

Universitatea POLITEHNICA din București  
Facultatea de Energetică  
Departamentul pentru Producerea și Utilizarea Energiei



## ***Rezumatul Tezei de Doctorat***

### ***Modelarea și simularea sistemelor energetice hibride în contextul integrării tehnologiilor de decarbonatare***

Autor: Drd. Ing. Dana-Alexandra CIUPAGEANU

Coordonator științific: Prof. Dr. Ing. Gheorghe LAZAROIU

București

2021



Universitatea POLITEHNICA din București  
Facultatea de Energetică  
Departamentul pentru Producerea și Utilizarea Energiei



Decizia nr. 678 / 31.05.2021

## ***Rezumatul Tezei de Doctorat***

### ***Modelarea și simularea sistemelor energetice hibride în contextul integrării tehnologiilor de decarbonatare***

***Autor:*** Drd. Ing. Dana-Alexandra CIUPAGEANU

***Coordonator științific:*** Prof. Dr. Ing. Gheorghe LAZAROIU

Comisia de Doctorat

Presedinte	Prof. Dr. Ing. Constantin BULAC	De la Universitatea Politehnica din București, Romania
Coordonator	Prof. Dr. Ing. Gheorghe LAZAROIU	De la Universitatea Politehnica din București, Romania
Referent	Prof. Dr. Ing. Roberto CIPOLLONE	De la Universitatea din L'Aquila, Italia
Referent	Prof. Dr. Ing. Violeta Vali CIUCUR	De la Universitatea Maritimă din Constanța, Romania
Referent	Prof. Dr. Ing. Cristian Florian DINCA	De la Universitatea Politehnica din București, Romania

***București***

***2021***

---

### *Rezumat teza de doctorat*

Sistemele alternative de generare a energiei cu impact redus asupra mediului și avantajoase din punct de vedere economic sunt o problemă globală majoră. Având în vedere evoluția tehnologică a echipamentelor integratoare ale sistemelor de conversie a energiei, faptul că cele mai multe dintre ele au devenit competitive din punct de vedere economic cu cele convenționale, dar și concentrarea politicilor energetice către creșterea ponderii surselor regenerabile în acoperirea cererii de energie, mixul energetic devine progresiv mai complex. Prin urmare, numai în ultimul deceniu, capacitățile instalate în tehnologiile regenerabile s-au dublat, urmând o tendință similară la nivel global și continental; la nivelul fiecărei țări, cu toate acestea, există o serie de factori care particularizează evoluția în timp a capacităților instalate. Având în vedere implicațiile economice ale variabilității energiei din surse regenerabile, atât în ceea ce privește integrarea în sistemul de energie electrică, cât și menținerea unui nivel adecvat de stabilitate și fiabilitate, studiile în acest domeniu sunt în prezent de mare interes.

Deși există numeroase avantaje ale extinderii utilizării surselor regenerabile de energie, lipsa sincronizării dintre producția lor și cererea de energie împiedică la un moment dat dezvoltarea lor mai rapidă. Stocarea energiei electrice este soluția care permite nu numai creșterea eficienței producției de energie utilizând tehnologii regenerabile, ci și separarea producției și consumului în timp și spațiu. Acest lucru facilitează tranziția la sistemele distribuite și îmbunătățește performanța la nivel de sistem. În plus, tehnologiile de decarbonizare sprijină complementar integrarea energiei regenerabile și îmbunătățirea performanțelor sistemului.

Ca o consecință a creșterii cererii de energie, sursele tradiționale de energie se apropie de epuizare, iar emisiile nocive de gaze cu efect de seră trec prin acoperiș. Pentru a asigura menținerea echilibrului energetic în orice moment și atenuarea impactului asupra mediului, RES a trebuit să își mărească penetrantion. În comparație cu sursele de energie tradiționale și complet controlabile, SRE se caracterizează prin caracteristici foarte fluctuante, astfel încât acestea sunt adesea exploatate în combinație cu sistemele de stocare a energiei (ESS) în sistemele hibride interconectate sau de la distanță. Soluțiile inovatoare disponibile pe piață permit îmbunătățirea fiabilității sistemelor și îmbunătățirea calității energiei. Progresul tehnic în domeniul generării distribuite și al integrării SSE indică sistemele energetice hibride, care

---

cuprind sisteme de producție/stocare multiple ca soluție viabilă pentru a depăși problemele legate de incertitudinea SRE.

Evaluările efectuate de Agenția Internațională pentru Energie (AIE) estimează că, în urma angajamentelor puse în aplicare în consecință la Acordul de la Paris privind schimbările climatice, rata globală de creștere a emisiilor de CO<sub>2</sub> va fi redusă până la o medie anuală de 160 de milioane de tone în 2040 (în comparație cu creșterea medie anuală de 650 de milioane de tone observată din 2000). Conform acestor strategii, capacitățile de generare a SRE au crescut cu 183% la nivel mondial în ultimii 14 ani. Acest timp de 14 ani este selectat pentru a acoperi primul an în care noile tehnologii SRE (în special energia eoliană) sunt prezente în balanța energetică din România, deoarece această țară este aria de interes a studiului prezentat în teză.

Teza de doctorat intitulată *Modelarea și simularea sistemelor energetice hibride în cadrul integrării tehnologiilor de decarbonizare*, abordează provocările legate de sistemele hibride de penetrare ridicată a energiei regenerabile și soluții inovatoare pentru atenuarea potențialelor dezavantaje, crescând în același timp performanțele operaționale.

În acest sens, *Capitolul I* prezintă o analiză detaliată a cadrului energetic actual, oferind comparații și analize cuprinzătoare ale sistemului românesc în contextul stabilit de politicile europene și globale. Sunt investigate caracteristicile energiei din surse regenerabile, se evaluează emisiile de dioxid de carbon și se discută tendințele evolutive economice tehnice, pe baza unei revizuirii ample a datelor reale și a literaturii științifice.

Capitolul I prezintă o analiză detaliată a cadrului energetic actual, oferind comparații și analize cuprinzătoare ale sistemului românesc în contextul stabilit de politicile europene și globale. Noile contribuții ale acestui capitol sunt legate de investigarea evoluției energiei din surse regenerabile și de impactul asupra mediului al sistemului energetic, evaluat în ceea ce privește emisiile de CO<sub>2</sub>. Seturi de date și statistici reale extinse sunt prelucrate pentru a oferi o revizuire cuprinzătoare și pentru a evidenția perspectivele privind energia din surse regenerabile, emisiile de dioxid de carbon, tendințele economice evolutive tehnologice în domeniul sistemelor hibride de energie din surse regenerabile.

În acest capitol se realizează o analiză privind corelația dintre disponibilitatea teritorială a SRE în România și distribuția populației, cu scopul de a discuta posibile soluții fezabile pentru creșterea ponderii SRE în balanța energetică a României. Pe baza estimărilor potențiale și a înregistrărilor statistice, disponibilitatea SRE și răspândirea regională a populației sunt suprapuse pentru toate cele 42 de regiuni, inclusiv capitala. Este evident că valorile maxime nu

---

sunt corelate (fiind evaluate la 2572,5 MW în regiunea 15, respectiv 7913,6 persoane la km<sup>2</sup> în regiunea 10, care reprezintă capitala), prezentând probleme de transport și încărcare a infrastructurii în sistemele centralizate.

În plus, în ultimii zece ani, în România, a fost elaborat un algoritm de calcul al cererii și producției pe surse (nucleară, cărbune, hidrocarburi, hidro, eoliană, fotovoltaică și biomasă). În ultimii zece ani, în România, a fost dezvoltat un algoritm care utilizează software-ul Matlab pentru a calcula unele cantități reprezentative pe an: cererea totală; energia totală generată și de sursa primară; ponderea energiei regenerabile în cererea de energie electrică, inclusiv energia hidro; capacitatea medie utilizată pentru fiecare sursă; și emisiile totale de dioxid de carbon. Potrivit rezultatelor, până în 2024 emisiile totale de CO<sub>2</sub> din sectorul energetic românesc vor scădea cu 44,86% din 2007 și cu 22,82% față de 2020. Energia nucleară și energia din surse regenerabile, cu excepția hidro, contribuie cel mai puțin la cantitatea totală de emisii de CO<sub>2</sub>. Participarea hidroenergiei la cantitatea totală de emisii de CO<sub>2</sub> este comparabilă cu cea a centralelor electrice pe hidrocarburi pentru sistemul energetic românesc. Creșterea ponderii energiei din surse regenerabile în producția de energie electrică ca urmare a mai multor factori, ar fi constrângerile de mediu, aspectele tehnice și economice sau implicațiile sociale, conduce la o reducere corespunzătoare a emisiilor totale de CO<sub>2</sub>. După s-a arătat anterior, această dependență urmează aproximativ o tendință liniară descrescătoare.

În continuare, **Capitolul II** prezintă o analiză detaliată a variabilității energiei regenerabile în România, bazată pe înregistrări de date de 14 ani la nivel real de sistem. O metodologie specifică este definită pentru acest domeniu, investigând intervalul de încredere pentru fiecare sursă de SRE, evidențiind cele mai variabile tipologii. În plus, pentru a răspunde provocărilor unei astfel de variabilități, mai multe soluții de atenuare sunt revizuite cu atenție. Sunt analizate tehnologiile de stocare și abordările de la putere la gaz. Analiza bazată pe intervalul de încredere al vârfurilor medii, permite, de asemenea, evidențierea neconcordanțelor dintre profilul cererii și profilurile de generare a SRE, cu referire în special la sursa de vânt. Pentru a răspunde provocărilor unei astfel de variabilități, mai multe soluții de atenuare sunt revizuite cu atenție. Printre acestea, tehnologiile de stocare și abordările de la putere la gaz sunt revizuite în detaliu.

**Capitolul III** prezintă principiul metanizării și revizuieste principiul de bază, compararea performanței diferitelor tehnologii și discută perspectivele de integrare în contextul integrării energiei din surse regenerabile. Capitolul III prezintă principiul metanării dioxidului de carbon,

---

ca un mod de a obține neutralitatea carbonului și revizuieste principiul de bază, compararea performanței diferitelor tehnologii și discută perspectivele de integrare în contextul integrării energiei din surse regenerabile.

Într-un cadru foarte orientat spre inovare și dezvoltarea de noi tehnologii, este necesară o cercetare intensivă pentru a permite penetrarea pieței și difuzarea largă a soluțiilor de ultimă generație. Tehnologiile îmbunătățite și foarte eficiente sunt încă necesare pentru a atinge niveluri acceptabile de emisii, asigurând în același timp atenuarea efectelor legate de SRE asupra comportamentului sistemelor energetice. În sistemele de energie regenerabilă cu penetrare ridicată, variabilitatea surselor de producere a energiei electrice trebuie atenuată, pentru a permite exploatarea optimă a acestora. În acest scop, acestea trebuie să cuprindă resurse de flexibilitate (cum ar fi dispozitivele de stocare) unități de generare suplimentare complet controlabile (grupuri diesel, de exemplu) și, uneori, cerere flexibilă. În acest context de generare a energiei limitat din punct de vedere ecologic și din ce în ce mai nesigur, documentul abordează selectarea catalizatorilor pentru un rezervor de metanizare, eventual cuplat la un generator diesel, având în vedere o abordare inovatoare și integratoare în cadrul sistemelor energetice hibride. Se subliniază necesitatea de a stabili o soluție de compromis, accesibilă și capabilă să asigure valori ridicate ale ratei de conversie a CO<sub>2</sub> și selectivitate în formarea CH<sub>4</sub>, în condiții de presiune și temperatură care implică un consum redus de energie.

**Capitolul IV** introduce conceptul de tehnologie de metanizare pentru reducerea emisiilor de dioxid de carbon. În primul rând, compoziția gazelor de ardere este investigată, apoi integrarea unei facultăți în sistemele energetice hibride pentru a obține neutralitatea carbonului. Tehnologiile de conversie a energiei electrice în agenți energetici pe termen lung gaz-gaz (P2G) joacă un rol esențial în dezvoltarea contemporană a sistemelor energetice cu emisii scăzute de dioxid de carbon. P2G este o soluție viabilă pentru stocarea energiei regenerabile foarte variabile pe termen mediu și lung, asigurând astfel satisfacerea dezechilibrelor de timp dintre producția de energie și cerere în contextul incert actual. Principiul de bază al P2G constă în producerea unui gaz combustibil (care poate fi stocat sau injectat în rețeaua de distribuție) utilizând:

- energie regenerabilă pentru obținerea hidrogenului (H<sub>2</sub>) prin electroliză;
- o sursă suplimentară de dioxid de carbon (CO<sub>2</sub>) pentru producția de gaz natural sintetic (SNG), cu un conținut ridicat de metan (CH<sub>4</sub>), în reacția de metanizare.

Se subliniază faptul că decarbonizarea prin metanizare este fezabilă din punct de vedere tehnic printr-o combinație de tehnologii (reactor de metanizare, electrolizor pentru producția de H<sub>2</sub>

---

etc.). Prin urmare, producția de CH<sub>4</sub> în procesele de decarbonare nu este în prezent competitivă din punct de vedere economic cu tehnologia convențională de producție dacăse intenționează utilizarea CO<sub>2</sub> atmosferic. O posibilă soluție mai accesibilă și mai implementabilă într-un timp mai scurt este prin "reutilizarea" CO<sub>2</sub> emis de instalații poluante. Acest concept se încadrează în domeniul tehnologiilor de captare și utilizare a carbonului, care pot elimina emisiile de CO<sub>2</sub> generate în funcționarea diferitelor centrale poluante (cum ar fi centralele electrice convenționale). Prin urmare, funcționalitatea tehnologiei discutate în această lucrare arată un potențial uriaș de cercetare, fiind încă mai puțin investigată și exploatată.

Se subliniază faptul că decarbonarea gazelor de eșapament și utilizarea conținutului său de CO<sub>2</sub> ca sursă de carbon pentru producția de metan sprijină depășirea problemelor critice din sistemele energetice actuale (cum ar fi unitățile de putere pe bază de combustibili fosili care captează gazele de ardere). Utilizarea CO<sub>2</sub>, în plus față de depozitarea sa pare o opțiune foarte atractivă pentru controlul și reducerea emisiilor. În prezent, ocuparea forței de muncă CO<sub>2</sub> ca materie primă chimică este restrânsă doar la unele procese: sinteza producției de uree, acid salicilic și policarbonați. Cu toate acestea, utilizarea reală reprezintă un procent foarte scăzut din potențialul de CO<sub>2</sub> disponibil.

Scenariile de generare a energiei cu emisii reduse de CO<sub>2</sub> sunt investigate în detaliu, de cele mai multe ori cuprinzând instalații de decarbonizare. CO<sub>2</sub> metanation nu este utilizat pe scară largă în prezent, cu doar câteva proiecte pilot de operare (cu puteri nominale sub 6 MW). În consecință, sunt necesare cercetări și demonstrații suplimentare.

Se subliniază faptul că integrarea instalațiilor de metan la ieșirea din instalațiile de ardere este o abordare multidisciplinară, a aspectelor chimice și energetice. Contribuția remarcabilă a abordării depoluante propuse se referă la interconectarea tehnologiilor moderne și clasice pentru obținerea energiei verzi și, urmărind decarbonizarea sectorului energetic.

Simulări extinse pentru modele hibride sunt prezentate în **Capitolul V**. Toate modelele de simulări sunt definite în raport cu datele reale corespunzătoare sud-estului României, unde este implementată o instalație pilot complexă. Toate simulările privesc componentele instalației și validarea acestora.

În primul rând, o turbină eoliană - sistemul generator diesel este modelat. Se demonstrează că, implementând o a doua sursă de tensiune, ar fi generatoare diesel, îmbunătățește fiabilitatea și performanțele surselor de alimentare intermitente, îmbunătățind continuitatea alimentării. Modelul abordat în această cercetare permite analiza interacțiunii dintre componentele sale. În

---

plus, acesta cuprinde date meteorologice de intrare, pentru a lua în considerare în mod corespunzător variabilitatea inerentă a

În al doilea rând, o matrice PV - celula de combustibil este investigată, definind un anumit controler logic fuzzy pentru aceasta. Se poate observa că controlerul logic fuzzy permite o tranziție mai rapidă între state, răspunzând atât reducerilor, cât și creșterilor de putere necesare PEMFC. În plus, puterea PEMFC este întotdeauna adusă la valoarea țintă. Se subliniază faptul că controlerul fuzzy permite o performanță îmbunătățită a sistemelor în ceea ce privește alimentarea sarcinii în urma referinței.

În al treilea rând, o matrice PV - sistemul de baterii este analizat. Tipurile noastre de tehnologii de baterii, reprezentate de un Li-ion, un Ni-Cd, un NiMH și un plumb-acid sunt luate în considerare pentru a observa comportamentul lor la paritatea puterii. Având în vedere că primele trei tehnologii de stocare electrochimică prezintă un comportament foarte similar în condiții dinamice, alegerea uneia dintre ele se bazează în principal pe criterii economice, nu numai ca investiții implicate, ci și ca costuri legate de fiabilitatea aprovizionării. Obiective de cercetare suplimentare care utilizează sisteme de stocare hibride și efectuează simulări, de asemenea, conectarea ulterioară a micro-rețelei la rețea.

În al patrulea rând, o turbină eoliană – este reprezentat sistemul de baterii. Această cercetare a abordat un model de simulare pentru o aplicare a controlului predictiv al modelului privind gestionarea exploatarea unui sistem de stocare a energiei bateriei într-o centrală electrică de energie eoliană, cu scopul de a stabili o configurație adecvată a controlerului. Structura propusă a MPC a arătat un comportament stabil în scenariul dinamic simulat. În cadrul cercetărilor ulterioare, vom dezvolta structura de control și vom evalua performanța acesteia în anumite cadre, pe baza datelor statistice disponibile.

În cele din urmă, se propune o structură hibridă complexă pentru a exploata avantajele configurațiilor poligenerării, inclusiv dispozitivele de stocare și tehnologiile neîntreruptibile de alimentare cu energie electrică. Mai detaliat, S RES au fost selectate ținând seama de disponibilitatea locală, pentru a spori independența energetică la nivel local. Secțiunea de stocare cuprinde două dispozitive, cu caracteristici de răspuns diferite și adecvare în intervalul de timp (baterie Li-ion pentru timp scurt și celulă reversibilă de combustibil din oxid solid pentru o perioadă medie și lungă de timp). Microgrila ar putea funcționa în modul interconectat, pentru a asigura fluxul de supraproducție către zonele cu lipsă de producție. În plus, un grup diesel echipat cu o unitate de metanizare este integrat în microgrilă, subliniind caracteristicile de captare și utilizare a carbonului într-un cadru de dezvoltare durabilă.



---

Arhitectura hibridă analizată în această cercetare cuprinde o aplicație la scară mică conectată la rețea, dar capabilă să funcționeze ca un sistem de sine stătător. Acesta cuprinde o turbină eoliană de 1,5 kW, o matrice fotovoltaică de 5 kW, un generator diesel de 8,8 kW și o baterie de 5,6 kWh. Configurația propusă corespunde unei instalații pilot din România, situată în regiunea Constanța.

Configurația multi-generare, corelată cu capacitățile de stocare și instalațiile de metanizare, cu sistemul de control și monitorizare corespunzător se încadrează în conceptul de rețea inteligentă regenerabilă.

Această cercetare abordează fezabilitatea unui sistem de putere de penetrare a SRE ridicat, axat pe condițiile din România. Analiza realizată demonstrează că există încă peste 50% potențial SRE neexploatat disponibil la scară regională pe teritoriul României. Acest lucru permite o creștere suplimentară a ponderii SRE în îndeplinirea echilibrului energetic național, variind în prezent în jurul valorii de 50 % dacă include centralele hidroelectrice mari. Astfel, dacă va implementa abordări similare cu cele introduse în studiul de față, România ar putea obține o creștere suplimentară de până la 10% a ponderii SRE. Dacă ar fi corelată cu tehnologiile de decarbonizare propuse, reducerea emisiilor nocive ar fi semnificativă.

Ratele ridicate de penetrare a SRE necesită o abordare multi-criterii pentru selectarea tehnologiei de stocare adecvate și dimensionarea puterii / capacității. Studii recente indică faptul că o capacitate de stocare de 6% din cererea anuală de energie este suficientă pentru a obține o cotă de 100% din SRE. În acest scop, sunt necesare tehnologii de alimentare cu gaz, de asemenea, în configurații hibride cu alte tehnologii de stocare, realizând atât echilibrarea pe termen lung, cât și pe termen scurt a fluctuațiilor SRE.

Contribuțiile tezei sunt detaliate în *Capitolul VI*, împreună cu concluziile generale și perspectivele de cercetare ulterioare. Principalele contribuții ale prezentei teze de doctorat constau în abordarea originală în analiza, modelarea și simularea sistemelor energetice hibride în contextul creșterii penetrării SRE și a țintelor neutre de carbon. Simulări extinse sunt efectuate în mediul Matlab. Calitatea și impactul rezultatelor cercetării sunt demonstrate prin numărul mare de lucrări științifice publicate în revistele Q1 și Q2, lucrările conferinței ISI și Scopus, astfel sunt detaliate în lista de publicații.

Dintr-o perspectivă de flexibilitate, se subliniază faptul că cerințele sunt reduse dacă sistemele adiacente își partajează resursele de alimentare de rezervă. Deoarece configurația propusă a microgrilei este echipată cu tehnologii gratuite de generare și stocare, astfel de arhitecturi

---

distribuite permit creșterea independenței energetice și a performanțelor ridicate de funcționare, alternând ca sursă online convenabilă pentru a satisface cererea de energie.

Trebuie menționat faptul că o creștere suplimentară a cotei de SRE poate fi realizată dacă se exploatează potențialul energetic al valurilor disponibil în Marea Neagră. Deși există mai multe investigații descrise în literatura de specialitate în această privință, deoarece nu există încă facilități operaționale, această categorie de SRE nu este luată în considerare în prezentul studiu.

În concluzie, trecerea la o structură descentralizată de generare este o alternativă fezabilă în România, dar având în vedere neconcordanța teritorială puternică dintre potențialul RES și înființarea comunităților energetice, microgrilele independente și economice accesibile nu sunt încă o soluție viabilă. Microgrilele interconectate din poligenerare, inclusiv secțiunile de stocare hibridă și instalațiile neîntreruptibile de alimentare cu energie electrică, sunt, pe baza conturului propus, permit dezvoltarea unui sistem energetic extrem de eficient și durabil.

Trebuie efectuate analize detaliate suplimentare pentru a defini configurația specială a microgrilei și pentru a evalua performanțele acestora.