

ARHITECTURI, TEHNICI DE MODELARE ȘI METODE DE COMANDĂ PENTRU CONVERTOARE DC-DC ÎN COMUTAȚIE

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la

Universitatea Politehnica Timișoara

în domeniul de doctorat Inginerie electronică, telecomunicații și tehnologii informaționale

autor ing. Evelyn-Astrid Lovasz (căs. Lovasz-Dragoșel)

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

luna mai anul 2025

Importanța și actualitatea temei de cercetare sunt motivate de rolul major pe care îl au convertoarele dc-dc în comutație în electronica de putere, având ca și scop conversia și gestiunea eficientă a energiei electrice și reglarea tensiunii. Convertoarele dc-dc își găsesc aplicabilitatea într-un număr mare de domenii de actualitate, cum ar fi: industria automotive, sisteme de iluminat, electroliză, energii regenerabile.

Scopul în electronica de putere este de a miniaturiza și de a reduce costul convertoarelor, în condițiile unui randament ridicat și cu răspuns dinamic de calitate. Aceste deziderate se pot obține prin: creșterea densității de putere, creșterea frecvenței de comutație, introducerea de topologii noi de randament ridicat (soft-switching, rezonante, cvasipătratic, cvasirezonante, etc.), extinderea pe scară largă a noilor tipuri de tranzistoare și diode de putere (carbură de siliciu - SiC, nitrură de galiu GaN) și, nu în ultimul rând, prin adoptarea unor tehnici de comandă inteligente (comandă digitală, metode neliniare de comandă, algoritmi evolutivi], fuzzy, rețele neuronale)

Obiectivele tezei de doctorat sunt investigarea unor noi familii de convertoare dc-dc cu comutație hibridă, alături de analiza și modelarea convertoarelor de putere în condițiile unor metode de comandă analogice, digitale și neliniare.

Metodele de cercetare utilizate constau în identificarea provocărilor tehnologiilor existente, generarea sistematică și modelarea matematică a unor noi topologii propuse, alături de proiectarea, validarea prin simulare și experiment al acestora.

Capitolul 1 este dedicat sintezei de noi convertoare cu comutație hibridă din familia Ćuk 2. Totodată se prezintă analiza statică, relațiile de proiectare și modelul de semnal mic. Considerațiile teoretice sunt validate prin simulare și apoi experimental, atât în buclă deschisă cât și în buclă închisă.

Autorul tezei aduce următoarele contribuții:

- sinteza tuturor celor 72 de convertoare de tip Ćuk 2 prin metoda rotirii celulei de bază;
- dintre aceste 72 de topologii, 42 sunt noi topologii funcționale de convertoare propuse de autorul tezei;

- clasificarea convertoarelor în familii și analiza statică unitară a acestora;
- furnizarea relațiilor generale de dimensionare a convertoarelor;
- extinderea acestor familii prin introducerea de bobine cuplate și introducerea prin aceasta a unui grad de libertate suplimentar;
- regăsirea tuturor convertoarelor propuse de D. Zhou în teza sa de doctorat [38] prin scurtcircuitarea bobinei rezonante. Relevarea unei corespondențe biunivoce între convertoarele Zhou și convertoarele Cuk 2;
- efectuarea unei analize pe familii după natura conversiei – coborâtoare, ridicătoare și coborâtor - ridicătoare – evidențiindu-se patru familii coborâtoare, patru familii ridicătoare și o familie coborâtor-ridicătoare;
- în fiecare din categoriile de mai sus se regăsesc convertoare cu raport static de conversie egal cu cel clasic dar și topologii cu tensiune de ieșire negativă, precum și convertoare cu mai pronunțat caracter coborâtor respectiv ridicător față de corespondentele clasice;
- verificarea atât prin simulare cât și experimentală a unui reprezentant al familiei LsC de tip Buck cu tensiune de ieșire negativă și verificarea considerațiilor teoretice relativ la solicitările componentelor și a naturii comutării elementelor semiconductoare

Capitolul 2 este dedicat modelării de semnal mic al convertoarelor cu comutație hibridă. Autorul tezei propune pentru prima dată un model de semnal mic pentru acest tip de convertoare. Se prezintă două metode de obținere a funcției de transfer control-ieșire, necesară pentru proiectarea buclei de reacție. Funcționarea în buclă închisă se validează atât prin simulare cât și experimental.

Autorul tezei aduce următoarele contribuții:

- o metodă pentru obținerea modelului în spațiul stărilor pentru convertoare de tip Cuk 2;
- funcția de transfer de semnal mic de ordinul patru se obține în două moduri, atât analitic cât și prin simulare folosind analiza răspunsului la impuls în programul de simulare PLECS;
- pentru a proiecta un regulator cu metode clasice, se prezintă modul în care se aproximează funcția de transfer a convertorului cu una de ordinul doi;
- considerațiile teoretice s-au validat atât prin simulare cât și cu ajutorul unui prototip experimental al convertorului.

Capitolul 3 prezintă un mod unitar de comandă pentru convertoare comandate în frecvență. În acest sens, se propune un controler universal ce poate fi modificat ușor în funcție de topologia aleasă. Funcționarea acestui controler se exemplifică pentru un convertor cvasirezonant și unul rezonant, ambele în buclă închisă. Totodată, se propune o metodă generalizată pentru obținerea modelului de semnal mic pentru convertoare rezonante pe baza metodei funcției descriptive extinse.

Autorul tezei aduce următoarele contribuții:

- Sistematizarea metodei EDF în vederea aplicării facile pentru convertoare

rezonante în obținerea modelului de semnal mic;

- Validarea caracteristicilor de amplitudine și fază ale funcției de transfer control-ieșire obținută cu metoda EDF prin comparație cu rezultatele publicate în literatură;
- Aproximarea funcției de transfer control-ieșire pentru LLC cu o funcție de transfer de ordinul doi pentru care dimensionarea controlerului este simplă;
- Un controler universal pentru convertoare comandate în frecvență;
- Exemplificarea controlerului pentru două tipuri de convertoare: un convertor cvasirezonant Buck QRC ZCS FW și un convertor rezonant de tip LLC

Capitolul 4 prezintă deducerea modelului de semnal mic pentru convertoare PWM CCM cu două stări topologice cu ajutorul funcției descriptive extinse. Se demonstrează că aplicarea metodei funcției descriptive extinse oferă o alternativă la modelul mediat clasic în spațiul stărilor pentru convertoare PWM în CCM, oferind totodată posibilitatea determinării amplitudinii fundamentalei variabilelor de stare clasice și a funcțiilor de transfer ale acestora relativ la comandă și alimentare.

Autorul tezei aduce următoarele contribuții:

- un model de semnal mare mediat în spațiul stărilor care permite determinarea componentelor continue ale variabilelor de stare clasice și, suplimentar față de metoda clasică, amplitudinile fundamentalelor acestora în stare staționară;
- un model de semnal mic în spațiul stărilor din care se pot calcula funcțiile de transfer de semnal mic: audiosusceptibilitatea și funcția de transfer control-ieșire. Se arată cum acest model se aplică convertoarelor PWM de ordinul doi și de ordinul patru, iar aplicabilitatea la orice convertor PWM se face similar, urmând exact aceiași pași;
- din acest model de semnal mic se demonstrează că se pot determina, pe lângă audiosusceptibilitățile și funcțiile de transfer control-ieșire clasice, care coincid cu cele din literatură și audiosusceptibilitățile și funcțiile de transfer control-ieșire în raport cu amplitudinile fundamentalelor variabilelor de stare clasice în orice convertor PWM.

De remarcat faptul că, deși ordinul modelelor de semnal mare și semnal mic este $3n$, unde n este ordinul convertorului, funcțiile de transfer de semnal mic rămân de ordinul n , ca și în cazul clasic.

Capitolul 5 prezintă o metodă generală ce conduce la simplificarea și abordarea unitară a proiectării în mod alunecător pentru convertoare de ordinul doi în CCM. Exemplificarea se face pentru un convertor coborâtor cu bobine cuplate.

Autorul aduce următoarele contribuții:

- o procedură ce obține din descrierea în spațiul stărilor o descriere generală adecvată aplicării comenzii în mod alunecător pentru convertoare PWM în mod CCM cu două stări topologice;
- proiectarea SMC pentru un convertor coborâtor de ordin doi cu bobine cuplate.

Capitolul 6 cuprinde concluziile finale și direcții viitoare.

Cercetările viitoare s-ar putea canaliza pe următoarele aspecte:

- investigarea experimentală a familiilor de convertoare cu bobine cuplate, de tip Ćuk 2 precum și un studiu comparativ între topologiile cu același caracter (coborător, ridicător sau ambele) legat de solicitările în curent și tensiune semiconductoarelor în condiții de alimentare, putere și tensiune de ieșire identice.
- investigarea altor metode de comandă, inclusiv neliniare, pentru convertoare de tip Ćuk 2.
- investigarea aplicării metodei funcției descriptive extinse și pentru convertoare cvasirezonante, pătratice și la puntea activă duală (DAB).
- investigarea aplicării metodei funcției descriptive extinse și pentru convertoare PWM DCM
- investigarea aplicării comenzii în mod alunecător la convertoare PWM de ordin superior.

Bibliografie semnificativă

- [1] R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*. Cham: Springer International Publishing, 2020. doi: 10.1007/978-3-030-43881-4.
- [2] R. B. Ridley, *Power supply design*. Monpazier, France: Ridley Designs, 2012.
- [3] S. S. Ang and A. Oliva, *Power-switching converters*, 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.
- [4] J. G. Kassakian, M. F. Schlecht, and G. C. Verghese, *Principles of power electronics*. in Addison-Wesley series in electrical engineering. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1991.
- [5] C. P. Basso, *Switch-mode power supplies: SPICE simulations and practical designs*. in Electronic engineering. New York: McGraw-Hill, 2008.
- [6] S. Cuk, “Hybrid Switching Step-Down Converter with a Hybrid Transformer,” US 9,231,471 B2, Ianuarie 2016
- [7] Cuk, Slobodan, “Step-Down Converter having a Resonant Inductor, A Resonant Capacitor and a Hybrid Transformer,” US 7,915,874 B1, Mar. 29, 2011
- [8] R. Tymerski, “Application of the time-varying transfer function for exact small-signal analysis,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 9, no. 2, pp. 196–205, Mar. 1994, doi: 10.1109/63.286812.
- [9] S. Tian, F. C. Lee, and Q. Li, “Equivalent circuit modeling of LLC resonant converter,” in *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Long Beach, CA, USA: IEEE, Mar. 2016, pp. 1608–1615. doi: 10.1109/APEC.2016.7468082.
- [10] J. M. Olm, E. Fossas, V. Repecho, A. Dòria-Cerezo, and R. Griñó, “Adaptive Control-Based Voltage Regulation of a Magnetically Coupled Multiport DC-DC Converter for Electrified Vehicles Applications,” in *2020 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Seville, Spain: IEEE, Oct. 2020, pp. 1–5. doi: 10.1109/ISCAS45731.2020.9180489.
- [11] A. Benevieri, L. Carbone, S. Cosso, F. Gallione, and S. Hussain, “Multi-Input Bidirectional DC-DC Converter for Energy Management in Hybrid Electrical Vehicles Applications,” in

- 2023 13th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE), Bucharest, Romania: IEEE, Mar. 2023, pp. 1–5. doi: 10.1109/ATEE58038.2023.10108261.
- [12] C. Wang *et al.*, “New digital control method for improving dynamic performance of a quasi-resonant flyback converter,” in *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Anaheim, CA, USA: IEEE, Mar. 2019, pp. 1788–1793. doi: 10.1109/APEC.2019.8721873.
- [13] C. Wang, D. Sun, X. Zhang, W. Gu, and S. Gui, “A Constant Current Digital Control Method for Primary-Side Regulation Active-Clamp Flyback Converter in CCM Mode,” in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, Oct. 2021, pp. 3501–3506. doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595671.
- [14] M. Stecca, W. Vermeer, T. B. Soeiro, L. Ramirez Elizondo, P. Bauer, and P. Palensky, “Battery Storage Integration in EV Fast Charging Station for Increasing its Revenues and Reducing the Grid Impact,” in *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Anaheim, CA, USA: IEEE, Jun. 2022, pp. 109–113. doi: 10.1109/ITEC53557.2022.9814040.
- [15] N. Abhay, J. Dong, P. Bauer, and S. Nouws, “Efficiency Map based Modelling of Electric Drive for Heavy Duty Electric Vehicles and Sensitivity Analysis,” in *2021 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Chicago, IL, USA: IEEE, Jun. 2021, pp. 875–880. doi: 10.1109/ITEC51675.2021.9490191.
- [16] Y. Li *et al.*, “A 500kW Forced-air-cooled Silicon Carbide (SiC) 3-Phase DC/AC Converter with a Power Density of 1.246MW/m³ and Efficiency >98.5%,” in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA: IEEE, Oct. 2020, pp. 209–216. doi: 10.1109/ECCE44975.2020.9236074.
- [17] M. Chen, B. Chen, Y. Wang, P. Wang, M. Zhang, and C. Che, “A High-efficiency Resonant DC-DC Converter with Wide Voltage Gain Range,” in *2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Detroit, MI, USA: IEEE, Oct. 2022, pp. 1–6. doi: 10.1109/ECCE50734.2022.9948078.
- [18] H. Bai, D. Yang, J. Song, Q. Su, B. Duan, and C. Zhang, “Linear Active Disturbance Rejection Control of LLC Resonant Converters for EV Chargers,” in *2020 Chinese Automation Congress (CAC)*, Shanghai, China: IEEE, Nov. 2020, pp. 993–998. doi: 10.1109/CAC51589.2020.9327865.
- [19] F. Xue, R. Yu, W. Yu, and A. Q. Huang, “GaN transistor based Bi-directional DC-DC converter for stationary energy storage device for 400V DC microgrid,” in *2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM)*, Atlanta, GA, USA: IEEE, Jun. 2015, pp. 153g–153l. doi: 10.1109/ICDCM.2015.7152029.
- [20] R. Kiran, M. S. Bhaskar, S. Padmanaban, F. Blaabjerg, P. Wheeler, and M. H. Rashid, “Unipolar Single Reference Multicarrier Sinusoidal Pulse Width Modulation Based 7-level Inverter with Reduced Number of Semiconductor Switches for Renewable Energy Applications,” in *2018 IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Budapest, Hungary: IEEE, Aug. 2018, pp. 1043–1048. doi: 10.1109/EPEPEMC.2018.8521864.
- [21] O. Asvadi-Kermani, A. Oshnoei, and F. Blaabjerg, “Adaptive Kalman-Based Constrained Predictive Control With Neural Estimator for a Noninverting Buck–Boost Converter,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 40, no. 2, pp. 2901–2915, Feb. 2025, doi: 10.1109/TPEL.2024.3487892.

- [22] A. Mostaan, J. Yuan, Y. P. Siwakoti, S. Esmaeili, and F. Blaabjerg, “A Trans-Inverse Coupled-Inductor Semi-SEPIC DC/DC Converter With Full Control Range,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 11, pp. 10398–10402, Nov. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2019.2917306.
- [23] Z. Tang *et al.*, “Lifetime Modeling and Analysis of Aqueous Organic Redox-flow Batteries for Renewable Energy Application,” in *2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Vancouver, BC, Canada: IEEE, Oct. 2021, pp. 1400–1404. doi: 10.1109/ECCE47101.2021.9595507.
- [24] E.-A. Lovasz and D. Lascu, “A General Approach for Deriving the Sliding Mode State-Space Equation in Second Order CCM Operated DC-DC Converters,” in *2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timisoara: IEEE, Nov. 2018, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISETC.2018.8583872.
- [25] E.-A. Lovasz and D. Lascu, “Universal Controller for Quasiresonant and LLC Converters,” in *2019 42nd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Budapest, Hungary: IEEE, Jul. 2019, pp. 513–516. doi: 10.1109/TSP.2019.8768886.
- [26] E.-A. Lovasz and D. Lascu, “A New Buck Converter with Hybrid Switching,” in *2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timisoara, Romania: IEEE, Nov. 2020, pp. 1–4. doi: 10.1109/ISETC50328.2020.9301107.
- [27] E.-A. Lovasz and D. Lascu, “Small-signal Model for PWM Converters using Extended Describing Function Approach,” in *2021 16th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems (EMES)*, Oradea, Romania: IEEE, Jun. 2021, pp. 1–4. doi: 10.1109/EMES52337.2021.9484156.
- [28] S. Lica, D. Lascu, and E.-A. Lovasz, “A new step-up-down quadratic dc–dc converter with a single active switch,” *Journal of Computational and Applied Mathematics*, vol. 436, p. 115362, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.cam.2023.115362.
- [29] E.-A. Lovasz, D. Lascu, and S. Lica, “Digitally Controlled Hybrid Switching Step-Up Converter,” *Electronics*, vol. 13, no. 9, p. 1740, May 2024, doi: 10.3390/electronics13091740.