



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2013 00318

(22) Data de depozit: 23.04.2013

(41) Data publicării cererii:  
30.12.2013 BOPI nr. 12/2013

(71) Solicitant:  
• UNIVERSITATEA "TRANSILVANIA" DIN  
BRAȘOV, BD.EROILOR NR.29, BRAȘOV,  
BV, RO

(72) Inventatori:

• BAROTE LUMINIȚA, BD. SATURN NR.37,  
AP. 64, BRAȘOV, BV, RO;  
• MARINESCU CORNELIU,  
STR. MIHAI EMINESCU NR.48, AP. 1,  
BRAȘOV, BV, RO

(54) METODĂ ȘI SOFTWARE DE EVALUARE A CONȚINUTULUI  
DE ARMONICI PRODUSE DE CONVERTOARE

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă de evaluare a conținutului de armonici produse de convertorul de putere din schema de conectare la rețea a unui sistem distribuit de generare, bazat pe surse de energie regenerabile. Metoda conform invenției constă în utilizarea unui modul de calcul al puterii active și reactive, și a unui bloc de control implementat software, în vederea obținerii unui conținut minim de armonici de curent, tensiunile de ieșire din regulatoarele conținute în blocul

de control fiind multiplexate, valoarea rezultată furnizând semnale de tensiune ce intră într-un generator PWM, la ieșire obținându-se semnale modulate pentru convertorul de rețea, iar coeficienții proporționali-integratori putând fi fixați/modificați în funcție de parametrii sistemului.

Revendicări: 2  
Figuri: 6



Nr. int. B.P.I. (pt. OSIM) / 114/09.04.13

OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRCI
Cerere de brevet de invenție
Nr. a 2013 00318
Data depozit 23-04-2013

Nr.int.B.P.I.: 96/21.03.2013

## METODĂ ȘI SOFTWARE DE EVALUARE A CONȚINUTULUI DE ARMONICI PRODUSE DE CONVERTOARE

### DESCRIEREA INVENȚIEI

Invenția se referă la o metodă și software de evaluare a conținutului de armonici produse de convertorul de putere din schema de conectare la rețea a unui sistem distribuit de generare (SDG) bazat pe surse de energie regenerabile (SER).

Metoda de control și evaluare a conținutului de armonici produse de convertoare, conform invenției, constă în dezvoltarea unui algoritm de evaluare și implementare în Matlab/Simulink a unor tehnici de control bazate pe regulatoare proporțional integratoare (PI) și proporțional rezonante (PR), în convertorul de putere de pe partea cu rețeaua, menținând echilibrul de putere în sistem dar și asigurarea calității puterii generate prin curentul de ieșire. Un domeniu important de aplicare al invenției este cel al sistemelor distribuite de generare cu SER.

Se cunosc diverse aplicații cu SER conectate la rețea, în care sunt utilizate diferite metode de control al curentului și tensiunii rețelei. Un exemplu este cazul turbinelor eoliene.

În ceea ce privește structura de control care poate fi implementată în convertorul de rețea se cunosc mai multe soluții tehnice, trei dintre ele având aceleași funcții principale de reglare a curentului și tensiunii într-un SDG cu SER sunt prezentate succesiv în continuare.

Prima dintre acestea constă în implementarea structurii de control în sistemul de coordonate  $abc$ , oferind posibilitatea de a controla independent fiecare fază de curent. Regulatele cu histerezis sau cu timp mort sunt implementate în mod normal pentru reglarea curentului în sistemul de coordonate  $abc$  (Luigi Malesani, Paolo Tenti, „A novel hysteresis control method for current-controlled voltage source PWM inverters with constant modulation frequency”, 1990). Utilizarea regulatelelor liniare, cum ar fi PI s-a dovedit neavantajoasă în sistemul de referință  $abc$ , datorită complexității schemei (Erika Twining, Donald Grahame Holmes, „Grid current regulation of a three-phase voltage source inverter with an LCL input filter”, 2003).

A doua structură de control poate fi implementată în sistemul de coordonate staționar  $\alpha\beta$ , unde este nevoie de utilizarea unui modul de transformare pentru a transfera variabilele

Barbu  
Marius

$abc$  într-un sistem  $\alpha\beta$ . În comparație cu structura mai sus prezentată, avantajul implementării structurii de control în sistemul de coordonate  $\alpha\beta$ , este reducerea numărului de variabile de la trei la două, prin urmare, capacitatea de calcul este mai mică. Din cauza limitărilor pe care le au regulatoarele PI pentru controlul mărimilor sinusoidale, regulatoarele PR au câștigat o largă popularitate în ultima vreme, în special la conectarea convertoarelor la rețea în sistemul staționar  $\alpha\beta$  (Daniel Zmood, Donald Grahame Holmes, „Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error”, 2003).

A treia structură poate fi implementată în sistemul de coordonate rotativ, notat  $dq$ . Pentru realizarea transformării variabilelor din acest sistem de referință, este necesară utilizarea unghiului de fază al tensiunii rețelei, care constituie un dezavantaj al acestei structuri. Cu toate acestea, variabilele transformate sunt mărimi de c.c., prin urmare, se realizează controlul semnalelor de procesare mult mai ușor. În mod normal, regulatoarele PI sunt asociate acestei structuri de control iar termenii cuplajului încrucișat și cei ai tensiunii în buclă de reacție pozitivă, pot fi utilizați pentru a se obține cele mai bune rezultate (Frede Blaabjerg, Remus Teodorescu, Marco Liserre, Adrian Timbus, „Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems”, 2006).

Scopul invenției este de a permite determinarea prin modelare software a conținutului de armonici cu diferitele tehnici/structuri prezentate mai sus și a permite studierea prin simulare a posibilelor soluții practice cu scopul de a asigura un conținut redus de armonici de curent și un răspuns rapid la variațiile de putere la bornele convertorului de rețea, fără a fi nevoie să se implementeze hardware soluțiile în studiu.

Problema pe care o rezolvă invenția este implementarea unui software de evaluare a conținutului de armonici de curent într-un SDG cu unul sau mai multe generatoare cu SER, creând o metodă software de reducere substanțială a conținutului de armonici de curent. Prin simulare se grăbește timpul de implementare a soluției optime și se evită studiul pe soluții implementate hardware, costisitor și consumator de timp. Această îmbunătățire este datorată unei metode originale implementată în Matlab/Simulink în două sisteme de referință diferite cu două regulatoare diferite.

Se menționează că pentru verificare s-au făcut măsurători experimentale pe o instalație cu puterea nominală a convertorului de putere de 2.2 kW.

Se prezintă în continuare exemplul de realizare și utilizare a invenției în legătură cu figurile 1...6 care reprezintă:

- Fig. 1, schema SDG incluzând convertorul de rețea și sursa de putere:

- Fig. 2, metoda de evaluare a conținutului armonic de curent inventată;
- Fig. 3, structurile de control implementate software și revendicate pentru convertorul de rețea: (a) cu reglatoare PI- $dq$ ; (b) cu reglatoare PR- $\alpha\beta$  prin metoda revendicată;
- Fig. 4, oscilograma curentului de fază a rețelei pentru o încărcare de 90% cu ambele reglatoare, fără și cu CA, obținute în urma: (a) simulărilor folosind metoda revendicată; (b) măsurărilor experimentale;
- Fig. 5, analiză comparativă între simulare folosind metoda revendicată și experiment a spectrul armonicelor de curent obținute în urma utilizării reglatoarelor: (a) PI; (b) PR; fără și cu CA;
- Fig. 6, analiză comparativă a factorului THD pentru curentul de rețea, între structurile de control utilizate, fără și cu CA, obținute în urma: (a) simularilor folosind metoda revendicată; (b) măsurărilor experimentale, la diferite valori de referință a puterii active.

Fig. 1 prezintă schema bloc a unui sistem distribuit de generare compus dintr-o sursă de putere **(1)** (generator electric care este antrenat prin intermediul unei surse de energie regenerabilă și care injectează puterea produsă rețelei și sarcinilor). Se utilizează un sistem de control **(2)**, care comandă convertorul de rețea **(3)**. Se măsoară tensiunile de fază  $U_{abc}$  și curenții de fază trifazați  $I_{abc}$ , pe baza cărora sunt furnizate semnalele de comandă convertorului de putere. Convertorul de pe partea cu rețeaua controlează în mod normal tensiunea de pe partea de curent continuu (c.c.) cu scopul de a menține echilibrul de putere în sistem dar și asigurarea calității puterii generate prin curentul de ieșire. Tensiunea de sincronizare cu rețeaua precum și cea de monitorizare sunt atribuții importante ale acestui convertor. Interfațarea cu rețeaua trifazată **(5)** se realizează prin intermediul unui filtru inductiv-capacitiv LC **(4)**, care are rolul de a atenua armonicile de ordin superior produse de comutația tranzistoarelor de putere.

Structura software revendicată de evaluare a conținutului de armonici inventată este prezentată în Fig. 2. Schema conține un modul de calcul al puterii active și reactive **(6)**, puteri pe care invertorul le poate produce și livra rețelei cu ajutorul metodei de control P/Q (droop control) **(7)**, care oferă posibilitatea de a schimba referința de putere activă **(8)** și reactivă **(9)** în conformitate cu cerințele SDG în diferite cazuri de funcționare. Referința puterii active

poate fi modificată și în trepte cu ajutorul blocului **(10)**. Trecerea de la o valoare constantă a puterii active la una variată în trepte se realizează cu ajutorul comutatorului **(11)**. Partea de sincronizare cu rețeaua este asigurată de un sistem PLL, care oferă o referință de curent perfect sinusoidală pentru regulatorul de curent și un unghi ( $\theta$ ) de sincronizare precis.

Blocul de control **(12)** al curentului și tensiunii rețelei, conține două regulatoare implementate în două sisteme de referință diferite care sunt prezentate detaliat în Fig. 3. Valoarea tensiunii de la ieșirea blocului de control **(12)** din sistemul de referință  $\alpha\beta$  se împarte la valoarea tensiunii de c.c. de la intrarea în convertor, utilizând operatorul matematic de împărțire **(13)**. Prin utilizarea blocului de transformare **(14)**, se obțin mărimi în sistemul de referință  $abc$ , care sunt aplicate generatorului de semnal PWM **(15)**, și împreună cu termenul de întârziere **(16)** se obțin semnalele de comandă pentru convertorul de putere.

Partea de control din convertorul de rețea include controlul curentului cu regulatoarele proportional integratoare (PI) în sistemul de referință  $dq$  **(17)** și compensatorul armonic (CA), **(18)**. Schema bloc se prezintă în Fig. 3a. Structura de control  $dq$  este implementată în sistemul de referință care se rotește cu aceeași frecvență ca și viteza unghiulară a rețelei.

Blocul **(19)**, realizează transformarea variabilelor din sistemul de referință sincron  $dq$ , în sistemul de referință  $\alpha\beta$ . Specifică acestei structuri de control este necesitatea cunoașterii informațiilor despre unghiul de fază al tensiunii rețelei ( $\theta$ ), pentru a putea fi pusă în aplicare transformarea.

Semnalul de intrare în regulatorul de curent reprezintă eroarea dintre valoarea măsurată și cea de referință a curentului de rețea. Ieșirea regulatorului este tensiunea de referință a rețelei, care împărțită la tensiunea sursei de c.c. oferă factorul de umplere pentru convertor

Transferul de putere activă, este controlat de referința de curent a axei  $d$  iar cel de putere reactivă de referința curentului de pe axa  $q$ . În mod obișnuit, referința de curent de pe axa  $q$  este setată nulă pentru a asigura un factor de putere unitar în acord cu standardele de calitate a puterii.

CA **(18)** se aplică în sistemul de referință sincron, unde curenții controlați sunt cantități de c.c., în scopul obținerii unui conținut scăzut de armonici și implicit a unei mai bune calități a energiei în configurația analizată. Două regulatoare PI sunt implementate în două cadre rotative, pentru compensarea armonicilor de curent de ordinul 5 și 7. Așa cum se poate observa în cadrul CA se utilizează și un modul de transformare, din sistemul de referință

staționar  $\alpha\beta$  în cel sincron rotativ  $dq$  și cu (19) viceversa. În continuare aceste semnale sunt însumate cu ieșirea CA (compensare  $\alpha\beta$ ), prin intermediul sumatoarelor (20), (21), iar cu ajutorul unui multiplexor (22) se obține valoarea tensiunii de referință utilizată la generarea semnalelor PWM. Blocurile (23) și (24) reprezintă parametrii regulatorului PI utilizați atât în cazul simulărilor realizate cu software Matlab cât și în cazul măsurărilor experimentale la nivel de laborator. Prin metoda inventată se pot fixa orice coeficienți proporționali ( $K_p$ ) – integratori ( $K_i$ ). Pentru metoda revendicată, s-a ales pentru verificare, coeficientul proporțional,  $K_p=10$  (23) și cel integrator  $K_i=1000$  (24).

Activarea (1)/dezactivarea (0) CA din cadrul structurii convertorului de rețea, se realizează cu ajutorul blocului (25). De remarcat este în acest caz, complexitatea algoritmului de control, în comparație cu structura implementată în sistemul de referință staționar  $\alpha\beta$ , prezentată în cele ce urmează.

Fig. 3b prezintă structura convertorului de rețea cu reguloare proporțional rezonante (PR) și CA implementate în sistemul de referință staționar  $\alpha\beta$  (26). Semnalele de intrare în regulatorul de curent reprezintă eroarea dintre valorile măsurate și cele de referință a curenților de rețea. Ieșirea regulatorului este tensiunea de referință a rețelei, care împartită la tensiunea sursei de c.c. oferă factorul de umplere pentru inverter. O caracteristică importantă a regulatorului PR este posibilitatea implementării CA, fără a interfera cu dinamica regulatorului. CA se aplică în strategia de control analizată cu scopul obținerii unei mai bune calități a energiei livrate în rețea. Ca și în cazul prezentat anterior, armonicile cele mai importante din spectrul de curent sunt cele de ordinul 5 și 7, care vor fi compensate de CA implementat în structura de control cu reguloare PR din cadrul convertorului de rețea. Semnalele de la ieșirea regulatorului PR sunt multiplexate cu ajutorul blocului (27) și se obține valoarea tensiunii de referință în sistem staționar  $\alpha\beta$ , utilizată la generarea semnalelor PWM. Parametrii regulatorului PR utilizați în ambele situații (simulare și experiment) sunt setați cu ajutorul celor două blocuri (28) și (29). Și în cadrul acestei structuri de control activarea/dezactivarea CA, se realizează cu ajutorul blocului (30).

Pentru demonstrarea funcționalității metodei prin simulare, în vederea reducerii conținutului armonic inventate, în continuare sunt prezentate câteva rezultate obținute în urma simulărilor și comparația cu experimentele în condiții de laborator în vederea validării metodei propuse.

Fig. 4 prezintă oscilograma curenților obținuți în urma simulărilor (Fig.4a) și a măsurătorilor experimentale de laborator (Fig.4b) cu cele două regulatoare, fără și cu compensarea armonicelor, în ambele cazuri condițiile de funcționare sunt considerate identice.

De asemenea, se poate observa în Fig. 5 o analiză comparativă a factorului total de distorsiune armonică (THD) pentru curentul de fază al rețelei în ambele situații (simulare/experiment) utilizând metoda de control cu regulatoare PI (Fig. 5a), respectiv regulatoare PR (Fig. 5b) fără și cu CA. Se poate observa faptul că rezultatele sunt apropiate (eroarea fiind de aprox. 2%), valori mai mari obținându-se în cazul testării în laborator a algoritmilor implementați.

Aceasta înseamnă că metoda de evaluare software a conținutului de armonici și revendicată pentru brevetare este validată de măsurătorile experimentale ca fiind precisă, astfel încât poate fi folosită cu succes în proiectare (nefiind necesară validarea experimentală), minimizând astfel prețul de cost și timpul de implementare.

Se poate observa în Fig. 5 că înainte de implementarea CA, metodele de control analizate oferă un THD mai mare decât limita impusă de standardul IEEE 1547.2 (5 %), prin urmare, metoda revendicată poate fi utilizată pentru studiul soluțiilor în așa fel încât calitatea energiei electrice livrate în rețea să fie îmbunătățită prin utilizarea tehnicii compensării selective a armonicelor, în scopul obținerii unui THD mai mic de 5 %. După implementarea CA se poate observa că nivelul THD scade considerabil și se obține o bună calitate a energiei electrice. Spectrul THD al curentului rețelei (faza A) a fost calculat începând de la 0.888 s (în simulare)/0.08 s (în experiment) pentru 1 ciclu de funcționare.

Pentru testarea metodei revendicate și în alte situații de funcționare, dar și pentru o mai bună vizualizare a datelor, în Fig. 6 se prezintă o analiză comparativă pentru patru valori diferite ale puterii active, în timp ce referința puterii reactive a fost setată 0, obținute în urma simulărilor (Fig. 6a) și experimentelor de laborator (Fig.6b) cu ambele regulatoare, fără și cu CA. Pe baza acestor rezultate, se poate concluziona că metoda software de control cu regulatoarele PI și CA, implementată în sistemul de referință sincron  $dq$ , se obține cea mai bună performanță, atât în simulare cât și în cazul măsurătorilor experimentale.

Invenția prezintă următoarele avantaje:

- evaluarea software rapidă și ieftină a soluțiilor cu un conținut redus al armonicelor de curent și asigurarea calității puterii generate;
- studiul soluțiilor prin metoda revendicată permite și un răspuns rapid la variațiile puterii active și reactive;

- metoda și software de evaluare a conținutului de armonici revendicate sunt validate de măsurătorile experimentale ca fiind precise;
- metoda poate fi folosită cu succes în proiectare, nefiind necesară validarea experimentală, minimizând astfel prețul de cost și timpul de implementare.



## REVENDICĂRI

1. Metodă și software de evaluare (descrise în Fig. 2 și Fig. 3) a conținutului de armonici produse de convertorul de putere din schema de conectare la rețea a unui sistem distribuit de generare bazat pe surse de energie regenerabile, **caracterizată prin aceea că**, în vederea obținerii unui conținut minim de armonici de curent pe tot intervalul de încărcare, conține un modul de calcul al puterii active și reactive **(6)**, puteri pe care convertorul de rețea le poate produce datorită surselor de putere (SER) și livra rețelei cu ajutorul metodei de control P/Q (droop control) **(7)**, care oferă posibilitatea de a schimba referința puterii active **(8)** și reactive **(9)** în conformitate cu cerințele SDG în diferite cazuri de funcționare.
  
2. Metoda și software de evaluare a conținutului de armonici, **conform revendicării 1, caracterizată prin aceea că** blocul de control **(12)** implementat software, conține două tipuri de regulatoare cu două metode de compensare a armonicilor de curent **(17)**, **(18)** și **(26)**, care sunt implementate software în două sisteme de referință diferite. Tensiunile de ieșire din cadrul blocurilor **(17)** și **(26)** sunt multiplexate în **(22)**, **(27)**, valoarea rezultată furnizând semnalele de tensiune ce intră în generatorul PWM **(15)**, obținându-se la ieșire semnalele modulate pentru convertorul de rețea. Blocurile **(23)**, **(24)**, **(28)** și **(29)** permit fixarea/modificarea coeficienților proporționali-integratori în funcție de cerințele sistemului. Pentru activarea/dezactivarea compensatorului armonic din cadrul soluțiilor software revendicate, se utilizează blocurile **(25)** și **(30)**. Aceste valori devin semnale de intrare pentru metoda revendicată în cadrul blocurilor **(17)** și **(26)**.

BY  
57

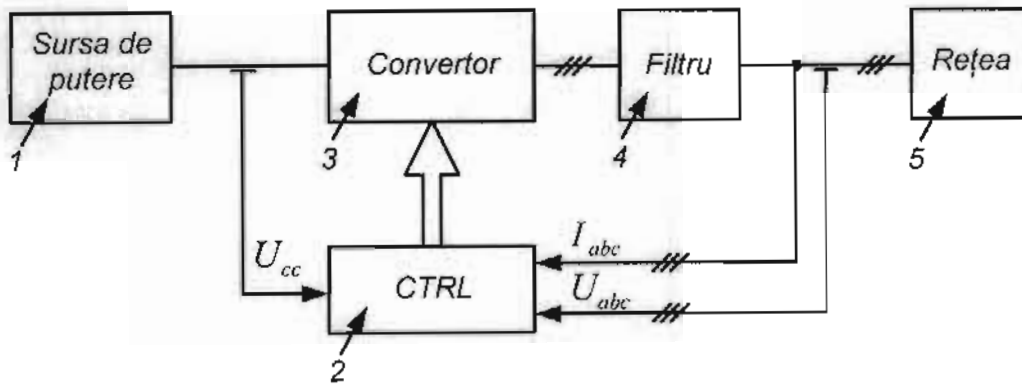


Fig. 1.

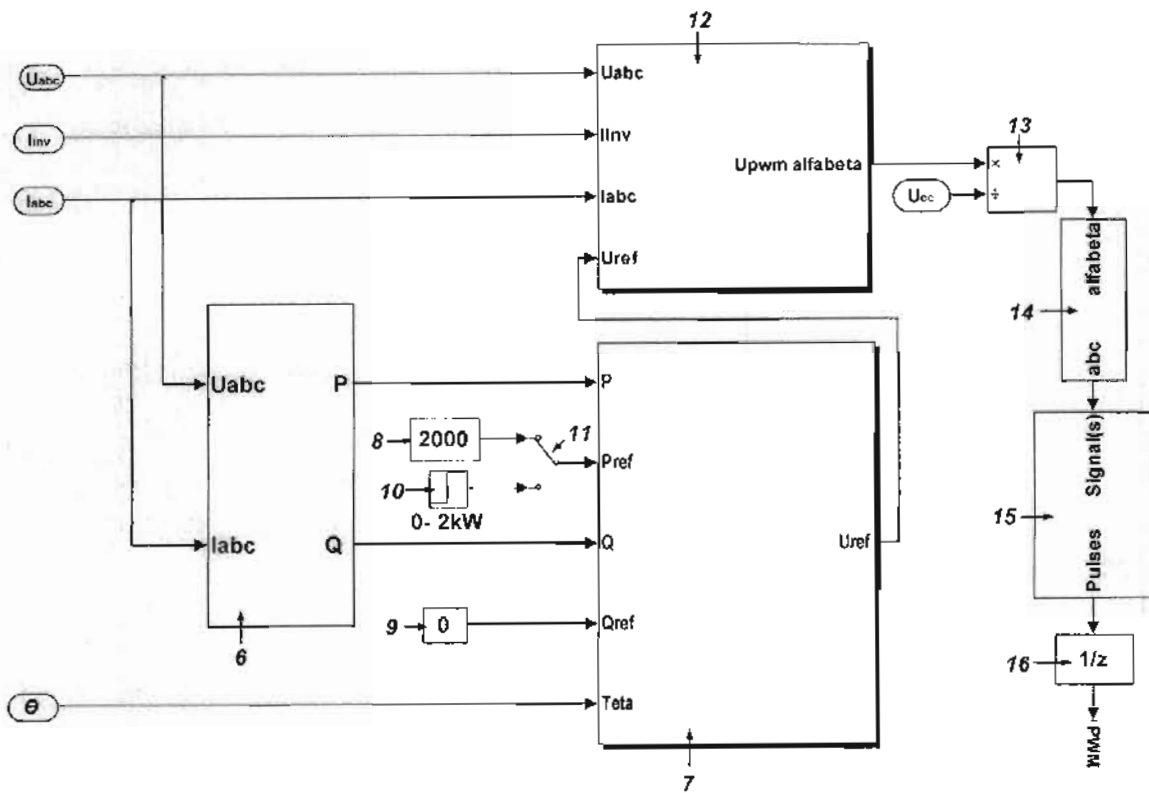
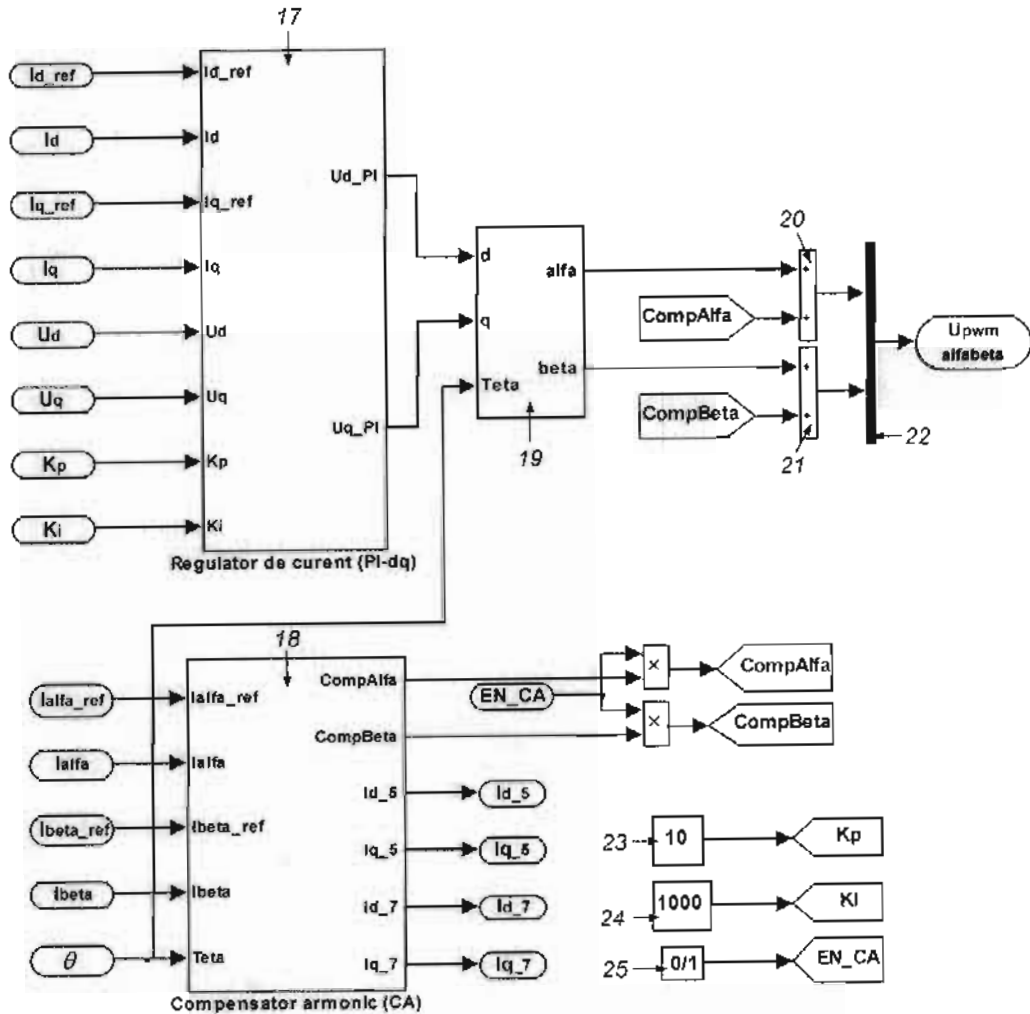


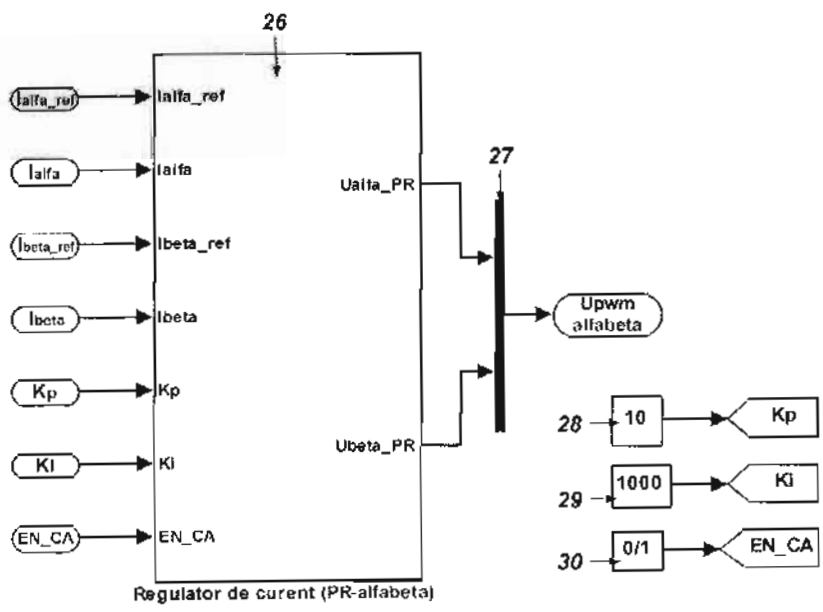
Fig. 2.

Prof. Dr. Ina Ion

34



(a)



(b)

Fig. 3.

*Prof. Dr. Ing. Marin*

85

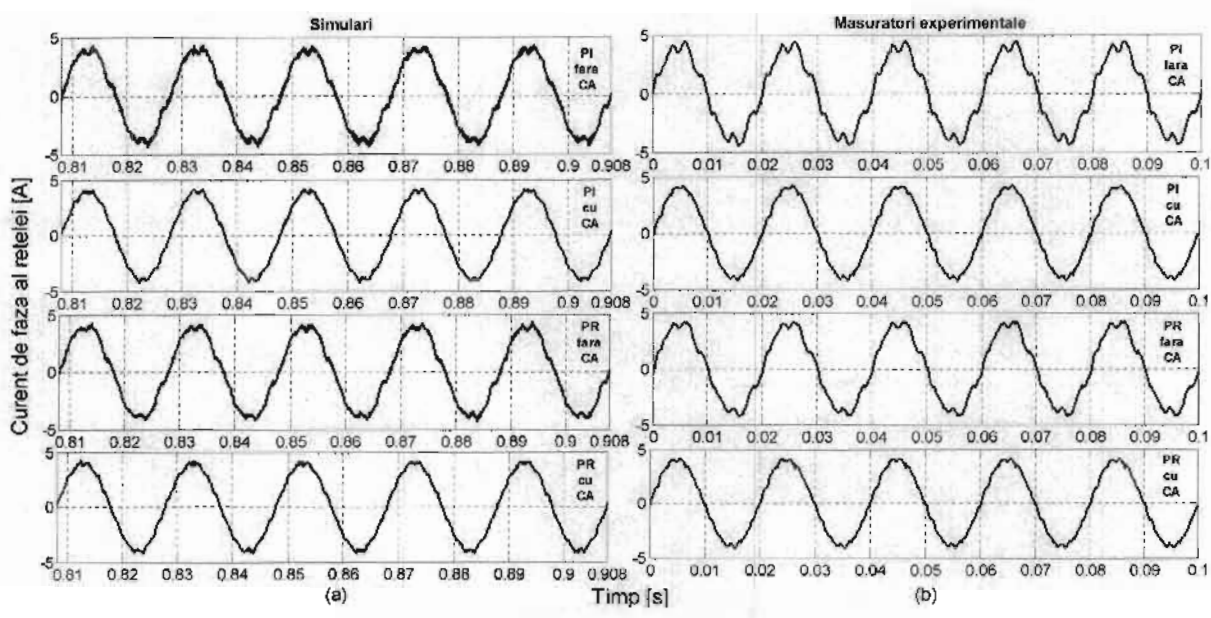
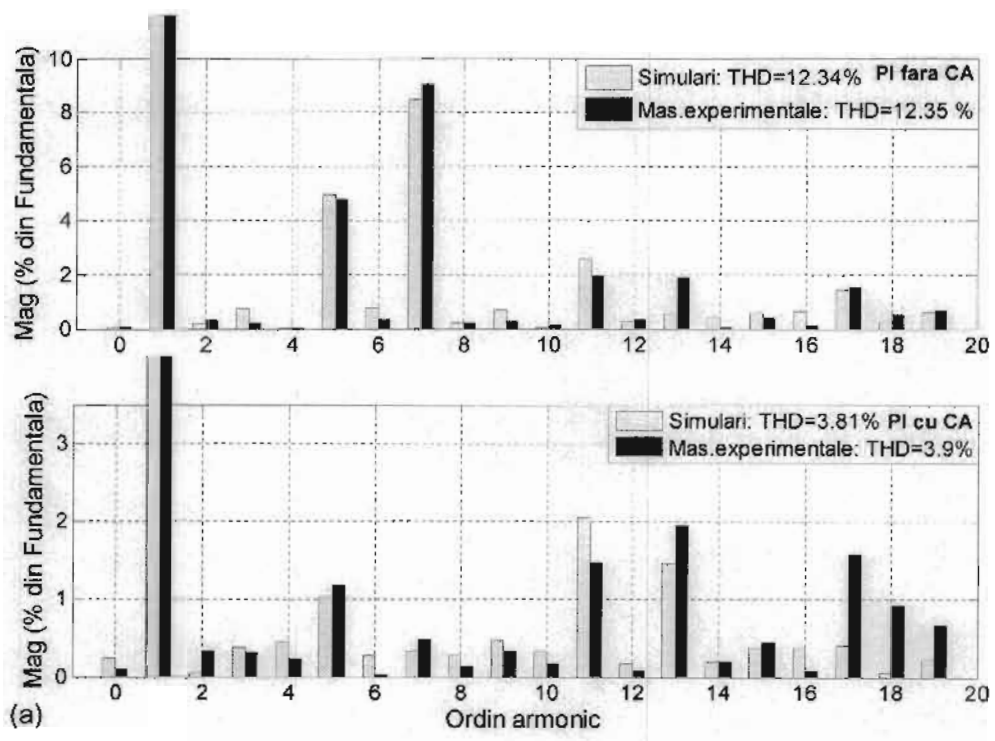


Fig. 4.



Bogdan  
Ivanescu

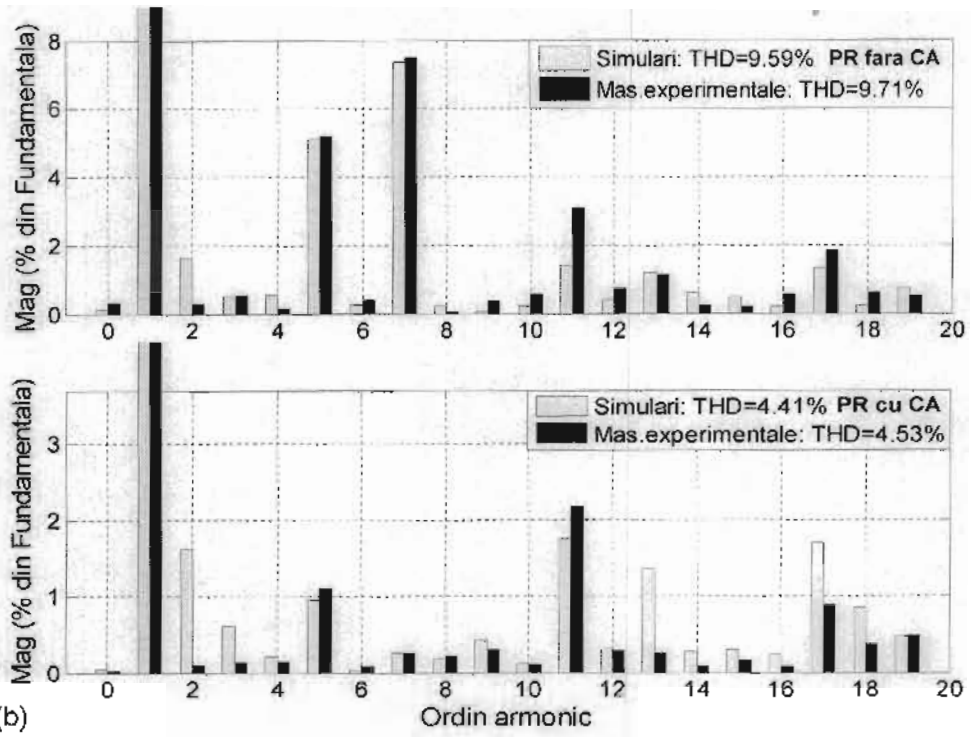


Fig. 5.

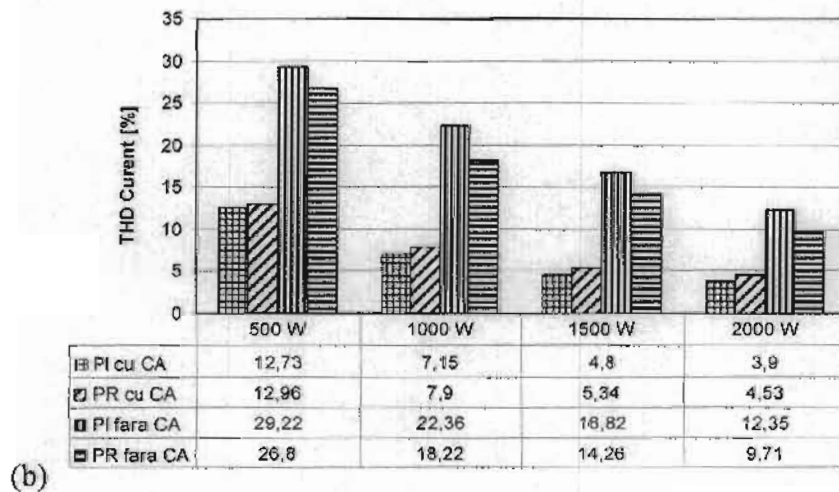
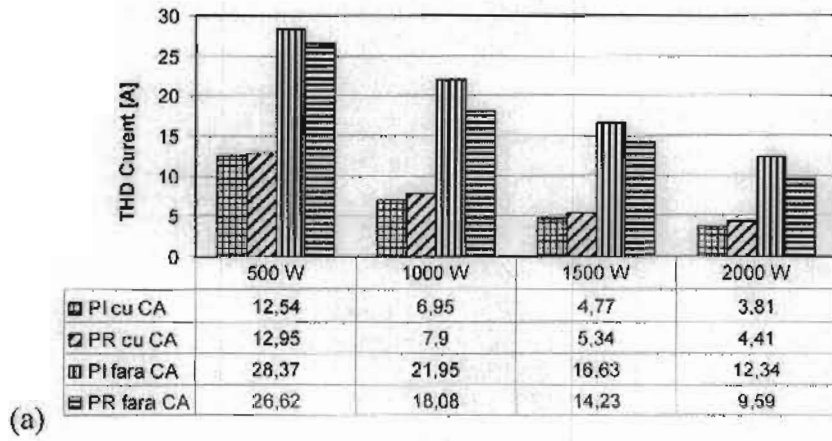


Fig. 6.

Bogdan  
Ivanescu