

## DEZVOLTAREA UNOR NOI ARHITECTURI DE CONVERTOARE CC-CC. MODELARE, COMANDĂ ȘI APLICAȚII

### 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: fiz. ing. Septimiu LICA**

conducător științific: Prof. univ. dr. ing. Dan-Florentin LASCU

luna iulie anul 2024

## 1. Introducere

Teza de doctorat se concentrează pe descoperirea unor noi convertoare cc-cc, modelare, control și aplicații, fiind în domeniul Ingineriei Electronice, Telecomunicațiilor și Tehnologiilor Informaționale. Aceasta introduce noi topologii de convertoare și propuneri de proiectare a controlerelor. Sunt propuse și analizate mai multe convertoare cc-cc de tip cvadratic, împreună cu topologii etajate. Cercetarea subliniază importanța inovației în electronica de putere pentru a satisface cerințele surselor de tensiune stabilizate și ale sistemelor de colectare a energiei.

### 1.1. Prezentare generală a importanței convertoarelor cc-cc în electronica de putere

Convertoarele cc-cc joacă un rol crucial în electronica de putere modernă, permițând reglarea eficientă a tensiunii și gestionarea energiei în diverse aplicații. Ele facilitează conversia curentului continuu (cc) de la un nivel de tensiune la altul, esențială pentru integrarea surselor de energie regenerabilă, cum ar fi panourile solare și pilele de combustie, în rețeaua electrică. În plus, odată cu extinderea utilizării vehiculelor electrice (EV) și a vehiculelor electrice hibride (HEV), convertoarele cc-cc sunt vitale pentru optimizarea utilizării energiei, îmbunătățirea performanței bateriilor și asigurarea funcționării fiabile a dispozitivelor electronice în diferite domenii, inclusiv electronica bunurilor de larg consum, telecomunicațiile și automatizarea industrială.

### 1.2. Obiectivele tezei

Obiectivul principal al acestei teze este de a propune topologii inovatoare de convertoare cc-cc care oferă avantaje față de convertoarele tradiționale, în special în ceea ce privește rapoartele de conversie statică, eficiența și reducerea solicitărilor asupra semiconductoarelor. Cercetarea contribuie în domeniul electronicii de putere prin introducerea a patru noi convertoare buck, un nou convertor boost și trei noi convertoare buck-boost, toate concepute pentru a îmbunătăți performanța în diverse aplicații. În plus, teza include dezvoltarea de modele de semnal mic și strategii de proiectare a controlerelor, oferind un cadru cuprinzător pentru

cercetări viitoare și implementări practice în sistemele de colectare a energiei regenerabile și alimentare cu energie.

Teza își propune să atingă următoarele obiective specifice:

- *Dezvoltarea de noi topologii de convertoare*: Propunerea și analiza mai multor topologii inovatoare de convertoare cc-cc, inclusiv patru noi convertoare buck, un nou convertor boost și trei noi convertoare buck-boost, care aduc îmbunătățiri față de proiectele existente în termeni de randament și performanță.
- *Optimizarea indicatorilor de performanță*: Îmbunătățirea raportului static de conversie și reducerea solicitărilor asupra semiconductoarelor utilizând topologiile de convertoare în comutație propuse, crescând astfel fiabilitatea echipamentelor și eficiența operațională în diverse aplicații.
- *Tehnici de modelare și control*: Dezvoltarea de modele de semnal mic și strategii avansate de control pentru noile arhitecturi de convertoare, facilitând astfel o performanță mai bună în aplicațiile reale, în special în sistemele de colectare a energiei regenerabile și gestionare a energiei.

## 2. Metodologia utilizată

Metodologia de cercetare utilizată în această teză include următorii pași cheie:

- *Identificarea problemei*: Faza inițială implică identificarea provocărilor și limitărilor specifice în tehnologiile existente de convertoare cc-cc, ghidând astfel țintele cercetării. De asemenea, unele convertoare de putere existente sunt selectate ca punct de plecare al cercetării. Acestea sunt candidate pentru metoda rotației celulelor de convertor.
- *Modelarea matematică*: Următorul pas constă în dezvoltarea de modele teoretice pentru topologiile de convertoare propuse, permițând analiza caracteristicilor lor de performanță și a comportamentului în funcționare. Studiile sunt realizate atât pentru modelul de cc, cât și pentru modelul de semnal mic. Este furnizat, de asemenea, un algoritm de proiectare.
- *Proiectarea și simularea*: Convertoarele sunt proiectate folosind pachete software de calcul și simulare, cum ar fi MATLAB™ și CASPOC. Aceste instrumente software sunt utilizate și pentru a valida funcționalitatea și performanța convertoarelor în diverse condiții.
- *Validarea experimentală*: Prototipurile practice ale convertoarelor sunt construite și testate în laborator pentru a compara rezultatele experimentale cu datele din simulare, confirmând aplicabilitatea practică a schemelor de convertoare propuse.
- *Optimizarea*: În final, cu un design specific, parametrii convertoarelor pot fi optimizați pe baza observațiilor din simulări și experimente, punând accent pe creșterea eficienței, reducerea solicitărilor componentelor și îmbunătățirea performanței în general. Aplicația vizată este identificată și din aceste remarci. Algoritmii de proiectare pot conduce la un design adecvat și optimal bazându-se pe anumite cerințe inițiale fixate.

Teza utilizează mai multe tehnici de modelare și simulare pentru a analiza și valida topologiile de convertoare cc-cc propuse:

- *Modelare în spațiul stărilor*: Această tehnică este utilizată pentru a deduce modelele matematice ale convertoarelor, surprinzând comportamentul lor

dinamic prin ecuații în spațiul stărilor. Facilitează analiza cc și calculele pentru caracteristicile de răspuns în frecvență.

- *Modelare de semnal mic*: Modelele de semnal mic sunt dezvoltate pentru a studia comportamentul convertoarelor la mici perturbații în jurul unui punct static de funcționare. Această abordare permite calcularea funcțiilor de transfer din modelul în spațiul stărilor, esențiale pentru proiectarea buclei de control și analiza stabilității.
- *Simulări MATLAB™*: Convertoarele sunt simulate folosind MATLAB™. Acest lucru permite evaluarea indicatorilor de performanță, cum ar fi eficiența, răspunsul tranzitoriu și comportamentul în regim staționar în diverse condiții de operare. Procedura de proiectare este implementată și într-un script MATLAB™. De exemplu, funcția de transfer de la control la ieșire pentru convertorul ZL1-Buck a fost calculată din modelul în spațiul stărilor atât în cazul ideal, cât și în cazul pierderilor în conducție. Rezultatele pentru magnitudine sunt prezentate în Figura 1, împreună cu rezultatele experimentale. Toate calculele și graficul au fost realizate folosind MATLAB™.

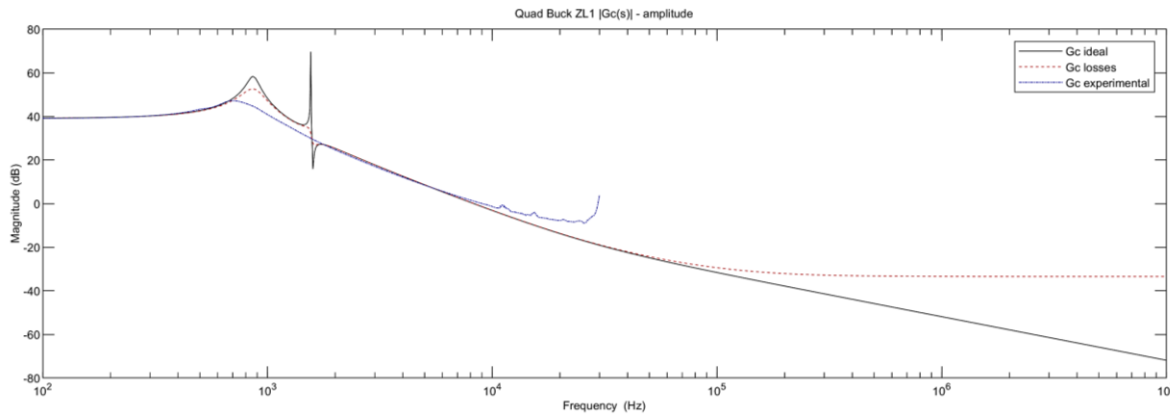


Figura 1. Funcția de transfer teoretică și experimentală control-ieșire a ZL1-Buck, reprezentarea Bode a magnitudinii [original].

- *Simulări CASPOC*: Simulările la nivel de circuit sunt efectuate pentru a analiza în detaliu caracteristicile electrice ale convertoarelor. Acest lucru include evaluarea impactului elementelor parazite și validarea modelelor teoretice în raport cu scenariile practice. De exemplu, schema convertorului ZL1-Buck a fost reprodusă în CASPOC și pierderile de conducție ale componentelor au fost incluse, în Figura 2 fiind reprezentate tensiunea pe dioda  $D_3$  și curentul prin aceeași diodă. Formele undelor confirmă funcționarea convertorului în modul de conducție continuă (CCM) în raport cu această diodă.

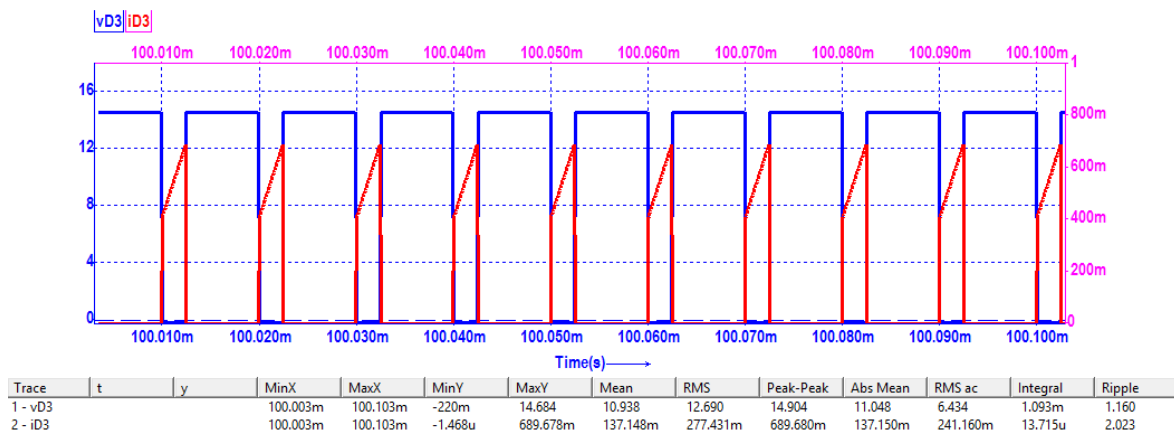


Figura 2. Tensiunea și curentul corespunzătoare celei de a treia diodă din ZL1-Buck, cu pierderi în conducție. [original].

- *Testare experimentală:* Prototipurile convertoarelor sunt construite și testate în laborator, permițând validarea în condiții reale. Acest pas asigură faptul că modelele reflectă cu acuratețe performanța convertoarelor în aplicații practice. În Figura 3 este prezentat prototipul pentru colectarea energiei solare utilizând convertorul ZL3-Buck.

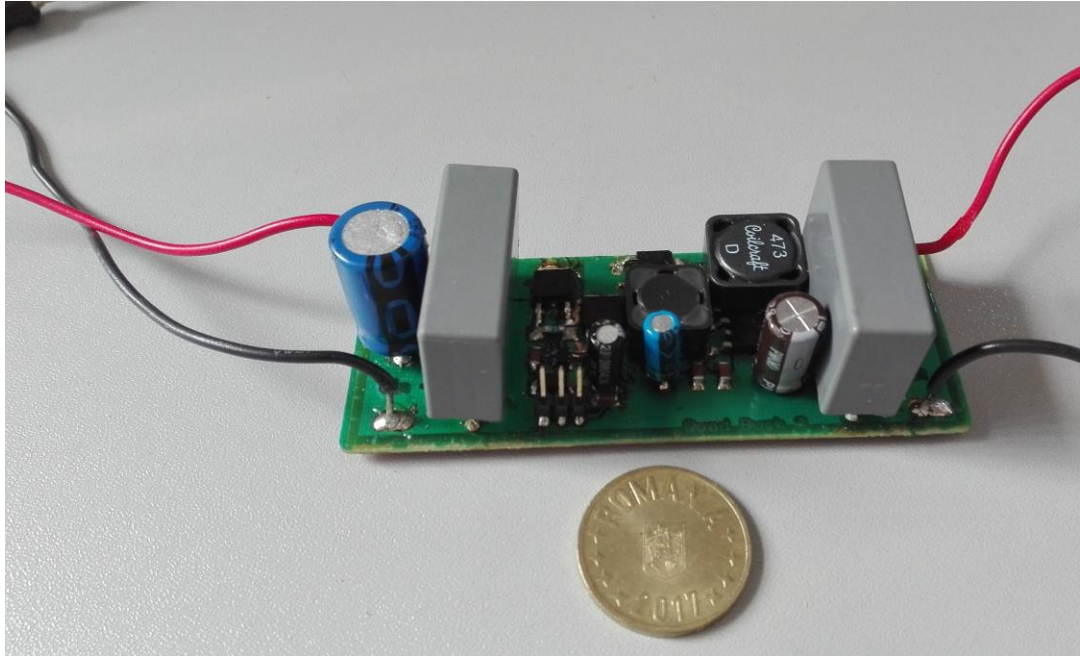


Figura 3. Placa PCB asamblată a prototipului solar ZL3-Buck [original]

### 3. Noi arhitecturi de convertoare cc-cc

#### 3.1. Descriere detaliată a topologiilor de convertoare propuse

Teza propune mai multe noi topologii de convertoare cc-cc, concentrându-se pe îmbunătățirea eficienței și performanței.

**Convertorul ZL1-Buck**, prezentat în Figura 4, utilizează un singur comutator activ și este proiectat pentru a reduce eficient tensiunea de intrare în timp ce crește curentul de ieșire. Acesta are o structură simplă, ceea ce îl face rentabil pentru aplicațiile care necesită reglarea tensiunii atunci când diferența dintre tensiunile de intrare și ieșire este mică.

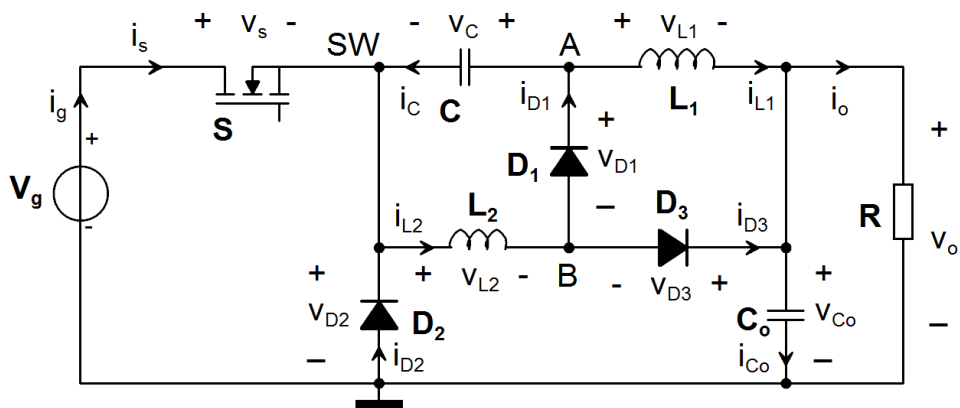


Figura 4. Noul convertor Quad ZL1-Buck propus [original]

**Convertorul ZL1-Buck-Boost** este analizat atunci când operează în CCM și se caracterizează prin capacitatea sa de a reduce sau, în special, de a crește tensiunea. Această flexibilitate este crucială pentru aplicațiile în care tensiunea de intrare poate varia semnificativ, cum ar fi în sistemele fotovoltaice (PV). Schema convertorului încorporează două inductoare, două condensatoare, un tranzistor și trei diode, așa cum este ilustrat în Figura 5, care lucrează împreună pentru a obține conversia de tensiune dorită.

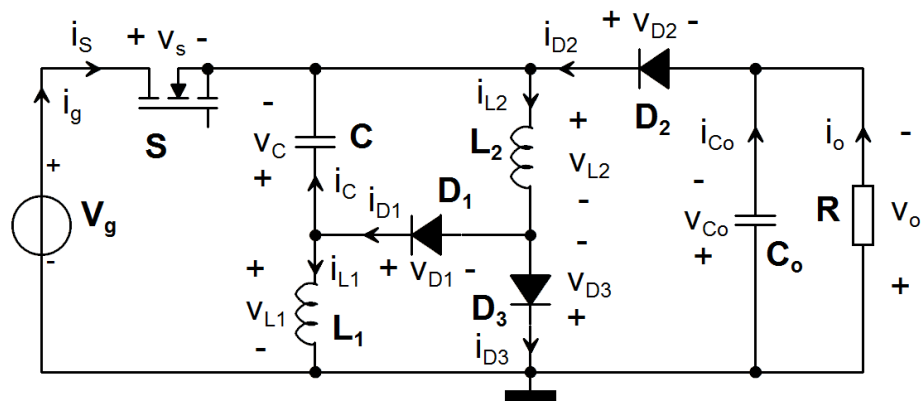


Figura 5. Noul convertor Quad ZL1-Buck-Boost propus [original]

**Familiiile ZL2 și ZL3** sunt constituite fiecare dintr-un convertor buck cvadratic și un convertor buck-boost cvadratic. Caracteristicile lor principale sunt raporturile de conversie statică îmbunătățite și solicitările reduse asupra semiconductoarelor, recomandându-le astfel ca fiind candidați ideali pentru aplicații specifice.

Studiul analizează diferite particularități și forme de undă asociate cu convertorul cvadratic ZL3-Buck, care este prezentat în Figura 6.

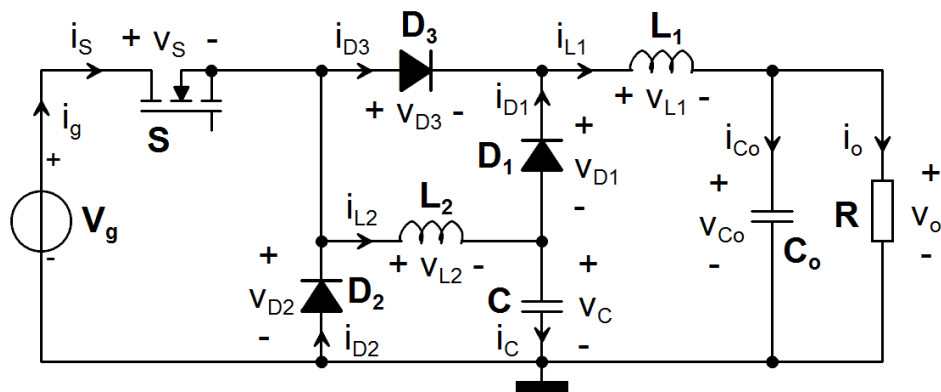


Figura 6. Convertorul cvadratic ZL3-Buck propus [original]

Explorează rezultatele simulărilor și testelor experimentale, precum și metricile de performanță, pentru utilizarea împreună cu modulele PV în condiții variabile. În plus, detaliază proiectarea, formele de undă ale simulărilor și analizele de eficiență ale prototipurilor de conversoare Quad ZL3-Buck propuse, evidențiind caracteristicile lor funcționale și disipările termice în timpul testării.

Aplicațiile în sistemele PV demonstrează utilitatea convertorului ZL3-Buck. Măsurătorile obținute cu bancul de testare solar sunt reproduse în Figura 7. Pentru o proiectare optimă și pentru extragerea cerințelor inițiale necesare, panourile PV sunt simulate, din cauza parametrilor lacunari din fișa tehnică dată de producător. Caracteristicile PV simulate sunt prezentate în Figura 8.

Convertoarele stivuite buck și boost sunt conversoare multietajate de tip ridicător sau coborâtor. Aceste topologii sunt proiectate pentru a obține rapoarte de conversie a tensiunii

îmbunătățite prin stivuirea mai multor etaje de conversie buck și boost tradiționale. Această configurație stivuită permite o mai bună eficiență și performanță în aplicațiile care necesită schimbări semnificative sau specifice de tensiune.

Formele de undă teoretice corespunzătoare elementelor pasive și active ale conversoarelor sunt studiate. Rapoartele de conversie statică și randamentul sunt evaluate, cu o atenție deosebită asupra modelelor cu pierderi. Acest capitol discută, de asemenea, ecuațiile modelului teoretic, formele de undă ale simulărilor și validările experimentale pentru conversoarele buck și boost stivuite cu diferite număr de etaje, subliniind modificările din rapoartele lor de conversie și valoarea randamentului.

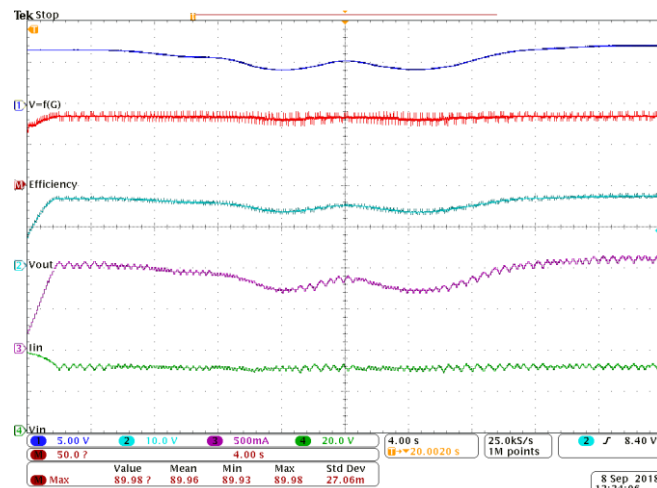


Figura 7. Captură de osciloscop cu iradiere solară variabilă: tensiunea de la piranometru ( $V=f(G)$  – albastru închis), tensiunea de ieșire ( $V_{out}$  – cyan), randamentul instantaneu ( $Efficiency$  – roșu), curentul de intrare ( $I_{in}$  – magenta), tensiunea de intrare ( $V_{in}$  – verde). [original]

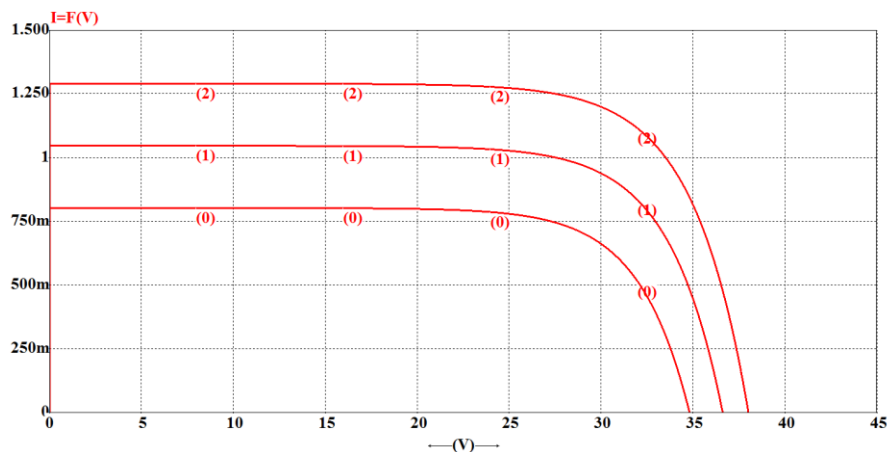


Figura 8. Caracteristicile curent-tensiune ale modulelor PV în serie (0)  $\rightarrow$  600W/m<sup>2</sup>, (1)  $\rightarrow$  800 W/m<sup>2</sup>, and (2)  $\rightarrow$  1000 W/m<sup>2</sup> [original]

În plus, cercetarea se extinde la dezvoltarea de noi arhitecturi generalizate de conversie cc-cc, punând accent pe modelare, simulări și perspective de aplicare practică. Convertorul buck stivuit pentru orice număr de etaje este prezentat în Figura 9.

Fiecare topologie propusă este analizată pentru caracteristicile sale operaționale, eficiență și adecvare pentru aplicații specifice, demonstrând avantajele lor potențiale față de designurile tradiționale și alte designuri raportate. Comparațiile cu topologii similare arată avantajele conversoarelor propuse.

Cercetarea implică, de asemenea, integrarea elementelor de control automat, de exemplu, implementări cu amplificatoare operaționale, pentru a regla tensiunile de ieșire și a gestiona variațiile de sarcină, evidențiind versatilitatea și adaptabilitatea schemelor de conversie propuse.

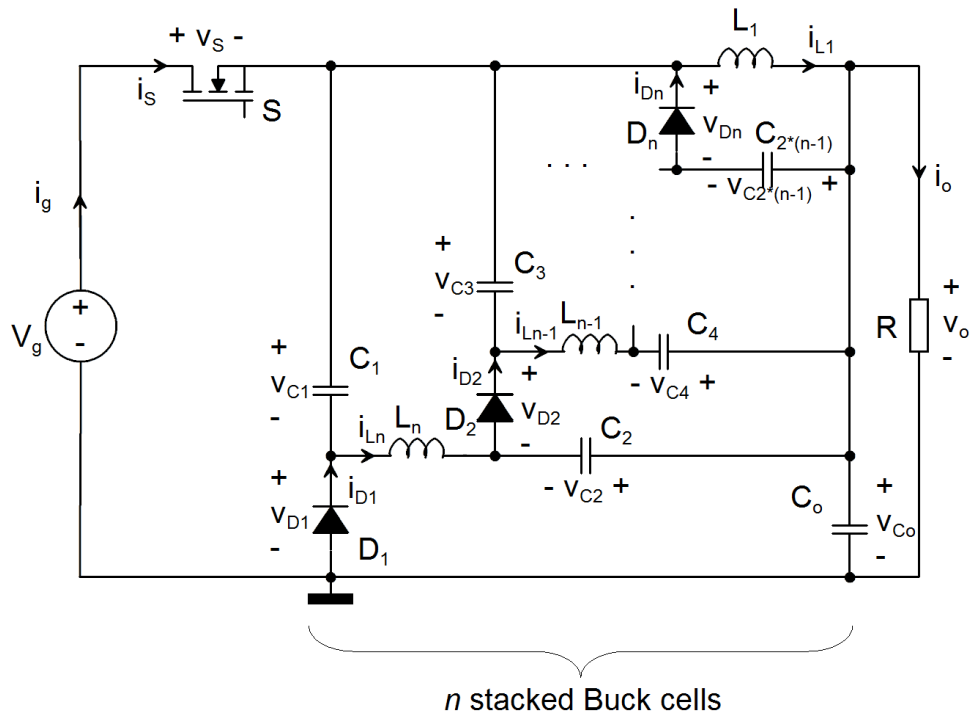


Figura 9. Generalizarea convertorului etajat buck [original]

### 3.2. Avantaje față de alte convertoare

Topologiile de convertoare propuse sunt comparate cu tehnologiile de conversie cc-cc existente pentru a evidenția avantajele lor. Ele oferă mai multe avantaje în comparație cu convertoarele tradiționale:

- *Eficiență ridicată:* Noile topologii sunt caracterizate prin pierderi de energie mici, rezultând o eficiență generală comparabilă cu cea a convertoarelor clasice, cum ar fi convertoarele buck, boost și buck-boost. Noile topologii, precum convertoarele ZL1-Buck și ZL1-Buck-Boost, demonstrează randamente care depășesc 90%. Randamentul experimental și cel calculat din modelul în spațiul stărilor cu pierderi în conducție incluse pot fi observate în Figura 10 pentru topologia ZL3-Buck.
- *Raporturi statice de conversie îmbunătățite:* Convertoarele propuse prezintă raporturi statice de conversie îmbunătățite, permițând o utilizare mai bună a factorului de umplere operațional și adaptabilitate în aplicațiile în care tensiunile de intrare și ieșire sunt apropiate sau este necesar un câștig de tensiune ridicat. De exemplu, familiile ZL1, ZL2 și ZL3 oferă performanțe mai bune atât în aplicațiile de ridicare, cât și în cele de coborâre, permițând o utilizare mai versatilă în diverse scenarii de gestionare a energiei. O comparație a curbelor raportului de conversie este prezentată în Figura 11. De exemplu, în cazul ZL3-Buck, pentru un raport static de conversie ridicat, de  $M = 0.9$ , convertorul tradițional trebuie să funcționeze aproape de  $D = 0.9$ , în timp ce convertorul propus va avea un factor de umplere mai relaxat, aproape de  $D = 0.7$ .
- *Solicitări reduse asupra componentelor:* Când proiectarea și funcționarea convertoarelor sunt optimizate, topologiile propuse reduc solicitările de curent și tensiune asupra semiconductoarelor și altor componente, ducând la o fiabilitate crescută și o durată de viață operațională mai lungă.

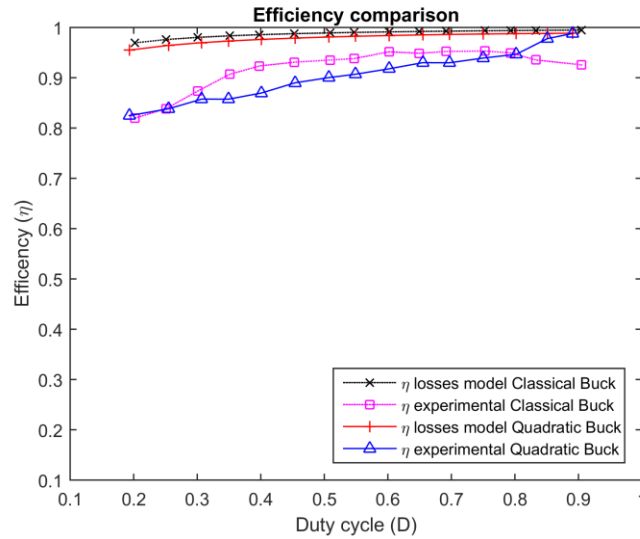


Figura 10. Eficiența teoretică în comparație cu eficiența măsurată pentru convertorul Buck clasic și convertorul ZL3-Buck propus [original]

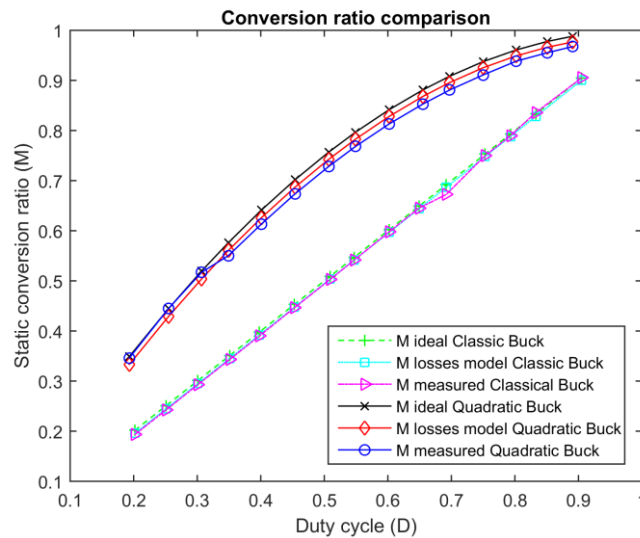


Figura 11. Raportul de conversie de cc teoretic în comparație cu modelul incluzând pierderi și măsurătorile pentru convertorul buck clasic și convertorul ZL3-Buck propus [original]

- **Reducerea costurilor:** Topologiile propuse sunt proiectate cu un număr redus de componente.
- **Versatilitate:** Capacitatea de a funcționa la un factor de umplere moderat în cazuri extreme, cum ar fi o mică reducere a tensiunii sau o mare creștere a tensiunii.

Aceste avantaje poziționează topologiile de convertoare propuse ca alternative mai bune pentru diverse aplicații în electronica de putere. În general, topologiile de convertoare propuse demonstrează performanțe superioare, eficiență și costuri optime comparativ cu alte topologii de convertoare cc-cc, făcându-le potrivite pentru aplicațiile moderne în energii regenerabile și surse de alimentare.



## 4. Analiza performanțelor

Teza prezintă rezultate cuprinzătoare atât în urma unor simulări, cât și din validările experimentale ale topologiilor de convertoare propuse. Iată câteva exemple.

### 4.1. Convertorul ZL1-Buck

*Rezultatele simulării:* Tensiunea de ieșire a fost calculată ca fiind 21.887V folosind modelul teoretic în spațiul stărilor, în timp ce simularea a indicat 21.905V, demonstrând o aliniere strânsă cu predicțiile teoretice.

*Rezultatele experimentale:* Prototipul practic a confirmat rezultatele simulării, cu mici discrepanțe atribuite toleranțelor componentelor din lumea reală.

### 4.2. Convertorul ZL1-Buck-Boost

*Rezultatele simulării:* Tensiunea de ieșire a fost prezisă teoretic a fi 25.6434V, iar simularea a raportat 25.644V, indicând o acuratețe ridicată în modelare.

*Rezultatele experimentale:* Testele au arătat că prototipul convertorului a menținut o performanță bună în condiții de variație ale factorului de umplere, validând eficacitatea în aplicații practice.

## 5. Analiza formelor de undă

*Rezultatele simulării:* Formele de undă ale simulărilor au coincis cu formele teoretice așteptate, cu variații minore în niveluri, indicând o fidelitate bună a modelului. Semnalele referitoare la bobina L1 din convertorul buck stivuit cu două etaje sunt prezentate în Figura 12.

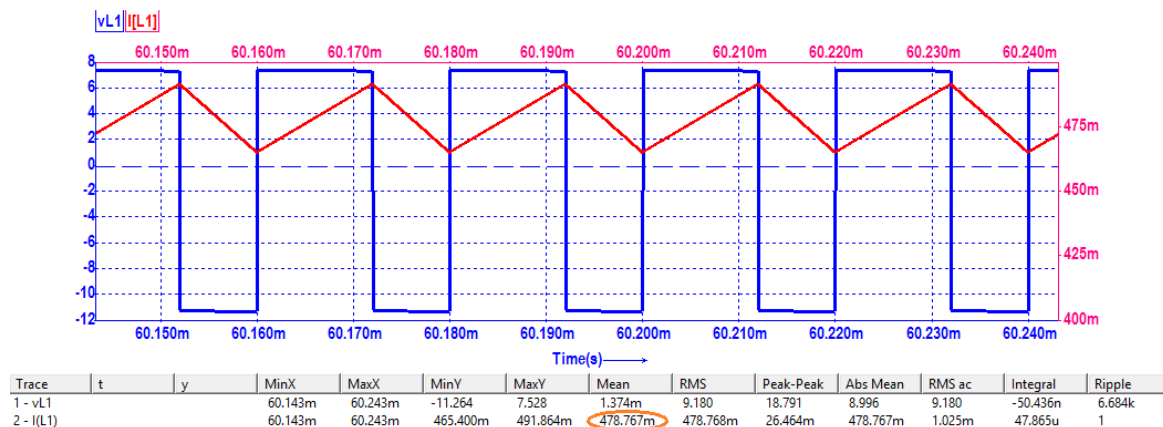


Figura 12. Rezultatele simulării pentru convertorul buck etajat cu  $n=2$ : tensiunea pe prima inductanță și curentul prin aceeași bobină [original]

*Rezultatele experimentale:* Formele de undă achiziționate în timpul testării s-au potrivit îndeaproape cu rezultatele simulărilor, confirmând integritatea operațională a convertoarelor propuse. Semnalele obținute pentru același convertor, buck stivuit cu  $n = 2$  etaje, sunt reproduse în Figura 13.

În ansamblu, rezultatele atât ale simulărilor, cât și ale experimentelor, au validat funcționarea convertoarelor noi, demonstrând potențialul lor pentru eficiență ridicată și performanță bună în diverse aplicații.

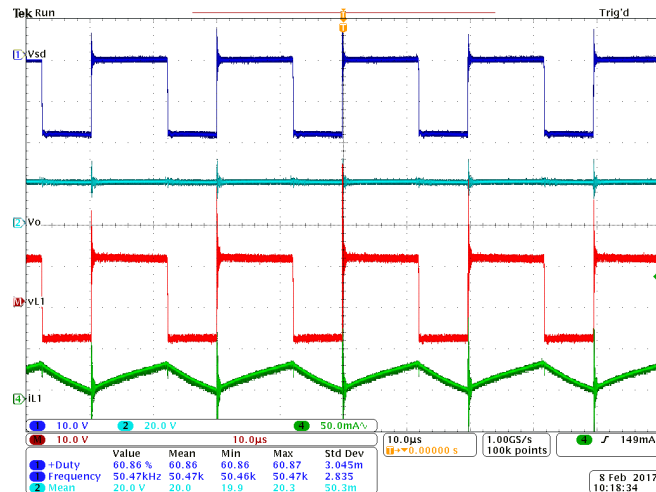


Figura 13. Captură de osciloscop (buck etajat  $n=2$ ): tensiunea pe tranzistor, de la sursă la drenă ( $V_{sd}$  – albastru închis), tensiunea de ieşire ( $V_o$  – cyan), tensiunea pe  $L_1$  ( $v_{L1}$  – roşu), curentul prin  $L_1$  ( $i_{L1}$  – verde) [original]

## 6. Aplicații

### 6.1. Potențiale aplicații ale noilor propuneri de convertoare

Topologiile propuse de convertoare cc-cc au o gamă largă de potențiale aplicații, inclusiv:

- *Sisteme cu energie regenerabilă:* Convertoarele ZL-Buck și ZL-Buck-Boost sunt deosebit de potrivite pentru integrarea în sistemele de colectare a energiei PV, unde pot gestiona eficient tensiunile de intrare variabile ale panourilor solare pentru a optimiza conversia și stocarea energiei.
- *Vehicule electrice:* Noile topologii de convertoare pot fi utilizate în sistemele de gestionare a energiei pentru vehicule electrice, oferind reglarea eficientă a curentului și tensiunii pentru încărcarea bateriilor și distribuția energiei, îmbunătățind performanța și autonomia vehiculului.
- *Electronice portabile:* Natura compactă și eficientă a convertoarelor propuse le face ideale pentru utilizarea în dispozitive electronice portabile, cum ar fi smartphone-urile și laptopurile, unde spațiul și eficiența energetică sunt critice.
- *Surse de alimentare industriale:* Aceste convertoare pot fi utilizate în aplicații industriale pentru alimentarea mașinilor și echipamentelor, unde conversia fiabilă și eficientă a tensiunii este esențială pentru eficiența operațională și economiile de costuri.
- *Sisteme de stocare a energiei:* Convertoarele pot fi integrate în soluții de stocare a energiei, cum ar fi sistemele de gestionare a bateriilor, pentru a optimiza procesele de încărcare și descărcare, îmbunătățind durata de viață și performanța dispozitivelor de stocare a energiei.

În concluzie, versatilitatea și eficiența noilor convertoare le fac potrivite pentru o varietate de aplicații în diferite sectoare, în special în energia regenerabilă și sistemele electronice avansate.

### 6.2. Discuție despre colectarea energiei și îmbunătățirea eficienței

Colectarea energiei se referă la procesul de captare și stocare a energiei din diverse surse

regenerabile, cum ar fi energia solară, eoliană și termică, pentru utilizare ulterioară. Integrarea convertoarelor cc-cc în sistemele de energie regenerabilă, în special energia solară, este un domeniu în care crește interesul. Topologiile de convertoare cc-cc propuse ar putea juca un rol important în îmbunătățirea eficienței sistemelor de colectare a energiei regenerabile.

- *Conversie optimizată:* Noile topologii de convertoare, cum ar fi convertoarele ZL-Buck și ZL-Buck-Boost, sunt proiectate pentru a atinge o eficiență ridicată în conversia energiei colectate în energie electrică utilizabilă. Capacitatea lor de a menține o eficiență ridicată în condiții de intrare variabile este esențială pentru maximizarea captării energiei din surse regenerabile fluctuante.
- *Raport static de conversie:* Raporturile statice de conversie îmbunătățite ale convertoarelor permit o reglare eficientă a tensiunii, asigurând că tensiunea de ieșire rămâne stabilă chiar și atunci când intrarea din sursele de energie variază semnificativ. Eficiența rămâne ridicată în diverse scenarii. Acest lucru este vital pentru aplicații precum sistemele de energie solară, unde iradierea solară poate varia rapid.
- *Pierderi reduse:* Prin minimizarea solicitărilor asupra semiconductoarelor și optimizarea selecției componentelor, topologiile propuse reduc pierderile de energie în timpul conversiei. Acest lucru duce la o eficiență generală mai mare a sistemului, ceea ce este esențial pentru aplicațiile în care resursele energetice sunt limitate și trebuie utilizate eficient.
- *Integrarea cu strategii avansate de control:* Cercetările viitoare privind implementarea controlului în curent și a strategiilor de control pe „un singur ciclu” cu aceste convertoare pot îmbunătăți suplimentar performanța lor. Aceste tehnici de control pot îmbunătăți timpii de răspuns și stabilitatea, conducând la o mai bună gestionare și utilizare a energiei în sistemele de colectare, precum și la consistența rețelei de cc. În această teză sunt utilizate strategii de control clasice, cum ar fi perturbă și observă (P&O) sau PID.

Așadar, topologiile propuse de convertoare cc-cc contribuie semnificativ la eforturile de implementare a colectării energiilor verzi prin îmbunătățirea eficienței conversiei, reducerea pierderilor și furnizarea unei ieșiri stabile, maximizând astfel potențialul surselor de energie regenerabilă.

## 7. Proiectarea regulatorului automat

Designul controlerului prezentat în această teză este un aspect critic pentru asigurarea funcționării eficiente în buclă închisă a topologiilor propuse de convertoare cc-cc.

### 7.1. Abordarea sistemelor de ordin ridicat

Teza abordează provocările asociate cu proiectarea controlerelor pentru convertoare de ordin ridicat, în special convertorul ZL3 Buck-Boost, care este de ordinul IV. Se utilizează o metodă de reducere de la ordinul IV la ordinul II a funcției de transfer control-ieșire, făcând procesul de proiectare mai gestionabil și tehnicile clasice de control aplicabile. Funcția de transfer control-ieșire estimată pentru convertorul cc-cc ZL3-Buck-Boost este ilustrată în Figura 14, împreună cu cea originală, de ordinul IV. Ca o remarcă despre reprezentarea fazei în diagramă, se poate afirma că, deoarece funcțiile trigonometrice sunt periodice cu perioada de  $360^\circ$ , rezultă că toate graficele de fază sunt practic suprapuse.

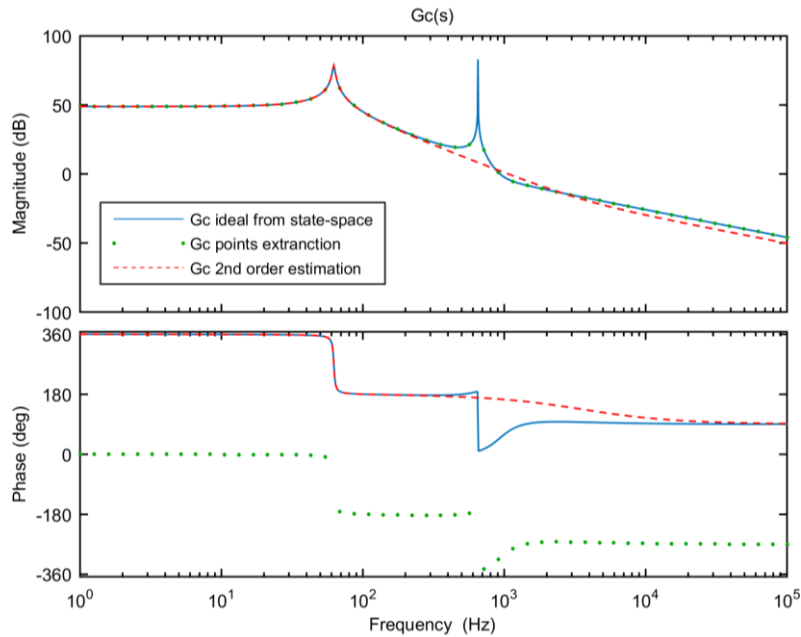


Figura 14. Reprezentările Bodé pentru funcția de transfer control-ieșire a convertorului ZL3-Buck-Boost, punctele extrase și funcția de transfer estimată, pentru reducerea ordinului [original]

## 7.2. Tehnici clasice de control

Designul controlerului se bazează pe metode foarte utilizate, cum ar fi plasarea polilor și zerourilor și metoda factorului  $K$ , care sunt eficiente pentru sistemele de ordinul II. Această abordare permite ajustarea sistematică a parametrilor controlerului pentru a atinge indicatori de performanță doriți, cum ar fi stabilitatea, timpul de răspuns, supra-reglajul, etc.

## 7.3. Simulare și validare

Proiectarea regulatorului automat este validată prin simulări, demonstrând eficiența sa în menținerea unei tensiuni de ieșire stabile și a reglării în condiții de sarcină variabile. Rezultatele indică faptul că regulatorul poate să se adapteze la schimbările sistemului, asigurând performanțe fiabile în aplicațiile practice. Dacă apare o treaptă în sarcină, tensiunea de ieșire a convertorului ZL3-Buck-Boost în buclă închisă rămâne la valoarea dorită, așa cum se poate observa în Figura 15.

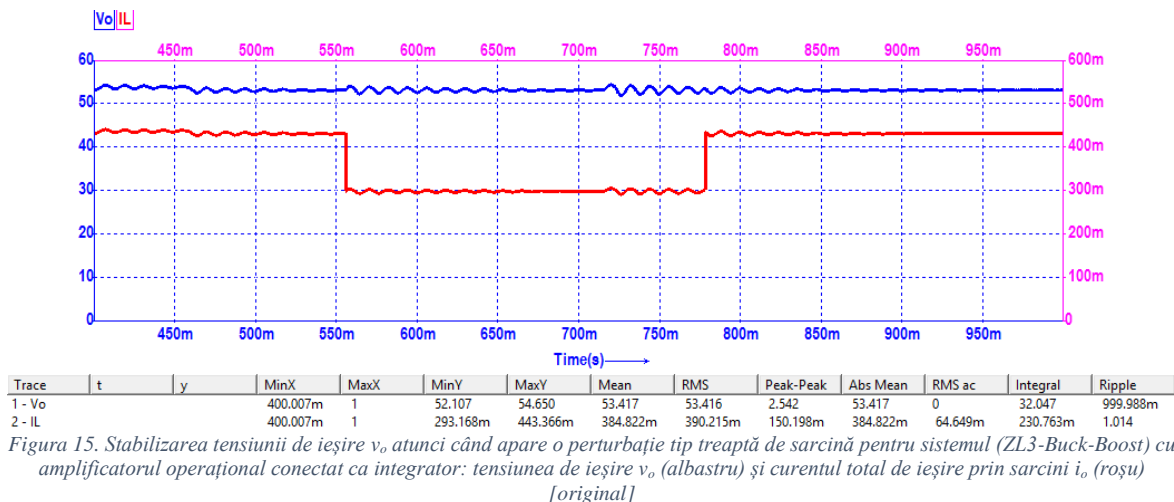


Figura 15. Stabilizarea tensiunii de ieșire  $v_o$ , atunci când apare o perturbație tip treaptă de sarcină pentru sistemul (ZL3-Buck-Boost) cu amplificatorul operațional conectat ca integrator: tensiunea de ieșire  $v_o$  (albastru) și curentul total de ieșire prin sarcini  $i_o$  (roșu) [original]

## 7.4. Aplicabilitate la convertoare similare

Strategia de proiectare dezvoltată în această teză nu este limitată la convertoarele specifice studiate; ci poate fi generalizată și aplicată altor topologii de convertoare similare. Această versatilitate sporește utilitatea practică a cercetării, oferind un cadru pentru proiectele viitoare de controlare în domeniul electronicii de putere.

Se poate afirma că designul regulatorului automat propus în această teză abordează eficient complexitățile sistemelor de convertoare de ordin ridicat, utilizând tehnici clasice și demonstrând performanțe robuste prin simulare, făcându-l o contribuție valoroasă în sfera electronicii de putere.

## 8. Modelarea de semnal mic a convertoarelor care configurează o buclă capacitivă

Modelarea de semnal mic a convertoarelor cu bucle capacitive, așa cum este discutată în teză, prezintă provocări și metodologii unice.

### 8.1. Provocări legate de singularitate

Prezența buclelor capacitive în convertoare, cum ar fi convertorul boost 1L2C, duce la singularitate în una din matricele de sistem. Acest lucru complică abordarea tradițională de deducere a funcțiilor de transfer, deoarece ipoteza de undulații mici și variații lente a tensiunilor pe capacități nu este valabilă.

### 8.2. Tehnici inovatoare de modelare

Pentru a aborda această provocare, teza propune metode alternative pentru modelarea de semnal mic, incluzând modelarea în timp discret și modelarea în timp continuu cu un rezistor de pierdere inserat. Aceste abordări permit gestionarea eficientă a naturii capacitive a buclelor formate prin evitarea inversărilor de matrice și concentrarea pe comportamentul dinamic al sistemului sau transformarea matricei într-una nesingulară.

### 8.3. Calcularea funcției de transfer

Modelul de semnal mic este dedus prin considerarea capacității echivalente a condensatoarelor în paralel și reducerea sistemului la două variabile de stare, deși convertorul 1L2C conține o bobină și două condensatoare. Acest lucru se traduce printr-o funcție de transfer de ordinul II, care se aseamănă cu comportamentul convertoarelor boost clasice, facilitând analiza și proiectarea controlului.

### 8.4. Validare și Aplicare

Modelele de semnal mic dezvoltate sunt validate prin simulări și rezultate experimentale, demonstrând acuratețea lor în asigurarea performanței convertoarelor. De exemplu, diagramele Bodé ale audiosusceptibilității calculate pentru convertorul boost 1L2C utilizând metodele propuse sunt prezentate în Figura 16. Aceste modele sunt esențiale pentru

proiectarea controlerelor și optimizarea funcționării topologiilor care prezintă bucle capacitive în diverse aplicații.

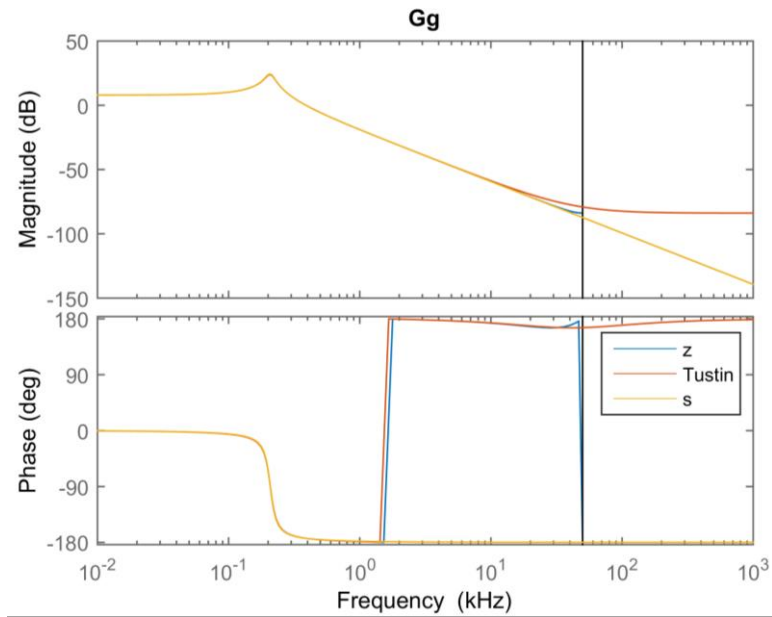


Figura 16. Audiodusceptibilitatea convertorului boost 1L2C în domeniul  $z$ , convertită cu metoda Tustin și în domeniul Laplace [original]

Se poate rezuma că modelul de semnal mic al convertoarelor care configurează o buclă capacivă este abordat eficient în teză prin tehnici inovatoare care depășesc provocările tradiționale, rezultând modele precise, esențiale pentru proiectarea controlului și optimizarea performanței sistemului.

## 9. Concluzii

### 9.1. Principalele descoperiri și contribuții

Teza prezintă câteva contribuții cheie legate de dezvoltarea și analiza noilor topologii de convertoare cc-cc:

- *Topologii inovatoare de convertoare:* Au fost propuse cu succes trei noi convertoare ZL-Buck și trei noi convertoare ZL-Buck-Boost, utilizând metoda rotirii celulei. În plus, au fost introduse două familii de convertoare buck și boost etajate, care prezintă o eficiență și performanță îmbunătățite comparativ cu omoloagele tradiționale.
- *Eficiență și performanță ridicate:* Convertoarele propuse prezintă eficiențe care depășesc 90%, cu rapoarte statice de conversie îmbunătățite și solicitări reduse asupra semiconductoarelor. Aceste îmbunătățiri le fac potrivite pentru aplicații în sistemele de energie regenerabilă, vehicule electrice și electronice portabile.
- *Design eficient al regulatorului automat:* A fost dezvoltată o proiectare robustă a controlerului pentru convertoare, utilizând tehnici clasice de control pentru a gestiona sistemele de ordin ridicat, echivalente cu un sistem de ordinul II. Controlerul a demonstrat o reglare stabilă a ieșirii în condiții de sarcină variabile, validată prin simulări.
- *Perspective asupra modelării de semnal mic:* Teza a abordat complexitățile modelului de semnal mic pentru convertoarele cu bucle capacitive, propunând tehnici inovatoare de modelare care evită singularitățile în matricea sistemului.

Modelele dezvoltate prezic cu acuratețe comportamentul convertorului, facilitând proiectarea și optimizarea controlului. S-a confirmat prin experiment că modelul calculat propus este precis în raport cu dinamica reală a convertorului în comutație.

- *Rezultate ale simulărilor și experimentelor:* Rezultatele simulărilor au relevat indicatori de performanță promițători, cum ar fi solicitările în tensiune și curent, în timp ce validările experimentale au confirmat predicțiile teoretice. Aceste rezultate încurajează investigații suplimentare și implementarea practică a convertoarelor propuse.

În concluzie, teza contribuie semnificativ în domeniul electronicii de putere prin introducerea de noi topologii de convertoare, strategii eficiente de control și tehnici avansate de modelare, deschizând calea pentru o gestionare îmbunătățită a energiei în diverse aplicații.

## 9.2. Direcții de cercetare viitoare și implicații pentru domeniu

Cercetările în curs în domeniul convertoarelor cc-cc se concentrează pe îmbunătățirea eficienței, reducerea costurilor și creșterea fiabilității, explorând limitele a ceea ce este posibil în tehnologia convertoarelor. Realizările acestei teze deschid mai multe direcții pentru cercetări viitoare și au implicații semnificative pentru domeniul electronicii de putere:

- *Strategii avansate de control:* Cercetările viitoare pot explora implementarea tehnicilor avansate de control, cum ar fi controlul pe „un singur ciclu” și controlul adaptiv, pentru a îmbunătăți performanța convertoarelor propuse. Aceste strategii ar putea îmbunătăți răspunsul dinamic și stabilitatea, în special în aplicațiile cu condiții de sarcină în schimbare rapidă.
- *Integrarea cu sistemele de stocare a energiei:* Investigarea integrării noilor topologii de convertoare cu sistemele de stocare a energiei, cum ar fi bateriile și supercondensatoarele, poate duce la soluții îmbunătățite de gestionare a energiei. Această cercetare ar putea să se concentreze pe optimizarea ciclurilor de încărcare și descărcare pentru a maximiza durata de viață și eficiența dispozitivelor de stocare.
- *Aplicarea în rețele inteligente:* Capacitățile convertoarelor pot fi explorate în continuare în contextul tehnologiilor de rețea inteligentă, unde conversia și gestionarea eficientă a energiei sunt critice. Cercetările ar putea să se concentreze pe dezvoltarea algoritmilor de control care permit integrarea fără probleme a surselor de energie regenerabilă în rețea, menținând stabilitatea și fiabilitatea.
- *Gestionarea termică și fiabilitatea:* Studiile viitoare ar putea aborda strategiile de management termic pentru convertoarele propuse pentru a le îmbunătăți fiabilitatea și performanța în condiții de solicitări ridicate. Investigarea materialelor termice de interfață și a proiectării care îmbunătățesc disiparea căldurii va fi esențială pentru funcționarea pe termen lung în medii solicitante.
- *Aplicații mai largi și variații ale topologiilor:* Extinderea cercetărilor pentru a include variații ale topologiilor propuse pentru aplicații specifice, cum ar fi vehiculele electrice, automatizările industriale și electronicele de larg consum, poate duce la soluții personalizate care să răspundă nevoilor diverse de conversie a energiei. Acest lucru ar putea implica explorarea schemelor de convertoare multietajate și a sistemelor hibride.

Rezumând, implicațiile acestor cercetări se extind dincolo de remarcile imediate, încurajând explorarea continuă a noilor topologii, a metodelor avansate de control, a integrării cu sistemele de management energetic și a aplicării în tehnologiile emergente, contribuind în

final la avansarea soluțiilor eficiente și durabile în domeniul electronicii de putere. Pe măsură ce tehnologia continuă să evolueze, atenția pe optimizarea acestor sisteme electronice va fi crucială pentru a răspunde cerințelor electrificării moderne.

## 10. Bibliografie semnificativă

- [1]. S. Ćuk, *Power Electronics: Topologies, Magnetics and Control*, vol. 1, Scotts Valley, California: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015, p. 270.
- [2]. S. Ćuk, *Power Electronics: Modeling, Analysis and Measurements*, vol. 2, Scotts Valley, California: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015, p. 272.
- [3]. S. Ćuk, *Power Electronics: Advanced Topics and Designs*, vol. 3, Scotts Valley, California: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2015, p. 360.
- [4]. S. Ćuk, *Power Electronics: State-Space Averaging and Ćuk Converters*, vol. 4, Scotts Valley, California: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2016, p. 378.
- [5]. R. W. Erickson and D. Maksimović, *Fundamentals of Power Electronics*, 3rd ed., Cham, Switzerland: Springer Nature, 2020, p. 1084.
- [6]. M. Brown, *Power Supply Cookbook*, 2nd ed., London: Newnes, 2001, p. 280.
- [7]. C. Basso, *Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulation and Practical Design*, 2nd ed., McGraw Hill, 2014, p. 992.
- [8]. D. Maksimović and S. Ćuk, "Switching converters with wide dc conversion range," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 6, no. 1, pp. 151-157, January 1991.
- [9]. D. Zhou, *Synthesis of PWM DC-to-DC Power Converters*, Pasadena, California: California Institute of Technology, 1996.
- [10]. M. R. Banaei and H. A. F. Bonab, "A novel structure for single-switch nonisolated transformerless buck-boost dc-dc converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 1, pp. 198-205, January 2017.
- [11]. D. Lascu, *Controlled Energy Transfer Using PWM and Resonant Converter*, Timișoara: Politehnica University Timișoara, 1998.
- [12]. J. G. Kassakian, D. J. Perreault, M. F. Schlecht and G. C. Verghese, *Principles of Power Electronics*, 2nd Edition, Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 2023, p. 875.
- [13]. S. Lyden and E. M. Haque, "Maximum Power Point Tracking techniques for photovoltaic systems: A comprehensive review and comparative analysis," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 52, pp. 1504-1518, 12 2015.
- [14]. A. Gontean, S. Lica, S. Bularka, R. Szabo and D. Lascu, "A novel high accuracy PV cell model including self heating and parameter variation," *Energies*, vol. 11, no. 36, pp. 1-21, 24 December 2018.
- [15]. S. Lica, M. Gurbina, D. Drăghici, D. Iancu and D. Lascu, "A new quadratic buck converter," in *Proceedings of 11th International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timișoara, Romania, 2014.
- [16]. S. Lica, D. F. Iancu, M. Tomoroga, M. Gurbină and D. Lascu, "A new single active switch quadratic buck converter," *International Review of Automatic Control (IREACO)*, vol. 8, no. 5, pp. 346-353, September 2015.
- [17]. B. Axelrod, Y. Berkovich and A. Ioinovici, "Switched-capacitor/switched-inductor structures for getting transformerless hybrid dc-dc PWM converters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 55, no. 2, pp. 687 - 696, March 2008.
- [18]. V. Mummadi, "Two-switch semi-quadratic buck converter," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 2, pp. 1185-1194, 2017.



- [19]. **S. Lica**, M. Gurbină, D. Lascu, I. M. Pop-Călimanu and A. Cireșan, “A novel stacked step-down switching converter,” in *2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP)*, Cheile Grădiștei. Brașov, România, 2017.
- [20]. **S. Lica**, I. M. Pop-Călimanu and D. Lascu, “A new high performance step-down quadratic converter,” in *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, Gliwice, Poland, 2021
- [21]. I. M. Pop-Călimanu, **S. Lica**, S. Popescu, D. Lascu, I. Lie and R. Mîrșu, “A new hybrid inductor-based boost dc-dc converter suitable for applications in photovoltaic systems,” *Energies*, vol. 12, no. 2, pp. 1-32, 15 January 2019.
- [22]. E. Krac and K. Górecki, “Modelling characteristics of photovoltaic panels with thermal phenomena taken into account,” *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 104, pp. 1-7, 2016.
- [23]. **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. 48, no. 115362, p. 18, 2023.
- [24]. **S. Lica**, M. Gurbină, D. Lascu, I. M. Pop-Călimanu, A. Cireșan and R. Szabo, “Multi-staged step-down converter for applications with small difference between input and output voltages”. Romania Patent RO133805A2, 22 March 2018.
- [25]. **S. Lica**, A. Molcuț, I. Lie and D. Lascu, “Small-signal modelling of the three switch 1L2C boost converter,” in *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Pitești, Romania, 2020.
- [26]. **S. Lica**, I. Lie, A. N. Wegner and I. M. Pop-Călimanu, “A generalized model for single-switch stacked step-down converters,” in *2020 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, Timișoara, Romania, 2020.
- [27]. **S. Lica**, I. M. Pop-Călimanu, D. Lascu, A. Cireșan and M. Gurbină, “A new stacked step-up converter,” in *2017 40th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Barcelona, Spain, 2017.
- [28]. **S. Lica**, V. Vătău, D. Lascu and M. Tomoroga, “A generalized model for stacked boost single-switch converters,” in *2020 IEEE 26th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Pitesti, Romania, 2020.
- [29]. **S. Lica**, M. V. Popescu, I. Lie and D. Lascu, “A new triple-stacked step-up converter for high-voltage gain,” in *2023 IEEE 29th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*, Craiova, Romania, 2023.
- [30]. R. Tymerski, “Application of the time-varying transfer function for exact small-signal analysis,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 9, no. 2, pp. 196-205, March 1994.