

Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca

Scoala Doctorala Interdisciplinara

Departament: *Electronică Aplicată*

Ing. Alexandru-Cristian ORIAN

TEZĂ DE DOCTORAT

Rezumat

Controlul digital al convertoarelor de putere în surse regenerabile

Conducător științific

Prof.dr.ing. Dorin PETREUȘ

CLUJ-NAPOCA, 2017

Cuvinte cheie: control digital, control prin glisare, convertoare în comutație, invertoare, FPGA.

Introducere și motivația tezei de doctorat

Convertoarele în comutație intermediază transferul de putere electrică dintre sursele de energie și consumatori. Ele au rolul principal de a adapta valorile mărimilor electrice de la ieșire la nevoile consumatorilor: convertoarele de curent continuu asigură la ieșire o tensiune constantă și debitează un curent a cărui intensitate variază într-un domeniu prevăzut în specificații; invertorele produc la ieșire o tensiune sinusoidală. Există situații în care este necesar și controlul mărimilor de intrare, precum fixarea tensiunii de alimentare a unui panou fotovoltaic. Se poate impune, de asemenea, forma de variație a unora dintre mărimi, precum a curentului de la ieșirea unui invertor care injectează energie în rețea și cea a curentului absorbit de un preregulator pentru corecția factorului de putere - curentul variază sinusoidal și în fază cu tensiunea rețelei. Convertoarele asigură protecții împotriva funcționării în afara specificațiilor, asigură fluxul de putere în sisteme cu mai multe surse de energie și consumatori, transfer bidirecțional al puterii etc. Aceste deziderate se realizează cu ajutorul algoritmilor de control. Performanțele algoritmilor de control se exprimă cu ajutorul unor mărimi clasificate ca parametri de regim staționar sau de regim tranzitoriu.

Elementul de reglare al buclei de control se poate implementa analogic sau digital. Reglarea analogică prezintă avantajul vitezei de funcționare mărite. Dezavantajele reglării analogice sunt variația parametrilor de circuit care o compun, susceptibilitatea la perturbații, depanarea și modificarea greoaie, faptul că nu se pretează la autocalibrare. Controlul digital permite utilizarea de algoritmi mai sofisticăți și modificarea mai ușoară a acestora, permite reducerea numărului de componente de circuit utilizate, prezintă imunitate la perturbații, posibilități de comunicare cu alte sisteme și depanare, determinarea funcției de transfer a unui circuit. Ca urmare a acestor posibilități, s-a ales controlul digital.

Implementarea elementului de reglaj s-a făcut cu un circuit FPGA (Field Programmable Gate Array) Artix7 de la Xilinx. Arhitectura circuitului FPGA se compune din blocuri de calcul DSP48, ale căror performanțe sunt comparabile cu cele ale circuitelor DSP (Digital Signal Processor), însă care se pot interconecta în configurații diferite, programabile și care permit utilizarea de linii de calcul în paralel, adaptate la aplicația dată. Semnalul de ceas este generat cu ajutorul unui cristal

de quartz și are frecvența de 100MHz, însă este posibilă sinteza de semnale de ceas cu frecvență de până la 8 ori mai mare cu ajutorul buclelor calate pe fază din circuit. Prin urmare, este posibilă generarea de semnale DPWM (Digital Pulse Width Modulation) cu o rezoluție suficient de mare utilizând numărătoare pentru generarea semnalului modulator.

Obiectivele tezei sunt:

- controlul stabilizatoarelor în comutație cu ajutorul FPGA: proiectarea unui circuit FPGA care să realizeze conversia analog-numerică a semnalului de reacție de la ieșirea stabilizatorului, reglajul și generarea ieșirii semnalului de comandă DPWM;
- controlul unui inverter monofazat alimentat de la panouri fotovoltaice care injectează energie în rețea.

Proiectarea unui convertor analog-numeric

Proiectarea unui convertor analog-numeric este parte din primul obiectiv al tezei, acela de a implementa întregul circuit de control al unui convertor în comutație cu un circuit FPGA. Convertorul analog-numeric eșantionează și cuantifică semnalul analogic pe care îl preia la intrare. Prin urmare, se pot impune criterii de performanță pentru funcționarea acestuia, precum viteza de conversie sau rezoluția absolută. Circuitul FPGA ales este Artix-7 și permite utilizarea unui convertor analog-numeric a cărui durată de conversie este de 1 μ s și rezoluția de 12 biți. Convertorul proiectat are o durată de 150ns și rezoluția de 8 biți. Dezavantajul rezoluției este atenuat prin limitarea domeniului de valori de măsurat în jurul tensiunii nominale de ieșire a convertorului în comutație, ceea ce îmbunătățește rezoluția absolută.

Implementarea convertorului analog-numeric s-a făcut cu mărime intermediară – timp. Conversia tensiune-durată s-a făcut cu două componente externe, un rezistor și un condensator, și un comparator din circuitul FPGA care preia semnale de intrare diferențiale. În final se obține un semnal digital al cărui factor de umplere este proporțional cu tensiunea analogică de intrare.

Conversia durată-număr determină valoarea numerică a factorului de umplere al semnalului de durată. Implementarea pe FPGA necesită aplicarea semnalului prin celule înseriate a căror durată de propagare este aceeași. Această metodă oferă o rezoluție superioară variantei cu un numărător sincron, care este limitată de frecvența de ceas a circuitului. Celulele înseriate au fost circuite sumatoare cu bit de Carry, deoarece sunt optimizate pentru durate de propagare mai mici. Schema

este prezentată în fig 1. Pentru a realiza acest lanț s-a impus o constrângere pentru limitarea duratei de propagare.

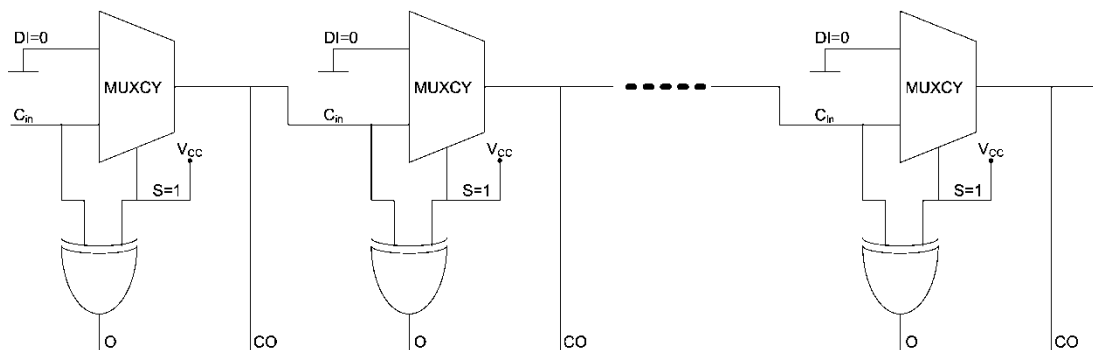


Fig. 1 Schema logică a blocului de propagare

Rezultatele experimentale s-au obținut pentru diferite frecvențe ale semnalului de intrare, așa cum reiese din fig 2, în care semnalul de intrare are culoarea portocalie și semnalul obținut din conversia analog-numerică și reconvertit în formă analogică are culoarea albastră.

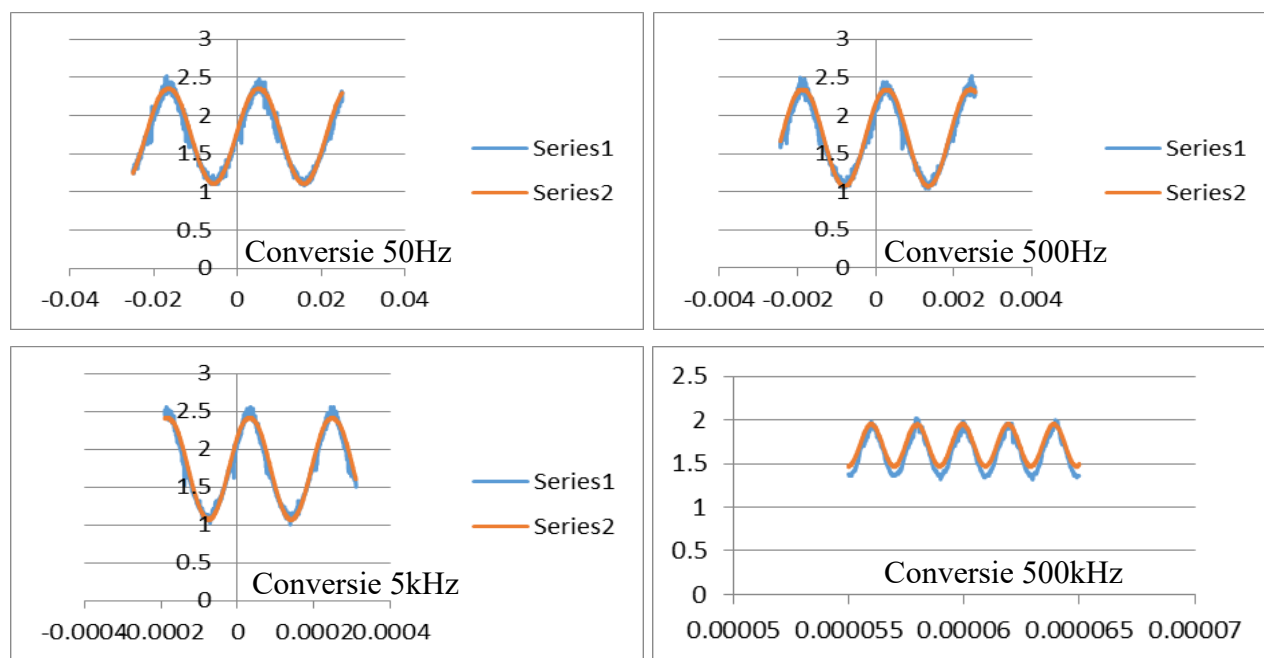


Fig. 2 Caracteristici de conversie la: 50Hz, 500Hz, 5kHz, 500kHz

Determinarea funcției de transfer a unui circuit dat

Determinarea funcției de transfer a unui circuit este parte din primul obiectiv al tezei, acela de a realiza controlul unui convertor în comutație cu un circuit FPGA și se poate utiliza în cazul recalibrării controlului.

Metoda constă în injectarea unei secvențe la intrarea circuitului dat și preluarea de eșantioane de la ieșirea circuitului. Ecuația cu diferențe finite este

$$y[n] = \sum_{i=0}^N b_i \cdot x[n-i] - \sum_{j=1}^M a_j \cdot y[n-j],$$

unde $x[n]$ este secvența aplicată la intrare, $y[n]$ este secvența preluată de la ieșire, a_i și b_j sunt coeficienții polinoamelor de la numitorului și respectiv numărătorului funcției de transfer în z , M și N sunt ordinele polinoamelor. Pentru a determina funcția de transfer am impus valorile M și N . Prin urmare, necunoscutele sunt a_i și b_j .

O primă metodă constă în dimensionarea secvențelor $x[n]$ și $y[n]$ în așa fel încât să se obțină un sistem cu matrice pătratică. Dezavantajul metodei constă în faptul că funcția de transfer obținută produce o ieșire corectă doar pentru $M+N$ eșantioane, apoi apar erori relative ce depășesc 100%. Soluția este de a mări numărul de valori ale secvențelor $x[n]$ și $y[n]$. Matricea sistemului obținut nu mai este pătratică, dar soluția se obține cu ajutorul pseudoinversei. Aceasta permite rezolvarea sistemului chiar și în caz de incompatibilitate. Răspunsul dat de sistem și răspunsul pe care l-ar da sistemul cu funcția de transfer obținută sunt prezentate în fig 3 alături de eroarea absolută pentru 100 de eșantioane.

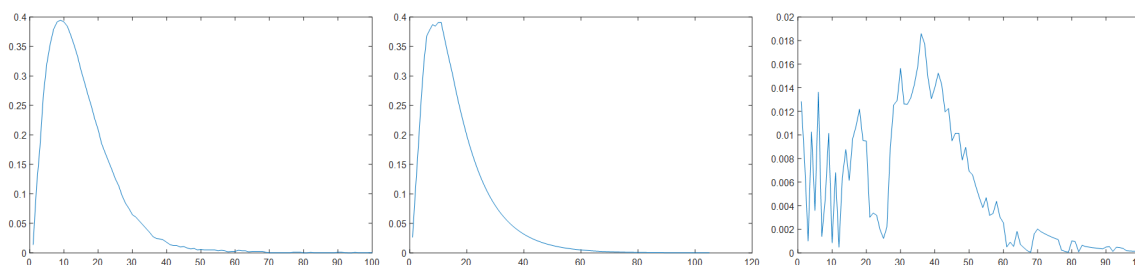


Fig. 3 Ieșirea în 100 de eșantioane, răspunsul în 100 de eșantioane și eroarea absolută

Pentru a obține rezultate experimentale s-a utilizat un circuit de prelucrare a semnalului audio de pe placa de dezvoltare Nexys 4. Diagrama Bode a circuitului original și cea a circuitului obținut prin metoda de față sunt prezentate în fig 4.

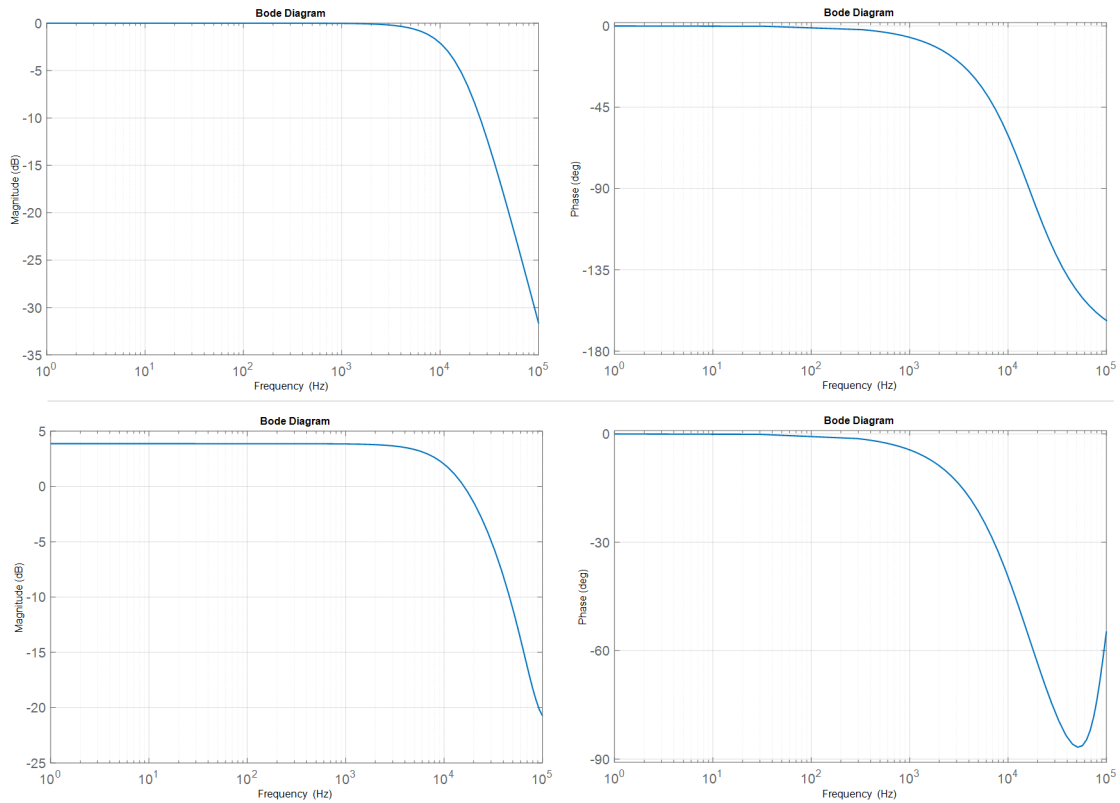


Fig. 4 Diagrama Bode pentru sistemul simulat (sus) și sistemul determinat experimental (jos).

Controlul convertorului în comutație prin glisare

Metoda de control prin glisare este parte din obiectivul de a controla un convertor în comutație utilizând unui circuit FPGA. În mod obișnuit controlul se realizează prin metodele sistemelor liniare și invariante, dar convertoarele în comutație nu sunt circuite liniare și invariante. Prin urmare, trebuie să se obțină modelul circuitului prin liniarizare în jurul unui punct de funcționare. Aceasta necesită cunoașterea parametrilor de circuit și funcționează cel mai bine în jurul punctului de funcționare ales pentru liniarizare, însă prezintă avantajul unei erori staționare la poziție nule dacă se impune în structura elementului de reglaj un pol în origine.

Metoda controlului prin glisare se pretează la controlul sistemelor cu structură variabilă, precum convertoarele în comutație, și prezintă avantajul simplității și faptul că nu este necesară cunoașterea cu precizie a modelului părții de putere a sistemului. Dezavantajul este pentru configurația naturală a mărimilor de stare alese nu este posibilă eliminarea erorii staționare la poziție.

Regimul tranzitoriu în cazul glisării se compune din două etape: evoluția liberă a sistemului până la atingerea condiției de glisare, și glisarea. Acestea sunt prezentate în fig 5. Panta drepte de glisare determină condiția de glisare și durata glisării, care în timp corespunde unei evoluții exponențiale către regimul staționar.

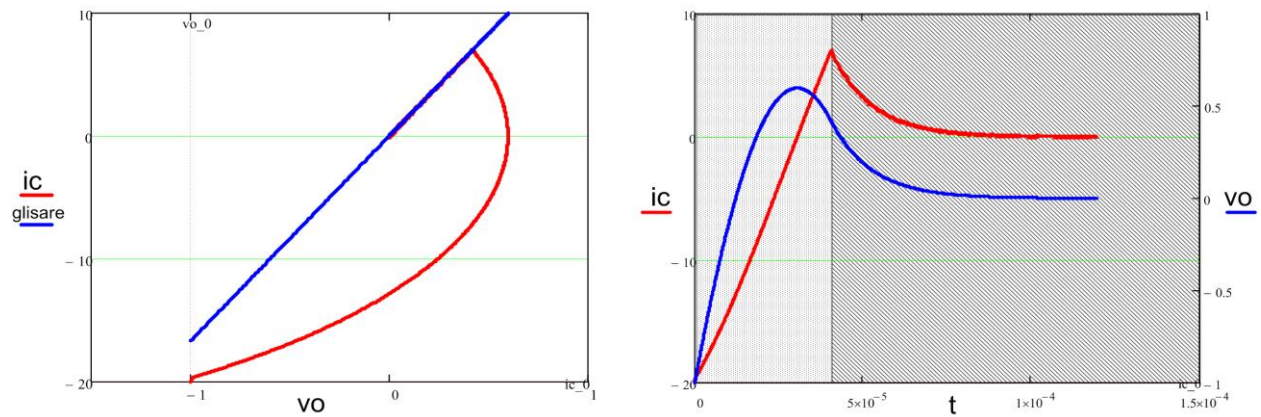


Fig. 5 Evoluția sistemului în planul stărilor (stânga) și mărimile de stare în regim tranzitoriu (dreapta).

Montajul experimental conține o placă de dezvoltare Nexys 4 cu circuitul FPGA Artix7 și un convertor buck alimentat la 24V, ieșire nominală 12V, $L=110\mu H$, $C=100\mu F$, $R_{sarcina}=6\Omega$. Eroarea tensiunii de ieșire pentru un salt de sarcină de 3A este prezentat în fig 6.

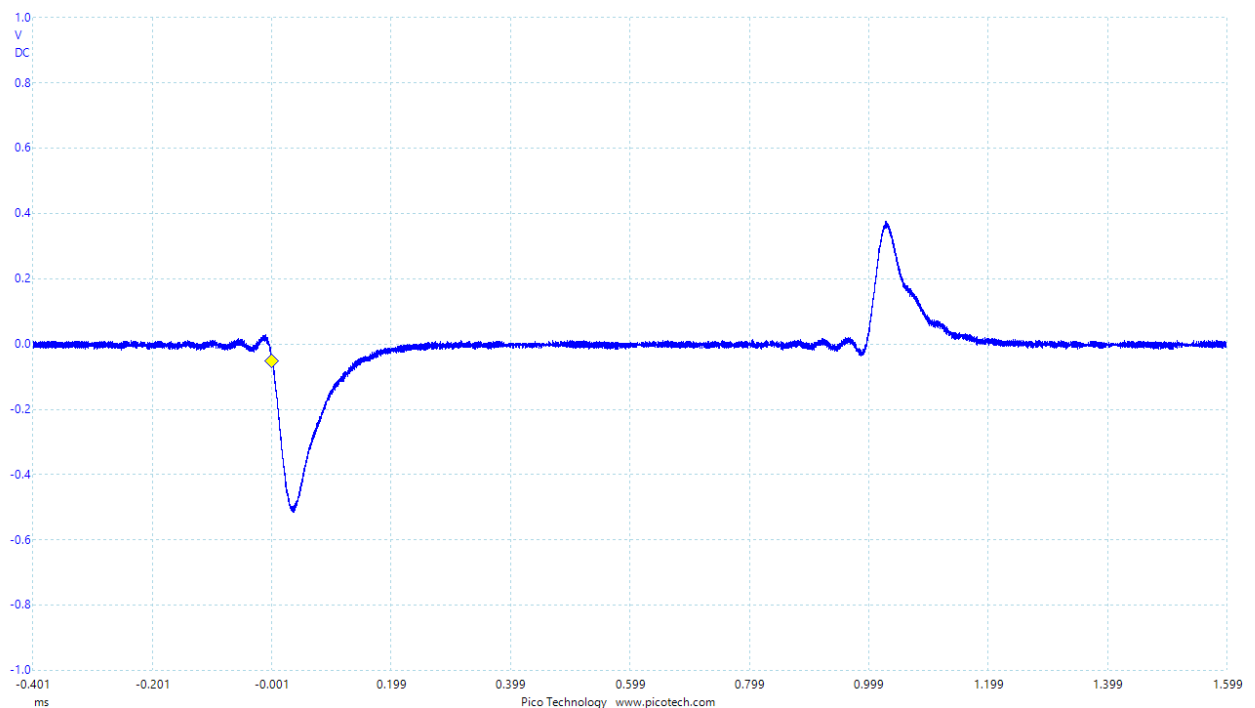


Fig. 6 Eroarea tensiunii de ieșire pentru un salt de sarcină de 3A

Controlul unui inverter alimentat de la panouri fotovoltaice și conectat la rețea

Preluarea de energie de la panouri fotovoltaice este o metodă de a utiliza energie regenerabilă. Prin injectarea ei în rețeaua de alimentare, această energie devine disponibilă utilizatorilor casnici. Curentul injectat în rețea trebuie să fie sinusoidal și în fază cu tensiunea rețelei.

Schema bloc a circuitului de control în coordonate (d,q) al unui inverter monofazat alimentat de la panouri solare este prezentată în fig. 7 și se compune din:

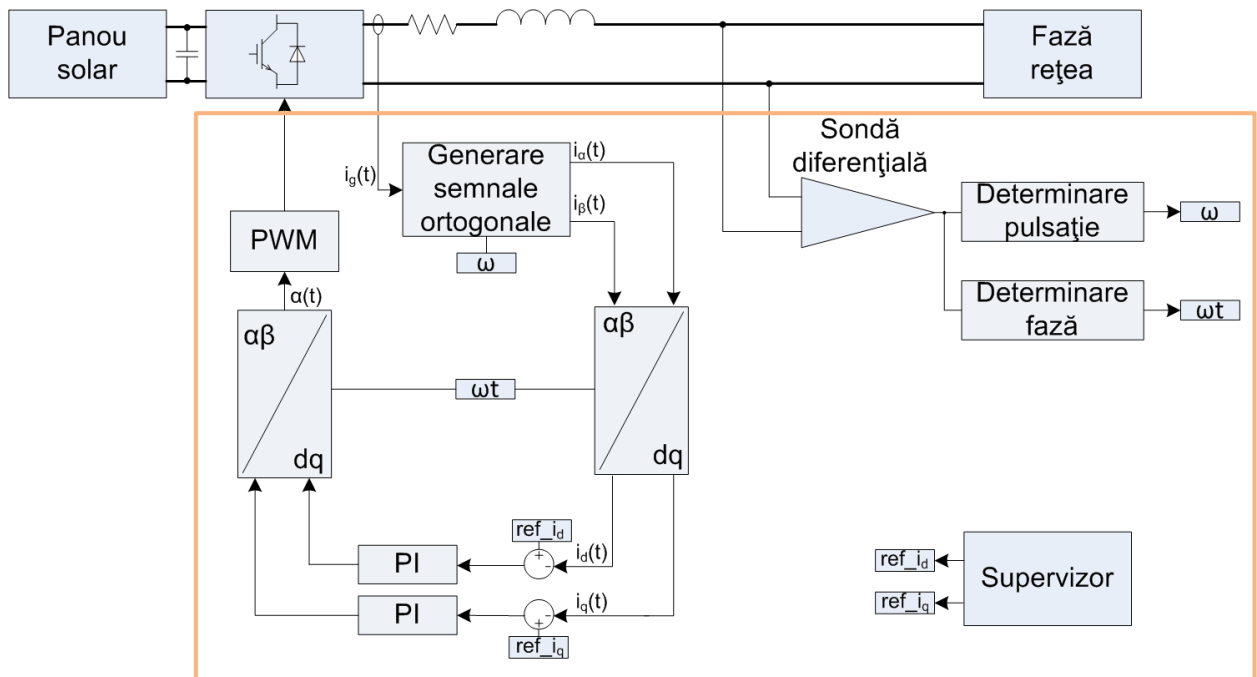


Fig.7 Schema bloc a buclei de control în coordonate (d, q) a inverterului monofazat

- buclă calată pe fază, care asigură sincronizarea cu tensiunea de fază; semnalul ωt este utilizat pentru realizarea transformărilor directă și inversă între coordonatele sinusoidale (α, β) și de curent continuu (d,q);
- generarea unei perechi de semnale sinusoidale în cuadratură: unul dintre ele repetă forma curentului de ieșire al inverterului, celălalt este o variantă decalată cu un sfert de perioadă; cele două semnale se folosesc pentru obținerea mărimilor de control în coordonate (d,q);
- transformarea (α, β) - (d,q); se folosește semnalul ωt obținut de la buclă calată pe fază; mărimile în coordonate (d, q) permit aplicare metodelor de control specifice sistemelor de curent continuu;
- controlul PI asupra mărimilor în coordonate (d,q); valorile de prescriere sunt generate de un circuit supervisor;

- transformarea (d, q) - (α , β); se folosește semnalul ωt obținut de la buclă calată pe fază; realizează revenirea la mărimi sinusoidale, pentru a genera semnalul PWM;
- generarea semnalului PWM – se aplică elementelor de comutație ale invertorului;

O problemă care poate să apară în controlul invertorului alimentat de la panouri fotovoltaice și care injectează energie în rețea este apariția de armonici superioare în componența curentului de la ieșirea invertorului. Acest curent ar trebui să fie sinusoidal și în fază cu tensiunea rețelei.

Deoarece puterile de la intrarea și ieșirea invertorului sunt aproximativ egale, peste componenta continuă a tensiunii de intrare se suprapune un riplu la frecvența dublul frecvenței de rețea de forma

$$u_{dc}(t) = \frac{P_M}{2 \cdot \omega_{grid} \cdot U_C \cdot C} \cdot \sin(2 \cdot \omega_{grid} \cdot t)$$

Acest riplu este modulată cu semnalul de comandă $d(t)$, generat de blocul PWM prin modularea unei mărimi sinusoidale $\alpha(t)$ cu frecvența rețelei. Rezultatul este

$$d(t) \cdot u_{dc}(t) = D \sin(\omega_{grid} \cdot t + \varphi) \cdot \frac{P_M}{2 \cdot \omega_{grid} \cdot U_C \cdot C} \cdot \sin(2 \cdot \omega_{grid} \cdot t)$$

și conduce la formarea armonicii a treia la ieșirea invertorului. Dacă aceasta pătrunde în circuitul de control și modulează încă o dată riplul $u_{dc}(t)$, se obține armonica a cincea la ieșirea invertorului. Eliminarea acestor componente impare s-a făcut prin trei metode: control dq, control proporțional-rezonant și control repetitiv. Controlul dq funcționează la fel ca în cazul descris anterior, dar se introduc căi separate pentru armonicile impare: pentru fiecare indice impar între 3 și $(2n+1)$ se introduce câte o buclă de control care fixează prescrierea la 0, astfel încât armonicile corespunzătoare să fie eliminate din curentul de ieșire al invertorului.

Rezultatele experimentale (fig 8) s-au obținut utilizând un invertor conectat la rețea printr-un transformator și un modul Dspace1104 pentru control.

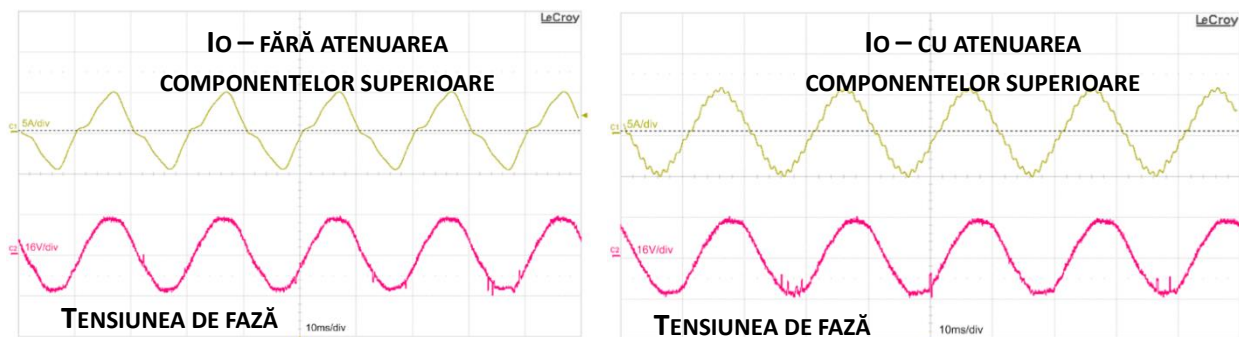


Fig. 8 Rezultate experimentale

Contribuții

- este prezentată proiectarea unui convertor analog-numeric cu mărime intermediară pe FPGA;
- implementarea convertorului analog-numeric pe FPGA s-a realizat în Vivado, în limbajul Verilog;
- metoda utilizează două componente R, C și un comparator intern al FPGA;
- determinarea funcției de transfer a unui circuit dat a fost implementată pe FPGA;
- implementarea pe FPGA presupune injectarea semnalului de test, citirea semnalului de ieșire și rezolvarea sistemului minimizarea erorii pătratice;
- controlul prin glisare al unui convertor coborâtor a fost modelat în Mathcad și simulat în LTSpice și implementat practic pe FPGA;
- s-a realizat controlul unui invertor monofazat alimentat de la panouri solare și conectat la rețea și s-au atenuat componentele superioare ale curentului de ieșire prin trei metode: dq, proporțional-rezonant și control repetitiv.