformantă. Regimul deformant al sarcinii a fost simulat la valoarea de $THD_1=30,03\%$. În aceste condiții au fost prezentate rezultatele numerice pentru fiecare tehnică de comandă.

Pe lângă reducerea regimului deformant s-a constatat și o diminuare a amplitudinii curentului absorbit de la rețeaua electrică în condițiile conectării filtrului activ în paralel cu sarcina deformantă. Cele patru amplitudini obținute pentru fiecare tehnică de comandă în parte au fost comparate și analizate în a doua parte a capitolului.

Reducerea amplitudinii curentului electric nu poate fi interpretată, din punct de vedere electric, decât ca o reducere a pierderilor de energie fără ca sarcina să-și modifice comportamentul.

De asemenea s-a arătat că poate fi controlat și factorul de putere la o valoare prestabilită. Această valoare poate fi în concordanță cu normativele în vigoare sau poate fi în concordanță cu necesitățile rețelei electrice în acel punct.

Toate rezultatele prezentate în acest capitol se referă strict la îmbunătățirea indicatorilor de calitate a energiei electrice care caracterizează aspectele investigate aici, însă numai în condițiile în care sarcina este trifazată, echilibrată și fără conductor de neutru.

Contribuțiile aduse prin acest capitol sunt:

- Modelarea în mediul Matlab/SimPowerSystems a ansamblului rețea-filtru activ-sarcină neliniară fără conductor de neutru;
- Implementarea în cadrul modelului a patru strategii de comandă diferite: PQ, DQ, SCP, CI, ale căror modelele matematice au fost preluate din literatura de specialitate;
- Evidențierea și analiza rezultatelor numerice în punctele esențiale din structura filtrului activ;
- Evidențierea și analiza rezultatelor numerice în P_{CC} ;
- Realizarea unei analize comparative din punct de vedere al comportamentului ansamblului rețea-filtru activ-sarcină modelat. Analiza a fost realizată bazându-se pe trei criterii:
 1. Evoluția regimului deformant de la o strategie de control la alta;
 2. Evoluția amplitudinii curentului absorbit de la sursă în cazul utilizării celor patru strategii de comandă implementate;
 3. Controlul factorului de putere în P_{CC} ;
- Fundamentarea teoretică a metodei „Control Indirect” și validarea acesteia prin simulare.

Trebuie menționat că rețelele electrice, mai ales cele de joasă tensiune, sunt construite și funcționează cu conductor de neutru. În aceste condiții este necesară o evaluare a comportamentului unui filtru activ conectat într-o astfel de rețea.

Cap. 4 Contribuții la modelarea și simularea structurilor de comandă a filtrelor active de putere cu 4 fire

În rețelele electrice sunt conectați atât consumatori trifazați fără conductor de neutru cât și consumatori cu conductor de neutru. Prin urmare trebuie să existe soluții de îmbunătățire a calității energiei electrice în ambele tipuri de rețele.

În capitolul de față se propune implementarea a trei tehnici de comandă pentru un filtru activ de tip paralel cu 3 brațe și 4 fire. Aceste tehnici de comandă reprezintă dezvoltări ale strategiilor cu același nume prezentate în capitolul 3.

Curentul absorbit de sarcina neliniară este prezentat în Figura 4-1, iar spectrul de armonici pentru acești curenți este prezentat în Figura 4-2.

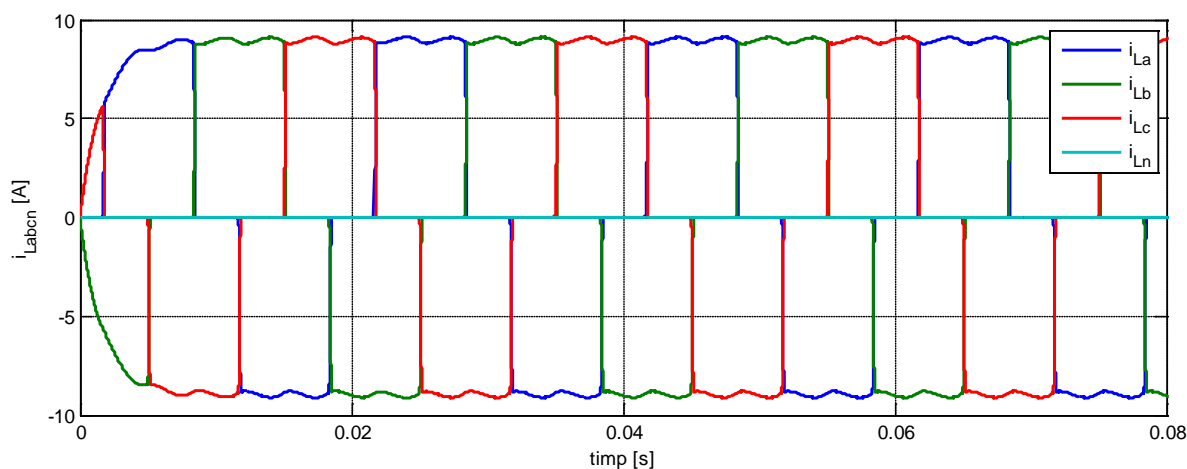


Figura 4-1 Curentul absorbit de sarcina neliniară

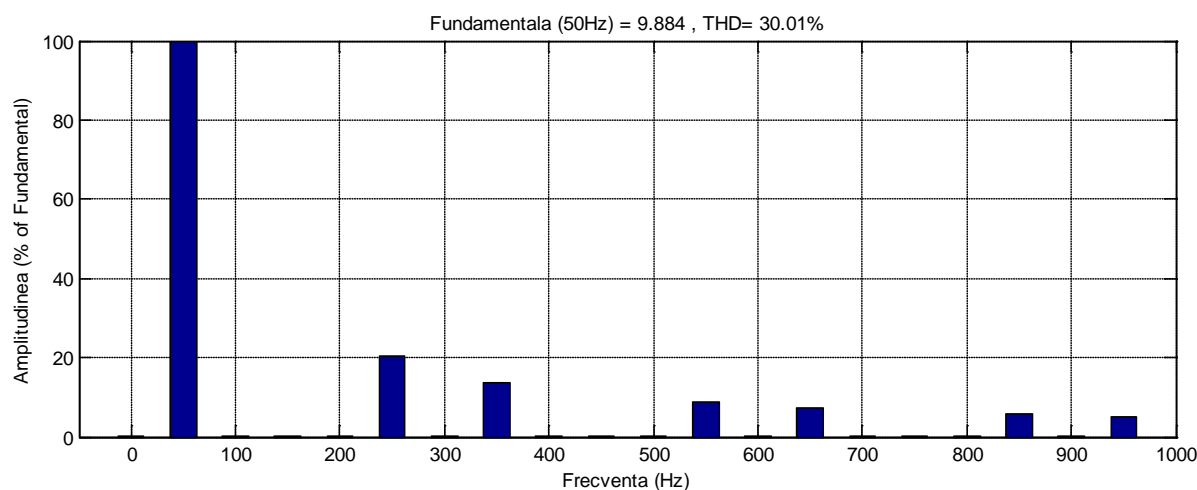


Figura 4-2 Spectrul de armonici a curentului absorbit de sarcina neliniară

4.1. Comanda filtrelor active cu 4 fire utilizând conceptul de putere instantanee - PQ

În Figura 4-3 este prezentată topologia unui filtru activ cu 3 brațe și 4 fire care poate fi comandat utilizând atât conceptul puterilor instantanee (PQ) cât și transformarea d-q (DQ).

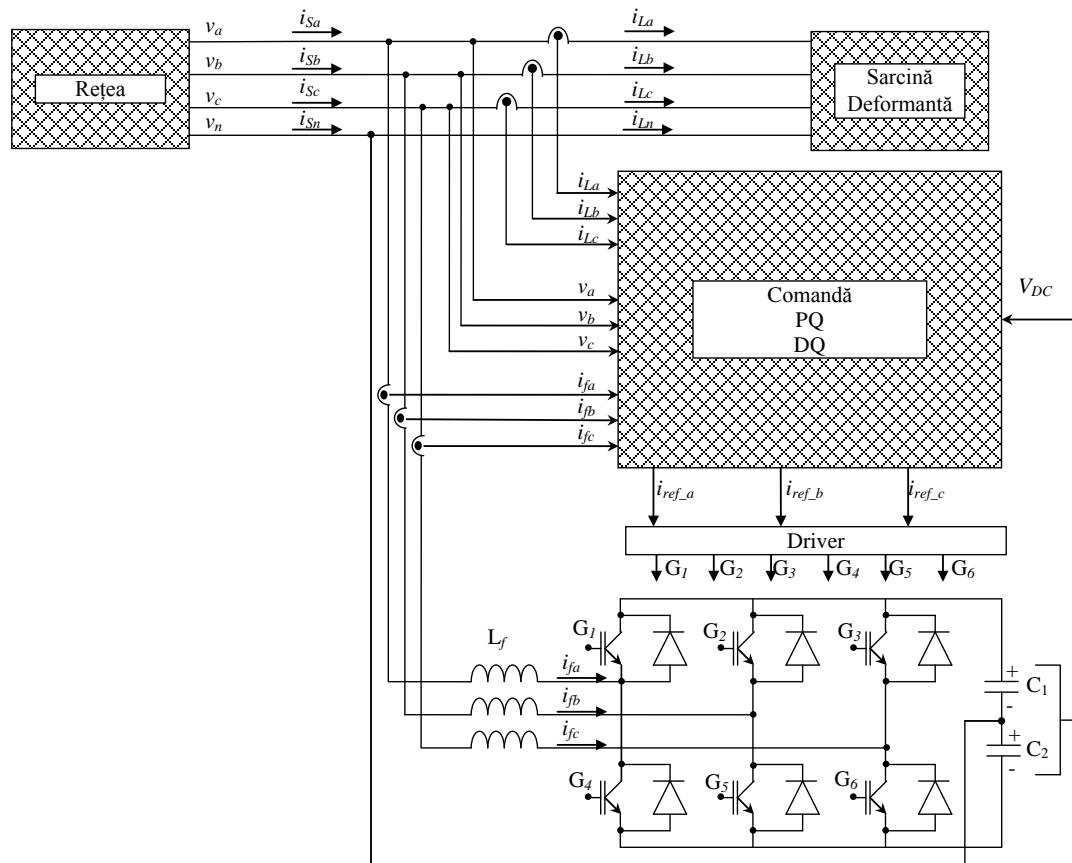


Figura 4-3 Topologie FA utilizată la comanda utilizând conceptul puterilor instantanee

4.1.1. Modelul matematic

Teoria generalizată a puterii instantanee a fost propusă de Akagi în 1984, ca răspuns la necesitatea creării unei baze teoretice pentru asigurarea funcționării echipamentelor statice de compensare a variațiilor rapide ale puterii reactive. Scopul metodei este de a extrage componentele care nu contribuie la puterea instantanee activă și de a le compensa fără întârzieri de timp.

Plecând de la curenții poluanți de sarcină i_{La} , i_{Lb} , i_{Lc} și de la tensiunile de fază u_{an} , u_{bn} , u_{cn} prin utilizarea transformatei Clarke se calculează mărimile p_{0L} , p_L și q_L care reprezintă puterea activă de secvență homopolară, puterea activă, respectiv reactivă instantanee la nivelul sarcinii.

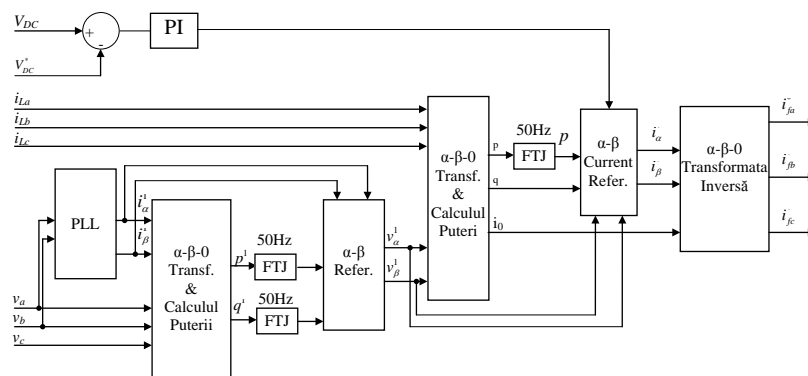


Figura 4-4 Comanda filtrului activ prin controlul puterilor instantanee

Acest algoritm de comandă necesită mijloace de calcul destul de importante, dar permite și compensarea unui eventual dezechilibru a curenților de sarcină inclusiv în situația în care există și sarcini monofazate sau bifazate.

Schema de comandă este prezentată în Figura 4-4. Spre deosebire de schema de comandă utilizată pentru filtrul activ cu 3 fire schema cu 4 fire ține cont și de componenta homopolara a curentului respectiv i_0 .

Așa cum se poate observa în Figura 4-4 este utilizat un bloc (PLL) pentru determinarea secvenței directe a curentului de sarcină. Faza și frecvența fundamentalei componente directe trebuie să fie determinate cu precizie de acest bloc. Detectorul de fază este prezentat în (Akagi H 2007).

4.1.2. Rezultate numerice

Conform transformatei Clarke, prin transformarea în coordonate α - β -0 se obțin cei trei curenți i_0 , i_α și i_β . Pornind de la consumatorul nelinier prezentat mai sus, prin măsurarea curenților și transformarea coordonatelor acestora se obțin cei trei curenți prezentați în Figura 4-5. Având în vedere că sarcina este trifazată și echilibrată rezultă că i_0 și i_β capătă valoarea 0. S-a ales o sarcină echilibrată pentru a se demonstra funcționalitatea metodei și totodată pentru a se putea face comparație între modelul cu conductor de neutru și modelul fără conductor de neutru. Perioada pe care se prezintă cei trei curenți este 0.04 – 0.14 s deoarece lucrarea de față nu ia în considerare regimul de pornire (regim dinamic).

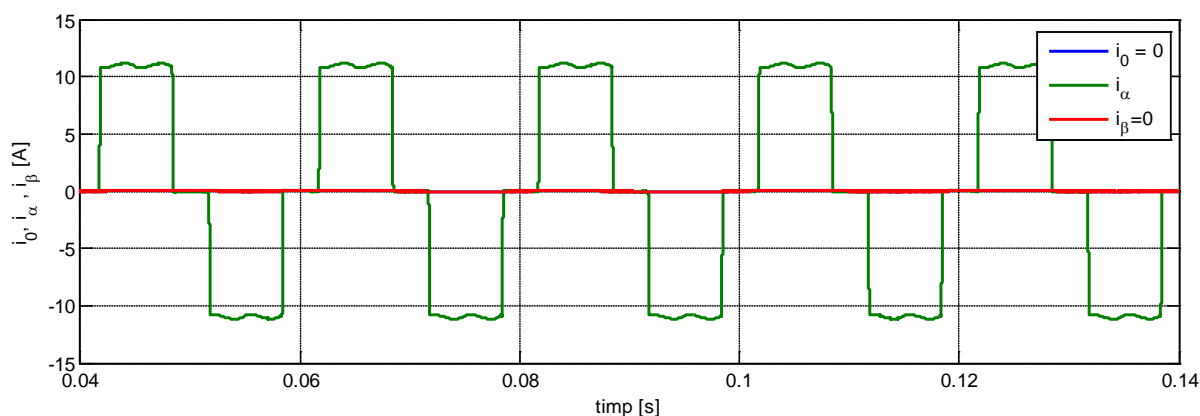


Figura 4-5 Curenții i_0 , i_α , i_β

Prin aplicarea transformatei Clarke inversă se obțin cei 3 curenți de referință i_{a-ref} , i_{b-ref} , i_{c-ref} (Figura 4-6) pentru comanda blocului de putere.

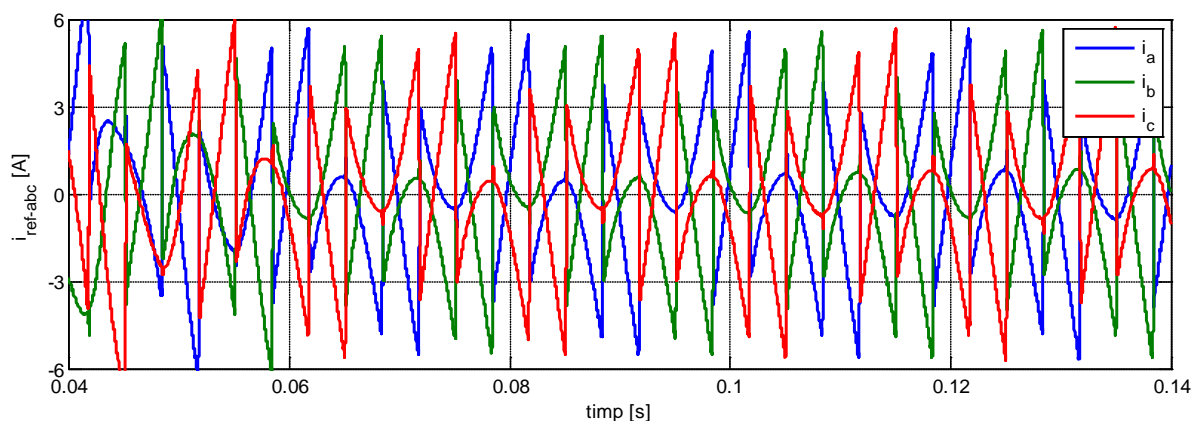


Figura 4-6 Curentul de referință $i_{abc-ref}$

În urma comenzii aplicată blocului de putere din cadrul filtrului activ, acesta absoarbe un curent așa cum este prezentat în Figura 4-7.

În Figura 4-8 sunt prezentate atât tensiunea cât și curentul pentru o fază, în raport cu rețeaua de alimentare.

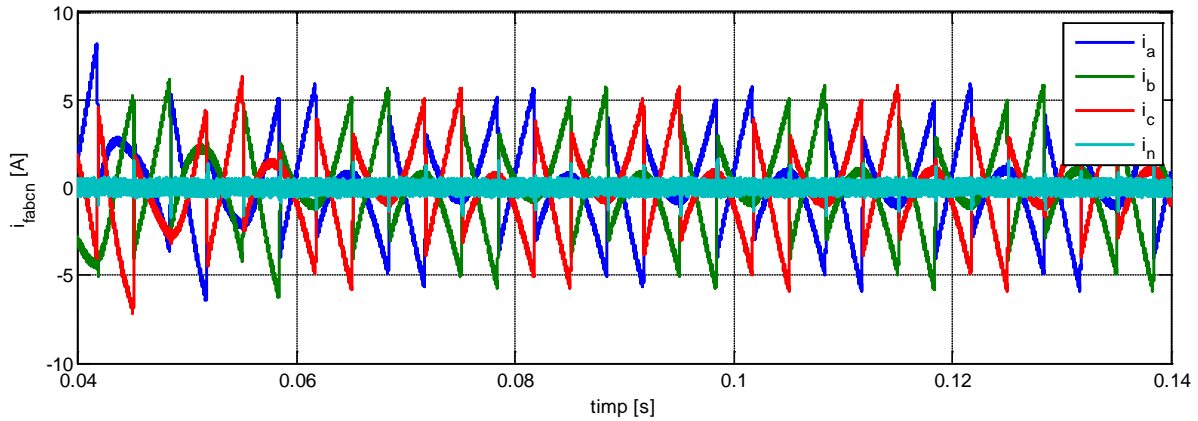


Figura 4-7 Curentul absorbit de filtrul activ

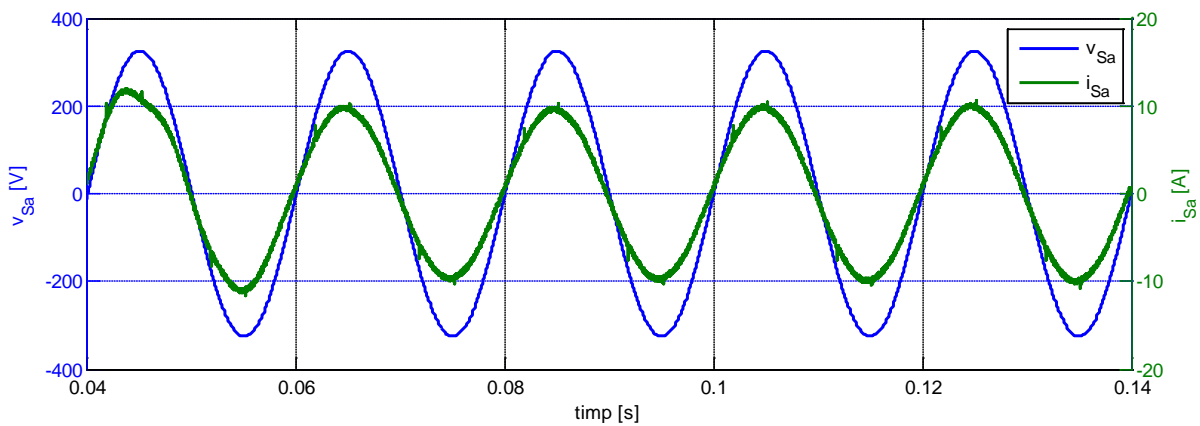


Figura 4-8 Tensiunea și curentul văzute de rețea pe faza a

Pentru verificarea metodei de comandă respectiv pentru demonstrarea funcționalității acesteia, se face analiza FFT a curentului de sursă. Această analiză este prezentată în Figura 4-9. Se observă că THD₁ s-a redus de la 30,01% (Figura 4-2) la valoarea de 3,47%.

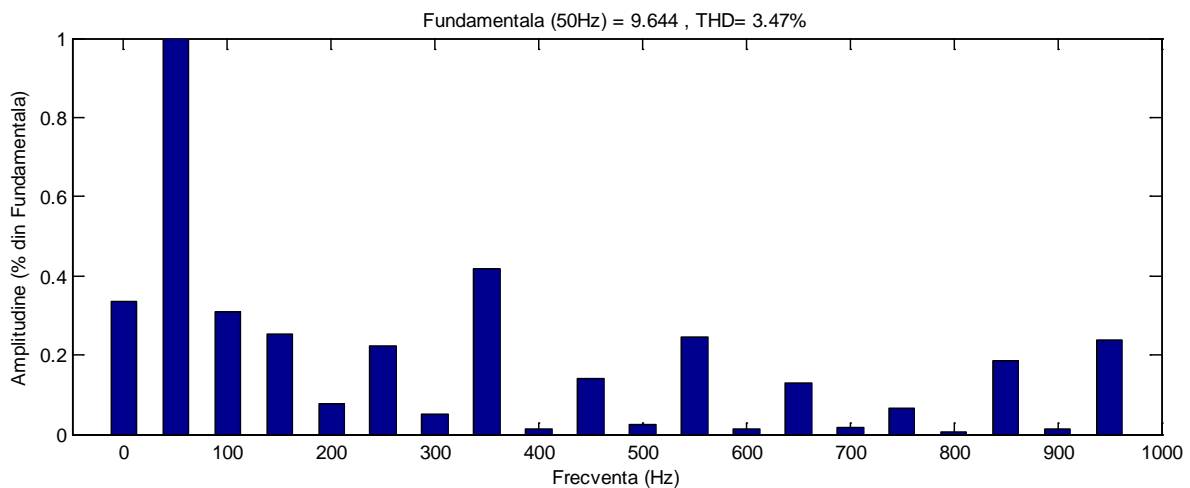


Figura 4-9 Analiza Fourier a curentului de sursă i_{Sabc}

4.2. Comanda filtrelor active cu 4 fire utilizând transformata DQ

În Figura 4-3 este prezentată topologia unui filtru activ cu 4 fire. Prin modificarea blocului „Comandă” în concordanță cu strategia DQ (Figura 4-11) se obține un filtru activ comandat cu strategia DQ.

4.2.1. Modelul matematic

Această metodă este cunoscută și sub denumirea de ”*algoritm bazat pe sisteme de referință sincrone*” (Ionescu F. 1998).

Schema de comandă este prezentată în Figura 4-10.

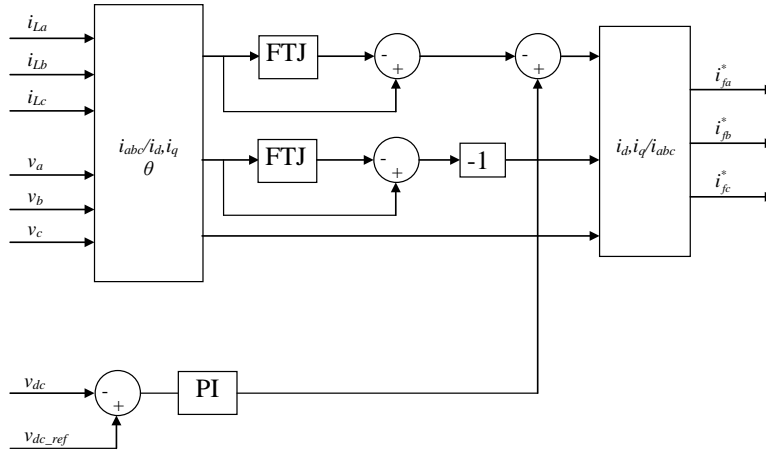


Figura 4-10 Comanda filtrelor active utilizând transformata DQ

4.2.2. Rezultate numerice

Filtrul activ pe lângă corectarea formei de undă, trebuie să acumuleze energie în condensator. Ținând cont de cele două aspecte se sintetizează un curent de referință pentru comanda filtrului activ. Acest curent de referință este obținut după transformarea *dq* inversă și este prezentat în Figura 4-11.

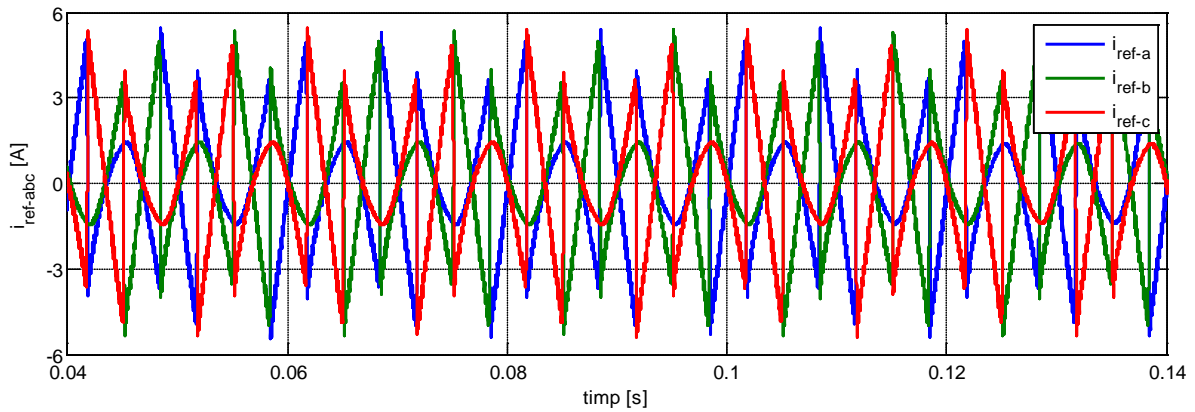


Figura 4-11 Referința de curent pentru cele trei faze – $i_{ref-abc}$

Curentul absorbit de filtrul activ este prezentat în Figura 4-12.

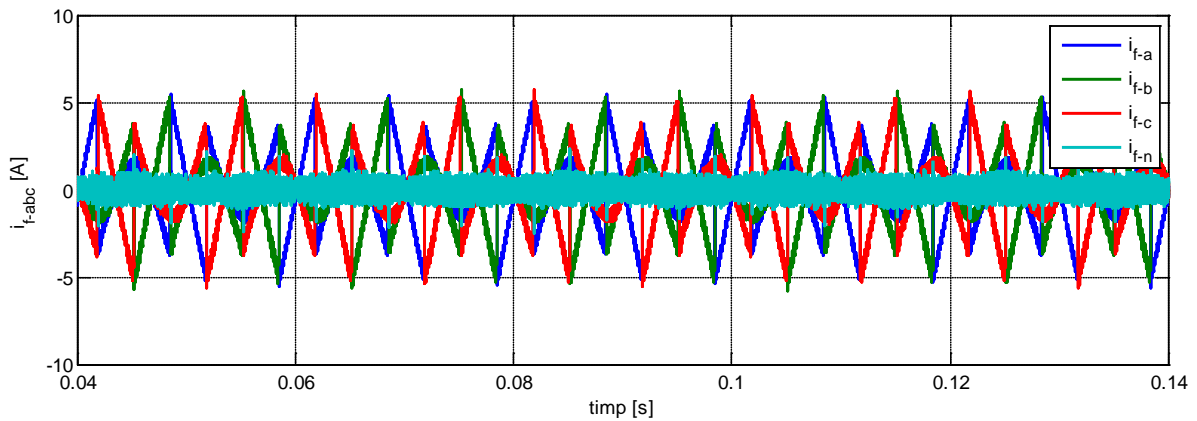


Figura 4-12 Curentul generat de filtrul activ

În Figura 4-13 sunt prezentate tensiunea și curentul pentru faza a , care după cum se observă sunt mult mai apropiate de o formă sinusoidală decât în situația în care filtrul activ lipsește. Pentru celelalte două faze spectrul armonic al tensiunii și al curentului sunt la fel.

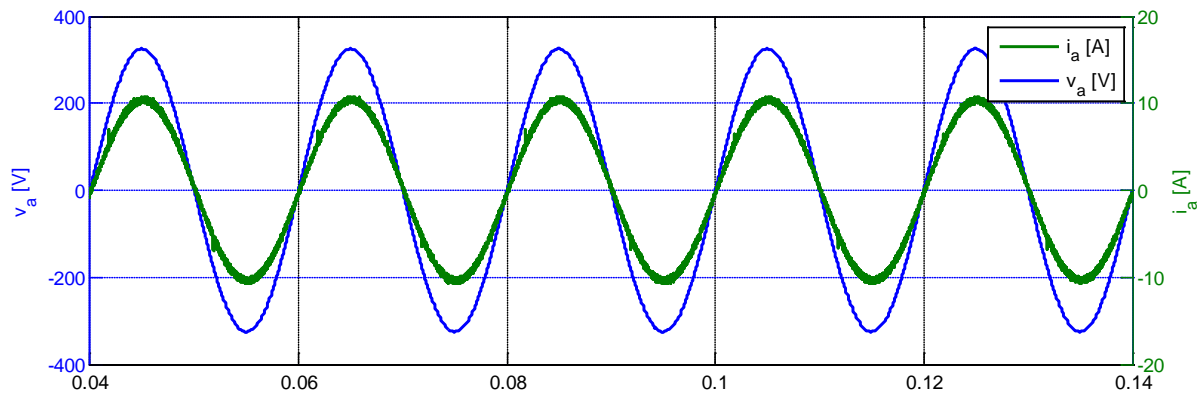


Figura 4-13 Tensiunea și curentul văzute la nivelul rețelei

În Figura 4-14 este prezentat indicatorul THD_1 (deformarea formei de undă pentru curent) care scade de la 30,01% (Figura 4-2) în condițiile neutilizării filtrului activ, la valoarea de 2,57% în condițiile utilizării filtrului activ comandat cu strategia DQ.

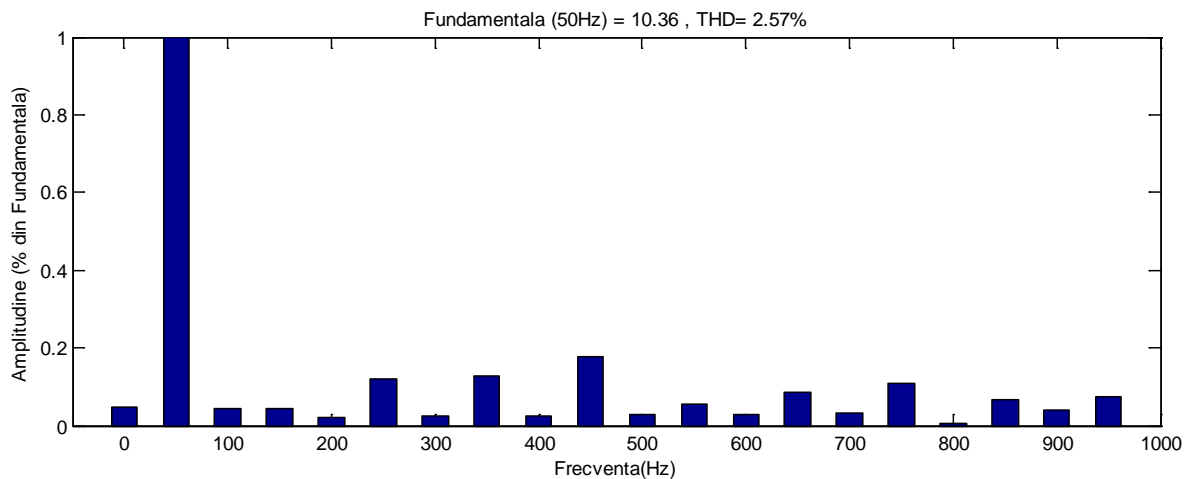


Figura 4-14 Analiza Fourier a curentului de sarcină

4.3. Comanda filtrelor cu invertoare trifazate de tensiune utilizând controlul indirect extins (CIE)

În Figura 4-15 este prezentată topologia unui filtru activ comandat utilizând conceptul CIE (Controlului Indirect Extins).

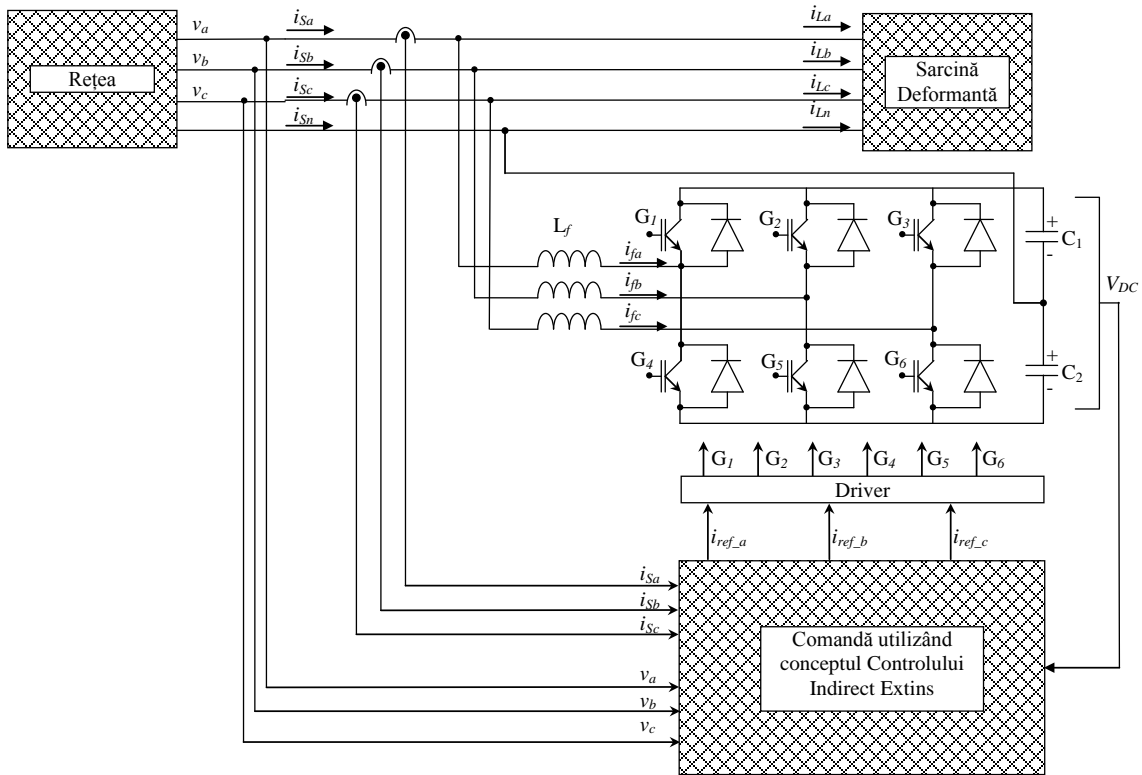


Figura 4-15 Topologie filtru activ comandat utilizând controlul indirect

4.3.1. Modelul matematic

Strategia de control numită *control indirect* a fost propusă în (Rosu E. 2009). Aceasta este o strategie care nu necesită cunoașterea îndeaproape a spectrului curentului absorbit de sarcina neliniară și a curentului reactiv absorbit de aceeași sarcină, așa cum s-a arătat în capitolul 3.

Dezvoltarea strategiei CI, dedicată filtrelor active cu 3 brațe și 3 fire, la strategia CIE, dedicată filtrelor active cu 3 brațe și 4 fire are două componente:

- Modificarea topologiei punții de putere prin utilizarea a două capacități respectiv C_1 și C_2 ca în Figura 4-15 obținându-se astfel punctul neutru;
- Adaptarea modelului de calcul pentru curenții de referință păstrând conceptul controlului indirect respectiv impunerea sinusoidală pentru curentul de rețea indiferent de forma curentului de sarcină.

Astfel:

La nivelul filtrului activ putem scrie:

$$i_{fa} + i_{fb} + i_{fc} = i_{fn} \quad (\text{Ec. 4-1})$$

unde: i_{fa}, i_{fb}, i_{fc} - reprezintă curenții absorbiți de filtru pe fazele a, b , și c ;

i_{fn} - reprezintă curentul de neutru al filtrului activ.

Curentul total pe faza „a” absorbit de la sursă este:

$$i_{sa}(t) = i_{La}(t) + i_{fa}(t) \quad (\text{Ec. 4-2})$$

Curentul pe faza a absorbit de sarcina neliniară este:

$$i_{La}(t) = i_{La}^1(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) \quad (\text{Ec. 4-3})$$

unde: $i_{La}^1(t)$ - reprezintă fundamentală curentului de sarcină;

$\sum_k i_{Lak}(t)$ - reprezintă componenta deformantă a curentului de sarcină;

$i_{Laq}(t)$ – reprezintă componenta reactivă.

Pe de altă parte, curentul pe faza „a” prin filtrul activ va fi:

$$i_{fa}(t) = i_{fa}^1(t) + \tilde{i}_{fa}(t) \quad (\text{Ec. 4-4})$$

$i_{fa}^1(t)$ – reprezintă componenta fundamentală a curentului absorbit de filtrul activ pe faza „a”;

$\tilde{i}_{fa}(t)$ – reprezintă componenta deformantă a curentului absorbit de filtrul activ pe faza „a”.

Conform strategiei *control indirect*, principiu păstrat și în cadrul strategiei *control indirect extins*, trebuie să impunem curentului de la sursă „ i_s ” pentru toate cele trei faze să fie sinusoidal și în fază cu tensiunea.

Astfel componenta care trebuie compensată de către filtrul activ este:

$$\sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t) + \tilde{i}_{fa} = \tilde{i}(t) \quad (\text{Ec. 4-5})$$

Din (Ec. 4-2) și (Ec. 4-5) rezultă:

$$i_{sa}(t) = i_{La}^1(t) + i_{fa}^1(t) + \tilde{i}(t) \quad (\text{Ec. 4-6})$$

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

$$i_a^*(t) = \varepsilon_{DC} \frac{V_a}{\sqrt{2}V} = \varepsilon_{DC} \sin \omega t \quad (\text{Ec. 4-7})$$

unde V este valoarea efectivă a tensiunii de fază a alimentării, iar ε_{DC} ieșirea regulatorului tensiunii de pe capacitatea C a convertorului. Impunerea de mai sus se compară cu valoarea măsurată a curentului absorbit de la rețea i_{sa} rezultând pentru comanda filtrului pe faza a :

$$u_{ca}^* = k(i_a^* - i_{sa}) = k(i_a^* - \tilde{i} - i_{La}^1 - i_{fa}^1) \quad (\text{Ec. 4-8})$$

unde k este amplificarea regulatorului.

Componentele sinusoidale ale sarcinii și filtrului, regulatorul fiind liniar, se regăsesc evident în impunerea sinusoidală pentru regulator, adică:

$$i_a^* = i_{La}^1 + i_{fa}^1 \quad (\text{Ec. 4-9})$$

Cu această remarcă rezultă impunerea pentru faza „a” a filtrului activ sub forma:

$$u_{ca}^* = -k \tilde{i} = -k(\tilde{i}_{fa}(t) + \sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t)) \quad (\text{Ec. 4-10})$$

adică proporțională cu componenta poluantă. În regim staționar regulatorul, dacă este corect proiectat, anulează eroare staționară la intrare, adică:

$$\tilde{i}_{fa}(t) = -(\sum_k i_{Lak}(t) + i_{Laq}(t)) \quad (\text{Ec. 4-11})$$

Pentru celelalte două faze impunerea sunt calculate în același mod și se obține sistemul de ecuații:

$$\begin{cases} i_a^*(t) = \varepsilon_{DC} \sin \omega t \\ i_b^*(t) = \varepsilon_{DC} (\sin \omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c^*(t) = \varepsilon_{DC} (\sin \omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{Ec. 4-12})$$

Având în vedere (Ec. 4-1) și (Ec. 4-12) rezultă controlul indirect pentru curentul de neutru.

Schema de comandă pentru controlul indirect extins este prezentată în Figura 4-16.

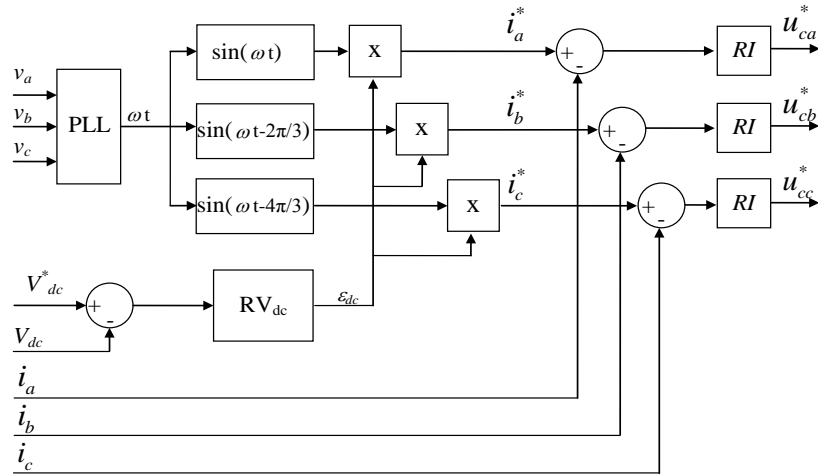


Figura 4-16 Strategia de comandă „control indirect extins”

4.3.2. Rezultate numerice

Unghiul rețelei ωt a fost determinat prin utilizarea unui bloc PLL.

Pornind de la funcția sinus, aplicând cele două defazaje de $-\frac{2\pi}{3}$ respectiv $-\frac{4\pi}{3}$ și impunând încărcarea condensatoarelor C_1 și C_2 se obține referința de curent pentru filtrul activ. Această referință de curent se determină pornind de la curentul absorbit de la sursă și nu de la curentul pe care ar trebui să îl genereze filtrul activ, astfel încât să fie eliminată componenta poluantă.

Curentul de referință cu care se compară curentul absorbit de la sursă se prezintă în Figura 4-17.

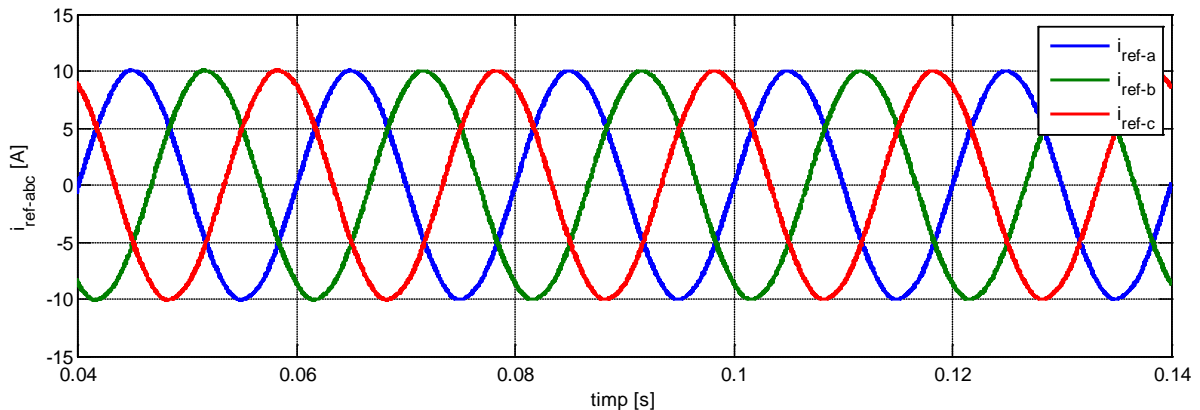


Figura 4-17 Curenții de referință $i_{ref-abc}$

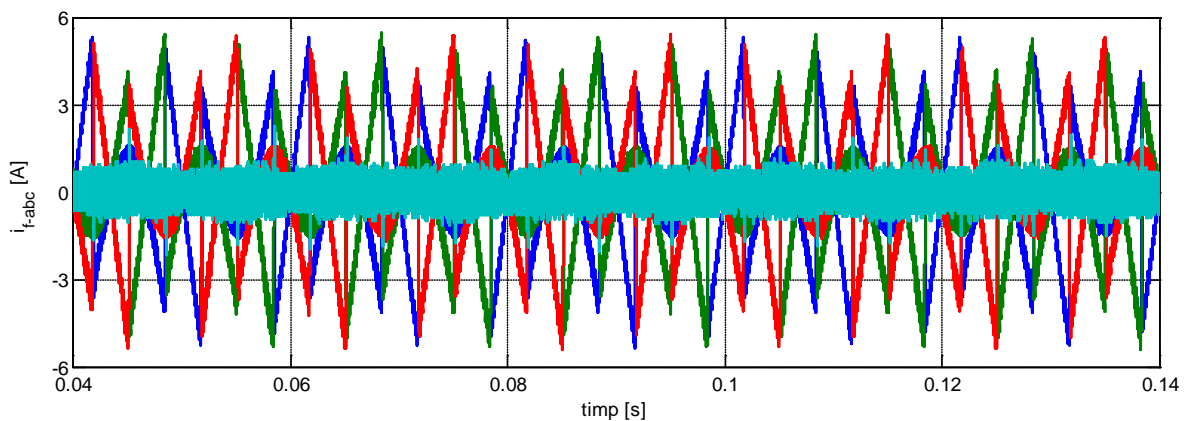


Figura 4-18 Curenții absorbiți de filtrul activ

În urma impunerii curentului de sursă ca acesta să fie sinusoidal și în fază cu tensiunea rezultă curentul absorbit de filtrul activ este prezentat în Figura 4-18.

În Figura 4-19 sunt prezentate formele de undă pentru tensiunea și curentul pentru faza *a*.

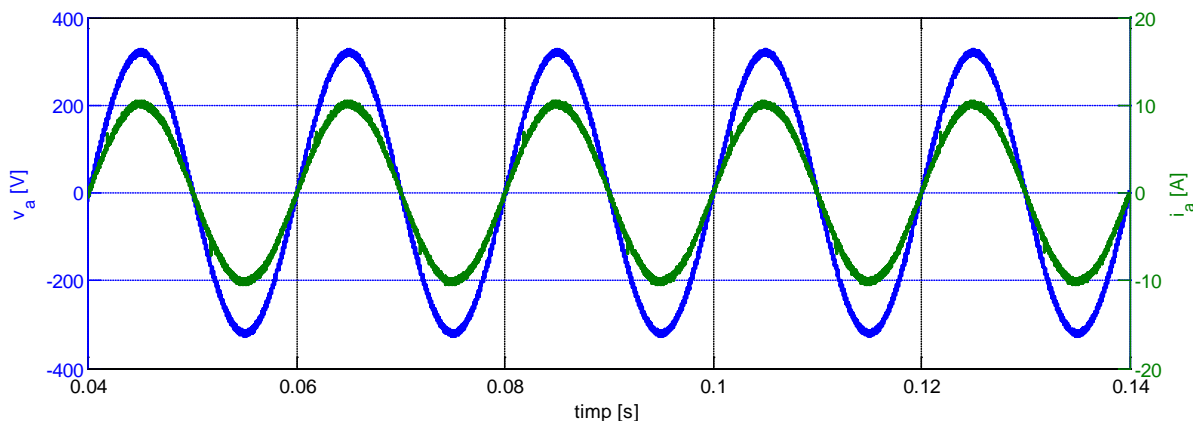


Figura 4-19 Tensiunea și curentul pe faza *a*

În Figura 4-20 este prezentat indicatorul THD_I care scade de la 30,01% (Figura 4-2) la valoarea de 2,00%. Această scădere are loc la conectarea unui filtru activ cu conductor de neutru și comandat cu strategia de control „Control Indirect Extins” la bornele unei sarcini trifazate fără conductor de neutru. Se poate observa că rezultatele sunt asemănătoare cu rezultatele obținute în cazul conectării în aceleași condiții a unui filtru activ de putere fără conductor de neutru.

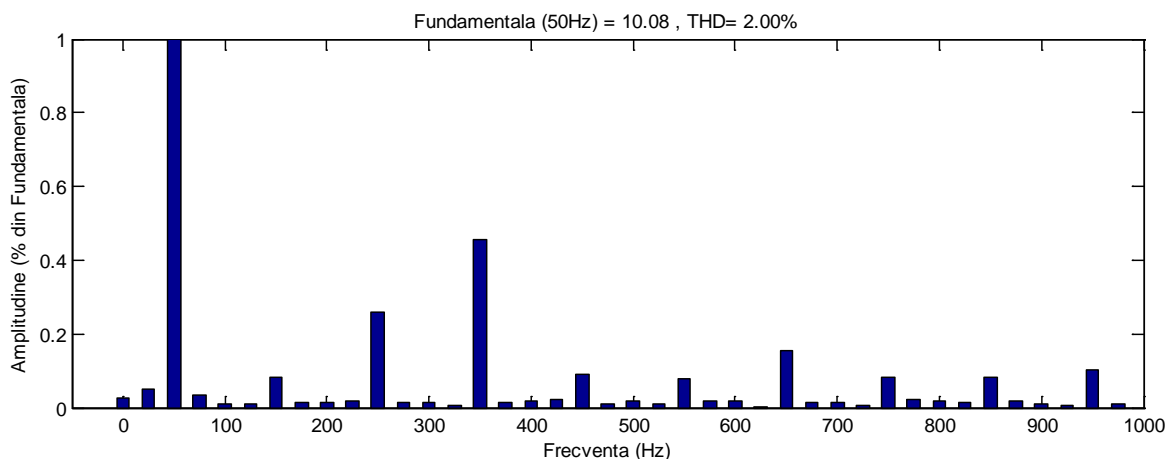


Figura 4-20 Analiza FFT a curentului absorbit de consumator

Se poate observa că atât prin utilizarea filtrelor active fără conductor de neutru cât și a celor cu conductor de neutru, în condițiile în care sarcina este aceeași – trifazată și echilibrată, rezultatele sunt apropiate ca valori absolute. Apar totuși mici diferențe de la o strategie de control la alta, diferențe care vor fi analizate în continuare.

De asemenea se poate spune ca un filtrul activ cu conductor de neutru poate înlocui cu succes unul fără conductor de neutru în configurațiile în care rețeaua electrică are disponibil acest conductor.

Spre deosebire de topologia fără conductor de neutru cea cu conductor de neutru permite obținerea îmbunătățirii calității energiei electrice și în situațiile în care sarcina nu este trifazată și echilibrată.

4.4. Studiu comparativ privind rezultatele filtrelor active cu 3 brațe și 4 fire

Filtrele active cu 4 fire sunt destinate utilizării în rețelele electrice unde există atât consumatori trifazați cât și consumatori monofazați sau bifazați. Aceștia, pe lângă deformarea formei de undă a

curentului electric și a factorului de putere redus sub valoarea neutrală, pot genera dezechilibre importante. De asemenea tot aici se întâlnesc probleme de calitate a energiei electrice referitoare la deformarea formei de undă a tensiunii, efectul de flicker și goluri de tensiune.

În continuare se va face o comparație între indicatorii de calitate a energiei electrice obținuți prin utilizarea filtrelor active cu 4 fire controlate cu trei strategii de control diferite. Criteriile de comparație sunt: Reducerea regimului deformant; Curentul absorbit de la sursă; Corectarea factorului de putere. Cele trei strategii de control sunt strategiile prezentate în acest capitol respectiv: PQ, DQ, și CIE. Schema de conectare a filtrului activ la bornele consumatorului este prezentată în Figura 4-21.

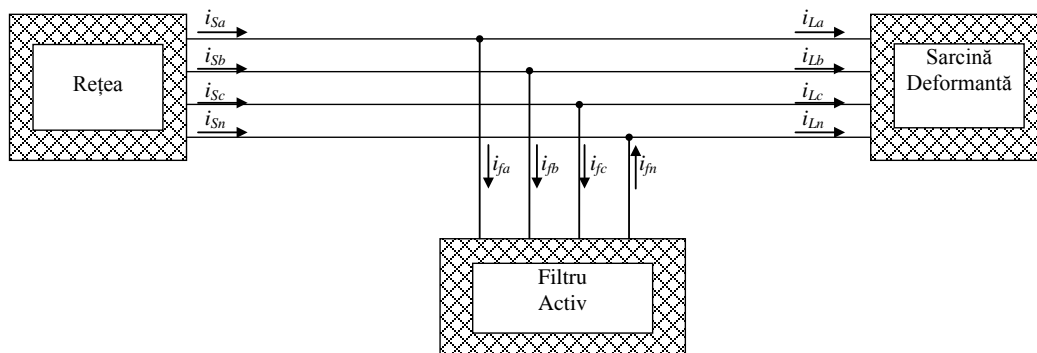


Figura 4-21 Conectarea filtrelor active cu conductor de neutru

4.4.1. Reducerea regimului deformant

Pentru a pune în evidență reducerea regimului deformant prin utilizarea celor trei strategii de comandă s-a simulat o sarcină deformantă cu o putere de aproximativ 5kVA. Sarcina deformantă este un redresor necomandat trifazat format dintr-o punte redresoare cu șase diode și o sarcină rezistiv-inductivă în partea de c.c.

Sarcina absoarbe un curent cu un factor de distorsiune de aproximativ 30%. Conectând la bornele acesteia filtrul activ care este comandat pe rând prin cele trei strategii (PQ, DQ, CIE) rezultatele sunt prezentate în Figura 4-22.

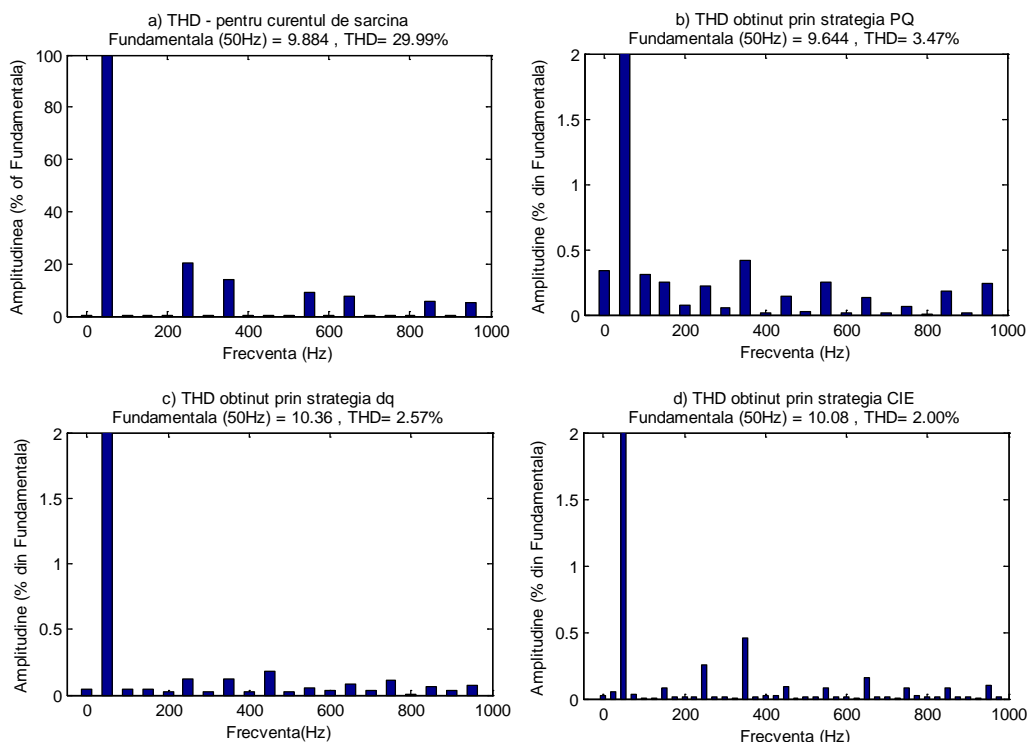


Figura 4-22 THD₁ obținut în urma utilizării celor trei strategii

În Figura 4-22 a) se prezintă analiza FFT a curentului de sarcină, curent care este echivalent cu absorbția de curent de la rețea în situația în care nu ar exista un filtru activ conectat în aceeași rețea.

În continuare sunt prezentate analizele FFT pentru curentul absorbit de la rețea în condițiile în care în paralel cu sarcina este conectat și un filtru activ care are diverse strategii de comandă. În cazul de față sunt prezentate rezultatele implementării strategiei PQ în Figura 4-22 b), a strategiei DQ în Figura 4-22 c) și a strategiei CIE în Figura 4-22 d).

Se poate observa în Figura 4-22 o distribuție diferită a spectrului de armonici în cazul celor trei metode de compensare a regimului deformat ceea ce indică funcționarea diferită a metodelor de comandă.

4.4.2. Curentul absorbit de la sursă

Un alt criteriu de comparație pentru cele trei strategii de comandă propus în acest capitol îl reprezintă valoarea efectivă a curentului absorbit de la sursă în condițiile compensării regimului deformat.

În Figura 4-23 sunt prezentați curenții absorbiți de la rețea în cele trei cazuri studiate și de asemenea și curentul absorbit de sarcina deformată.

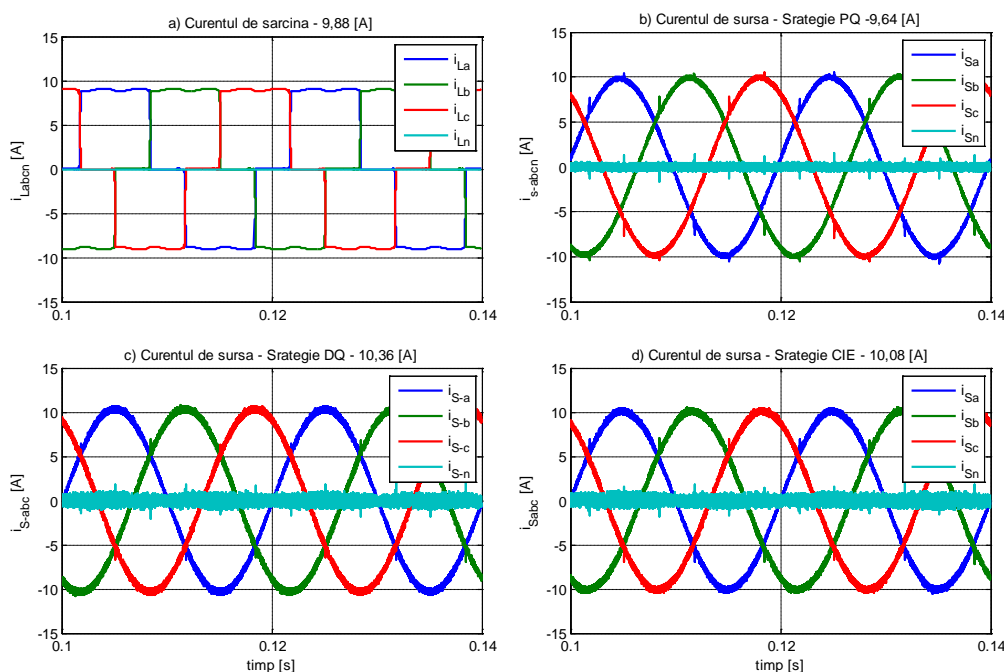


Figura 4-23 Curenții absorbiți de la rețea

4.4.3. Corectarea factorului de putere

După cum se cunoaște, problema factorului de putere în rețelele electrice este o problemă reglementată. Factorul de putere neutral este 0,92 conform EN50160 respectiv PE143/90. Valoarea 0,92 este considerată a fi valoarea optimă pentru tranzitul de energie electrică. La această valoare a factorului de putere, pierderile sunt minime iar sistemul este stabil. Evident, cu cât valoarea factorului de putere se apropie mai mult de valoarea unitară cu atât pierderile sunt mai mici.

S-a luat în considerare o sarcină rezistiv – inductivă a cărei factor de putere natural este 0,61. Utilizând cele trei strategii de comandă se pot observa în Figura 4-24 rezultatele obținute.

De asemenea, se poate observa în Figura 4-24 că amplitudinea curentului de sursă este mai mică decât amplitudinea curentului de sarcină în toate cele trei cazuri, ceea ce implică și o diminuare semnificativă a pierderilor energetice în lanțul de alimentare a sarcinii cu energie electrică.

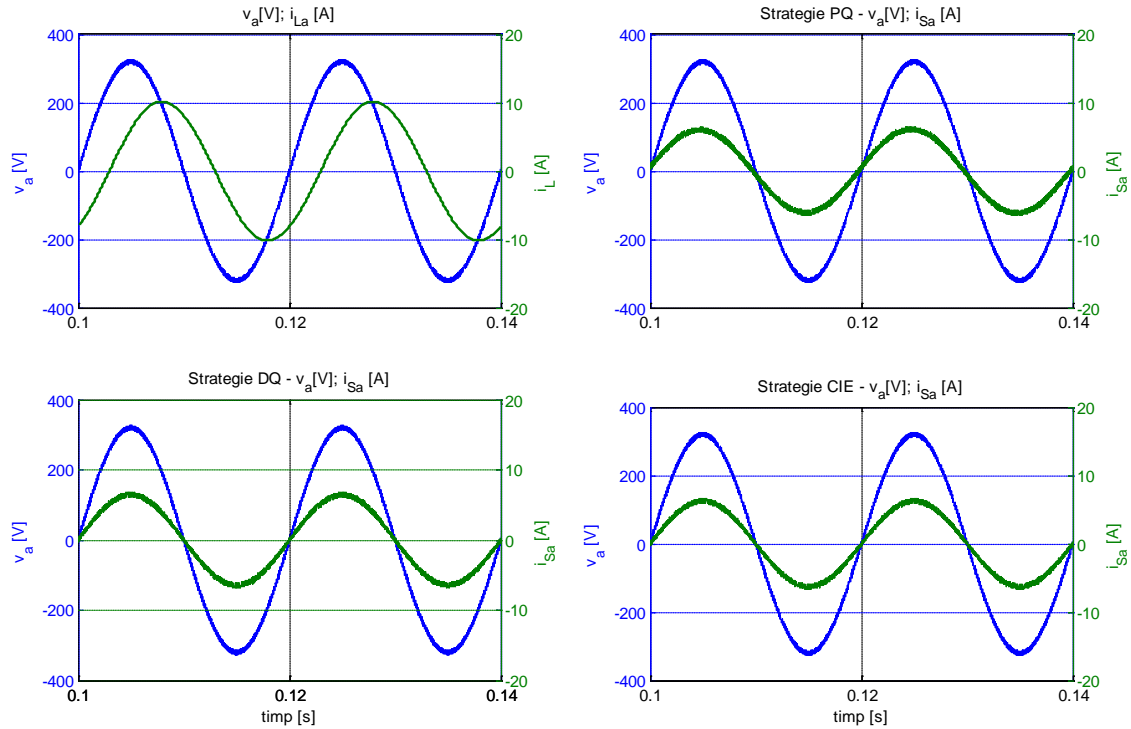


Figura 4-24 Corectarea factorului de putere cu ajutorul celor trei strategii de comandă

4.5. Concluzii

În capitolul de față s-a făcut trecerea de la filtrele active fără conductor de neutru la filtrele active cu conductor de neutru, utilizându-se aceeași punte trifazată cu trei brațe.

Prin utilizarea a două capacități conectate în serie ca soluție de stocare a energiei s-a creat punctul median care a fost conectat la conductorul de neutru.

Au fost dezvoltate tehnicile de comandă de la capitolul anterior prin modelarea, simularea și analiza acestora.

De asemenea, s-a constatat ca nu toate tehnicile de comandă utilizate la comanda filtrelor active fără conductor de neutru pot fi dezvoltate pentru sistemele cu conductor de neutru.

Tehnica de comandă care utilizează conceptul separării componentei poluante nu oferă o îmbunătățire a calității energiei electrice în cazul unei topologii a circuitului de forță care oferă și punctul de neutru.

Pentru a se putea face o comparație între rezultatele obținute cu filtrele active cu conductor de neutru și cele fără conductor de neutru s-a utilizat, pe parcursul analizei tehnicilor de comandă, aceeași sarcină deformantă ca și în capitolul anterior, respectiv o punte trifazată necomandată cu sarcină rezistiv-inductivă.

Rezultatele în cazul regimului deformant sunt comparabile în cele două cazuri respectiv în cazul unei rețele fără conductor de neutru și cu conductor de neutru.

Situațiile speciale în cazul sistemelor cu conductor de neutru au fost analizate separat.

În ceea ce privește curentul absorbit de la rețea s-a constatat o diminuare a amplitudinii acestuia la utilizarea filtrului activ în paralel cu sarcina fiind remarcate ușoare diferențe între cele trei tehnici de comandă analizate.

De asemenea, s-a arătat în acest capitol că factorul de putere poate fi controlat astfel încât să valoarea acestuia să fie menținută la valoarea necesară în rețea.

Contribuțiile aduse prin acest capitol sunt:

- Modelarea în mediul Matlab/SimPowerSystems a ansamblului rețea-filtru activ-sarcină neliniară cu conductor de neutru;
 - Implementarea în cadrul modelului a trei strategii de comandă diferite: PQ, DQ, CIE.
 - Evidențierea și analiza rezultatelor numerice în punctele esențiale din structura filtrului activ;
 - Evidențierea și analiza rezultatelor numerice în P_{CC} .
 - Realizarea unei analize comparative din punct de vedere al comportamentului ansamblului rețea-filtru activ-sarcină modelat. Analiza a fost realizată bazându-se pe trei criterii:
 1. Evoluția regimului deformant de la o strategie de control la alta;
 2. Evoluția amplitudinii curentului absorbit de la sursă în cazul utilizării celor patru strategii de comandă implementate;
 3. Controlul factorului de putere în P_{CC} .
 - S-a propus o nouă strategie de control respectiv „Controlul Indirect Extins” care reprezintă extinderea domeniului de aplicare a strategiei „Control Indirect” de la sistemele fără conductor de neutru la sistemele cu conductor de neutru.
 - S-au analizat rezultatele obținute cu noua strategie de control având în vedere următorii indicatori de calitate a energiei:
 1. Regimul deformant pentru curent (THD_I);
 2. Factorul de putere (PF);
 3. Echilibrul curenților de la sursă (K_I);
 4. Echilibrarea tensiunilor în P_{CC} (K_U);
 5. Reducerea efectului de flicker
- Din acest capitol rezultă următoarele perspective de dezvoltare:
- Evaluarea economiei de energie electrică obținută în cazul utilizării filtrelor active atât pentru sistemele cu conductor de neutru cât și pentru sistemele fără conductor de neutru.
 - Dezvoltarea și implementarea strategiei CIE pentru o punte cu patru brațe;
 - Studiarea influenței capacităților C_1 și C_2 asupra funcționării filtrului activ;
 - Simplificări ale comenzii pentru situații distincte cum ar fi corectarea unui anumit indicator de calitate a energiei (doar THD, doar dezechilibru, doar factor de putere, doar flicker etc.)
 - Studiarea influenței metodelor de comandă asupra armonicilor individuale de unde poate rezulta o recomandare pentru utilizarea comenzii adecvate în funcție de spectrul de armonici generat de sarcină.

Cap. 5 Contribuții la diversificarea aplicabilității filtrelor active de putere

5.1. Utilizarea energiilor regenerabile pentru îmbunătățirea calității energiei electrice

În perioada contemporană energiile regenerabile sunt din ce în ce mai mult utilizate atât în rețele electrice izolate cât și prin injectarea lor în rețeaua electrică națională. Aceste două soluții, în literatura internațională, poartă denumirile de OFF-GRID respectiv ON-GRID.

Indiferent de soluția practică, datorită dezvoltării electronicii de putere și a tehnicii de calcul, valorile indicatorilor de calitate a energiei electrice sunt din ce în ce mai scăzute. Evident, această scădere a valorilor indicatorilor de calitate a energiei se datorează utilizării în rețelele electrice de receptoare care înglobează în ele electronică de putere și tehnică de calcul, ceea ce face ca receptoarele să devină neliniare.

Utilizarea de receptoare neliniare poate avea efecte mai pronunțate asupra indicatorilor de calitate a energiei electrice în rețelele izolate decât în rețelele considerate cu putere de scurt-circuit infinită. Aceasta nu poate decât să ducă la concluzia că în rețelele izolate trebuie acordată o atenție deosebită calității energiei electrice dacă se dorește o eficientizare a producției și a consumului de energie electrică.

Tot dezvoltarea electronicii de putere și a tehnicii de calcul a permis realizarea de noi echipamente care să poată fi conectate la bornele consumatorilor neliniari iar rețeaua în care acestea sunt conectate să perceapă ansamblul ca un consumator liniar.

De asemenea dezvoltarea echipamentelor de producere a energiei electrice din surse regenerabile (panouri fotoelectrice, eoliene etc.) permite producția de energie la locul de consum, acolo unde resursele naturale sunt disponibile.

Din punct de vedere economic, soluția optimă pentru valorificarea energiei electrice produse din surse regenerabile diferă de la țară la țară. Astfel sunt țări care acordă un preț mai mare pentru energia verde injectată în sistem decât prețul energiei pe care o cumpără consumatorul din același sistem. De asemenea sunt țări care nu stimulează micul producător de energie electrică din diverse considerente, cel mai adesea incapacitatea sistemului de a prelua energie verde de la producătorii mici.

În aceste condiții, există două soluții de valorificare a energiei verde: prin livrarea ei în totalitate în sistemul energetic național sau prin consumarea acesteia în totalitate de către producător. Din punct de vedere tehnic ambele soluții sunt realizabile, diferența între ele constând în topologie.

În Figura 5-1 se prezintă o soluție de interconectare a sursei regenerabile la rețea prin intermediul unui filtru activ acceptând ipoteza că toată energia produsă de sursa regenerabilă este consumată de sarcină. Astfel, filtrul activ joacă un dublu rol: acela de a valorifica energia produsă dintr-o sursă regenerabilă și de a eficientiza consumul prin îmbunătățirea indicatorilor de energie electrică.

În continuare se prezintă câteva rezultate ale simulării topologiei din Figura 5-1 unde s-a folosit drept sursă regenerabilă o sursă de curent controlabilă. Sarcina simulată capătă mai multe forme pentru a pune în evidență cele două aspecte: injecția de energie din sursa regenerabilă și îmbunătățirea indicatorilor de calitate.

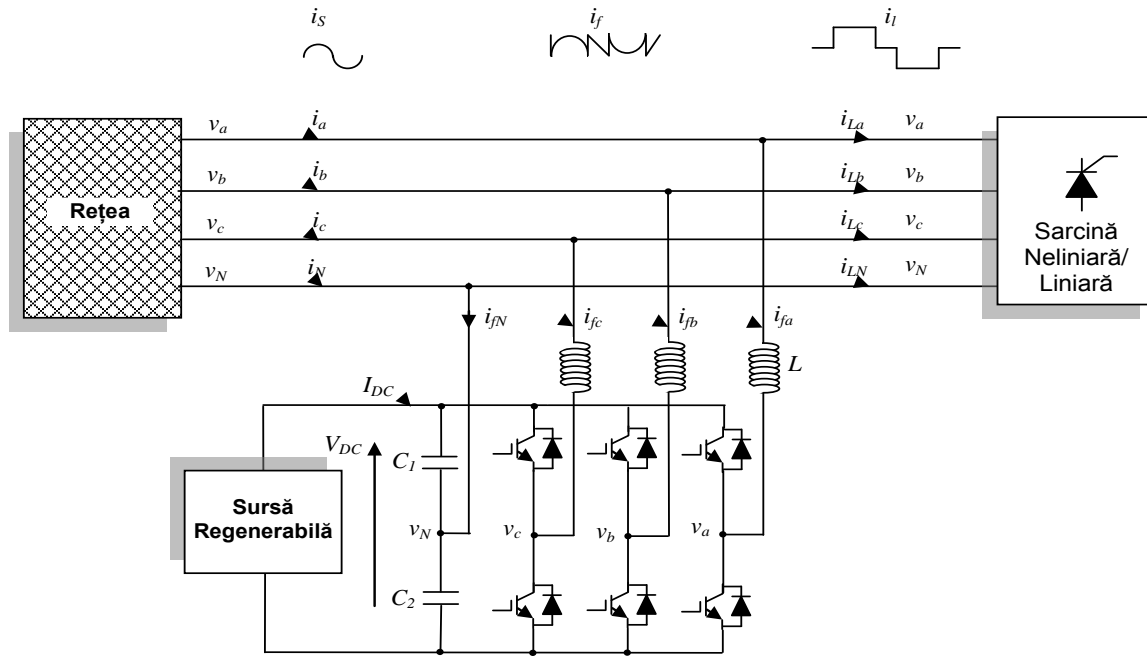


Figura 5-1 Conectarea sursei regenerabile prin intermediul filtrului activ

5.1.1. Injecția de energie din sursa regenerabilă având o sarcină inductivă

Pentru a simula injecția de energie electrică din sursa regenerabilă s-a simulat o sarcină rezistiv-inductivă iar strategia de control a filtrului activ este de tip CIE. Sarcina funcționează la un factor de putere de 0,69 ceea ce înseamnă că există și tranzit de energie reactivă.

În această situație filtrul activ realizează injecția de energie electrică disponibilă de la sursa regenerabilă și concomitent realizează și corectarea factorului de putere. Astfel restul necesarului de energie este absorbit de la rețea la un factor de putere unitar.

În Figura 5-2 se prezintă curenții și tensiunile în P_{CC} în condițiile în care se utilizează o sarcină rezistiv-inductivă a cărei caracteristici sunt: puterea activă $P=0.85$ kW, puterea reactivă $Q=0,88$ kvar, puterea aparentă $S=1,5$ kVA iar factorul de putere este $PF=0.69$. Astfel în Figura 5-2a) se prezintă curentul de rețea pe cele trei faze care se observă că la momentul $t=0,1s$, moment la care crește curentul generat de sursa regenerabilă de la valoarea 0A la valoarea 4A, se diminuează proporțional cu acesta; în Figura 5-2 b) se prezintă curentul prin filtrul activ care la momentul $t=0,1s$ prezintă o creștere proporțională cu a curentului de la sursa regenerabilă; în Figura 5-2 c) se prezintă curentul prin sarcină care nu se modifică, iar în Figura 5-2d) se prezintă tensiunea în P_{CC} care de asemenea nu prezintă nici o modificare.

Se poate observa cu ușurință că tensiunea în P_{CC} este în fază cu intensitatea curentului de rețea.

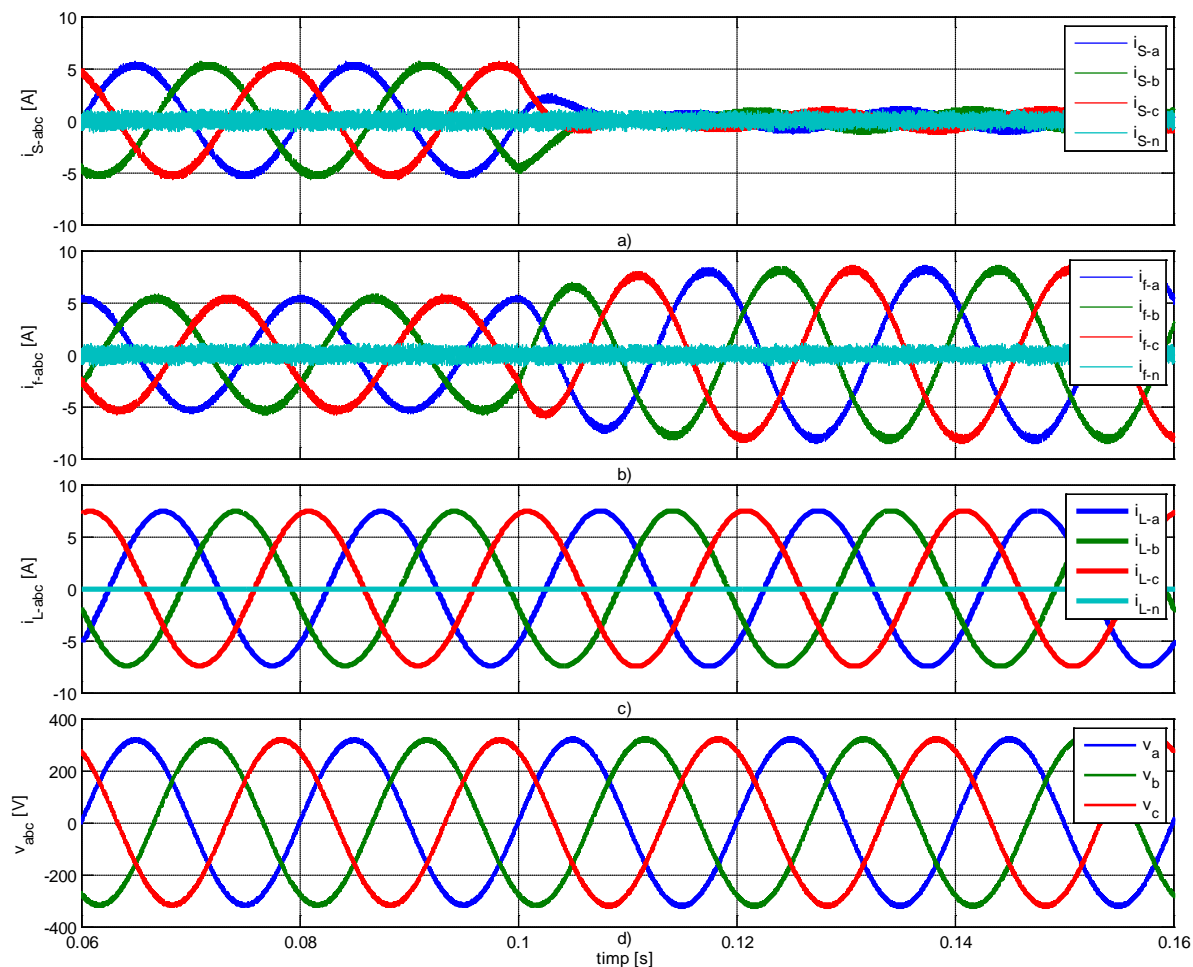


Figura 5-2 Curenții și tensiunile în P_{CC} la corectarea factorului de putere

5.2. Echilibrarea curentului absorbit de la sursă în cazul consumatorilor fără conductor de neutru

În general, în rețelele electrice, absorbția de curent de la rețea nu este întotdeauna simetrică. De exemplu, în situațiile în care există sarcini trifazate dezechilibrate sau sarcini bifazate conectate în rețea, curentul absorbit pe cele trei faze este dezechilibrat. Acest lucru generează pierderi suplimentare atât în înfășurările transformatorului cât și pe linia electrică de alimentare a consumatorului.

S-a simulat o sarcină liniară trifazată dezechilibrată fără conductor de neutru. Rezultatele conectării unui filtru activ de putere la bornele acesteia sunt prezentate în Figura 5-3.

În Figura 5-3 se prezintă echilibrarea curentului pe cele trei faze, prin utilizarea unui filtru activ controlat cu cele patru strategii de control (PQ, DQ, SCP, CI), în condițiile în care curentul de sarcină are un factor de dezechilibru $k_1 = 14,45\%$ (vezi Figura 5-3 a)).

Se poate observa în Figura 5-3 o reducere semnificativă a factorului de dezechilibru astfel: prin utilizarea strategie PQ se obține $k_1 = 0\%$ (vezi Figura 5-3 b)); prin utilizarea strategie DQ se obține un factor de dezechilibru $k_1 = 3,8\%$ (vezi Figura 5-3c)); prin utilizarea strategiei SCP factorul de dezechilibru obținut este $k_1 = 12,20\%$ (vezi Figura 5-3d)); iar prin utilizarea strategiei CI s-a obținut un factor de dezechilibru $k_1 1,7\%$ (vezi Figura 5-3e)).

În cazul strategiei SCP se observă o creștere semnificativă a valorii distorsiunii armonice respectiv $THD_1 = 6,60\%$ ceea ce face ca această strategie să nu fie recomandată spre utilizare decât în situația în care sarcina este echilibrată. Această creștere a nivelului de distorsiune se datorează metodei de

control.

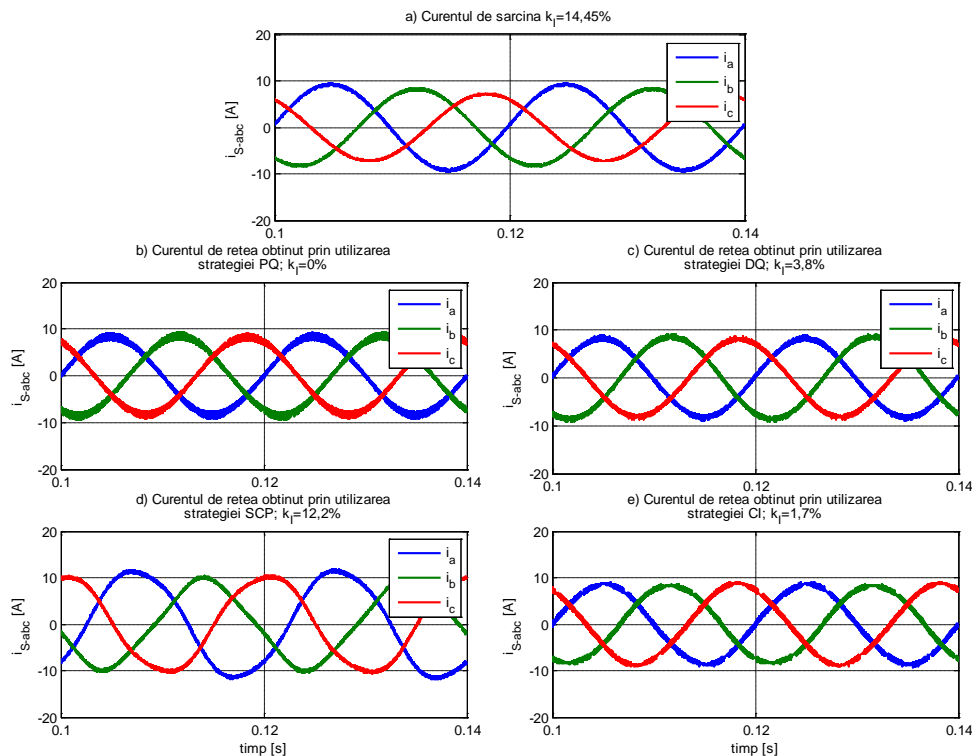


Figura 5-3 Echilibrarea curentului în PCC

5.3. Echilibrarea curentului absorbit de la sursă în cazul consumatorilor cu conductor de neutru

În general, în rețelele electrice, absorbția de curent de la rețea nu este nici de departe simetrică, având în vedere că există simultan alimentați atât consumatori trifazați dar și monofazați. Acest lucru generează pierderi suplimentare atât în înfășurările transformatorului cât și pe linia electrică de alimentare a consumatorului.

S-a simulat o sarcină liniară trifază dezechilibrată cu conductor de neutru. Rezultatele conectării unui filtru activ de putere la bornele acestuia sunt prezentate în Figura 5-4.

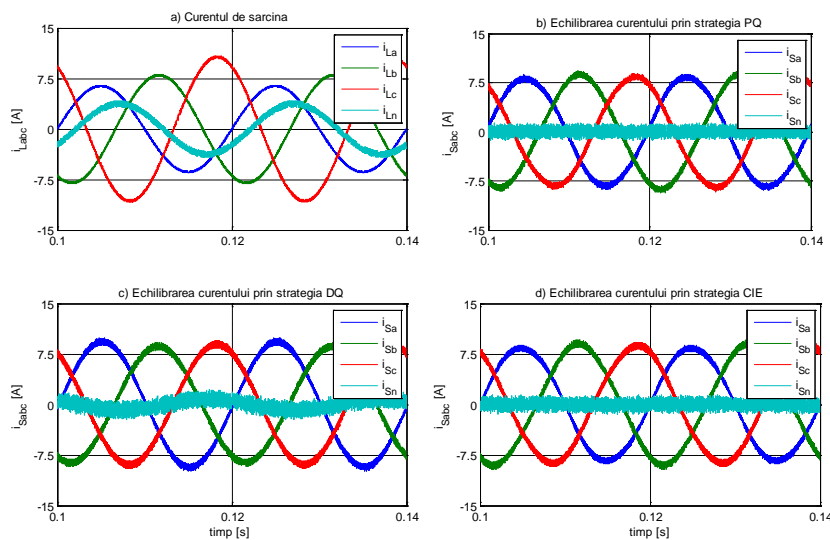


Figura 5-4 Echilibrarea curentului de la rețea

Curenții absorbiți de la rețea în cele patru situații sunt prezentați în Figura 5-4 a) curentul absorbit de sarcină, Figura 5-4b) curentul absorbit de la rețea în condițiile conectării unui filtru cu strategie de comandă PQ, Figura 5-4 c) curentul absorbit de la rețea în condițiile conectării unui filtru cu strategie de comandă DQ și Figura 5-4 d) curentul absorbit de la rețea în condițiile conectării unui filtru cu strategie de comandă CIE.

5.4. Echilibrarea tensiunilor în punctul de conexiune comună în cazul consumatorilor fără conductor de neutru

În rețelele electrice fără neutru pot exista atât sarcini trifazate cât și sarcini bifazate așa cum s-a arătat și la capitolul anterior. Existența sarcinilor bifazate determină un dezechilibru de curent ceea ce implicit duce la o nesimetrie a tensiunilor în punctul de conexiune comună.

Pentru a diminua nesimetria datorată sarcinii în discuție se poate utiliza un filtru activ de tip paralel care prin echilibrarea absorbției de curent pe cele trei faze indirect va conduce la simetrizarea tensiunilor în P_{CC} .

În continuare s-a simulat o sarcină puternic dezechilibrată, fără conductor de neutru, cu un factor de dezechilibru pentru curent $k_I=92,26\%$. Pentru simularea căderilor de tensiune s-au luat în considerare rezistența electrică R_S și inductivitatea L_S a rețelei de alimentare.

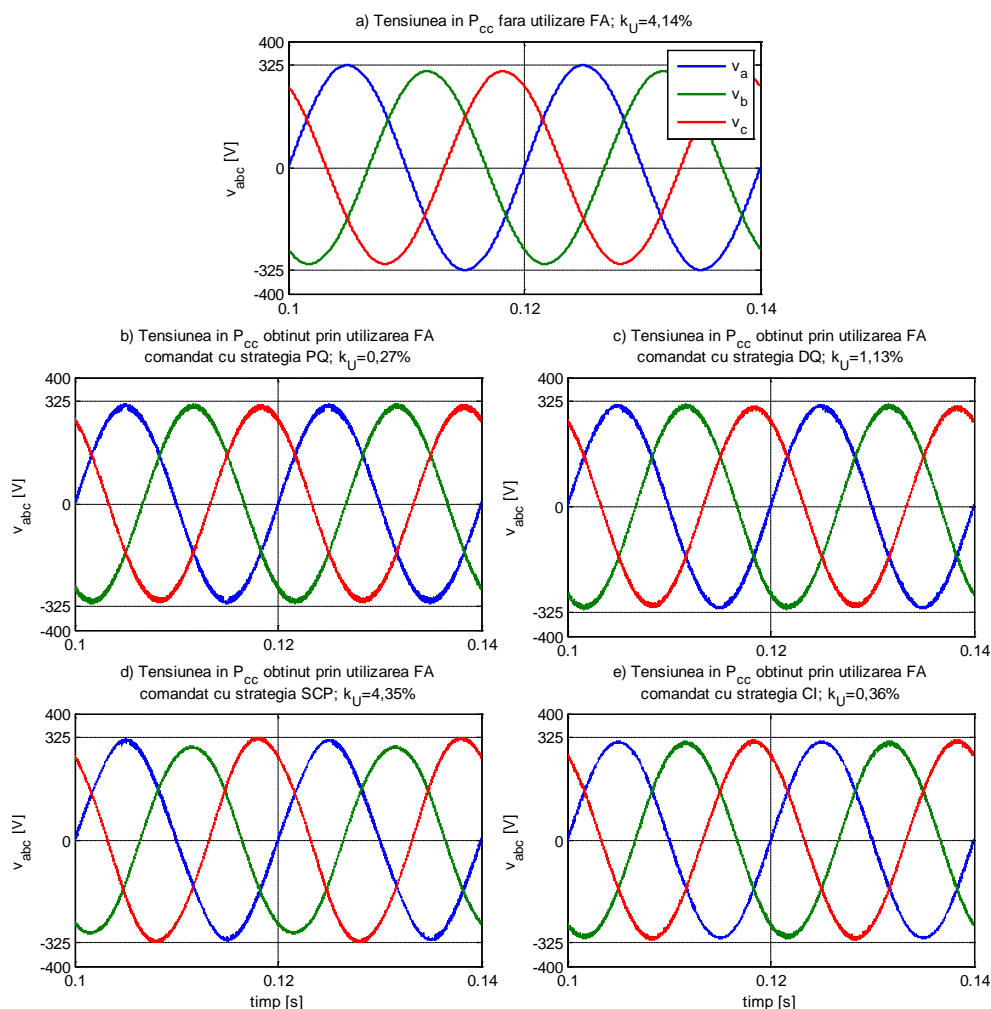


Figura 5-5 Tensiunea în P_{CC}

În Figura 5-5 este prezentată tensiune în punctul de conexiune comună în condițiile în care la rețea s-a conectat sarcina dezechilibrată descrisă mai sus. Astfel în Figura 5-5 a) se prezintă tensiunea

în P_{CC} în condițiile în care este conectată doar sarcina la rețea fără utilizarea unui filtru activ; în Figura 5-5 b) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care este conectată atât sarcina cât și un filtru activ comandat cu strategia de control PQ; în Figura 5-5c) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care este conectată sarcina dar și același filtru activ controlat însă cu strategia de control DQ; în Figura 5-5d) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care filtrul activ conectat la bornele sarcinii dezechilibrate este comandat utilizând strategia de control SCP, iar în Figura 5-5 e) se prezintă tensiunea în P_{CC} când filtrul activ are un control de tip CI.

5.5. Echilibrarea tensiunilor în punctul de conexiune comună în cazul consumatorilor cu conductor de neutru

În rețelele electrice datorită structurii acestora, sarcinilor dezechilibrate și impedanțelor inegale ale liniilor electrice de transport și distribuție a energiei electrice, tensiunea în punctul de conexiune comună devine nesimetrică.

Prin echilibrarea curentului pe cele trei faze, practic rețeaua electrică vede o sarcină echilibrată așa cum s-a arătat la paragraful anterior. În acest mod, nesimetria tensiunilor datorată sarcinilor dezechilibrate conectate în rețea este semnificativ diminuată.

În continuare s-a simulat o sarcină dezechilibrată cu un factor de dezechilibru pentru curent $k_I=80,29\%$. Pentru simularea căderilor de tensiune s-au luat în considerare rezistența electrică R_r și inductivitatea L_r a rețelei de alimentare.

În Figura 5-6 este prezentată tensiune în punctul de conexiune comună în condițiile în care la rețea s-a conectat sarcina dezechilibrată descrisă anterior. Astfel în Figura 5-6 a) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care este conectată doar sarcina la rețea fără utilizarea unui filtru activ; în Figura 5-6 b) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care este conectată atât sarcina cât și un filtru activ comandat cu strategia de control PQ; în Figura 5-6 c) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care este conectată sarcina dar și același filtru activ controlat însă cu strategia de control DQ; în Figura 5-6 d) se prezintă tensiunea în P_{CC} în condițiile în care filtrul activ conectat la bornele sarcinii dezechilibrate este comandat utilizând strategia de control CIE.

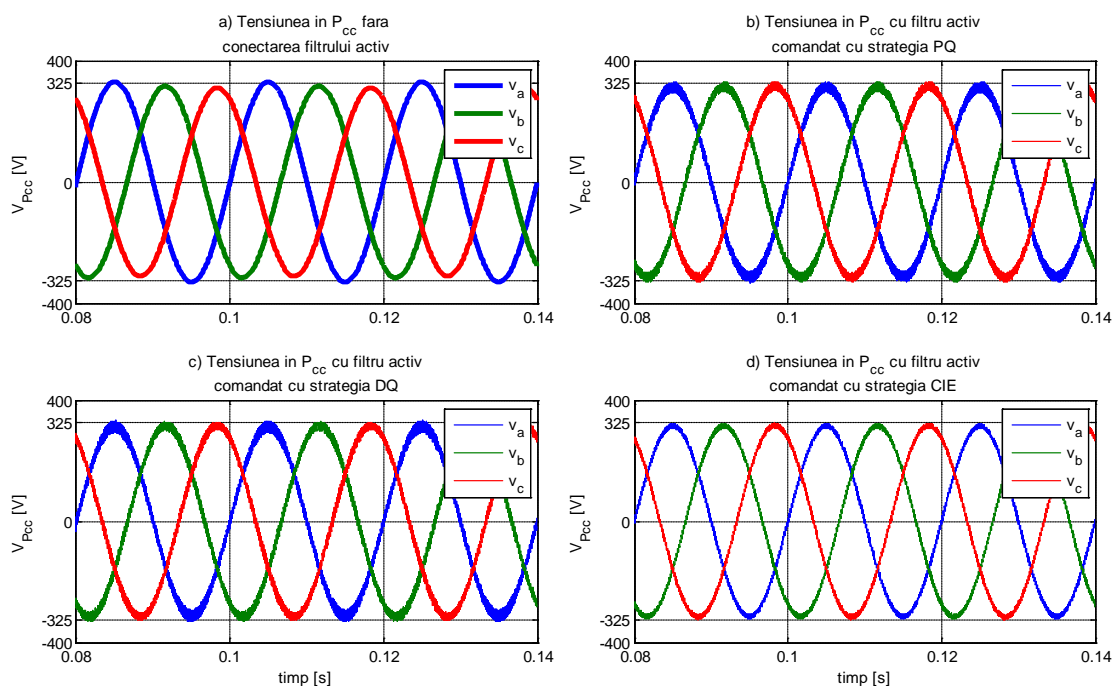


Figura 5-6 Tensiunea în P_{CC}

5.6. Concluzii

În capitolul de față se prezintă alte efecte ale utilizării filtrelor active de tip paralel asupra indicatorilor de calitate a energiei electrice. Acești indicatori se referă la echilibrarea curentului absorbit de la rețea și la echilibrarea tensiunilor în P_{CC} în condițiile în care în P_{CC} nu mai sunt conectate și alte sarcini.

De asemenea, dacă acceptăm ideea conform căreia o energie de calitate este aceea care are în componența sa un procent cât mai mare de energie produsă din surse regenerabile, atunci tehnica de comandă a filtrelor active trebuie să țină cont de acest aspect.

Dezvoltarea soluțiilor de producere de energie electrică local, la locul de consum, din surse regenerabile, permite dezvoltarea filtrelor active în direcția integrării celor două concepte: calitatea energiei și surse regenerabile. În aceste condiții filtrele active capătă denumirea de condiționere de rețea integrând practic toate sursele disponibile la locul de consum.

La locul de consum pot exista mai multe tipuri de surse regenerabile dar și surse clasice de energie electrică. Utilizarea tuturor tipurilor de surse pentru a alimenta cu energie electrică un grup de consumatori sau un singur consumator se în scrie în conceptul de „*sustainable energetic mix*” (Bezzeccheri 2011).

Contribuțiile aduse prin acest capitol sunt:

- Modelarea ansamblului „*rețea electrică - sarcină - condiționar de rețea – sursă regenerabilă*”;

- Simularea rezultatelor injecției de energie electrică produsă din surse regenerabile în P_{CC} prin intermediul condiționerului de rețea în cele două situații:

1. Când sarcina este liniară;
2. Când sarcina este neliniară;

- S-au evidențiat și analizat rezultatele implementării unui filtru activ din punctul de vedere al echilibrării curentului absorbit de la o sursă fără conductor de neutru și de asemenea de la o sursă cu conductor de neutru;

- S-au evidențiat și analizat rezultatele implementării unui filtru activ din punctul de vedere al echilibrării tensiunilor în P_{CC} în condițiile conectării unui singur consumator în acel P_{CC} .

Din acest capitol rezultă următoarele perspective de dezvoltare:

- Analiza eficienței unei structuri de tipul celor prezentate mai sus în special a structurilor în care se folosește energia regenerabilă.

- Analiza beneficiului implementării soluțiilor de filtraj activ pentru echilibrarea curenților absorbiți de la rețea;

- Analiza beneficiului implementării soluțiilor de filtraj activ pentru echilibrarea tensiunilor în P_{CC} în anumite condiții.

Cap. 6 Stand experimental de dezvoltare a soluțiilor de îmbunătățire a calității energiei electrice

6.1. Stand experimental

Schema bloc a modelului fizic realizat pentru demonstrarea aplicabilității soluțiilor propuse în capitolele anterioare este prezentat în Figura 6-1.

Realizarea efectivă a modelului experimental a fost finanțată prin contractul de cercetare PNCDI nr. 21-017/2007 – MECENER din echipa căruia autorul acestei teze de doctorat face parte, iar o vedere de ansamblu a acestuia este prezentată în Figura 6-2.

Modelul fizic realizat poate să emuleze în laborator diverse situații reale întâlnite frecvent în practică. Aceste situații se referă strict la punerea în evidență a problemelor de calitate a energiei electrice.

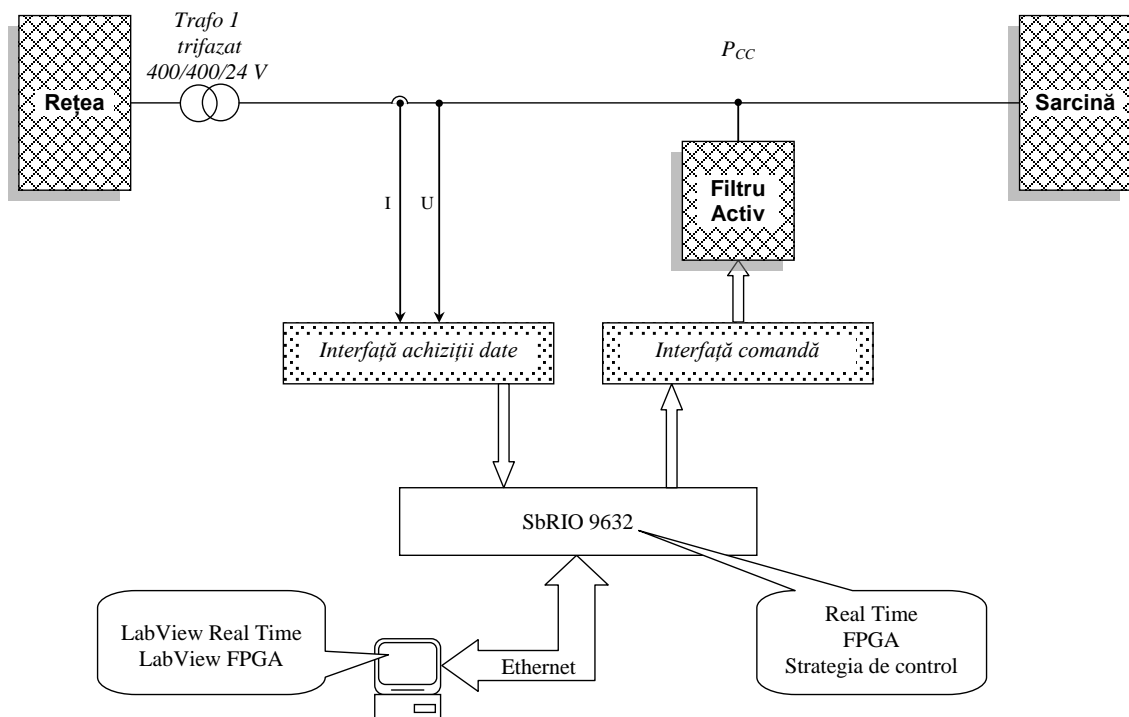


Figura 6-1 Schema bloc a standului experimental

Standul experimental cuprinde un transformator de separare de 5 kVA cu tensiunile nominale 400/400/24 într-o conexiune DY11. Acesta alimentează cu energie electrică o bară de distribuție (sarcina) la care sunt conectați consumatori a căror regimuri de funcționare sunt diverse. În acest mod pot fi puse în evidență regimuri de funcționare pentru sarcini trifazate, bifazate și monofazate cum ar fi regimurile inductive, capacitive, rezistive, deformante și dezechilibrate.

Standul este echipat cu un sistem de achiziție de semnale și control de tip sbRIO9632 și cu puncte de măsură care fac posibilă achiziționarea de semnale din punctele reprezentative. Aceste puncte reprezentative sunt situate la bornele fiecărui consumator în parte dar și la bornele secundarului transformatorului (PM0 ÷ PM6 – Figura 6-3).

Sistemul de achiziție a semnalelor a fost realizat în laborator pornind de la placa sbRIO9632.

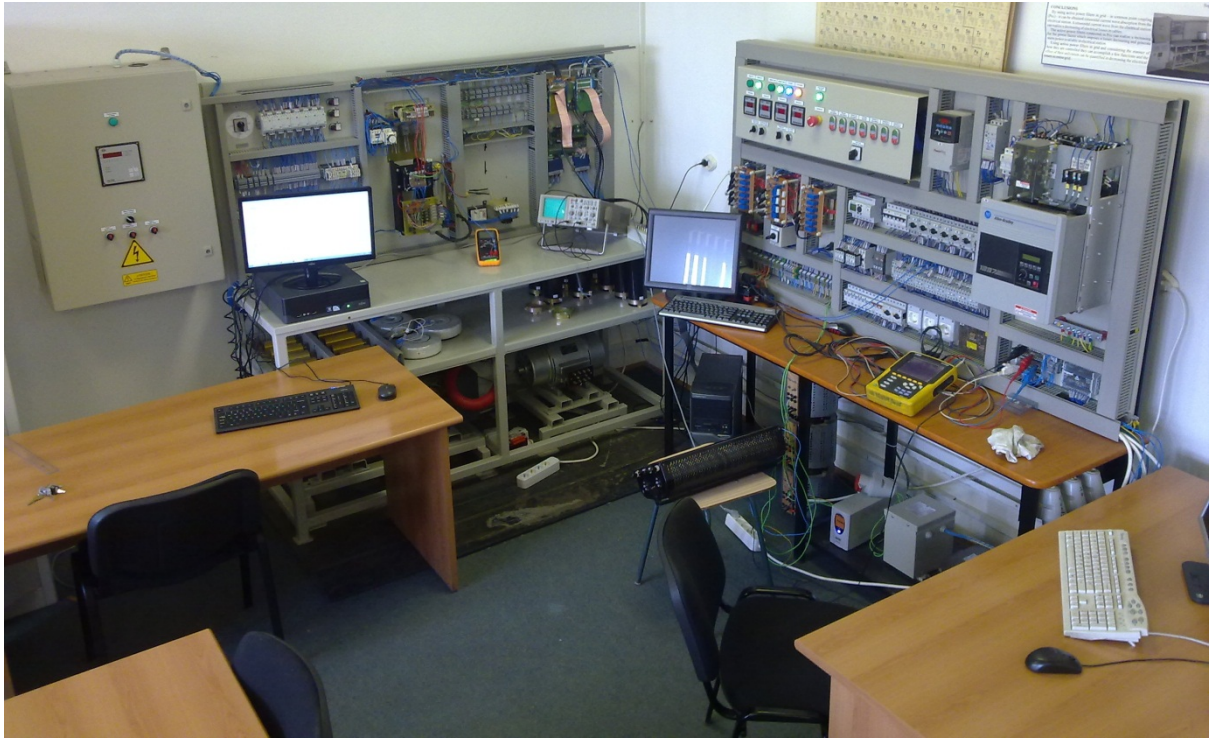


Figura 6-2 Standul experimental dezvoltat în laborator

Așa cum se poate observa în Figura 6-3 cele două mașini electrice, mașina de c.c. și mașina asincronă, pot fi folosite ca sarcină mecanică una pentru cealaltă. De asemenea mașina asincronă poate fi conectată la rețea prin intermediul unui convertizor de frecvență sau prin intermediul unui soft-starter. Astfel pot fi puse în evidență două regimuri de funcționare a rețelei electrice: regim deformant respectiv regim inductiv. Prin conectarea celorlalți consumatori pot fi puse în evidență și alte regimuri de funcționare: inductiv, capacitiv, dezechilibrat.

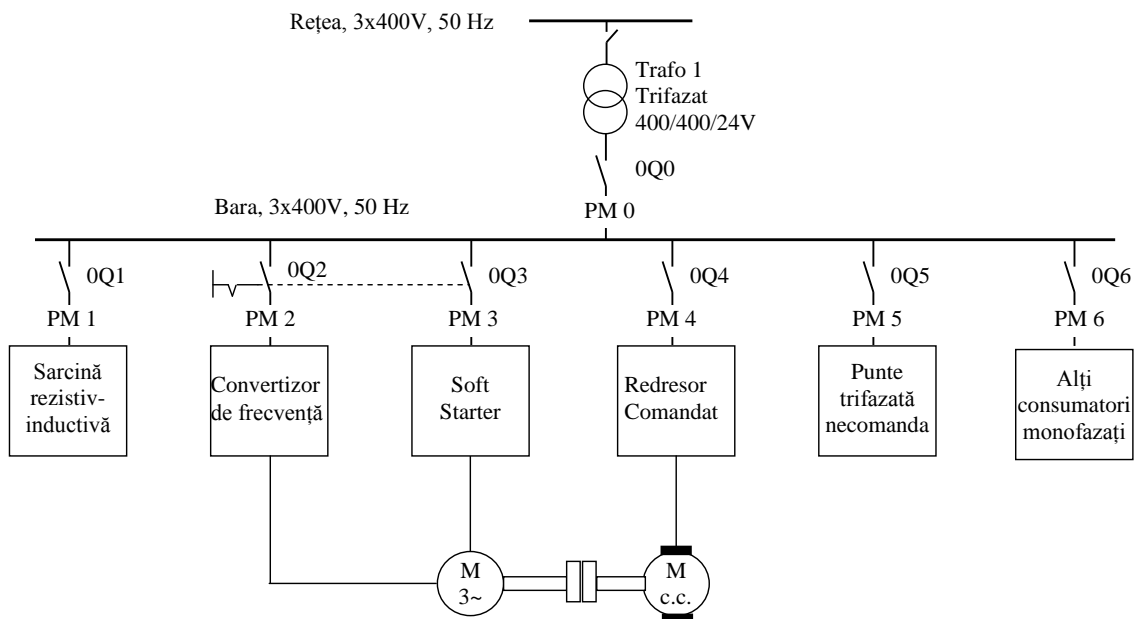


Figura 6-3 Schema bloc a sarcinii

6.2. Sistemul de achiziție și control

Filtrul activ realizat pe standul experimental folosește „controlul indirect” prezentat în capitolul 3. Controlul filtrului activ a fost implementat într-o structură HIL (Hardware in the Loop) prin utilizarea plăcii sbRIO9632 produsă de National Instrument.

În implementarea algoritmului de comandă a fost utilizată proprietate FPGA-ului de a realiza calcule paralele ceea ce îi conferă o viteză suficient de mare pentru controlul unui filtru activ.

Algoritmul de comandă a fost realizat în patru pași:

a) achiziția datelor – Aceasta constă în achiziționarea semnalelor de tensiune și curent necesare calculului referinței pentru filtrul activ. Procesul de achiziție a semnalelor se realizează într-o buclă de tip „while” cu o perioadă de $4\mu s \times 7 \text{ intrări} = 28\mu s$ (limita inferioară a sistemului de achiziție).

b) prelucrarea datelor pentru implementare regulatorului PI care are rolul de a regla tensiunea continuă la bornele capacității „C” pentru stocarea de energie necesare funcționării filtrului activ.

c) prelucrarea datelor pentru obținerea referinței Figura 6-4 – Pornind de la semnalele de tensiune și curent se calculează starea în care trebuie să fie fiecare comutator static. Această buclă se execută cu o frecvență de 2.5 MHz. Sunt utilizate trei astfel de bucle, câte una pentru fiecare braț a punții trifazate.

d) trimiterea comenzilor către comutatoarele statice – Acest pas se realizează prin 6 bucle independente. Fiecare buclă coordonează starea fiecărui comutator static în parte și totodată coordonează și timpii morți între comutațiile pe braț.

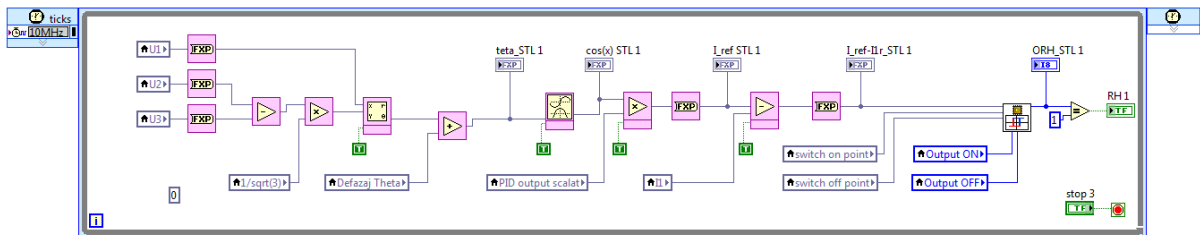


Figura 6-4 Bucla de calcul a referinței

Datorită utilizării FPGA-ului buclele prezentate anterior se execută în paralel. Dependența dintre aceste bucle se constituie atunci când anumite variabile sunt calculate într-o buclă și apoi se utilizează în celelalte bucle. Transmiterea variabilelor dintr-o buclă într-o altă buclă nu influențează timpii de execuție a acestor.

Modul de calcul al buclelor prezentate anterior reprezintă diferența fundamentală dintre un FPGA și un procesor de semnal clasic.

6.3. Rezultate experimentale

În urma realizării standului experimental, cu ajutorul acestuia, se pot pune în evidență diverse situații întâlnite în practică.

Pentru corectarea diverșilor indicatori de calitate a energiei electrice s-a implementat controlul indirect, așa cum s-a prezentat la paragraful 6.2.

Interfața FPGA de utilizare a controlului indirect – Figura 6-5 – permite vizualizarea și modificarea parametrilor strategiei de control în timp real.

Pentru înregistrarea evoluției în timp a valorilor diverselor mărimi achiziționate și/sau controlate se utilizează interfața Real-Time (RT). Aceasta, Figura 6-6, permite memorarea valorilor cu o frecvență de eșantionare care poate fi modificată prin intermediul câmpului „Sample Rate (Hz)” din cadrul interfeței RT.

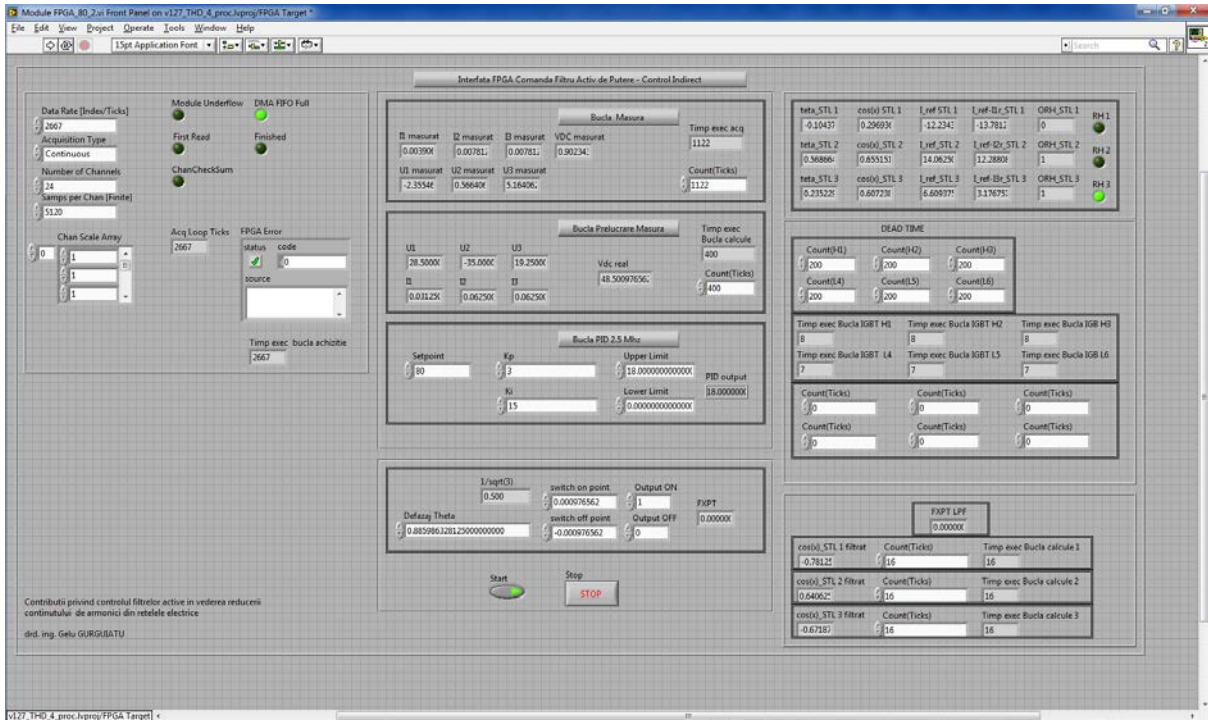


Figura 6-5 Interfața FPGA pentru „Controlul Indirect”

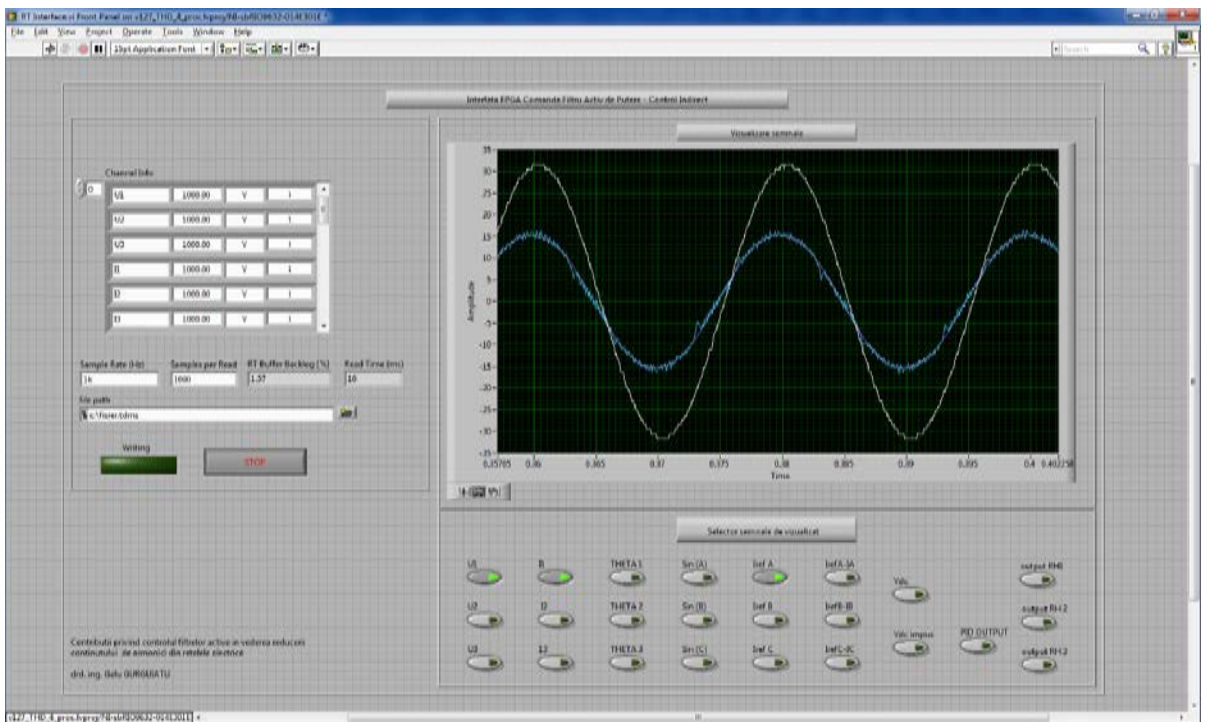


Figura 6-6 Interfața RT pentru „Controlul Indirect”

6.3.1.1. Compensarea regimului deformant

În cazul compensării regimului deformant s-a obținut o reducere a THD_1 de la valoarea de 30% la 4%. Schema circuitului experimental pentru reducerea regimului deformant este prezentată în Figura 6-7.

Parametrii circuitului experimental sunt prezentați în Tabelul 6-1

Tabelul 6-1

$u_a; u_b; u_c$ [V]	L_f [mH]	C [μ F]	V_{DC} [V]	BH [A]	R [Ω]
24	1.18	10000	75	0.1	4

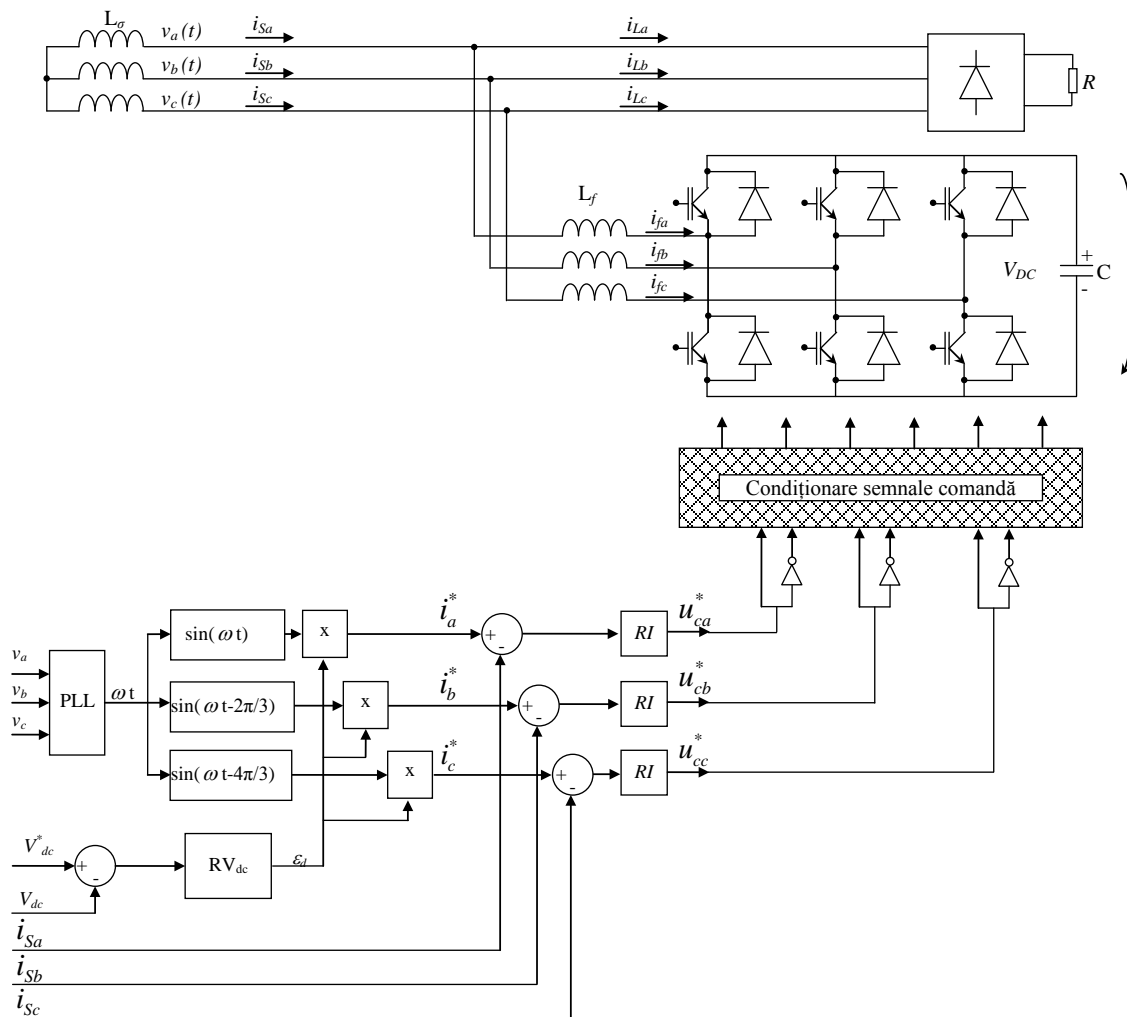


Figura 6-7 Compensarea regimului deformant utilizând controlul indirect

În Figura 6-8 a) se prezintă curentul absorbit de sarcina neliniară iar în Figura 6-8 b) se prezintă regimul deformant pentru curentul absorbit de la rețeaua electrică în condițiile în care sarcina se conectează direct la rețea. În condițiile în care se conectează la bornele sarcinii filtrul activ comandat cu tehnica denumită *control indirect* curentul absorbit de la rețeaua electrică se poate observa în Figura 6-8 c) iar în Figura 6-8 d) se prezintă regimul deformant al acestuia.

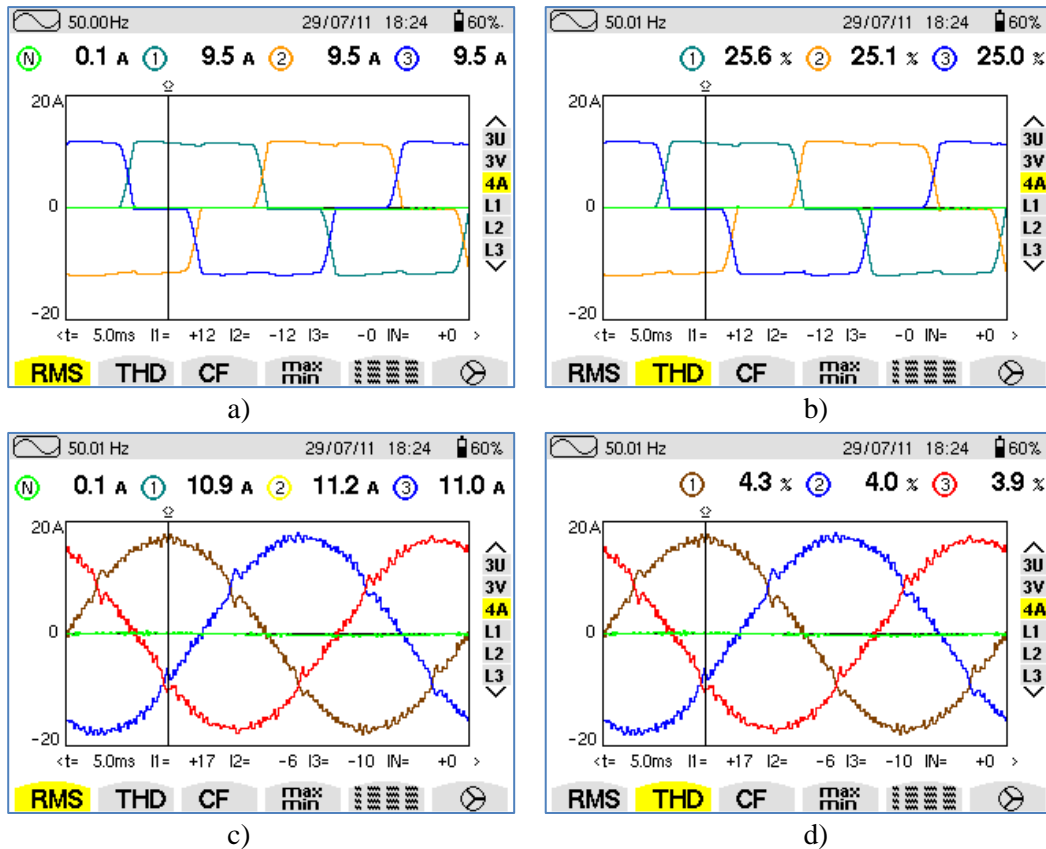


Figura 6-8 Compensarea regimului deformant utilizând controlul indirect

6.3.1.2. Corectarea factorului de putere

Așa cum s-a arătat mai sus factorul de putere este un indicator foarte important pentru tranzitul de energie electrică în rețelele electrice.

Pentru circuitul experimental prezentat în Figura 6-7 factorul de putere este foarte aproape de factorul de putere unitar după cum se poate observa în Figura 6-9 pentru faza L1, situația repetându-se și pentru celelalte faze.

Rezultatele utilizării filtrului activ în ceea ce privește defazajul dintre tensiune și curent sunt prezentate în Figura 6-9. În Figura 6-9 a) sunt prezentate valorile efective și instantanee pentru tensiunea în P_{CC} și curentul absorbit din rețea în condițiile în care sarcina deformantă este conectată direct la rețea. În Figura 6-9 b) sunt prezentate valorile deformării armonice pentru aceleași mărimi în aceleași condiții.

După conectarea filtrului activ de putere comandat cu strategia de comandă „Control Indirect” forma de undă atât pentru tensiunea în P_{CC} cât și pentru curentul absorbit de la rețeaua electrică se modifică semnificativ. Aceste modificări se pot observa în Figura 6-9 c) și Figura 6-9 d).

Valoarea distorsiunii armonice totale pentru tensiune (THD_U) scade de la 5.6% la 1.2% iar valoarea distorsiunii armonice totale pentru curentul absorbit de la rețeaua electrică (THD_I) scade de la 25.5% la 4.3%.

Această scădere a distorsiunii armonice totale atât pentru curent cât și pentru tensiune, cumulată cu factorul de putere care capătă o valoare foarte apropiată de unitate, poate fi interpretată ca o creștere a eficienței tranzitului și consumului de energie electrică.

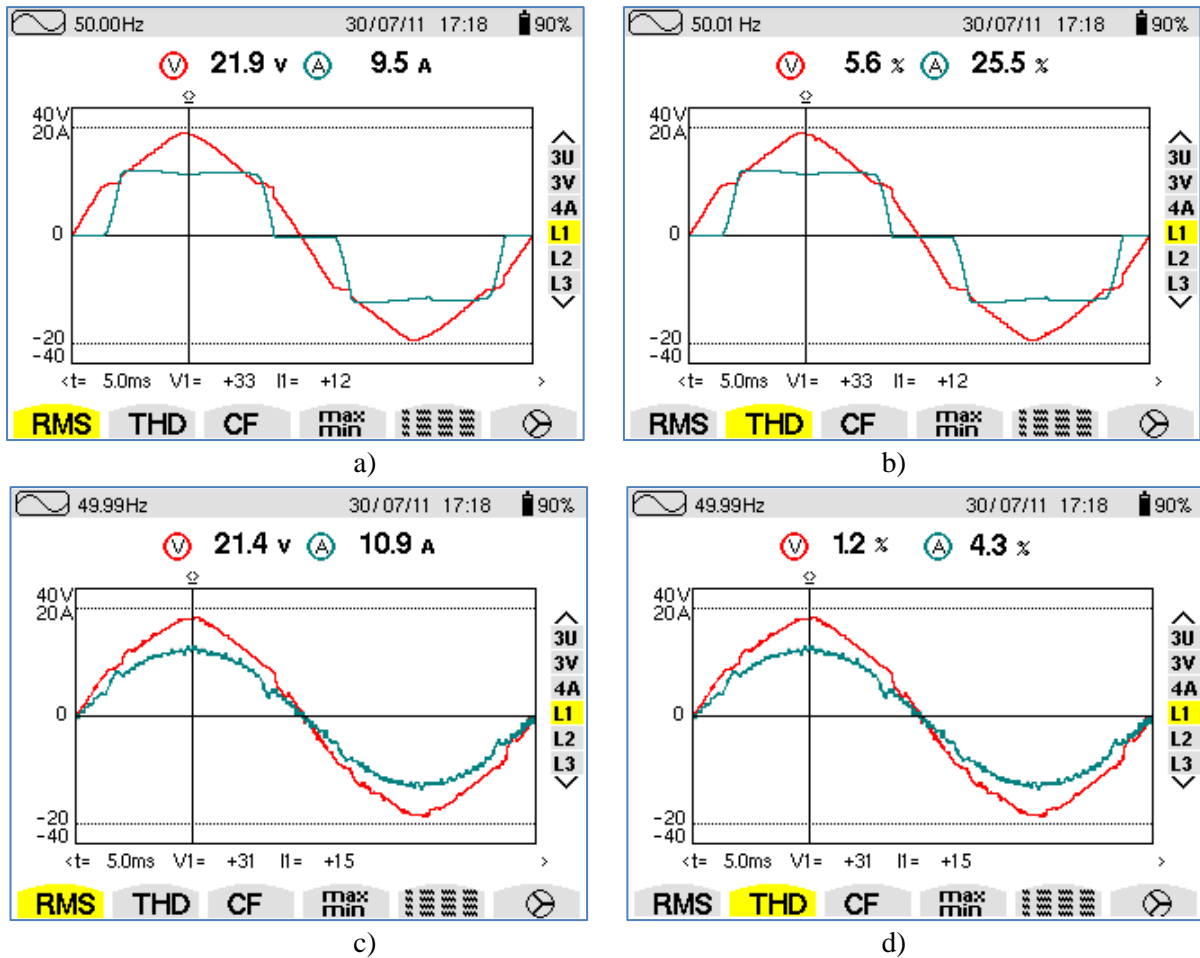


Figura 6-9 Corectarea factorului de putere

În ceea ce privește valorile energetice, acestea sunt prezentate în Figura 6-10 a) pentru sarcină respectiv în Figura 6-10 b) pentru sursă.

Se remarcă o scădere a puterii reactive de la valoarea de 187,7 var la valoarea 53,6 var. În ceea ce privește factorul de putere global acesta crește de la 0,955 la valoarea 0,966 regimul de funcționare rămânând unul inductiv.

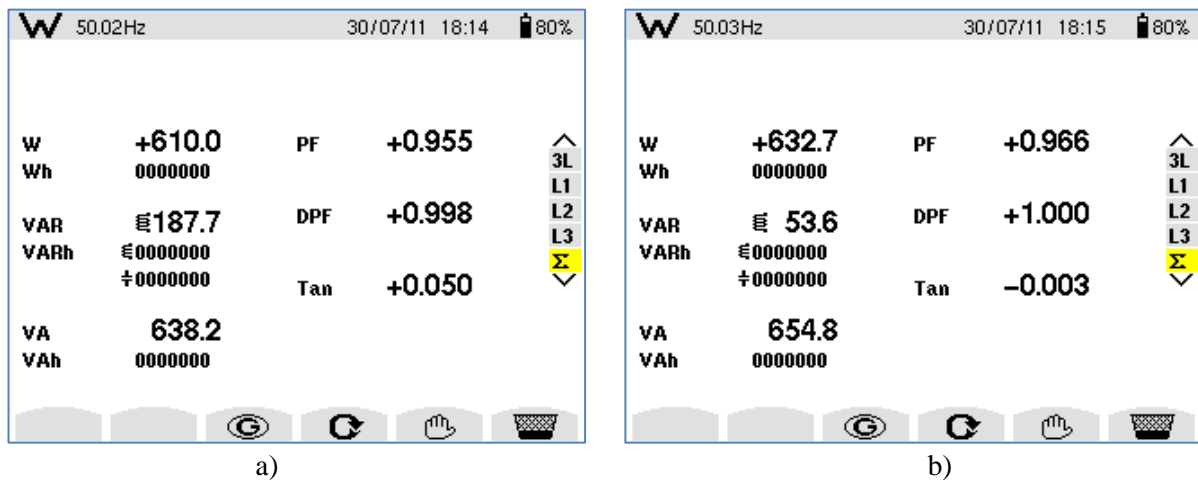


Figura 6-10 Valorile energetice a) la bornele sarcinii b) la bornele sursei

6.4. Concluzii

În acest capitol se prezintă realizarea practică a standului experimental. Acesta poate să reproducă o serie de regimuri de funcționare a consumatorilor electrici existenți în practică.

Regimurile de funcționare a unui consumator care pot fi evidențiate cu ajutorul standului experimental sunt:

- Regim deformant;
- Regim inductiv pentru o sarcină trifazată echilibrată;
- Regim inductiv pentru o sarcină trifazată dezechilibrată;
- Regim de funcționare bifazat într-o rețea trifazată;
- Regim de funcționare monofazat într-o rețea trifazată.

De asemenea, în cadrul standului experimental, a fost realizat și filtrul activ comandat cu ajutorul unei plăci de dezvoltare echipată cu un FPGA, ceea ce permite implementarea diverselor tipuri de strategii de comandă.

Rezultatele experimentale confirmă aplicabilitatea tehnicii de comandă denumită „Control Indirect”.

Contribuțiile aduse prin acest capitol sunt:

- Realizarea practică a standului experimental a fost coordonată de către autorul acestei lucrări – ca membru în echipa de cercetare în cadrul contractului de cercetare 21_017/2007 MECENER – „Metode de evaluare a calității energiei electrice în vederea creșterii eficienței energetice în sisteme electrice la care sunt racordate și surse regenerabile”;
- Implementarea diverselor tipuri de consumatori capabili să genereze diverse regimuri de funcționare prin intermediul cărora pot fi analizați și îmbunătățiți indicatorii de calitate a energiei electrice;
- Separarea galvanică față de rețeaua electrică a standului s-a făcut prin intermediul unui transformator de putere;
- Realizarea sarcinii rezistiv-inductivă cu trepte de putere și factor de putere reglabil;
- Realizarea cuplajului mecanic m.a. – m.c.c. fiecare dintre cele două mașini fiind alimentate prin intermediul convertizorului de frecvență respectiv redresorului comandat. În acest mod cele două mașini pot fi încărcate mecanic la arbore;
- Realizarea sistemului de conectare a mașinii asincrone la rețea prin intermediul convertizorului de frecvență sau prin intermediul soft-starterului;
- Implementarea în sistem HIL (Hardware in the Loop) a plăcii de achiziție și control sbRIO9632 care permite testarea strategiilor de comandă utilizate în această teză de doctorat;
- Realizarea sistemelor de achiziție a semnalelor electrice analogice prin intermediul separărilor galvanice – semnale care permit funcționarea controlului implementat;
- Realizarea sistemului de condiționare a semnalelor digitale de comandă a punții trifazate prin intermediul optocuploarelor;
- Realizarea inverterului cu funcție de filtru activ cu ajutorul modului inteligent 6MBP30RH-060;
- Punerea în evidență a regimurilor de funcționare posibile ale standului din care au fost prezentate în această lucrare doar acele regimuri reprezentative;
- Conectarea filtrului activ comandat cu strategia de control implementată pe FPGA-ul Xilinx existent pe placa sbRIO9632 la bornele sarcinii existente pe stand;
- Evidențierea rezultatelor conectării filtrului activ realizat pe standul experimental;
- Validarea funcționalității metodei implementate prin rezultatele experimentale.

Din acest capitol rezultă următoarele perspective de dezvoltare:

- Implementarea celorlalte strategii de comandă a filtrelor active cu ajutorul plăcii de dezvoltare sbRIO9632 existentă pe stand;
- Dezvoltarea inverterului realizat pe stand prin modificarea topologiei acestuia, ceea ce permite o utilizare ulterioară pentru validarea strategiilor de comandă pentru structuri de filtre active cu conductor de neutru fie prin utilizare de punți cu patru brațe, fie prin utilizarea de punți cu trei brațe dar cu capacitate cu punct median;
- Dezvoltarea filtrului activ de la trei brațe la patru brațe astfel încât să se poată evidenția practic avantajele și dezavantajele structurii cu trei brațe față de structura cu 4 brațe.
- Comanda inverterului poate modifica destinația acestuia pentru alte studii cum ar fi injecția de energie electrică în rețea produsă din surse regenerabile;
- Inverterul, prin modificarea structurii de comandă, poate fi folosit pentru alimentarea mașinilor asincrone în cazul acționărilor electrice.
- Dezvoltarea inverterului cu funcție de filtru activ la o structură multi-level.

Cap. 7 Concluzii și perspective

Calitatea energiei electrice este o preocupare actuală a cercetătorilor din domeniu. În ultima perioadă noțiunea de „calitate a energiei electrice” este susținută prin indicatorii acesteia. Acești indicatori au fost definiți și normați prin reglementări tehnice care diferă de la o țară la alta dar care trebuie să se alinieze la normativele Uniunii Europene.

Prin intermediul acestor indicatori s-au evaluat rezultatele metodelor de comandă a filtrelor active prezentate în lucrarea de față.

Metodele de comandă analizate în această lucrare se referă atât la sistemele de tip filtre active fără conductor de neutru cât și la cele cu conductor de neutru.

Modelele matematice pentru comanda filtrelor active au fost preluate, în parte, din literatura de specialitate, simulate și analizate pe parcursul lucrării „*Contribuții privind controlul filtrelor active în vederea reducerii conținutului de armonici din rețelele electrice*”. În ceea ce privește extinderea metodei de comandă denumită „Control Indirect” de la sistemele fără conductor de neutru la sistemele cu conductor de neutru și denumită „Control Indirect Extins” aceasta s-a cristalizat în capitolul 4.

Se desprind din lucrarea de față următoarele concepte:

- Corectarea integratoare a indicatorilor de calitate a energiei electrice consumate din rețeaua electrică;
- O energie electrică de calitate este aceea care înglobează o cantitate importantă de energie produsă din surse regenerabile;

Cele două concepte pot fi implementate prin intermediul strategiei de comandă a filtrului activ care capătă și funcție de condiționar de rețea așa cum s-a arătat în capitolul 5.

În spiritul celor două concepte, în lucrarea de față, s-a făcut în primul capitol o trecere în revistă a soluțiilor de corectare a indicatorilor de calitate a energiei electrice prezentându-se totodată limitele acestora.

În capitolul 2 s-a prezentat partea de putere a unui filtru activ care se va utiliza în continuare pentru analizele ulterioare.

În capitolul 3 se prezintă o analiză comparativă între rezultatele obținute cu patru strategii de comandă pentru sistemele electrice trifazate fără conductor de neutru. Cele patru strategii de comandă au fost modelate și simulate în cadrul aceluiași capitol.

În capitolul 4 se prezintă o analiză comparativă între rezultatele obținute cu trei strategii de comandă pentru sisteme electrice trifazate cu conductor de neutru. De asemenea, strategiile în discuție au fost modelate și simulate în cadrul aceluiași capitol.

Capitolul 5 este dedicat conceptului conform căruia o energie de calitate este aceea care înglobează și o cantitate de energie electrică produsă din surse regenerabile.

În capitolul 6 se prezintă rezultatele experimentale obținute pe standul dezvoltat în laborator.

Contribuțiile aduse prin această lucrare sunt:

Cap. 2:

- Determinarea inductivităților de conectare la rețea a filtrului activ utilizând metoda energetică;
- Determinarea capacității din parte de c.c. a filtrului activ prin metoda energetică.

Cap. 3:

- Modelarea și simularea celor patru strategii de comandă pentru filtrele active trifazate fără conductor de neutru: PQ, DQ, SCP, CI;
- Prezentarea rezultatelor numerice în punctele esențiale din structura filtrului activ
- Fundamentarea teoretică a „Controlului Indirect”;
- Prezentarea rezultatelor numerice în P_{CC} ;
- Analiza comparativă a rezultatelor obținute cu cele patru strategii de comandă modelate și simulate. Analiza a fost realizată bazându-se pe trei criterii:
 1. Evoluția regimului deformant de la o strategie de control la alta;
 2. Evoluția amplitudinii curentului absorbit de la sursă în cazul utilizării celor patru strategii de comandă implementate;
 3. Controlul factorului de putere în P_{CC} ;

Cap. 4:

- Modelarea și simularea celor trei strategii de comandă pentru filtrele active trifazate cu conductor de neutru: PQ, DQ, CIE;
- S-a propus o nouă strategie de control respectiv „Controlul Indirect Extins” care reprezintă extinderea domeniului de aplicare a strategiei „Control Indirect” de la sistemele fără conductor de neutru la sistemele cu conductor de neutru;
- S-au analizat rezultatele obținute cu noua strategie de control având în vedere următorii indicatori de calitate a energiei:
 1. Regimul deformant pentru curent (THD_I);
 2. Factorul de putere (PF);
 3. Echilibrul curenților de la sursă (K_I);
 4. Echilibrarea tensiunilor în P_{CC} (K_U);
 5. Reducerea efectului de flicker;
- Prezentarea rezultatelor numerice în punctele esențiale din structura filtrului activ;
- Analiza comparativă a rezultatelor obținute cu cele trei strategii de comandă modelate și simulate.

Cap. 5:

- Modelarea ansamblului „rețea electrică - sarcină - condiționar de rețea – sursă regenerabilă”;
- Simularea rezultatelor injecției de energie electrică produsă din surse regenerabile în P_{CC} prin intermediul condiționarului de rețea în cele două situații:
 1. Când sarcina este liniară;
 2. Când sarcina este neliniară;
- S-au arătat rezultatele implementării unui filtru activ din punctul de vedere al echilibrării curentului absorbit de la o sursă fără conductor de neutru și de asemenea de la o sursă cu conductor de neutru;
- S-au arătat rezultatele implementării unui filtru activ din punctul de vedere al echilibrării tensiunilor în P_{CC} în condițiile conectării unui singur consumator în acel P_{CC} .

Cap. 6:

- Realizarea practică a standului experimental a fost coordonată de către autorul acestei lucrări – ca membru în echipa de cercetare în cadrul contractului de cercetare 21_017/2007 MECENER 9 – „Metode de evaluare a calității energiei electrice în vederea creșterii eficienței energetice în sisteme electrice la care sunt racordate și surse regenerabile”;
- Implementarea diverselor tipuri de consumatori capabili să genereze diverse regimuri de funcționare prin intermediul cărora pot fi analizați și îmbunătățiți indicatorii de calitate a energiei electrice;
 - Separarea galvanică față de rețeaua electrică a standului s-a făcut prin intermediul unui transformator de putere;
 - Realizarea sarcinii rezistiv-inductivă cu trepte de putere și factor de putere reglabil;
 - Realizarea cuplajului mecanic m.a. – m.c.c. fiecare dintre cele două mașini fiind alimentate prin intermediul convertizorului de frecvență respectiv redresorului comandat. În acest mod cele două mașini pot fi încărcate mecanic la arbore;
 - Realizarea sistemului de conectare a mașinii asincrone la rețea prin intermediul convertizorului de frecvență sau prin intermediul soft-starterului;
 - Implementarea în sistem HIL (Hardware in the Loop) a plăcii de achiziție și control sbRIO9632 care permite testarea strategiilor de comandă utilizate în această teză de doctorat;
 - Realizarea sistemelor de achiziție a semnalelor electrice analogice prin intermediul separărilor galvanice – semnale care permit funcționarea controlului implementat;
 - Realizarea inverterului cu funcție de filtru activ cu ajutorul modulului inteligent 6MBP30RH-060;
 - Punerea în evidență a regimurilor de funcționare posibile ale standului din care au fost prezentate în această lucrare doar acele regimuri reprezentative;
 - Conectarea filtrului activ comandat cu strategia de control implementată pe FPGA-ul Xilinx existent pe placa sbRIO9632 la bornele sarcinii existente pe stand.
 - Evidențierea rezultatelor conectării filtrului activ realizat pe standul experimental;

- Validarea funcționalității metodei implementate prin rezultatele experimentale.

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

- Dezvoltarea și implementarea strategiei CIE pentru o punte cu patru brațe;
- Studierea influenței capacităților C_1 și C_2 asupra funcționării filtrului activ;
- Studierea comparativă între metodele de comandă din perspectiva volumului de calcul;
- Simplificări ale comenzii pentru situații distincte cum ar fi corectarea unui anumit indicator de calitate a energiei (doar THD, doar dezechilibru, doar factor de putere, doar flicker etc.);
- Studierea influenței metodelor de comandă asupra armonicelor individuale de unde poate rezulta o recomandare pentru utilizarea comenzii adecvate în funcție de spectrul de armonice generat de sarcină;
- Analiza eficienței unei structuri de tipul celor care înglobează și surse regenerabile din punctul de vedere al beneficiilor;
- Analiza beneficiului implementării soluțiilor de filtraj activ pentru echilibrarea curenților absorbiți de la rețea;
- Analiza beneficiului implementării soluțiilor de filtraj activ pentru echilibrarea tensiunilor în P_{CC} în anumite condiții prin comparare cu filtrele active de tip serie.
- Implementarea experimentală pentru celelalte strategii de comandă (PQ, DQ, SCP) a filtrelor active cu ajutorul plăcii de dezvoltare sbRIO9632 existentă pe standul experimental.
- Dezvoltarea filtrului activ, din punct de vedere experimental de la trei brațe la patru brațe astfel încât să se poată evidenția practic avantajele și dezavantajele structurii cu trei brațe față de structura cu 4 brațe;
- Comanda inverterului poate modifica destinația acestuia pentru alte studii cum ar fi injecția de energie electrică în rețea produsă din surse regenerabile;
- Inverterul, prin modificarea structurii de comandă, poate fi folosit pentru alimentarea mașinilor asincrone în cazul acționărilor electrice.

Bibliografie

- Akagi H, Watanabe E H, Aredes M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. Wiley-Interscience, 2007.
- Alfonso, J., C. Couto, and J. Martins. *Active Filters with Control Based on the p-q Theory*. IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, Sept 2000, pag. 5-11, 2000.
- Aredes, M. *Active Power Line Conditioners*. Berlin: D83, 1996.
- Bezzeccheri, Maurizio. *Renewable for a sustainable energetic mix*. Las Palmas: INTERNATIONAL CONFERENCE ON RENEWABLE ENERGIES AND POWER QUALITY (ICREPQ'11), 2011.
- Bojoi, R. I., G. Giovani, B. Valeriu, G. Maurizio, F. Francesco, and P. Francesco. *Current Control Strategy for Power Conditioners Using Sinusoidal Signal Integrators in Synchronous Reference Frame*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 20, NO. 6, NOVEMBER 2005, 2005.
- Ceangă, Emil, Cristian Nichita, Ludovic Protin, and Antonio N. Cutululis. *Theorie de la commande des systemes*. București: Editura Tehnică, 2001.
- EN50160. *Caracteristicile tensiunii furnizate de rețelele publice de distribuție*. Bucuresti: Institutul Român de Standardizare (IRS), 1998.
- Fodor, D., P. Delarue, F. Ionescu, and D. Floricău. *Convertoare statice de putere speciale*. Editura Printech, București, 1997, pag. 99-125, 1997.
- Gelu, GURGUIATU, VECHIU Ionel, and MUNTEANU Toader. *Power quality improvement using renewable energy*. Las Palmas: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICRPQ 2011), ISBN: 978-84-614-7527-8, 2011.
- Gyugyi, L., and E.C. Strycula. *Active ac Power Filters*. Proc. IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting, vol. 19-C, 1976, pp. 529-535, 1976.
- Ionel, VECHIU, GURGUIATU Gelu, and ROSU Emil. *Advanced Active Power Conditioner to Improve*. Singapore: 9th International Power and Energy Conference, ISBN 978-1-4244-7397-7, 2010.
- Ionescu F., Floricău D., Nițu S., Jean-Paul S., Delarue P., Boguș C. *Electronică de putere - Convertoare statice*. București: Editura Tehnică, 1998.
- PE143. *Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice*. Agentia Națională pentru Reglementare în domeniul Energiei, 1994.
- Rosu E., Culeamă M., Dumitriu T., Munteanu T. and Paduraru R. *Active power filter with indirect control for line-frequency controlled rectifiers*. Galati: THE ANNALS OF "DUNAREA DE JOS" UNIVERSITY OF GALATI, FASCICLE III, Vol.32, No.1, ISSN 1221-454X, ELECTROTECHNICS, ELECTRONICS, AUTOMATIC CONTROL, INFORMATICS, 2009.
- Zhang, R. *High performance power converter systems for nonlinear and unbalanced load/source*. Blacksburg, Virginia: Teză de doctorat, 1998.