

REZUMATUL

tezei de doctorat cu titlul

COMENZI DIGITALE PREDICTIVE ÎN CURENT PENTRU CONVERTOARE DC-DC ÎN COMUTAȚIE

Scopul lucrării este de a propune și analiza algoritmi și metode de implementare a comenzilor digitale predictive în curent pentru convertoare dc-dc în comutație de înaltă frecvență. Se cunoaște că, în general, comanda în curent este importantă pe de o parte în proiectarea controllerelor pentru convertoare ce prezintă un zero în semiplanul drept (boost, buck-boost), apoi pentru faptul că în anumite cazuri oferă o inerentă protecție la supracurenți, iar pe e altă parte aplicațiile de sudură, electroliză sau controlul LED-urilor fac uz de acest tip de comandă. Lucrarea are ca punct de plecare două articole și un brevet ale colectivului de la Universitatea Boulder Colorado, pe care autorul le analizează critic și le dezvoltă cu semnificative și originale contribuții.

Importanța și actualitatea temei reiese din faptul că principalul scop al electronicii de putere este satisfacerea cerințelor de conversie a energiei și funcționarea corectă a sistemelor de alimentare dezvoltate pentru diverse aplicații. Convertoarele dc-dc în comutație s-au utilizat în forme simple de mai bine de cincizeci de ani, începând cu tradiționalele choppere de putere. Literatura continuă să publice o serie de noi topologii, dar în ultima decadă accentul s-a mutat de pe variantele topologice pe tehnicile de comandă, arătând că domeniul convertoarelor în comutație dc-dc este departe de a fi epuizat.

Firește, inițial tehnicile de comandă au apărut în versiune analogică, începând cu comanda în curent, cel controlat fiind curentul de vârf și continuând apoi cu comanda prin sarcină și o serie de comenzi integrative (one-cycle control) propuse de Smedley și Cuk.

Odată cu creșterea vitezelor de achiziție și procesare a microcontrolerelor și DSP-urilor comenzile digitale au penetrat tot mai mult în electronica de putere. Comanda digitală oferă o serie de avantaje în ceea ce privește sensibilitatea mai scăzută la variația unor parametri, programabilitatea și posibilitatea de îmbunătățire a performanțelor folosind scheme de comandă sofisticate. Microprocesoarele și DSP-urile bazate pe comandă digitală sunt deja larg răspândite în comanda motoarelor și în aplicațiile trifazate de mare putere ce funcționează la frecvențe de comutație relativ scăzute. Datorită progreselor în tehnologia microprocesoarelor și DSP-urilor,

2 Rezumat

mai ales privind creșterea capacității de procesare și scăderea costurilor, comanda digitală devine din ce în ce mai viabilă și pentru convertoarele de înaltă frecvență, de putere mică și medie.

Metodele de cercetare abordate sunt bazate pe identificarea problemei, modelarea matematică a conceptului teoretic, simularea acestuia, și în final validarea experimentală.

Toate tipurile de comenzi predictive analizate și propuse au parcurs etapele menționate mai sus, rezultatele finale obținute validând pe rând corectitudinea etapelor anterioare, pornind de la conceptul teoretic și dezvoltarea de programe în Matlab cât și dezvoltarea de noi blocuri bibliotecă și realizarea schemelor de simulare în mediul Caspoc. Prin aceste rezultate și lucrările științifice publicate autorul consideră că reușește să aducă noi contribuții personale la vastul domeniu al comenzilor în curent pentru convertoarele dc-dc.

Conținutul fiecărui capitol poate fi sintetizat după cum urmează:

Capitolul 1, având titlul "Stadiul actual al comenzilor predictive în curent", face o prezentare a rezultatelor publicate privind comenzile digitale predictive în curent și stabilind zonele de interes investigate. Se realizează o trecere în revistă a principiului de funcționare a comenzilor digitale predictive. Este cunoscut faptul că problema instabilității există și în cazul acestor tipuri de comenzi. Astfel autorul își propune ca obiectiv aducerea de noi contribuții pentru obținerea stabilității necondiționate indiferent de tehnica de modulație utilizată în corelație cu toate metodele de comandă.

Capitolul 2, denumit "Comanda predictivă a curentului mediu cu modulație trailing-edge", investighează în detaliu acest tip de comandă. A fost determinată legea de comandă și totodată au fost dezvoltate considerații teoretice privind stabilitatea acestui tip de comandă. Analiza s-a efectuată într-o manieră generală, prin urmare, concluziile legate de stabilitate sunt valabile pentru orice convertor, ca de altfel și legea de comandă care este, de asemenea, generală. Numai valorile tipice pentru pantele curentului inductiv trebuie să fie introduse pentru a se obține legea de comandă pentru o anumită topologie.

Se demonstrează că comanda digitală predictivă prin curentul mediu utilizând modulația trailing-edge este în mod necondiționat stabilă pentru orice valoare a factorului de umplere, prin urmare reprezintă o opțiune foarte atractivă în corecția factorului de putere sau în aplicații de sudură. Acest tip de comandă poate fi implementată relativ ușor, utilizând fie un microcontroler, fie un DSP sau utilizând programul LabVIEW, dezvoltând o aplicație pentru plăcile de achiziții de date oferite de National Instruments.

Un aspect foarte important este dezvoltarea de noi blocuri dedicate pentru simularea comenzilor predictive. Acestea au fost dezvoltate în programul Caspoc, program dedicat simulării sistemelor de putere.

Capitolul 3, intitulat "Comanda predictivă a curentului mediu cu modulație leading-edge" utilizează aceeași abordare ca cea din capitolul 2 pentru a deduce legea de comandă și pentru analiza stabilității acestui tip de comandă. Și de această dată analiza s-a efectuat într-o manieră generală, prin urmare, concluziile de stabilitate sunt valabile pentru orice convertor, în timp ce legea de comandă se poate particulariza în funcție de valorile pantelor curentului inductiv ce trebuie să fie riguros cunoscute pentru a se obține legea de comandă pentru o anumită topologie de convertoare.

Se demonstrează că comanda digitală predictivă prin curentul mediu utilizând modulația leading-edge este necondiționat stabilă pentru orice valoare a

factorului de umplere, prin urmare și acest tip de comandă reprezintă o opțiune foarte atractivă.

Capitolul 4, având titlul "Comanda predictivă a curentului de vârf cu modulație trailing triangle", se ocupă cu investigarea în detaliu, a comenzii predictive de tip trailing triangle peak. A fost determinată legea de comandă și totodată au fost dezvoltate considerații teoretice privind stabilitatea acestui tip de comandă. Analiza s-a efectuat într-o manieră generală, prin urmare, concluziile de stabilitate sunt valabile pentru orice convertor în timp ce legile de comandă sunt, de asemenea, generale.

Se demonstrează că comanda trailing triangle peak este instabilă pentru orice valoare a factorului de umplere, prin urmare este infirmată stabilitatea restrictivă prognozată de colectivul de la Boulder, Colorado.

Capitolul 5, intitulat "Comanda predictivă a curentului de vale cu modulație leading triangle" are ca obiect de studiu comanda predictivă de tip trailing triangle peak. A fost determinată legea de comandă și totodată au fost dezvoltate considerații teoretice privind stabilitatea acestui tip de comandă. Analiza a fost efectuată într-o manieră generală, prin urmare, concluziile de stabilitate sunt valabile pentru orice convertor în timp ce legile de comandă sunt, de asemenea, generale.

Spre deosebire de rezultatele colectivului de la Boulder, Colorado, se argumentează riguros că comanda trailing triangle peak este instabilă pentru orice valoare a factorului de umplere, prin urmare este infirmată stabilitatea restrictivă.

Capitolul 6 denumit "Analiza stabilității comenzilor predictive utilizând un model exact", are ca obiectiv elaborarea unei metode mai exacte decât metoda geometrică pentru studiul stabilității convertoarelor dc-dc. Metoda ține cont de faptul că într-un convertor dc-dc forma curentului inductiv este în realitate nu una liniară ci una exponențial amortizată, cu constante de timp mari în raport cu perioada de comutație. Dezvoltarea acestei metode de studiu a stabilității are la bază descrierea convertoarelor dc-dc cu ajutorul modelului discret în spațiul stărilor, utilizând funcția exponențială de matrice, ceea ce face ca determinarea factorului de umplere să presupună rezolvarea unei ecuații transcendente. Metoda exactă are atuul că se poate aplica oricărui tip de comandă. Astfel se determină cu mare acuratețe domeniul de stabilitate în cazul fiecărui tip de comandă predictivă, arătându-se că diferențele față de metoda aproximativă pot fi uneori semnificative.

Capitolul 7 denumit "Comenzi predictive în curent utilizând noi tehnici de modulație" propune două noi tehnici de modulație, denumite „double trailing triangle” și „double leading triangle”, prin adăugarea unei comutații suplimentare într-o perioadă. Dezavantajul comutației suplimentare puternic este contrabalansat de obținerea unui grad de libertate adițional care este utilizat pentru obținerea stabilității necondiționate. Trebuie subliniat că sub ambele tipuri de modulație comenzile predictive în curent sunt necondiționat stabile, indiferent de metoda de comandă, adică prin curentul de vârf de vale sau mediu. Mai mult, pentru fiecare din cele două noi tehnici de modulație asociate cu comanda prin curentul mediu autorul propune două versiuni de alegere a punctului țintă controlat, pentru fiecare furnizând legile recursive și demonstrându-le stabilitatea necondiționată. Un alt avantaj adus de aceste comenzi este faptul ca pulsațiile vârf la vârf din tensiunea și curentul de ieșire sunt reduse semnificativ datorită dublării frecvenței de comutație.

Capitolul 8 intitulat „Comenzi digitale predictive în curent liniare generalizate” este dedicat unei analize generalizate a tuturor comenzilor predictive în curent de tip liniar și are ca rezultat dezvoltarea și sinteza de noi comenzi predictive. În funcție de ținta dorită, adică curentul de vale, de vârf sau mediu, s-a

4 Rezumat

dedus condiția de stare staționară care se bazează pe diferența dintre curentul de referință impus și curentul țintă controlat. Au rezultat astfel șapte tipuri de condiții de stare staționară. Sunt deduse condițiile care conduc la stabilitate indiferent de tehnica de modulație (trailing edge, leading edge, trailing triangle, leading triangle, double trailing triangle, double leading triangle) și indiferent de metoda de comandă utilizată (curentul de vale, curentul de vârf, curentul mediu). În acest scop, aplicând teoria șirurilor recurente perturbațiilor apărute atât în curentul inductiv cât și în factorul de umplere, a rezultat o condiție generală de stabilitate. Această condiție generală de stabilitate are trei forme, în funcție de natura rădăcinilor ecuației de ordinul doi asociată șirului recurent rezultat. Corelând condiția generală de stabilitate cu cea de stare staționară se pot alege ușor parametrii relației de recurență pentru factorul de umplere astfel încât legea de comandă predictivă aleasă să fie necondiționat stabilă. Se propune și o abordare elegantă pentru analiza generală a stabilității, care conduce la exact aceleași rezultate, abordare ce utilizează transformata Z. Concluzia este că practic se pot obține o infinitate de relații de recurență (legi de comandă) stabile pentru orice metodă de comandă în curent în tandem cu orice tehnică de modulație. Ca exemplificare, se deduc legi de comandă necondiționat stabile pentru comenzile trailing-peak, leading-valley, trailing triangle peak și leading triangle valley care în versiunile clasice erau necondiționat instabile sau aveau stabilitate condiționată.

Capitolul 9 este destinat verificărilor experimentale. Autorul prezintă arhitectura hardware utilizată, precum și programele LabView dezvoltate.

Capitolul 10 reunește concluziile finale și sinteza tuturor contribuțiilor personale ce au rezultat în cadrul tezei, fiind reluate aici contribuțiile precizate la sfârșitul fiecărui capitol. Totodată, sunt indicate și direcțiile de cercetare viitoare.

Anexele tezei cuprind numai programele MATLAB dezvoltate, deoarece schemele de simulare CASPOC au fost inserate în capitolele care au tratat problematica corespunzătoare.

Contribuțiile autorului pot fi sintetizate astfel:

1. **Corectarea** rezultatelor colectivului de la Universitatea Boulder, Colorado, astfel:
 - Comanda **TA** nu este stabilă pentru un factor de umplere mai mic decât 0,5 ci este în mod inerent stabilă pentru orice valoare a factorului de umplere;
 - Comanda **LA** nu este instabilă pentru un factor de umplere mai mic decât 0,5 ci această comandă este în necondiționat stabilă.
 - Comanda **TTP** nu este stabilă pentru un factor de umplere mai mic decât 0,5 ci este în mod inerent instabilă pentru orice valoare a factorului de umplere.
 - Comanda **LTV** nu este stabilă pentru un factor de umplere mai mare decât 0,5 ci este în mod inerent instabilă pentru orice valoare a factorului de umplere.
2. Propunerea a **două noi tehnici de modulație** denumite: „**double trailing triangle**” și „**double leading triangle**” a căror corelare cu metodele de comandă în curent are ca rezultat **6 noi tipuri de comenzi predictive în curent**: DTTV, DTP, DTTA, DLTV, DLTP și DLTA, care **sunt necondiționat stabile**;
3. **Generalizarea** legii de comandă predictivă, propunerea unei versiuni de tip liniar ce conduce la **sinteze de noi legi necondiționat stabile** pentru comenzile digitale predictive în curent;

4. Realizarea de **programe Matlab** pentru verificarea tuturor comenzilor predictive în curent prin simularea modelului discret în spațiul stărilor;
5. **Dezvoltarea** în simulatorul de circuite de putere Caspoc a **noilor blocuri bibliotecă** necesare implementării fiecărui tip de comandă. Aceste blocuri au fost dezvoltate și ca o cerință a companiei **Simulation Research**, care dezvoltă programul Caspoc și care **le-a asimilat** în ultima versiune de program;
6. Realizarea schemelor de circuit în programul Caspoc pentru toate comenzile predictive;
7. **Implementarea în LabView** a comenzilor digitale predictive, **dezvoltarea** unui program de bază ce se poate ușor particulariza de la o comandă predictivă la alta;
8. **Proiectarea și construcția** unui model experimental structurat în jurul unui convertor boost;
9. Verificarea și validarea prin **experiment** a fezabilității considerentelor teoretice dezvoltate legate de comenzile predictive.

Autorul consideră ca și **studiu de perspectivă**:

1. Extinderea comenzilor predictive pentru comanda în tensiune.
2. Extinderea comenzilor predictive la convertoare dc-dc în comutație cu funcționare DCM.