

## Converters for Optimizing Power Distribution in Fuel Cell Vehicles

### Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnică Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie Electronică, Telecomunicații și Tehnologii Informaționale

**autor ing. Wensong Shen**

conducător științific Prof. univ. dr. ing. Dan Lascu

luna octombrie anul 2022

Elaborarea prezentei teze pornește de la **motivația** determinată de impactul deosebit de mare pe care electronica de putere îl are în industria automotive, în special în propulsia vehiculelor. Creșterea autonomiei vehiculelor electrice, alături de funcționarea fără șocuri mecanice și creșterea duratei de funcționare au fost teme ce au implicat numeroși cercetători într-o muncă intensă și continuă.

În ultimii ani pilele de combustie, numite și celule cu combustibil, au câștigat un interes crescând, nu numai pentru emisiile de carbon extrem de mici, dar și pentru că hidrogenul prezintă o serie de proprietăți benefice legate de puterea de combustie, costurile de producție și transport și gradul de curățenie. Pilele de combustie sunt capabile să producă energie electrică plecând de la hidrogen, fără a genera poluare suplimentară.

Pe de altă parte, convertoarele dc-dc sunt absolut necesare pentru a conecta pila de combustie cu elementul stocant de energie – bateria sau supercapacitatea – în diferite configurații. Teza de doctorat are ca subiect utilizarea convertoarelor dc-dc în optimizarea grupului motopropulsor din vehiculele cu pile de combustie.

**Importanța și actualitatea temei** sunt justificate în principal de progresele înregistrate în dezvoltarea industriei bazată pe energia hidrogenului în țări ca Statele Unite, China, Coreea de Sud, Japonia și Europa. De exemplu, în China, utilizarea energiei hidrogenului este în mare parte orientată spre dezvoltarea de autobuze și camioane cu pile de combustie, în timp ce Coreea de Sud și Japonia s-au angajat să construiască o societate bazată pe energia hidrogenului și chiar o economie bazată pe hidrogen. Datorită subvențiilor guvernamentale în Coreea de Sud vânzările anuale de vehicule pe bază de hidrogen au atins 65% din vânzările globale în 2020, cu o rată impresionantă de 39% pe an. În Europa s-au făcut eforturi în această direcție, inclusiv prin proiecte regionale. Doctorandul a făcut parte din echipa de cercetare a unui astfel de proiect finanțat din programul european FP7/2007-2013 vizând Inițiativa Tehnologică comună pentru pile de combustie și hidrogen, proiect denumit “Small 4 Wheel Fuel Cell Passenger Vehicle Applications in Regional and Municipal Transportation (SWARM)”. Regiunile care au participat în proiect au fost British Midlands și Wales (Birmingham, Coventry and Abergavenny), regiunea Bruxelles și Wallonia (Liège), Germania de nord-vest (Wilhelmshaven) și zona Köln (Frechen).

**Obiectivele științifice propuse** spre rezolvare au ca scop optimizarea convertoarelor dc-dc din vehicule cu pile de combustie.

**Metodele de cercetare abordate** sunt de manieră tradițională în electronica de putere, constând în identificarea problemei, modelarea matematică a conceptului teoretic, proiectarea, apoi simularea sistemului pentru o primă verificare a teoriei dezvoltate și în final realizarea experimentelor ca modalitate de validare finală, folosind un banc de test special construit pentru verificarea grupurilor motopropulsoare.

Pe parcursul tezei notațiile și abrevierile sunt în deplină concordanță cu cele acceptate de comunitatea științifică internațională, cele folosite fiind cele anglo-saxone, cu excepția

notației pentru tensiunea electrică.

**Introducerea** începe cu o prezentare clară a motivației tezei, continuă cu prezentarea structurii tezei, a obiectivelor ei, în final specificându-se echipamentele utilizate în procesul de cercetare.

**Capitolul 1** este dedicat prezentării stadiului actual al domeniului. Este intitulat “From Hydrogen Energy to Fuel Cell Electric Vehicle” și prezintă pentru început avantajele hidrogenului ca sursă de energie: prietenos cu mediul, curat, eficient, mediu de interconectare energetic bun, mediu de stocare a energiei și aplicabilitate pe scară largă în scenarii diverse. Sunt rezumate demersurile și implementările făcute de cele mai importante țări în aplicarea tehnologiilor energetice pe bază de hidrogen în domeniul transporturilor. Apoi este prezentată o clasificare ale pilelor de combustibil în funcție de tipul de electrolit utilizat și este descris principiul de funcționare al lor, subliniindu-se că celula de combustie cu membrană cu schimb de protoni (PEMFC) este cea mai adecvată în vehiculele electrice datorită temperaturii de funcționare joase, densității de putere mare și pornirii rapide. Sunt prezentate apoi caracteristicile PEMFC. În continuare este analizat grupul motopropulsor, comparându-se fluxul de energie dintr-un vehicul electric cu baterie și unul pilă de combustie. Autorul investighează sistemul motopropulsor hibrid, cu baterie și pilă de combustie, identificând două configurații de bază. În configurația I convertorul dc-dc este bidirecțional, fiind inserat între magistrala de curent continuu și baterie, în timp ce în configurația II convertorul dc-dc este unidirecțional, fiind plasat între pila de combustie și magistrala de curent continuu. Sunt subliniate principalele caracteristici pe care trebuie să le asigure convertorul dc-dc în fiecare din cele două arhitecturi.

**Capitolul 2**, având titlul “Electronic Switch to Control the Powertrain of FCEV” propune un concept nou pentru controlul sistemului motopropulsor dintr-un vehicul electric hibrid. În locul unui convertor dc-dc, se utilizează un întrerupător electronic de putere (E-switch) pentru a conecta pila de combustie și bateria. Întrerupătorul este realizat cu șase tranzistoare MOSFET de putere conectate în paralel. Provocarea este că E-Switch-ul trebuie să funcționeze câteva secunde în regiunea liniară în timpul proceselor de intrare și ieșire din conducție. Aceasta necesită măsurarea și echilibrarea curenților individuali din fiecare tranzistor. Au fost investigate caracteristicile MOSFET-ului liniar și funcționarea în raport cu aria de operare sigură (SOA) și comparată cu cea a unui MOSFET standard. S-a identificat traiectoria punctului de funcționare și au fost trase concluzii privind fezabilitatea unui astfel de întrerupător datorită existenței unei margini de siguranță. Este propusă o procedură de comutare pas cu pas. Pentru măsurarea curentului și funcționarea în buclă închisă au fost utilizați senzori Hall de tipul LA-55P. Totodată, s-a optat pentru un microcontroler de tip STM32F4-MCU cu ajutorul căruia au fost monitorizați principalii parametri ai pilei de combustie și ai E-switch-ului, au fost generate semnalele PWM necesare controlului curenților prin tranzistoare și a fost realizată comunicația cu sistemul de management al pilei de combustie. Se arată că componenta alternativă din conversia digitală analogică trebuie rejectată și în acest scop se utilizează un filtru trece-jos de tip R-C. Este descrisă proiectarea controlerului proporțional-integrativ (PI) și au fost efectuate simulări în mediul Matlab/Simulink pentru a se verifica conceptele teoretice. În partea de final a capitolului sunt prezentate rezultatele experimentale care au arătat că pierderile de putere se împart aproximativ echilibrat între cele șase MOSFET-uri, fapt confirmat de profilul de temperatură măsurat. În paragraful de sfârșit sunt relevate principalele contribuții ale doctorandului legate de tematica abordată în capitol.

În **Capitolul 3**, intitulat “DC/DC Converter for Powertrain in FCEV”, autorul propune un convertor multifază fără izolare de tip buck, utilizat în configurația II, deoarece este o structură bidirecțională. Analiza începe cu un convertor buck sincron monofază, fiind prezentate ecuațiile de proiectare. Se insistă pe valorile rms ale curenților aferenți capacităților

de intrare și de ieșire și pe valoarea rms a curentului inductiv, deducându-se relații pentru dimensionarea elementelor reactive. La pasul următor se analizează un convertor buck multifază cu funcționare întretesută, având comune capacitățile de intrare și de ieșire. Este propus un algoritm interesant pentru proiectarea bobinelor individuale, bazat pe ecuații matematice iterative. Totodată sunt calculate pulsațiile curenților din capacitățile de intrare și de ieșire. Comparând caracteristicile convertoarelor buck monofază și multifază cu N faze se concluzionează, așa cum era de așteptat că în topologia multifază puterea modulelor individuale este  $1/N$  din puterea totală, având totodată și solicitări reduse. Pulsațiile curenților de intrare și de ieșire sunt diminuate și în consecință capacitățile de intrare și de ieșire pot fi și ele micșorate, putându-se utiliza capacități cu film metalizat în locul capacităților electrolitice. De asemenea, se obține o reducere a costurilor și o fiabilitate crescută. Partea de comandă este un aspect important legat de topologia multifază. Întâi este obținut, în manieră clasică, modelul în spațiul stărilor al unui convertor buck monofază cu elemente de pierderi serie pentru elementele reactive, calculându-se pe baza sa funcțiile de transfer de semnal mic. Folosindu-ne de acest model, sunt apoi determinate funcțiile de transfer ale convertorului buck multifază. Caracteristicile Bode au evidențiat un fenomen important, și anume că o dată cu creșterea numărului de faze, banda convertorului devine mai largă și în consecință răspunsul convertorului este mai rapid. Modul de împărțire al curenților între faze este de asemenea investigat de autor. După ce se prezintă succint principalele metode de echilibrare a curenților – medierea curentului în sistem master-slave cu master dedicat, împărțirea curenților mediați cu comandă democratică și împărțirea curenților de vârf cu controlul master automat – autorul optează pentru echilibrarea curenților cu ajutorul unei unități cu microcontroler (MCU). De fapt, este o implementare digitală a metodei de comandă a curentului mediat folosind un MCU și astfel evitând un hardware extern complex. Sunt măsurate curenții prin toate bobinele și valorile măsurate sunt furnizate controlerului care modifică semnalele PWM, astfel încât componentele continue ale curenților inductivi să fie egale. Implementarea fizică și rezultatele experimentale pentru un convertor buck cu șase faze au confirmat fezabilitatea convertorului multifază. A fost realizată o comparație între funcționarea dezechilibrată și cea cu echilibrarea curenților, arătându-se superioritatea celei din urmă, care compensează toleranțele componentelor și furnizează curenți continui egali. Sunt prezentate curbele randamentului funcție de puterea de ieșire, rezultând că se obțin randamente excelente, în special atunci când tensiunea de ieșire este coborâtă puțin față de cea de intrare. În partea de final a capitolului este propusă o strategie de comandă pentru un convertor DC/DC monofază din sistemul de propulsie. În timpul procesului de pornire, curentul de ieșire este controlat să crească lent până ce factorul de umplere este 1 și pila de combustie este direct conectată la magistrala de curent continuu și funcționează în arhitectură pasiv hibridă. Procedura este similară la oprire. Testele experimentale efectuate pe platforma de test dezvoltată au validat strategia de comandă propusă. Capitolul se încheie cu concluziile și menționarea principalelor contribuții ale autorului.

“Soft-Switching Converters for Fuel Cell Vehicles” este titlul **Capitolului 4**, în care sunt propuse două topologii cu comutare nedisipativă (soft-switching) și anume: un convertor buck sincron multifază de tip ZVT-PWM și un convertor buck cu magistrală de curent continuu rezonant paralelă (PRDCL). Trebuie precizat că acest capitol ar fi putut fi împărțit în două capitole distincte, motivul pentru care autorul nu a procedat așa fiind acela că ambele topologii aparțin aceleiași categorii de tip soft-switching. Se începe prin trecerea în revistă a principalelor tehnici de comutare soft-switching, apoi se prezintă convertorul ZVT-PWM. Ideea de la care s-a plecat este aceea a unui convertor ZVT buck monofază publicat în literatură care, pe lângă structura clasică hard-switching, utilizează o rețea auxiliară formată dintr-un întrerupător, o bobină rezonantă, o capacitate rezonantă și o diodă. În mod asemănător, topologia multifază pornește de la convertorul multifază cu comutare hard (hard-

switched) cu N faze și folosește același tip circuit rezonant auxiliar constând dintr-un switch, o bobină rezonantă și o diodă. În privința capacității rezonante, aceasta este distribuită în fiecare fază în paralel cu întrerupătoarele principale. Suplimentar sunt inserate N switch-uri serie, între circuitul auxiliar și brațele convertorului buck. Se arată că în stare staționară o perioadă are șapte stări topologice numite de autor stări de funcționare. Sunt evidențiate principalele forme de undă, fiecare stare fiind analizată individual și durata sa calculată analitic. Pe scurt, ideea de bază pentru a obține aducere în conducție la tensiune zero este să se conecteze o capacitate în paralel cu tranzistorul MOSFET și până la aducerea sa în conducție sarcina pe capacitate să fie adusă la zero. Sunt deduse condițiile în care se obține comutarea la tensiune zero (ZVS) și este interesant de menționat că în condițiile rezultate intervine și numărul de faze N. Sunt oferite, de asemenea, indicații de proiectare. Pentru a demonstra corecta funcționare a topologiei propuse, a fost implementat practic un convertor buck cu două faze de 2kW, în care un microcontroler STM32 a generat semnalele PWM de comandă. Oscilogramele ridicate au confirmat procesul de comutare nedisipativă și au fost determinate experimental dependențele randamentului de puterea de ieșire, atât pentru convertorul buck ZVT-PWM, cât și pentru topologia hard-switching. Aceste curbe au arătat că la nivele de puteri mici, mai mici decât 400W, randamentul convertorului ZVT-PWM nu este mai mare decât cel al versiunii hard-switched. Totuși, la nivele de puteri mari, convertorul ZVT-PWM cu două faze este clar superior celui hard-switched. În partea a doua a capitolului, se propune un convertor buck multifază cu comutare nedisipativă, având o magistrală de curent continuu paralel rezonantă. Convertorul PRDCL utilizează modulația PWM convențională, cu patru componente suplimentare: două tranzistoare, o bobină și o diodă. Funcționarea convertorului este descrisă în detaliu, identificându-se cinci stări topologice într-o perioadă de funcționare. Pentru fiecare stare topologică, denumită în lucrare cu termenul de “mod”, este reprezentat circuitul corespunzător și sunt deduse principalele relații de funcționare. Inițial, versiunea monofază a fost simulată în programul LTSpice, confirmându-se comutarea la curent zero și la tensiune zero. Apoi a fost simulată o topologie cu două faze. Se arată că în raport cu un convertor multifază clasic, raportul static de conversie al topologiei propuse este mai mic, fenomenul explicându-se în principal prin faptul că procesul rezonant influențează puternic tensiunea de ieșire. Este determinat teoretic raportul static de conversie pentru mai mulți factori de umplere. Apoi a fost construit un prototip de convertor PRDCL cu două faze. Principalele forme de unde achiziționate au fost prezentate împreună cu măsurători de randament și toate considerațiile teoretice au fost confirmate cu precizie. Întrucât randamentul este parametrul de interes, se arată că sub 1300W convertorul nu oferă un randament mai bun decât versiunea hard-switched, dar peste acest nivel de putere, deci la puteri mari, randamentul său este mai mare, cu valori remarcabile, în jur de 98.5%. Capitolul se încheie cu un rezumat, concluzii și evidențierea principalelor contribuții.

**Capitolul 5**, intitulat “Application of Small Fuel Cell Vehicle” prezintă un banc de testare pentru grupurile motopropulsor în configurația II. Mașina electrică și inverterul sunt emulate cu surse de putere și sarcini electronice, ceea ce permite simularea accelerării și decelerării. Datorită facilității master-slave pe care o oferă, sursele de alimentare pot fi combinate ca module pentru a mări domeniul tensiunii și curentului. Ele pot fi comandate fie manual, fie cu semnale externe, funcționând ca și surse de curent constant sau tensiune constantă. În sistem se utilizează modulul de combustie HyPNHD8, funcționând în așa numitul “Current Draw Allowed Mode (CDA)”. În acest mod, puterea de ieșire a pilei de combustie este controlată de modul magistralei. Este descris sistemul de alimentare cu oxigen și hidrogen, împreună cu sistemul de management termic și sistemul de management al bateriei. Un computer host este utilizat pentru a livra semnalele de comandă pentru sarcinile electronice și sursele de alimentare, astfel permițându-se simularea unui ciclu complet de funcționare. În acest scop, s-a utilizat programul LabVIEW, putându-se achiziționa

principalele forme de undă dintr-un ciclu de funcționare. E-switch-ul propus și prezentat în Capitolul 3 a fost testat în acest banc de test. Prima dată testele au fost efectuate în stare de conducție cu sarcină electronică variabilă. Valorile măsurate au fost înregistrate timp de 14 minute. Acestea au fost: curentul bateriei, curentul pilei de combustie, alături de curentul maxim pentru sistemul cu pila de combustie. Celălalt set de măsurători au constatat în tensiunea bateriei și tensiunea pilei de combustie. Apoi aceleași două seturi de măsurători au fost efectuate cu E-switch-ul conectând celula de combustie și bateria. Înregistrarea a durat 20 minute, începând cu o stare de încărcare a bateriei de 15% și fiind oprit la o stare de încărcare a bateriei de 16%. Măsurătorile au dovedit fezabilitatea sistemului pasiv hibrid.

Capitolul de final, **Capitolul 6**, denumit “Conclusions and Contributions” este dedicat concluziilor de final și subliniază principalele contribuții ale autorului, incluzând și lista de publicații ale acestuia. În partea sa finală, sunt prezentate câteva prognoze și sugestii pentru posibile direcții de cercetare viitoare.

Rezultatele obținute în această teză au fost diseminate și validate prin publicare în conferințe internaționale. Toate cele 7 articole publicate în conferințe au indexare WoS, dintre care la 4 doctorandul este prim autor. Articolele au 5 citări, excluzând autocitările și indicele Hirsch WoS al autorului este egal cu 2.

### Bibliografie semnificativă

- [1] Janaki Balakrishnan. Fuel cells – configuration and operation. In *2007 IEEE Canada Electrical Power Conference*, pages 213-217, 2007.
- [2] Stefani Vanussi Melo Guitolini, Imene Yahyaoui, Jussara Farias Fardin, Lucas Frizera Encarnação, and Fernando Tadeo. A review of fuel cell and energy cogeneration technologies. In *2018 9th International Renewable Energy Congress (IREC)*, pages 1-6, 2018.
- [3] **Wensong Shen**, Ioana-Monica Pop-Calimanu, and Folker Renken. Control strategy for dc/dc converter in drive train of fuel cell vehicles. In *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pages 243-249, 2021.
- [4] Infineon. AN201705PL11005, Linear FET combines advantages of planar and trench MOSFETs. [www.infineon.com](http://www.infineon.com).
- [5] Giuseppe Consentino. Power mosfets working in linear zone: The dangerous effect of the k gain factor on thermal instability. In *International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, pages 1515-1519, 2012.
- [6] Monzer Al Sakka, Joeri Van Mierlo, Hamid Gualous, and Philippe Lataire. Comparison of 30kw dc/dc converter topologies interfaces for fuel cell in hybrid electric vehicle. In *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, pages 1-10, 2009.
- [7] Abdelfatah Kolli, Arnaud Gaillard, Alexandre De Bernardinis, Olivier Bethoux, Daniel Hissel, and Zoubir Khatir. A review on dc/dc converter architectures for power fuel cell applications. *Energy Conversion and Management*, 105:716-730, 2015.
- [8] Folker Renken, David Piwczyk, **Wensong Shen**, Ioana-Monica Pop-Calimanu, and Robert Steinberger-Wilckens. A novel concept to control the powertrain in battery fuel cell hybrid vehicles. In *2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe)*, pages P.1-P.9, 2018.
- [9] Folker Renken. Multiphase dc/dc converters for hybrid electric vehicles. In *Proceedings of 14th International Power Electronics and Motion Control Conference EPE-PEMC 2010*, pages T9-98-T9-105, 2010.
- [10] Folker Renken, **Wensong Shen**, Udo Schürmann, and Ioana-Monica Pop-Calimanu. Multiphase dc/dc converter and its use in the powertrain of fuel cell vehicles. In *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, pages 280-

286, 2018.

- [11] Afshin Keshtkar Teeula and Shahriyar Kaboli. A reliable and fast response buck converter based on interleaved converter. In 2019 27th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), pages 804-807, 2019.
- [12] Folker Renken, **Wensong Shen**, Chao Wang, Ioana-Monica Pop-Calimanu, and Aurel Ciresan. Multiphase hybrid buck-boost converter with wide conversion ratio. In 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), pages P.1-P.9, 2017.
- [13] Danis Farrakhov, Kirill Barabanov, Alexander Podguzov, Inar Yamalov, and Ruslan Urazbakhtin. Quasi-resonant buck converter for high power application. In 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), pages 1-4, 2020.

