

CONVERTOARE CC-CC BIDIRECȚIONALE CU RAPORT DE CONVERSIE EXTINS PENTRU APLICAȚII DE STOCARE ÎN SUPERCONDENSATOARE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Electrică

autor ing. Dan-Cornel Hulea

conducător științific Prof.dr.ing. Nicolae Muntean

luna 11 anul 2020

Această teză prezintă noi convertoare de curent continuu – curent continuu (CC-CC) bidirecționale, cu raport de conversie extins, utilizate în aplicații de stocare cu supercondensatoare, cu scopul de a îmbunătăți performanțele de stocare în rețele de tip microgrid sau vehicule electrice. Topologiile prezentate sunt dezvoltate din structuri hibride unidirecționale, caracterizate de utilizarea unor celule comutate constituite din condensatoare sau inductoare identice ce comută între conexiune serie și paralel cu ajutorul diodelor. Prin acest mod de operare, celulele comutate ajută în obținerea unui raport extins de conversie a tensiunii (mai mare în mod ridicător de tensiune și mai mic în mod coborâtor), o solicitare mai mică a dispozitivelor de comutație și reducerea volumului componentelor pasive. Structurile bidirecționale dobândesc aceleași avantaje de la cele unidirecționale, beneficiind în plus și de funcționarea în două cadrane.

Această lucrare este centrată pe patru topologii de convertoare, dintre care trei sunt propuse de autor. Topologiile studiate sunt descrise analitic pentru a obține ecuațiile de dimensionare și mărimile utilizate în comparații. Analiza dinamică este realizată pentru a obține o dimensionare a componentelor convertoarelor mai bună, pentru a analiza stabilitatea și pentru a proiecta regulatoare de curent pentru acestea. Simulări numerice au fost utilizate ca sprijin în dimensionarea și analiza convertoarelor studiate. Rezultate experimentale sunt achiziționate pentru două topologii hibride în aplicații cu puteri de până la 5kW. Pentru a măsura eficiența și pentru a verifica influența diferitelor tipuri de tranzistoare, o topologie este realizată utilizând tranzistoare MOSFET și GaN-FET. Pentru a elimina unele dezavantaje ale topologiilor nou studiate, versiuni îmbunătățite sunt propuse pentru fiecare dintre topologiile studiate.

Strategii de partajare a puterii pentru stocare în supercondensatoare utilizate în rețele de tip microgrid sunt propuse și implementate cu ajutorul unui convertor hibrid. Modul acestora de operare este testat experimental și prin simulări numerice.

Capitolul 1 prezintă o introducere în domeniul rețelelor de tip microgrid, cu accentul pe avantajele distribuției în CC, și tensiuni uzuale care sunt potrivite pentru aceste aplicații. O clasificare a elementelor de stocare este prezentată, cu accentul pe stocarea chimică și electrostatică, în baterii și, respectiv, supercondensatoare (SC), prezentând și caracteristicile acestora din punct de vedere al densității de putere și de energie.

Deoarece tensiunile într-o rețea microgrid au valori relativ mari comparate cu tensiunile comune ale SC, și deoarece o utilizare eficientă a energiei stocate în SC este avantajoasă, convertoarele CC-CC bidirecționale cu raport extins de conversie sunt de dorit ca o interfață a SC cu rețeaua de CC.

O prezentare generală a nouă topologii de convertoare prezentate în literatura de specialitate este realizată, prezentate prin modul de operare al acestora și ecuațiile corespunzătoare regimului staționar. Aceste topologii sunt utilizate în capitolele următoare ca referințe în comparațiile cu structurile hibride studiate în această lucrare. Aceste topologii sunt alese deoarece prezintă un raport extins de conversie obținut fără utilizarea unor inductivități cuplate, un număr redus de componente, și datorită utilizării unor scheme simple de comandă. Parametri precum raportul de conversie al tensiunii, energia totală din inductivități, energia totală din condensatoare și stresul total pe dispozitivele semiconductoare sunt determinate pentru aceste convertoare pentru a fi comparate în capitolul 6 cu topologiile propuse în aceasta lucrare.

Topologiile selecționate sunt:

- un convertor bidirecțional coborâtor/ridicător convențional (CBBB),
- un convertor bidirecțional cu impedanță cvasi-Z (BSQZ),
- un convertor bidirecțional cvadratic convențional (CBQ),
- trei noi convertoare bidirecționale cvadratice (BQ1, BQ2 și BQ3),
- un convertor modular multi-nivel cu structură triunghiulară (BTMM),
- două convertoare bidirecționale cu capacități comutate (BSC1, BSC2).

O introducere în domeniul convertoarelor hibride unidirecționale este de asemenea prezentată în acest capitol. Natura hibridă a acestor convertoare este dată de utilizarea unor celule de condensatoare sau de inductivități comutate în structura acestora, celule prezentate în Fig. 1 pentru structuri unidirecționale, care ajută în obținerea unui raport extins de conversie.

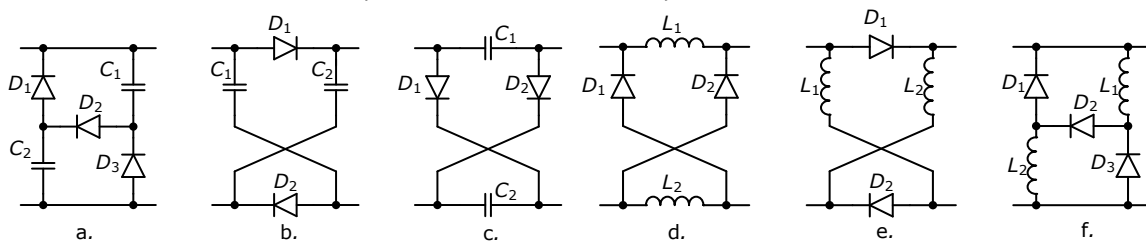


Fig. 1. Celule unidirecționale de condensatoare (a-c) și inductivități comutate(d-f) [1], [2]

Capitolul 2 prezintă un convertor bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate (BHSC1), propus în [3]. Această topologie utilizează o celulă cu condensatoare comutate, similar cu varianta unidirecțională a topologiei, prezentată în [1]–[4], pentru a obține un raport extins de conversie, o solicitare redusă a dispozitivelor semiconductoare și dimensiuni reduse ale componentelor pasive.

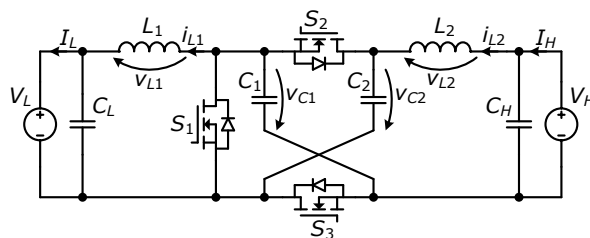


Fig. 2. Convertorul bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate (BHSC1) [3], [5]–[7]

Analiza acestui convertor include o analiză de regim staționar, realizată în mod similar cu cea a convertorului CBBB din primul capitol, și o analiză de regim dinamic, care este utilizată pentru proiectarea unui regulator analogic și digital. Descrierea analitică a BHSC1 este necesară pentru a obține mărimile utilizate în comparațiile cu celelalte convertoare. Analiza în regim dinamic a fost realizată pentru a obține un model linear al BHSC1 utilizat în proiectarea reguletoarelor.

În plus față de cele două reguletoare, un regulator „Valley Current Mode Controller”

este folosit datorită unei implementări rapide. Răspunsuri în frecvență ale modelului convertorului și rezultate de simulare și experimentale pentru funcționare în regim tranzitoriu sunt utilizate pentru a verifica stabilitatea sistemului. Deoarece mărimea de control a fost curentul printr-un singur inductor, și datorită numărului crescut de variabile de stare ale sistemului, oscilații amortizate au fost observate în curentul celui de-al doilea inductor. Aceste oscilații au fost atenuate prin încetinirea referinței cu ajutorul unui filtru trece jos. Rezultatele de simulare au o asemănare bună cu cele obținute din analiza matematică a regimului dinamic, și cu rezultatele experimentale obținute în regimul tranzitoriu.

Pentru a elimina tensiunile de frecvență mare între intrări, un dezavantaj al acestei topologii, s-a propus o variantă îmbunătățită a acestei topologii în Fig. 3.

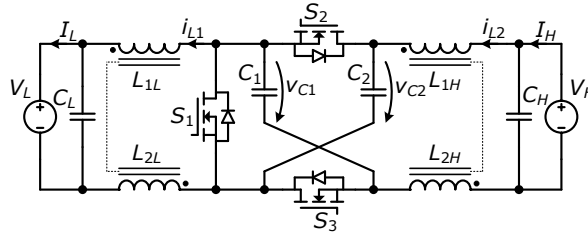


Fig. 3. Convertorul bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate în varianta îmbunătățită (I-BHSC1)

Capitolul 3 prezintă un alt convertor bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate (BHSC2), având schema din Fig. 4, care utilizează o altă celulă de condensatoare comutate în structura acestuia fost testată anterior în variantă unidirecțională în [2], [8], obținând aceleași avantaje a raportului extins de conversie al tensiunilor, similar cu BHSC1, dar cu beneficiul adițional al existenței unei legături directe a circuitului de masă între cele două intrări [9]. Acest avantaj este benefic în transformarea acestei topologii pentru funcționare mai simplă în structuri cu mai multe faze, sau multi-nivel.

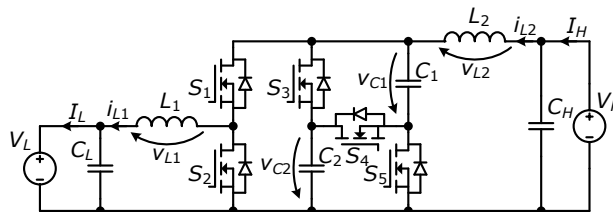


Fig. 4. Convertorul bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate (BHSC2) [9]

Similar cu analiza BHSC1, acest capitol include analiza în regim staționar și dinamic a BHSC2. Analiza funcționării BHSC2 în regimul staționar au fost realizate pentru a obține elementele necesare în comparațiile cu alte topologii, și s-a obținut un necesar de componente pasive identic cu cel al BHSC1.

Analiza în regim dinamic a fost realizată pentru a obține modelul linear al BHSC2 care a fost utilizat inițial pentru a realiza un convertor stabil din etapa de proiectare, iar apoi a fost utilizat pentru a proiecta regulatorul de control al fluxului puterii. Stabilitatea sistemului este investigată urmărind răspunsul în frecvență și polii și zerourile sistemului. Influența componentelor pasive este analizată pentru a obține o proiectare bună din punct de vedere a stabilității. Un regulator a fost proiectat pentru BHSC2, iar rezultatele de simulare sunt utilizate pentru a demonstra funcționalitatea convertorului în regimul de trecere dintre modul ridicător și coborâtor de funcționare.

În comparație cu BHSC1, acest convertor nu necesită o filtrare a referinței, obținând astfel un răspuns mai rapid. Un dezavantaj al topologiei este o creștere a solicitării totale în dispozitivele semiconductoare, deoarece BHSC2 are două tranzistoare în plus în comparație cu BHSC1.

O versiune îmbunătățită a BHSC2, prezentată în Fig. 5, este propusă, versiune care

translatează schema inițială într-o topologie multi-nivel, obținând beneficii caracteristice acestor structuri.

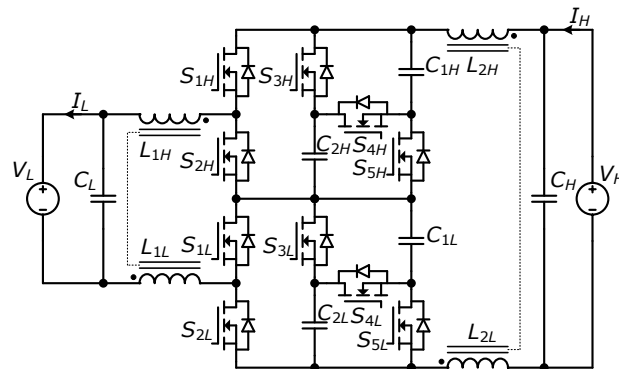


Fig. 5. Îmbunătățirea BHSC2 într-o topologie multi-nivel (3L-BHSC2)

Capitolul 4 prezintă un convertor bidirecțional hibrid cu inductivități comutate (BHSI), care, după cum îi sugerează și numele, utilizează o celulă de inductivități comutate pentru a obține un raport extins de conversie a tensiunii. Fiind inițial propus ca o topologie de convertor coborâtor de tensiune, unidirecțional, în [2], iar mai apoi ca și convertor ridicător de tensiune în [10], BHSI este o combinație dintre cele două, după cum este prezentat în Fig. 6 [11]. În plus față de raportul extins de conversie, această topologie are avantajul unui sistem de ordin redus al modelului liniarizat, deoarece cei doi curenți din inductoare sunt considerați identici.

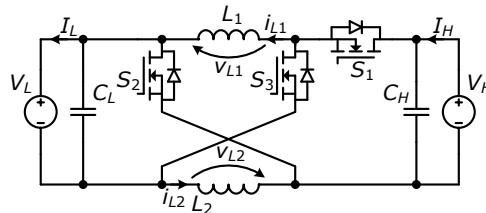


Fig. 6. Convertorul bidirecțional hibrid cu inductivități comutate (BHSI) [11]

O analiză teoretică este realizată pentru convertorul BHSI în regim staționar și în regim dinamic de funcționare. Analiza de regim staționar, realizată în mod similar cu cea a convertorului CBBB, este utilizată pentru dimensionarea componentelor pasive și pentru a obține elementele necesare unei comparații obiective cu celelalte topologii. Cu ajutorul modelului dinamic al BHSI, un regulator digital a fost proiectat, iar influența modelării incorecte a microcontrolerului a fost analizată din răspunsul în frecvență al sistemului și din rezultate experimentale.

Două prototipuri ale convertorului BHSI au fost realizate, utilizând tranzistoare MOSFET convenționale de siliciu, și noile tranzistoare cu nitrură de galiu, GaN-FET, și influența acestora asupra topologiei este prezentată. Eficiența acestor prototipuri este măsurată și comparată cu rezultatele teoretice. Din cele două prototipuri ale BHSI se observă o diferență nesemnificativă în modul de operare al convertorului, dar diferențe semnificative din punctul de vedere al randamentului. Rezultatele de simulare, care sunt în concordanță cu cele experimentale, confirmă modelarea dinamică a convertorului.

Oscilațiile de tensiune pe inductoare, prezente de asemenea și în variantele unidirecționale ale topologiei, sunt prezente și în BHSI, dar pot fi amortizate cu ajutorul unui snubber RC, sau pot fi eliminate în totalitate în versiunea îmbunătățită a acestei topologii, expusă în Fig. 7, care este de asemenea prezentată și analizată în acest capitol.

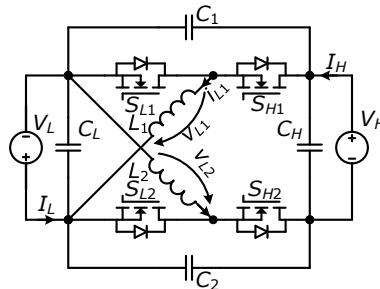


Fig. 7. Convertorul bidirecțional hibrid cu inductivități comutate în varianta îmbunătățită (I-BHSI) [12]

Capitolul 5 prezintă un convertor bidirecțional hibrid cu inductivități și condensatoare comutate (BHSISC), expus în Fig. 8, care utilizează o combinație între celula cu inductivități comutate și celula cu condensatoare comutate, similar convertorului BHSI din capitolul 4 și a convertorului BHSC1 în capitolul 2, obținând astfel un raport de conversie mult mai extins și performanțe mai bune pe ansamblu [13].

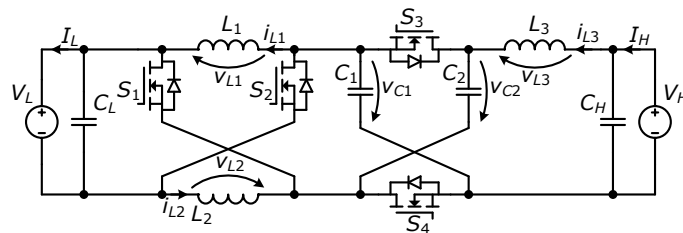


Fig. 8. Convertorul bidirecțional hibrid cu inductivități și condensatoare comutate (BHSISC) [13]

Analiza în regim staționar și în regim dinamic sunt realizate pentru a descrie caracteristicile principale ale convertorului, similar cu celelalte convertoare analizate în această lucrare, pentru a îmbunătății dimensionarea componentelor pasive și pentru a realiza structura de control a acestuia. Comparând această topologie cu altele, din perspectiva mărimilor de comparație obținute din calcul în regim staționar, se poate observa o performanță bună.

Analiza dinamică este utilizată pentru a obține un convertor stabil din etapa de proiectare și selecție a componentelor pasive, și pentru proiectarea regulatorului de curent necesar pentru controlul fluxului de putere în convertor. Chiar dacă numai un singur curent dintr-un inductor este controlat, nu apar oscilații semnificative în celălalt inductor. Rezultate de simulare sunt utilizate pentru a confirma modelul dinamic și pentru a demonstra funcționalitatea convertorului BHSISC în regim staționar și tranzitoriu.

O topologie îmbunătățită este propusă în final, care elimină tensiunea cu frecvența de comutație dintre intrări, și reduce tensiunile de oscilație dintre inductoare, îmbunătățind în plus caracteristicile acestei topologii.

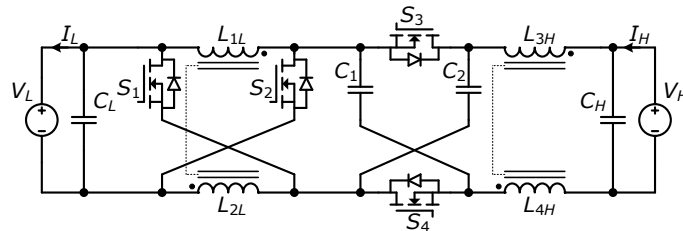


Fig. 9. Convertorul bidirecțional hibrid cu inductivități și condensatoare comutate în varianta îmbunătățită (I-BHSISC)

Capitolul 6 prezintă o comparație între diferitele topologii hibride prezentate în capitolele 2-5, și alte topologii propuse în literatură, descrise în capitolul 1. Deoarece literatura de specialitate prezintă multe topologii de convertoare, sub aceeași categorie de convertoare bidirecționale neizolate, sunt necesare diferite moduri de a le compara. Convertoarele sunt comparate în funcție de raportul de conversie al tensiunii în mod ridicător și în mod coborător

de funcționare, în funcție de energia totală în inductoare, de energia totală în condensatoare și în funcție de solicitarea totală pe dispozitivele de comutație, mărimi cu valori normalizate față de cele ale convertorului bidirecțional convențional coborâtor-ridicător, mărimi care mai apoi sunt reprezentate în grafice.

Raportul de conversie oferă o perspectivă de ansamblu asupra performanței convertorului, deoarece arată gama de operare în tensiune pentru cele două intrări. Energia totală în inductoare și în condensatoare oferă informații în legătură cu gabaritul și costul acestor elemente pasive. Solicitarea totală a dispozitivelor de comutație oferă informații asupra costului sau a pierderilor în acestea.

Pe ansamblu, fiecare topologie este mai potrivită pentru o anumită aplicație, depinzând de gama raportului de conversie, a numărului de dispozitive semiconductoare sau a solicitării totale pe acestea, a dimensiunii componentelor pasive sau a costului acestora.

În privința raportului de conversie, convertoarele cvadractice obțin cel mai extins raport de conversie, urmărite îndeaproape de convertorul BHSISC. Restul convertoarelor hibride se situează undeva între convertoarele cvadractice și cele convenționale, iar acest aspect poate să fie un avantaj dacă această gamă a raportului de conversie este de dorit.

În privința energiei totale în inductoare sau condensatoare, convertoarele cu capacități comutate BSC1 și BSC2 oferă performanțe bune dar cu costul apariției unor vârfuri de curent în perioadele în care se comută condensatoare cu tensiuni diferite în paralel. Mai apoi urmează convertoarele hibride care au caracteristici bune în acest sens, similar cu convertorul convențional, dar cu avantajul unui raport mai extins de conversie. Celelalte topologii au un necesar mult mai mare pentru condensatoare și inductoare.

În privința stresului total pe dispozitivele de comutație, convertorul BHSISC și celelalte convertoare hibride, obțin cele mai bune rezultate, mult mai reduse decât cele ale convertorului convențional, urmate mai apoi de către celelalte topologii.

O concluzie interesantă se poate observa în privința convertoarelor cvadractice, aceea că caracteristicile acestora considerate în analiză sunt identice sub aproape toate aspectele, indiferent de schema acestora.

Pe ansamblu, convertoarele hibride, în special convertorul BHSISC, au caracteristici bune ceea ce le fac potrivite pentru aplicații în care se dorește un raport extins de conversie a tensiunii.

Capitolul 7 prezintă o aplicație a convertoarelor bidirecționale cu raport extins de conversie: ca o interfață între magistrala de CC a unei rețele microgrid și a unui supercondensator utilizat în stocare. Acest capitol debutează cu o privire de ansamblu asupra strategiilor de control în rețele microgrid, cu aplicații pentru convertoare bidirecționale de CC-CC cu raport extins de conversie. O clasificare a acestor strategii este prezentată inițial, după cum se poate observa în Fig. 10, în funcție de tipul de comunicație între elementele microgridului (centralizat, distribuit și descentralizat) și a ierarhiei în care structura de control este clasificată (terțiar, secundar sau primar) [14]–[18].

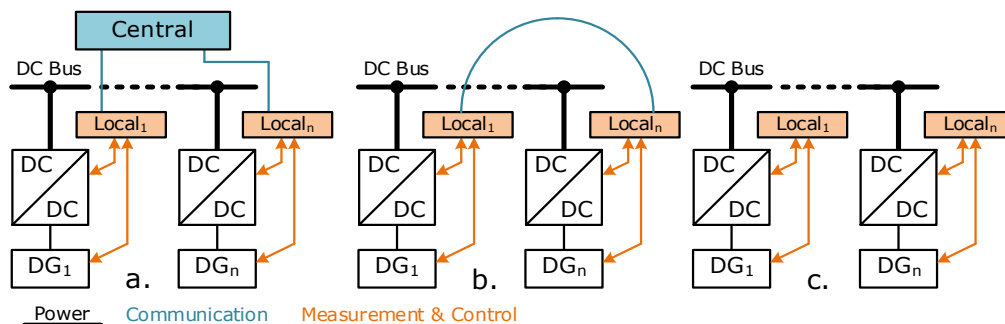


Fig. 10. Strategii de control într-o rețea microgrid, categorisite din privința comunicației dintre elemente: a. Centralizat, b. Distribuit, c. Descentralizat [14]–[18] (DG – generatoare distribuite)

În această lucrare accentul cade pe trei strategii descentralizate, cu aplicații în rețele microgrid cu control de tip droop, des utilizate în controlul rețelelor nanogrid, sau ca strategii de control locale în sisteme centralizate sau distribuite. Metodele de control de tip droop pentru partajarea puterii în aplicații cu stocare în supercondensator, sunt bazate pe diferite impedanțe virtuale, două bazate pe o strategie neliniară de tip droop [19], iar una bazată pe o impedanță virtuală neliniară [20], cu schemele echivalente care sunt implementate în bucla de control a convertorului de interfațare, prezentate în Fig. 11, și caracteristicile aferente acestora în Fig. 12.

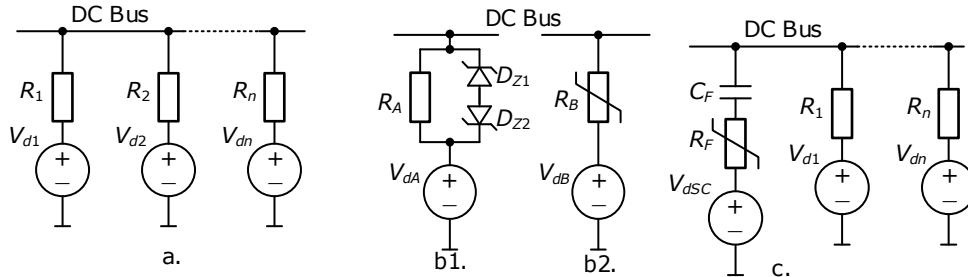


Fig. 11. Schema echivalentă a metodei convenționale (a.) și a celor neliniare de tip droop (b1, b2, c)

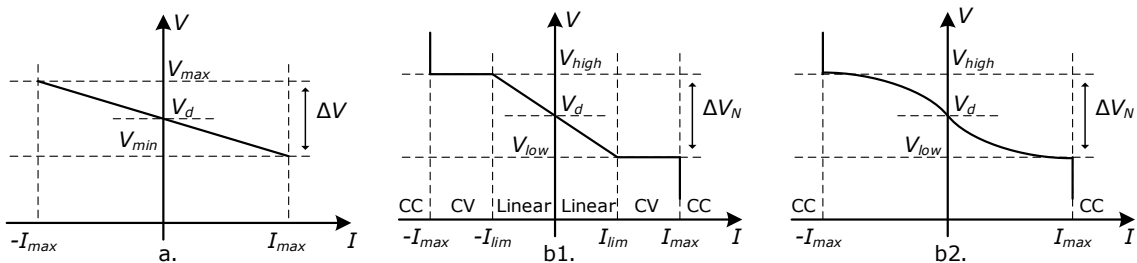


Fig. 12. Caracteristica statică a metodei convenționale (a.) și a celor neliniare de tip droop (b1, b2)

Metodele neliniare de tip droop sunt considerate ca alternative simple la metoda centralizată de control, una convențională, pentru stocarea în supercondensatoare. Metodele recente bazate pe impedanța virtuală, din literatura de specialitate, sunt considerate deoarece oferă performanțe bune ca și metode descentralizate. Metoda impedanței virtuale a fost îmbunătățită utilizând o caracteristică neliniară a filtrului, obținând avantajul unei influențe variabile a sistemului de stocare, bazate pe amplitudinile de variație ale tensiunii rețelei. Cu alte cuvinte, s-a obținut un filtru cu frecvența de tăiere variabilă, având avantajul introducerii mai multor parametri care pot fi controlați de un sistem ierarhic centralizat de ordin superior, sau o influență variabilă a acestui sistem ce depinde de amplitudinea de variație a rețelei.

Toate strategiile sunt validate prin rezultate de simulare și experimentale.

Capitolul 8 prezintă concluziile tezei, contribuțiile originale ale autorului și viitoare direcții de cercetare în domeniul subiectului prezentat.

Teza este centrată pe topologii bidirecționale de conversie de CC-CC care au un raport extins de conversie datorat utilizării unor celule hibride de condensatoare sau inductivități comutate, inițial propuse pentru structuri unidirecționale. Patru topologii sunt studiate în detaliu, dintre care trei sunt propuse de autor. Dintre acestea, două sunt cu condensatoare comutate, una cu inductivități comutate, iar una este o combinație între celulele cu inductivități și condensatoare comutate.

Analiza conversoarelor este realizată pentru regim staționar pentru a obține caracteristicile acestora de performanță: energia stocată în elementele pasive și solicitarea totală a tranzistoarelor.

O comparație amănunțită este realizată între topologiile studiate și alte 9 structuri prezentate în literatura de specialitate, care se pot clasifica sub aceeași categorie. Din această comparație rezultă că topologiile hibride au performanțe bune pe ansamblu.

Analiza în regimul dinamic de funcționare este realizată pentru fiecare dintre cele patru topologii, pentru a analiza stabilitatea acestora, pentru a îmbunătăți stabilitatea din etapa de proiectare a lor, și pentru a proiecta un regulator stabil. Toate topologiile sunt testate prin simulări, în timp ce două topologii sunt testate experimental, obținând rezultate cu o concordanță bună cu cele de simulare. Toate convertoarele propuse prezintă un mod de funcționare stabil în ambele regimuri de funcționare, crescător sau coborâtor de tensiune. Metode de îmbunătățire a schemelor pentru cele patru topologii sunt propuse.

În final, un convertor hibrid cu capacități comutate este utilizat ca platformă pentru implementarea a trei noi metode de partajare a puterii în rețele de tip microgrid, pentru stocare în supercondensatoare, metode propuse de autor.

Următoarea listă conține contribuțiile autorului:

- Analiza de ansamblu a aplicațiilor de stocare a energiei în supercondensatoare în rețele de tip microgrid și avantaje ale convertoarelor cu raport extins de conversie în aceste aplicații.
- Analiza literaturii de specialitate în domeniul convertoarelor cu raport extins de conversie
- Analiza în regim static și dinamic a unui convertor hibrid cu condensatoare comutate. Realizarea experimentelor și a simulărilor convertorului. Îmbunătățirea topologiei inițiale.
- Propunerea unui convertor bidirecțional hibrid cu condensatoare comutate, cu masă comună, și realizarea analizei acestuia în regim staționar și dinamic. Proiectarea unui regulator de curent pentru acesta. Validarea funcționării convertorului prin simulări numerice. Îmbunătățirea topologiei inițiale într-o structură multi-nivel.
- Propunerea unui convertor bidirecțional hibrid cu inductivități comutate și analiza acestuia în regim staționar și dinamic. Proiectarea unui regulator de curent digital. Construcția a două prototipuri a acestuia cu tranzistoare MOSFET respectiv GaN-FET, și analiza influenței și a randamentului acestora. Propunerea unei topologii îmbunătățite, și testarea acesteia prin simulări numerice.
- Propunerea unui convertor bidirecțional hibrid cu inductivități și capacități comutate, studiat în regim staționar și dinamic. Proiectarea acestuia ținând cont de influența componentelor pasive asupra stabilității, și realizarea unui regulator de curent pentru acesta. Realizarea de simulări numerice a acestuia pentru a-i confirma funcționarea. Propunerea unei versiuni îmbunătățite a topologiei inițiale.
- Realizarea unei comparații cuprinzătoare între cele 4 topologii studiate și cele 9 topologii prezentate în literatura de specialitate.
- Propunerea a trei strategii neliniare de tip droop de partajare a puterii în aplicații de stocare în supercondensatoare, în rețele de tip microgrid, și implementarea acestora într-un convertor bidirecțional hibrid.

În continuare rămân deschise câteva direcții viitoare de cercetare, cum ar fi:

- Verificarea experimentală a topologiilor nou propuse.
- Dezvoltarea unor metode avansate de comparație care permit selecția optimă a unei topologii în funcție de aplicație.
- Evaluarea unor metode mai potrivite pentru controlul convertoarelor, care au de obicei un model dinamic cu un ordin superior.
- Analiza stabilității strategiilor de partajare a puterii.
- Evaluarea unor noi metode de îmbunătățire a topologiilor bidirecționale hibride, cum ar fi în structuri cu mai multe faze, multi-nivel, sau cu mai multe intrări.

Teza este centrată pe un număr de 7 lucrări publicate la conferințe indexate ISI și două lucrări publicate în jurnale indexate ISI, la care autorul tezei este fie prim-autor sau coautor.

Una dintre lucrările menționate a fost premiată la conferința EPE în 2019 cu premiul „EPE Young Author Best Paper Award”.

Teza este structurată în 8 capitole distribuite în 178 pagini, dintre care 11 sunt pentru referințele bibliografice. Această lucrare conține 155 figuri, 26 tabele și 135 titluri bibliografice.

References

- [1] B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici, “Switched-capacitor (SC)/switched inductor (SL) structures for getting hybrid step-down Cuk/Sepic/Zeta converters,” in *2006 IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, May 2006, p. 4 pp.-, doi: 10.1109/ISCAS.2006.1693770.
- [2] B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici, “Switched-Capacitor/Switched-Inductor Structures for Getting Transformerless Hybrid DC–DC PWM Converters,” *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.*, vol. 55, no. 2, pp. 687–696, Mar. 2008, doi: 10.1109/TCSI.2008.916403.
- [3] H. Nomura, K. Fujiwara, and M. Y. Kochi, “A new DC-DC converter circuit with larger step-up/down ratio,” in *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jun. 2006, pp. 1–7, doi: 10.1109/pesc.2006.1712228.
- [4] B. Axelrod, Y. Berkovich, and A. Ioinovici, “Transformerless DC-DC converters with a very high DC line-to-load voltage ratio,” in *Proceedings of the 2003 International Symposium on Circuits and Systems, 2003. ISCAS '03.*, May 2003, vol. 3, p. III–III, doi: 10.1109/ISCAS.2003.1205049.
- [5] O. Cornea, E. Guran, N. Muntean, and D. Hulea, “Bi-directional hybrid DC-DC converter with large conversion ratio for microgrid DC busses interface,” in *Automation and Motion 2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives*, Jun. 2014, pp. 695–700, doi: 10.1109/SPEEDAM.2014.6872065.
- [6] D. Hulea, N. Muntean, and O. Cornea, “Valley current mode control of a bi-directional hybrid DC-DC converter,” in *2015 Intl Aegean Conference on Electrical Machines Power Electronics (ACEMP), 2015 Intl Conference on Optimization of Electrical Electronic Equipment (OPTIM) 2015 Intl Symposium on Advanced Electromechanical Motion Systems (ELECTROMOTION)*, Sep. 2015, pp. 274–279, doi: 10.1109/OPTIM.2015.7427024.
- [7] O. Cornea, G. Andreescu, N. Muntean, and D. Hulea, “Bidirectional Power Flow Control in a DC Microgrid Through a Switched-Capacitor Cell Hybrid DC–DC Converter,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 4, pp. 3012–3022, Apr. 2017, doi: 10.1109/TIE.2016.2631527.
- [8] N. Muntean, O. Cornea, O. Pelan, and C. Lascu, “Comparative evaluation of buck and hybrid buck DC-DC converters for automotive applications,” in *2012 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, Sep. 2012, p. DS2b.3-1-DS2b.3-6, doi: 10.1109/EPEPEMC.2012.6397272.
- [9] D. Hulea, N. Muntean, M. Gireada, and O. Cornea, “A Bidirectional Hybrid Switched-Capacitor DC-DC Converter with a High Voltage Gain,” in *2019 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Aug. 2019, pp. 289–296, doi: 10.1109/ACEMP-OPTIM44294.2019.9007160.
- [10] L. Yang, T. Liang, and J. Chen, “Transformerless DC–DC Converters With High Step-Up Voltage Gain,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 8, pp. 3144–3152, Aug. 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2022512.
- [11] D. Hulea, B. Fahimi, N. Muntean, and O. Cornea, “High Ratio Bidirectional Hybrid Switched Inductor Converter Using Wide Bandgap Transistors,” in *2018 20th European*

Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Sep. 2018, p. P.1-P.10.

- [12] D. Hulea, M. Gireada, D. Vitan, O. Cornea, and N. Muntean, "An Improved Bidirectional Hybrid Switched Inductor Converter," presented at the 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '20 ECCE Europe), to be published.
- [13] D. Hulea, N. Muntean, M. Gireada, O. Cornea, and E. Serban, "Bidirectional Hybrid Switched-Inductor Switched-Capacitor Converter Topology with High Voltage Gain," in *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, Sep. 2019, p. P.1-P.10, doi: 10.23919/EPE.2019.8915535.
- [14] D. E. Olivares *et al.*, "Trends in Microgrid Control," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 4, pp. 1905–1919, Jul. 2014, doi: 10.1109/TSG.2013.2295514.
- [15] S. Parhizi, H. Lotfi, A. Khodaei, and S. Bahramirad, "State of the Art in Research on Microgrids: A Review," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 890–925, 2015, doi: 10.1109/ACCESS.2015.2443119.
- [16] T. Dragičević, X. Lu, J. C. Vasquez, and J. M. Guerrero, "DC Microgrids—Part I: A Review of Control Strategies and Stabilization Techniques," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 7, pp. 4876–4891, Jul. 2016, doi: 10.1109/TPEL.2015.2478859.
- [17] L. Meng *et al.*, "Review on Control of DC Microgrids and Multiple Microgrid Clusters," *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 5, no. 3, pp. 928–948, Sep. 2017, doi: 10.1109/JESTPE.2017.2690219.
- [18] Z. Cheng, J. Duan, and M. Chow, "To Centralize or to Distribute: That Is the Question: A Comparison of Advanced Microgrid Management Systems," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 12, no. 1, pp. 6–24, Mar. 2018, doi: 10.1109/MIE.2018.2789926.
- [19] D. Hulea, O. Cornea, and N. Muntean, "Nonlinear droop charging control of a supercapacitor with a bi-directional hybrid DC-DC converter," in *2016 IEEE 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, Jun. 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/EEEIC.2016.7555540.
- [20] D. Hulea, O. Cornea, and N. Muntean, "Energy Management Strategy for Supercapacitor Storage Using a Nonlinear Virtual Impedance," in *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Aug. 2018, pp. 375–380, doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521858.