Universitatea Națională de Știință și Tehnologie
Politehnica București
Facultatea de Energetică
Departamentul Sisteme Electroenergetice

Rezumatul Tezei de Doctorat

Soluții hibride AC/DC pentru rețelele electrice de distribuție: microrețele, legături la tensiune continuă, stocarea energiei electrice, PV, VE

Conducător științific:
Prof. Dr. Ing. Mihai Sănduleac

Student doctorand:
Ing. Teodor-Ioan Diaconu

1. Studiul critic al datelor de literatură

Contextul actual al sistemelor energetic la nivel național și internațional, marcat de nevoia de reducere a gazelor cu efect de seră, țintele impuse la nivelul Uniunii Europene, mai ales prin Pactul Verde European, înmulțirea accelerată a numărului de mașini electrice, apariția hidrogenului ca vector energetic, descentralizarea producției, digitalizarea rețelelor etc., aduce cu sine nevoia adaptării rapide a sistemelor electroenergetice.

Bazate în mare măsură pe tehnologii la tensiune alternativă (t.a.) de peste un secol, sistemele electroenergetice încep a fi completate de către tehnologii la tensiune continuă (t.c.). Acest fenomen se datorează avansurilor importante din domeniul electronicii de putere.

Există deja dezvoltări în care tehnologiile la t.c. au aplicații importante și în care există numeroase implementări la nivel global, înlocuind tehnologiile tradiționale la t.a.. Demne de menționat aici sunt transportul de puteri mari pe distanțe lungi (HVDC), interconectarea în asincron a rețelelor și conectarea fermelor eoliene offshore, toate la nivel de înaltă tensiune.

Din punct de vedere economic, liniile HVDC sunt mai economice decât cele HVAC pentru distanțe mari (aproximativ 500 km). Deși investiția inițială (CAPEX) în HVDC este mai mare decât în cazul HVAC din cauza costului stațiilor de transformare, costurile de operare (OPEX) este mai mică datorită pierderilor mai mici de putere.

Pornind de la zona de înaltă tensiune, aceste tehnologii pătrund și în zona de medie și joasă tensiune. Aici, ele beneficiază de câteva avantaje importante, în comparație cu tehnologiile clasice la tensiune alternativă, acestea fiind: densitate mai mare de putere, îmbunătățirea integrării surselor de energie regenerabilă distribuită, controlabilitate crescută și compatibilitate mai bună cu cablurile de electricitate.

Însă, la momentul actual, rețelele de medie tensiune au lungimi scăzute, sunt buclate, nivelurile de tensiune și echipamentele folosite sunt bine standardizate în cazul tehnologie la tensiune continuă și întreruptoarele sunt mai scumpe în cazul tensiunii continue. Din această cauză, rețelele hibride MVAC/MVDC întârzie să apară pe scară largă.

Obiectivul tezei de doctorat derivă din necesitatea de evoluție către rețelele inteligente ale actualelor sisteme electroenergetice cauzată de punctele descrise anterior. Elementul principal al tezei este reprezentat de nevoia comunităților energetice inteligente din mediul rural sau urban, conectate sau nu la rețeaua publică, de a fi alimentate cu energie electrică din surse prietenoase față de mediu. Considerând faptul că în multe cazuri, este dificilă construcția de rețele noi, sursele de energie regenerabilă necesită invertoare pentru a se conecta la rețeaua t.a., iar o parte semnificativă a consumatorilor pot funcționa alimentați la t.c., o soluție poate fi utilizarea rețelelor hibride AC/DC.

Dintre avantajele MVAC merită amintite:

A. Cea mai mare parte a rețelei de medie tensiune existentă este la tensiune alternativă

Deși prima rețea electrică din lume, realizată la New York în 1882 de Thomas Edison, a fost realizată la tensiune continuă, tehnologia ce a ajuns să domine lumea în urma „Războiului Curenților” la scurt timp după este cea la tensiune alternativă, începând cu 1892, ca urmare a inventării transformatorului și a mașinii electrice asincrone. La momentul respectiv, rețeaua la t.c. trebuia să aibă același nivel de tensiune în fiecare punct al său din cauza imposibilității tehnice de a transforma nivelul de tensiune cu tehnica disponibilă atunci, ceea ce ar fi dus la pierderi ridicate și la lipsa de rentabilitate a investiției. În cazul tehnologiei la tensiune alternativă, acest lucru a fost posibil de atunci,

chestiune ce a contribuit la adoptarea acestei variante la nivelul întregii lumi. În zilele noastre, impedimentul ce a contribuit la ignorarea tensiunii continue în trecut nu mai este o problemă. Ca urmare, majoritatea consumatorilor sunt alimentați astăzi la t.a..

B. Necesitatea de standardizare

În prezent, există numeroase standarde importante pentru t.a. pentru nivele de tensiune, frecvență și, ca urmare, pentru echipamente. Acest element este în curs de dezvoltare și pentru MVDC.

Pe lângă acestea, MVDC poate contribui cu următoarele avantaje:

A. Densitate mai mare de putere

În anumite cazuri, precum în zonele urbane/industriale dense, unde nivelul de electrificare crește, poate fi dificilă și neeconomică întărirea rețelei. Din motive non-electrice (de mediu, de spațiu etc.), creșterea nivelului de putere al cablurilor și transformatoarelor existente sau trasarea unor elemente noi de rețea fiind dificilă sau imposibilă determină, astfel, nevoia de a utiliza mai eficient activele și traseele existente. De aceea, trecerea unor porțiuni ale rețelei de la t.a. la t.c. poate fi considerată o soluție în această situație, la fel ca și în cazul HVDC. În cazul MVDC, domeniul de tensiune considerat la momentul actual este de 10-70 kV.

B. Controlabilitate îmbunătățită

O legătură HVDC, MVDC sau LVDC de tip VSC poate controla atât fluxul de putere, cât și modulul puterilor activă și reactivă independent una față de cealaltă. Un asemenea lucru nu este posibil în cazul unei legături obișnuite la t.a. fără echipamente suplimentare.

C. Număr crescând de consumatori de energie electrică la tensiune continuă

Numeroși consumatori casnici sau noncasnici sunt, în esență, consumatori de energie la t.c.. Creșterea numărului de electronice utilizate și a diverselor procese industriale a crescut necesarul de energie la t.c., care deocamdată este acoperită prin transformarea din t.a. în t.c..

D. Integrare îmbunătățită a producătorilor bazați pe invertoare, pe bază de surse regenerabile de energie.

Îmbunătățiri recente ale tehnologiei convertoarelor au dus la apariția tehnologiei MMC. Aceasta reprezintă o variantă îmbunătățită, mai complexă, a celei VSC. În cadrul MMC, o valvă este alcătuită dintr-un număr mare de comutatoare conectate în serie, lucru ce permite obținerea unei tensiuni alternative în trepte, prin controlarea individuală a modulelor.

Legăturile HVDC de tip back-to-back sunt un tip de legătură folosit deja în numeroase cazuri, precum conectarea a două rețele cu frecvențe diferite (Brazilia-Argentina, Brazilia-Paraguay, Brazilia-Uruguay, Japonia), a două rețele cu aceeași frecvență dar cu reguli diferite pentru reglajul puterii active sau în interiorul aceleiași rețele pentru a putea izola mai ușor defectele sau pentru a conecta două noduri cu o diferență prea mare a argumentului tensiunilor.

Aceste utilizări, adaptate unei structuri cu multiple terminale, se pot utiliza și la nivelul rețelelor de medie tensiune, contribuind la creșterea flexibilității și nivelului de control la nivelul operatorilor de rețele de distribuție, dar și a nivelului de interconectare între operatori diferiți, inclusiv din țări diferite. Aceste elemente contribuie și la transformarea operatorilor rețelelor de distribuție în operatori de sistem, completând rolul operatorilor rețelei de transport și sistem.

Cea mai simplă conexiune MVDC sau LVDC care poate fi introdusă într-o zonă urbană densă este legătura back-to-back, denumită „soft open point” (SOP). Aceasta înlocuiește conceptul tradițional de „normal open point” (NOP), reprezentat de separatorul clasic din cadrul unei rețele buclate de medie sau joasă tensiune. Spre deosebire de NOP, SOP contribuie activ la dirijarea fluxului de putere între cele două ramuri conectate, contribuind la stabilitatea rețelei. Cu ajutorul SOP, rețeaua poate deveni radială sau buclată. Un exemplu de legătură a fost implementat în Marea Britanie.

Rețelele de tip insular/izolate (electrice și/sau geografice) și consumatorii aflați la mare distanță de rețea suferă de multe ori din cauza dezechilibrului dintre producția și consumul de putere. Insulele geografice situate în aproprierea țărmului sunt, uneori, alimentate și de pe continent printr-o legătură la t.a., însă există situații când nici aceasta nu poate compensa căderea de tensiune ce apare la nivelul insulei prin injecția de putere reactivă, iar alte metode pot fi nerentabile. În asemenea cazuri, soluția tehnico-economică poate fi reprezentată de o legătură MVDC cu două terminale între continent și insulă, legătură asemănătoare cu una HVDC clasică.

Localitățile rurale aflate la mare distanță de rețeaua publică pot fi conectate la aceasta printr-o legătură de tip MVDC, ce are pierderi mai mici decât o legătură clasică la t.a. De asemenea, legătura în t.c. se poate extinde până la nivel de joasă tensiune cu ajutorul conversiei t.c.-t.c. Întreaga (micro)rețea a localității, hibridă, cu elemente t.c. și t.a. ar putea funcționa și în regim insularizat dacă deține suficientă capacitate de producție și stocare, iar consumatorii neesențiali sunt dispecerizabili. Un alt caz este opusul celui relatat, în care o rețea izolată produce mult mai mult decât consumă, iar această energie trebuie evacuată.

Un astfel de exemplu valoros îl reprezintă proiectul ANGLE-DC, care reutilizează o legătură la t.a. de 33 kV între nordul Țării Galilor și insula Anglesey. Insula Anglesey a evoluat de la o rețea lipsită de producție, dependentă de cea a insulei Marii Britanii, la una cu peste 80 MW instalați, majoritatea fiind însă din surse regenerabile variabile. Proiecte de regenerare urbană au dus și la o creștere a consumului. Pentru exportul/importul energiei electrice pe insulă, limitele termice și ale tensiunii admise ale legăturii existente de 33 kV t.a. ar fi fost astăzi depășite. Soluția tradițională ar fi implicat întărirea rețelei prin capacități noi de distribuție. Abordarea luată în calcul a fost totuși aceea a transformării conexiunii existente într-una MVDC, fără a înlocui nici o componentă, de ±27 kW t.c., valoare calculată pentru conversia unei legături dublu circuit, în care izolatoarele rezistă la o t.c. echivalentă celei alternative de vârf fază-pământ.

Un alt exemplu este alimentarea unei platforme maritime din apropiere de Wenchang, China. Aceasta era inițial alimentată printr-o legătură submarină în cablu MVAC. Supratensiunile apărute la repornirea alimentării platformei au distrus, în timp, izolația cablurilor. Generatoarele diesel de la bordul platformei izolate fiind insuficiente, scumpe de operat și zgomotoase, platforma a fost reconectată în cadrul unui proiect pilot printr-o legătură nouă MVDC de ±15 kV, 8 MW.

În timp ce rețelele de MT beneficiază de multe dintre caracteristicile celor de ÎT, deși există diferențe, modelarea acestora și calculul regimului permanent, se face într-un mod identic. Principala diferență ce apare în rețelele de JT ce afectează modul în care se pot modela acestea este dezechilibrul prezent între faze. Cauza acestei situații sunt consumatorii monofazați, în mod special cei de putere mare precum stații de încărcare pentru mașini electrice monofazate, pompe de căldură monofazate, dar și producția distribuită monofazată, de exemplu invertoare monofazate. O metodă prin care se poate realiza analizei unor asemenea rețele este prin includerea conductorului neutru suplimentare față de cele trei faze. În cazul studierii unei rețele de joasă tensiune hibride AC-DC, aceste dezechilibre ar trebui să

poată fi gestionate pe partea la t.a. de către convertoare. Până în prezent, există multiple lucrări care analizează controlul metode de control și gestiune pentru convertoare în cazul rețelelor. Totodată, ulterior etapelor de modelare, cercetare, aceste tehnologii trebuie să fie și disponibile din punct de vedere comercial pentru a se putea implementa rețele de joasă tensiune hibride AC-DC, problemă care nu se regăsește la MT.

Calculul curenților de scurtcircuit al instalațiilor auxiliare t.c. din cadrul centralelor și stațiilor de transformare este tratat în standardul CEI 61660. Prima parte a acestui standard tratează calcul curenților de scurtcircuit în rețele t.c.. A doua parte analizează impactul scurtcircuitului de t.c. asupra diferitelor echipamente. Ultima parte este un raport tehnic ce prezintă diferite abordări ale calculului curentului de scurtcircuit cu ajutorul unui factor de corecție σj.

A doua tehnologie este cea a întreruptorului electronic (solid-state). Pe ramura principală acestuia se află un semiconductor de putere *S* (IGBT sau IGCT), cu rolul de a întrerupe circulația curentului la apariția unui defect. La detectarea defectului, semiconductorul se oprește, iar curentul trece prin ramura secundară. Pe aceasta se regăsește un circuit supresor, alcătuit dintr-o diodă, montată în paralel cu o rezistență, și un condensator.

Rolul supresorului este de a scădea rapid valoarea curentului de defect, împreună cu varistorul, care a aceeași întrebuințare ca a celui folosit la întreruptorul mecanic. Avantajele acestei variante sunt rapiditatea stingerii defectului și riscul scăzut de defectare prin lipsa unor componente mișcătoare. Din cauza plasării dispozitivului semiconductor direct pe cărarea utilizată de curent în timpul operării normale, pierderile acestui întreruptor sunt semnificative. De asemenea, design-ul complicat al conexiunii înseriate de dispozitive semiconductoare de putere necesar atingerii tensiunilor de blocare ale unei linii MVDC.

Cu toate acestea, cercetările în domeniul semiconductoarelor pe bază de carbură de siliciu (SiC), cu tensiuni de blocare nominale mai mari decât în cazul tehnologiilor actuale, bazate pe siliciu, ar putea scădea numărul de semiconductoare necesare atingerii tensiunii de blocaj necesare, scăzând nivelul de complexitate și prețul acestor echipamente.

Prin pătrunderea tehnologiilor HVDC în zona de MVDC și chiar LVDC, noi posibilități apar pentru rețelele de distribuție. Avantajele majore sunt mai ales pentru zonele urbane dense, consumatorii izolați și integrarea surselor de energie regenerabilă. Posibilitățile includ atât crearea unor rețele de distribuție complet la t.c. sau a unor hibride, la t.c. și la t.a., pentru a profita de avantajele ambelor tehnologii.

Proiectele pilot existente, apărute în ultimii câțiva ani, se axează acum să demonstreze în mod practic avantajele acestor tipuri de rețele, regăsite până de curând la nivel teoretic sau doar în cadrul unor proiecte de cercetare.

Există însă anumite obstacole ce trebuie depășite pentru implementarea pe scară largă a rețelelor hibride. Principalele obstacole sunt lipsa/insuficiența standardelor, adaptarea întreruptoarelor pentru MVDC și LVDC, apariția unor soluții comerciale pentru transformatoarele electronice și costurile de investiție.

2. Contribuții originale

După inventarierea critică a utilizărilor actuale și a direcțiilor din domeniu — de la comparațiile MVDC/HVDC, diversitatea topologiilor și utilizărilor și până la provocările de standardizare, întrerupere și transformare, se trece la transformarea concluziilor în pași

operaționali, pe o rețea de test hibridă AC-DC. Această mișcare stabilește într-un mod clar și explicit modul de analiză, criteriile de selecție și întreg instrumentarul de simulare, astfel încât ipotezele generate cu ajutorul punctului de plecare al cercetării să fie verificate, avansând nivelul de cunoaștere în domeniul MVDC.

Un prim pas îl reprezintă crearea unei rețele hibride AC-DC de medie tensiune de test, pornind de la rețele de test existente. Astfel, după examinarea rețelelor de test propuse de IEEE și CIGRE, a fost aleasă rețeaua IEEE-33 ca bază pentru dezvoltarea rețelei hibride necesare.

Un al doilea pas important reprezintă utilizarea metodei QSTS (Quasi-Static Time Series) alături de un program de regim permanent, astfel încât evoluții dinamice ale stării unei rețele să fie surprinse prin înlănțuiri de stări cvasi-statice guvernate de bucle de reglaj implementate numeric. Aceste bucle de reglaj reprezintă automatizările care, în realitate, acționează aproape instantaneu pentru menținerea în parametri a rețelei. Considerând faptul că într-o rețea de medie tensiune, variațiile producției și consumului se resimt mai puternic și mai rapid, simpla studiere a regimului permanent nu ar fi fost suficientă pentru evaluarea modificărilor aduse de hibridizarea rețelei.

Pentru analiza regimurilor permanente a fost folosit programul open-source OpenDSS, care permite asocierea unor puteri nodale sub formă de vectori ca date de intrare , respectiv de valori corespunzătoare fiecărui interval de timp (o oră, un minut, o secundă etc.). OpenDSS optimizează calculul tuturor rezultatelor, prezentate ca serie (înșiruire) de rezultate în timp (time series) prin utilizarea rezultatelor de la regimul permanent anterior ca date de intrare pentru noul regim permanent, corespunzător următorului moment în timp. În acest fel, numărul de iterații pana la convergenta este mai mic și obținerea seriei de date în timp se face într-un timp mai scurt, metoda QSTS putând fiind implementată cu ajutorul acesteia și cu adaptările necesare simulării buclelor de reglaj.

Datorită implementării regulatoarelor de tensiune, nodurile de tip PQ au putut fi transformate în noduri PU, abordare care corespunde funcționării reale a reglajului tensiunii.

O primă metodă de reglaj implementată și studiată este cea a unui regulator de tensiune de tip buclă PID. Aceasta conține două blocuri principale:

- un bloc de comparare a mărimii din proces cu o valoare de referință, la ieșirea căruia se obține eroarea față de mărimea de referință;
- o funcție de transfer care utilizează ca mărime de intrare eroarea obținută anterior, pe care o utilizează pentru a obține o mărime de ieșire prin intermediul unei funcții de transfer de tip PID.

Reglajul de tip PI (combinație de proporțional-integrativ) și PID (combinație de proporțional-integrativ-derivativ) sunt cele mai utilizate funcții de reglaj utilizate în practică, câteva aspecte ale blocului general PID fiind sintetizate în cadrul tezei, inclusiv aspecte legate de reglajul adecvat („tunarea”) parametrilor PID. În cazul în care blocul de reglaj deține doar componenta proporțională K_P, există întotdeauna o eroare numită deviație remanentă de reglaj. Componenta integrativă asigura faptul că după o perioadă de timp deviația remanentă scade treptat și ajunge în final la zero, fiind practic corectarea din ce în ce mai bună a erorii reziduale a iterațiilor precedente. Componenta derivativă (numită și diferențială) asigură un răspuns mai rapid.

Modul în care se aleg constantele PID este în cele mai multe situații bazat pe un proces iterativ, în care se pornește de obicei de la alegerea constantei K_P, cu $K_I = 0$ (timp infinit de răspuns integrativ) și $K_D = 0$ (fără reacție derivativă), după care pentru $K_P = ct$ se trece la

alegerea K_I și în final, cu $K_P = ct$ și $K_I = ct$. se alege K_D. Operația poate suferi iterații de reajustare a constantelor alese anterior până ce răspunsul funcției de transfer este cel dorit pentru o funcție treapta de perturbare a sistemului.

Dacă se dorește reducerea zgomotului la ieșire ca urmare a unui zgomot la intrare (variații aleatorii ale mărimii de intrare suprapuse peste semnalul util), se poate face o modificare a funcției care să introducă și un filtru trece-jos (Low-Pass-Filter LFP).

Testele efectuate au demonstrat eficiența acestui tip de regulator de tensiune implementat între două momente de timp ce pot fi considerate cvasi-statice. Pentru reglarea fină a acestuia s-au abordat în mod empiric mai multe valori ale componentelor proporțională, integrativă și derivativă. Ultima componentă, deși a ajutat în crearea unui răspuns rapid, a dus la oscilații, motiv pentru care utilizarea ei a fost abandonată, regulator rezultat fiind de tip PI.

În model se identifică unul sau mai multe noduri de echilibru pe partea la t.c. (U = constant), care joacă rolul de „furnizor" de inerție la nivelul rețelei la t.c. într-un mod echivalent ca rezultat nodului de echilibru din rețeaua la t.a., reprezentat în mod tradițional de cel mai puternic generator. Astfel, se permite menținerea echilibrului dintre consum și generare în cazul variațiilor bruște de putere.

Prima rețea hibridă AC-DC de test creată a fost una de zece noduri la t.a., o subrețea a rețelei IEEE-33, căreia i s-a adăugat o legătură la t.c., cu rolul de a uni o zonă cu producție mărită de una având consum mărit.

Dat fiind că rețeaua la t.c. nu deține inerție mecanica de rotație, care să asigure răspunsul instantaneu la perturbații și care să preîntâmpine astfel degradarea sistemului prin modificarea tensiunii (în special scăderea acesteia) – așa cum se întâmplă în rețelele electrice la t.a. în cazul frecvenței, în situația unei rețele electrice la t.c. un efect similar de inerție îl au condensatoarele cuplate la bateriile la t.c. la anumite noduri, în special la generatoarele de t.c., în cazul nostru al nodului de echilibru. Astfel, nodul de echilibru la t.c. este o sursă de tensiune a cărei valoare a tensiunii este de fapt tensiunea menținută pe bara t.c., respectiv pe condensatorul de pe bara t.c., care este capabil să aibă o reacție instantanee la perturbații, prin livrarea curentului necesar, în timp ce tensiunea pe acesta scade gradual, ca urmare a extragerii de energie. Valoare calculată și utilizată pentru capacitatea condensatorului a fost testată pentru ca această să poată menține calitatea de regim cvasi-static pentru fiecare pas studiat.

Efectul capacității pe bara DC este formalizat ca „inerție electrostatică" (HELS): energia stocată într-un condensator încetinește degradarea tensiunii în cazul evenimente rapide, efect validat atât teoretic, cât și prin rulări QSTS cu pași temporali scurți.

Primul set de teste efectuat a validat această formă de „inerție electrostatică".

În acest fel, trecerea dinspre cercetarea stadiului actual al rețelelor MVDC spre cercetarea aplicată se face fără rupturi: noțiunile despre controlabilitatea rețelelor la t.c. și ajutorarea rețelelor la t.a. cu ajutorul celor la t.c. , creșterea producției distribuite sau avantajele hibridizării se regăsesc în simulările efectuate. Seturile de teste utilizate în continuare adaugă, în continuu, elemente noi pentru validarea acestora și a funcționării rețelei hibride ca un întreg.

Următorul set de teste a vizat regimuri cu puterea P solicitată într-un nod la t.a. Puterea cerută din convertor nu mai este egală cu variația lui P, ci reprezintă o putere activă nodală cu care să fie realizată menținerea tensiunii în nod la o tensiune de referință care trebuie să fie în limitele admisibile (+/- 5%).

Pe fundamentul prototipului hibrid creat și al metodei QSTS integrată cu un program de regim permanent, analiza se extinde către o rețea MT complexă, care include două subrețele DC multi-terminal cu patru, respectiv cu opt noduri, cu capabilități de reglaj al tensiunii prin P și/sau Q în nodurile AC. Din acest punct al cercetării originale, accentul studiilor efectuate se mută de la validări pe configurații simplificate la evaluarea coordonării și validarea conceptului pe o arhitectură lărgită, în care fluxurile de putere pot urma trasee alternative, putând fi redistribuite prin rețelele la t.c.

În continuare, este descris modelul matematic de funcționare al convertoarelor bidirecționale pentru cele două moduri de funcționare: AC-DC și DC-AC. Sunt descrise modul de implementare al reglajelor descrise anterior.

Următorul set de teste demonstrează utilitatea reglajului tensiunii prin P, Q sau printr-o combinație a celor două componente, care sunt cuantificate din punct de vedere al efectivității reglajului în funcție de limitările componentelor rețelei și cuantificate din punct de vedere al eficienței rețelei.

Sensibilitățile dU/dP și dU/dQ sunt cuantificate în următorul set de teste pentru noduri reprezentative, ceea ce justifică utilizarea controlului prin P ca instrument practic la medie tensiune, complementând reglajul clasic prin Q utilizat în cadrul rețelelor de înaltă tensiune. O comparație între cele două metode de control și complementaritatea lor este arătată în cadrul testelor efectuate, rezultatul fiind faptul că ambele metode sau o combinație a lor sunt potrivite. Influențarea funcționării acestora este dată de rețeaua în cauză, fiind nevoie de adaptarea reglajului de la caz la caz pentru a avea cea mai bună soluție cu pierderi minime.

Studiile de caz compară metodele de control și arată cum distribuția sarcinii între convertoare, poziționarea nodurilor de echilibru și constrângerile din cadrul celor două tipuri de rețea influențează stabilitatea tensiunii.

Sunt apoi explorate scenarii cu subseturi și parametri variați, pentru a testa robustețea metodei dezvoltate și a îi evidenția relevanța.

Pentru testele efectuate sunt verificate și bilanțurile de puteri pentru identificarea pierderilor diferite, datorate diverselor tipuri de reglaj utilizat. Se poate arăta faptul că aceste pierderi sunt în limite normale, însă adaptarea fină a reglajului ajută pentru minimizarea pierderilor într-un mod semnificativ.

Ulterior, funcționarea rețelei este studiată ca un întreg în care există, pe lângă consumatori și producători clasici, producători pe bază de surse de energie regenerabilă, cu producție intermitentă, și instalații de stocare.

O introducere importantă în materie de reglaj utilizat este funcția de statism de tensiune. Similar statismului de frecvență, „statism” înseamnă în acest caz raportul între abaterea relativă a *tensiunii* și variația relativă a *puterii active* rezultată ca răspuns la abaterea de *tensiune*, în regim permanent, exprimat în procente. Abaterea relativă de *tensiune* se raportează la tensiunea nominală și variația relativă a *puterii active* se raportează la capacitatea maximă sau la puterea activă reală în momentul atingerii pragului relevant. Pentru a nu activa la orice abatere nesemnificativă a tensiunii, s-a utilizat și zona de insensibilitate. De menționat este faptul că puterea de consemn de 0% corespunde, de exemplu unui sistem de stocare de tip BESS aflat inițial cu o putere la borne egală cu zero, dar care poate asigura reglaj atât pentru scăderea tensiunii nodale sub pragul de insensibilitate inferior cât și pentru creșterea tensiunii nodale peste pragul de insensibilitate superior. Acest mod de funcționare este folosit inclusiv în scenariile prezentate în cadrul tezei. Rezultatul observabil este faptul că alegerea statismului de tensiune are soluții specifice fiecărui caz de sistem în parte, iar

tehnicile QSTS-RP pot simula bine evoluția sistemului pentru diverse cazuri de statism, fiind un instrument util și în acest domeniu.

Scenariile din acest set de teste includ perturbații în rampă, variații în trepte, variații cu pantă. Pornind de la un singur nod ce poate asigura reglajul pe baza statismului de tensiune, cu valori diferite ale statismului, simulările efectuate au cuprins și interacțiunile apărute în cazul mai multor noduri cu statism de tensiune, utilizându-se curbe de statism identice sau diferite, cărora le este implementat și un filtru trece-jos, cărora le sunt limitate mai mult sau mai puțin puterile. Observațiile importante în cadrul acestor teste sunt interacțiunile a două noduri cu rol de reglare a tensiunii cu ajutorul statismului, fiind prezentată și minimizarea interacțiunilor negative. Un astfel de exemplu este reducerea episoadelor în care un nod readuce tensiune în limite iar celălalt fie amplifică prea mult efectul primului, fie încearcă să îl combată.

Abaterile față de așteptări sunt documentate și explicate contextual (topologie, limite ale convertorului, raportul X/R), fixând domeniile de valabilitate ale strategiilor de reglaj.

Din acest punct, rezultatele nu doar confirmă ideile inițiale, ci oferă bază pentru „bune practici” de operare coordonată în rețele MVDC cuplate și modelate împreună cu MVAC.

Rezultatele validate pentru și cu ajutorul rețelelor electrice hibride de medie tensiune creează premisele extinderii naturale către sisteme multi-vector, în care o rețea locală de gaz interacționează cu rețeaua hibridă prin conversii P2G și G2P, creând o așa numită „Gas Valley”.

În condiții clasice, rețelele electrice și cele de gaz metan nu sunt cuplate în mod explicit.

Totodată, trebuie menționat faptul că pentru a funcționa, rețeaua de gaz metan are nevoie de echipamente care utilizează energie electrică cum ar fi pompele/compresoarele de creștere a presiunii. Aceasta nu este considerată însă o interacțiune sistemică, ci doar una funcțională, în care respectivele echipamente se comportă ca un consumator oarecare.

În același timp, centralele electrice ce folosesc drept combustibil gazul metan injectează energie electrică în sistemul electroenergetic prin utilizarea gazului metan furnizat de rețeaua de gaz metan, dar nici această situație nu este, în general, considerată ca fiind o interacțiune între cele două sisteme, ele fiind analizate separat.

În contextul introducerii pe scară largă a surselor regenerabile, a căror producție depinde de condițiile naturale (radiație solară, prezența vântului), producția de energie din aceste surse nu este în general sincronizată cu consumul din sistem, necesitând diverse masuri, precum stocarea energiei, o metodă considerată ca fiind una dintre cele mai eficiente. În cazul rețelelor de gaz natural, problema stocării este rezolvată cu ajutorul depozitelor de gaz, dar și prin cantitatea de gaz existentă în rețea, care poate funcționa ca o stocare semnificativă.

Stocarea pe termen scurt începe să fie tot mai prezentă prin folosirea bateriilor Li-Ion, a căror prezență este în creștere. Totuși, pentru stocare de lunga durată (inter-sezonieră), stocarea cu baterii Li-Ion devine nepractică, fiind necesare soluții complementare.

Conversia energiei electrice obținută din surse regenerabile în hidrogen este considerată o soluție complementara absolut necesară pentru a face față diferențelor semnificative între producția de energie electrică din centrale fotovoltaice vara și cererea de putere electrică pe timp de iarnă, când producția de energie din surse regenerabile scade apreciabil.

Stocarea gazului metan este considerată ca având un potențial de zeci de ori mai mare decât cel al energiei electrice, iar stocarea hidrogenului ar putea avea caracteristici apropiate pe măsură ce tehnologiile de stocare ale acestuia se vor îmbunătăți și ieftini.

Pentru viitor este posibilă trecerea completă la hidrogen, ceea ce necesită reproiectarea conductelor de gaz, a turbinelor pe gaz și a sistemelor de stocare, care însă pot fi foarte costisitoare, iar riscul este de încetinire a procesului de transformare a sistemului energetic.

Ca o alternativa tehnică, transformarea suplimentară din hidrogen în CH4, prin utilizarea reacției Sabatier ar putea asigura producerea de gaz metan complet verde. Astfel, în cadrul reacției Sabatier este capturat bioxidul de carbon (CO2) din atmosferă pentru a se produce CH4, iar în urma arderii acestuia se eliberează înapoi în atmosfera aceeași cantitate de CO2. Acest fenomen este "circular", neducând la creșterea emisiilor de CO2 pe întreg ciclul.

Este important de menționat faptul că, deși este vorba tot de un transfer de putere printr-un mediu conductor, fluxul de putere al gazului are particularitățile sale. Aspecte importante diferențiază regimul permanent al unei asemenea rețele față de cea de electricitate. Un prim aspect este faptul că gazul este compresibil, adică își modifică semnificativ volumul la variații de temperatură și presiune. De asemenea, în mod evident, gazul este guvernat de către alte caracteristici față de electricitate, precum masa, volumul, densitatea, presiunea, temperatura, vâscozitatea etc. Deși între o parte dintre acești parametri pot fi echivalați în parte cu cei electrici, o simulare folosind același model matematic ar da rezultate nesatisfăcătoare. Până la acest moment, abordarea propusă de literatură este similară cu metoda secvențială destinată rețelelor electrice hibride, diferența fiind faptul că simularea rețelei în sine este realizată în continuare cu modelul matematic propriu.

Astfel, este introdusă explicit arhitectura și modelul matematic pentru interfețele P2G (electrolizor, instalație de metanare Sabatier) alături de stocarea gazului rezultat și G2P (turbine în ciclu combinat, celule cu combustibil), astfel încât fluxurile de energie să poată fi dirijate către vectorul potrivit la momentul potrivit, cu scopul de a crește posibilitatea de integrare a energiei electrice provenită din surse regenerabilă prin utilizarea cât mai mult a infrastructurii existente, crescând flexibilitatea sistemului.

Primele teste validează sprijinul pe care îl pot acorda componentele P2G la mijlocul unei zile de vară, precum și componentele G2P în cadrul unei seri de vară.

Ciclul inter-sezonier P2G-SG-G2P este analizat, pentru a demonstra utilitatea unei astfel de cuplări: excedentul de energie electrică din perioada de vară este convertit în gaz, care este stocat și apoi reintrodus iarna ca putere electrică (1 MW, 4 h/zi), cu un randament global agregat și indicatori de utilizare calculați pas cu pas. Modelele cuantifică energia chimică disponibilă (H_2, CH_4, amestecul celor două), precum și efectele asupra regimului rețelei electrice în perioadele critice, reliefând beneficii pentru flexibilitate și reziliență.

Sunt analizate compromisurile tehnologice și economice ale amestecurilor H_2-CH_4 alături de alternativa conversiei complete cu ajutorul reacției Sabatier pentru gaz metan „verde", cu implicații asupra emisiilor și a necesarului de infrastructură.

În paralel, sunt evaluate costurile specifice (electrolizor, lanț CH_4 verde, transport și stocare) și dependența prețului gazului din „Gas Valley" de prețul energiei electrice, pentru scenarii de investiții distincte. Aceste simulări arată faptul că alegerea unui model de „Gas Valley" doar pe bază de hidrogen sau cu mixt de hidrogen-CH4 depinde în mod esențial de costurile de investiție, de transport și de stocare pentru hidrogen, respectiv pentru CH4, chestiuni influențate și de existența și adaptabilitatea unei infrastructuri existente.

Următoarele aspecte sunt importante în privința utilizării unei GV ca sprijin pentru o rețea hibridă:

- Energia electrică folosită pentru conversia P2G poate fi folosită pentru obținerea hidrogenului, a gazului metan sau a unui mixt dintre acestea
- Puterea de 2400 kW utilizată în zilele de vara pentru conversia P2G nu afectează rețeaua electrică în perioadele de producție abundentă cu surse regenerabile, problema studiată în S1
- Puterea de 1000 sau 2000 kW produsă în zilele de iarna prin conversia G2P îmbunătățește regimul de funcționare a rețelei electrice hibride studiate în S2
- Pentru datele de intrare prezentate, funcționarea P2G din perioada de vară asigură un aport semnificativ de putere în perioada de iarna, fiind pusă în evidență o perioada de 4 ore de producție de energie electrică al 1000 kW pe un număr de 74 zile.
- Valori mai mari ale producției de iarnă se pot determina prin metoda prezentată, modificând date de intrare cum ar fi puterea P2G, precum și numărul de ore și de zile de utilizare.
- În cadrul capitolului s-a sistematizat un model matematic simplificat pentru microrețeaua de gaz, numita generic „Gas Valley", care să permită dezvoltarea de studii de interacțiune a rețelei electrice (clasice și/sau hibride) care să pună accentul pe diverse aspecte.

Randamentul pe un ciclu complet P2G-SG-G2P este în cazul studiat de 34.4%, fiind mic în comparație cu randamente uzuale ale unor echipamente individuale. Totuși, un astfel de randament trebuie acceptat ca soluție viabilă, fiind una din soluțiile de viitor care să ajute la atingerea neutralității față de emisiile de carbon prin integrarea energiei produse din surse regenerabile în sectorul gazelor.

Acest cadru integrează cunoașterea existentă asupra studierii regimurilor permanente a sistemelor electroenergetice în logica multi-vectorială, permițând proiectarea unor comunități energetice capabile să beneficieze de flexibilitate energetică suplimentară între vectori și sezoane.

Scopul general al tezei, ca o integrare a eforturilor de cercetare, este acela de a oferi un cadrul de analiză (engl. Framework) a evoluției dinamice a unor rețele eterogene de energie (engl. *Hybrid and Multi-Energy Grids Dynamic Analysis Framework using QSTS-LF technologies*), care să cuprindă rețele electrice AC și DC (hibride) și rețele de gaz metan/hidrogen. Mediul de analiză propus abordează evoluții dinamice prin folosirea tehnicilor QSTS în combinație cu un program de regimuri permanente.

3. Concluzii

Prezenta teză de doctorat este dedicată unei teme importante pentru evoluția viitoare a sistemelor electroenergetice, respectiv rețelele hibride de medie tensiune. În cadrul acesteia au fost inventariate atât argumentele teoretice pro-hibridizare - capacitatea de transport, controlabilitate, integrarea producătorilor distribuiți și cu producție variabilă, integrarea producătorilor și consumatorilor DC, cât și barierele tehnice și normative - protecții la t.c., dispozitive de comutație, stadiul standardizării, prezentate în capitolele **Eroare! Fără sursă de referință.**. Din această analiză realizată a reieșit nevoia unui cadru unitar de testare care să traducă afirmațiile conceptuale în ipoteze verificabile și bune practici transferabile, în special

la nivelul rețelelor de distribuție, unde raportul impedanțelor și profilul de producție alterează semnificativ realizarea reglajelor față de înalta tensiune.

O constatare principală a fost lipsa unor rețele de test hibride recunoscute și detaliate suficient pentru comparații riguroase între metode, topologii și strategii de control. Rețelele AC de referință există, însă transformarea lor în rețele de probă AC/DC — cu linii convertibile, convertoare plasate strategic sau unde a permis tipologia locației, noduri pentru reglaj și posibilități de reconfigurare — rămâne, în mare măsură, o sarcină a fiecărui cercetător, ceea ce complică reproducerea și agregarea rezultatelor. În acest context, în capitolele **Eroare! Fără sursă de referință.**, **Eroare! Fără sursă de referință.** și **Eroare! Fără sursă de referință.**, prezenta lucrare a adoptat și a extins un model IEEE de rețea de distribuție, IEEE-33, l-a organizat pe zone cu potențial de insularizare și i-a adăugat trasee alternative de transfer prin rețele DC, astfel încât studiile de reziliență și coordonare să fie posibile fără a pierde topologia rețelei originale. Rolul liniilor noi și modul lor de exploatare (întărire, buclare, rute ocolitoare) au fost precizate pentru a susține scenarii credibile de operare, pornind de la o funcționare în parametri nesatisfăcători ai rețelei.

Alegerea metodei de simulare a urmat două criterii principale: să surprindă fidel evoluțiile induse de profiluri variabile de sarcină/producție și să integreze natural funcțiile de automatizare între doi pași ai simulării. Metoda Quasi-Static Time Series (QSTS), prezentată în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**, satisface aceste cerințe. Aceasta se datorează posibilității de integrare cu un program de calcul pentru regimuri permanente. Astfel, a putut fi creată o metodă nouă de analiză, integrată, cu ajutorul căreia se poate modela evoluția dinamică a rețelei drept o înlănțuire de regimuri permanente și permite „închiderea buclei” cu regulatoare discrete (PI/PID) pe nodurile care în realitate ar dispune de automatizări pentru menținerea nivelului de tensiune. În plus, folosirea unui program de regim permanent consacrat (precum OpenDSS), prezentată în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**, asigură accesibilitate și reproductibilitate, calități esențiale când obiectivul este stabilirea unui protocol de lucru reutilizabil de către viitori cercetători.

Rețeaua de test a fost concepută astfel încât să ofere un compromis între realism operațional, claritatea și calitatea cercetării: topologie ușor de observat, zone ce pot fi separabile pentru a crea situații noi, trasee alternative pentru fluxul de putere și puncte clare de interfață AC/DC. În această arhitectură s-au introdus convertoare cu roluri distincte: unele impun un nivel de tensiune pe bara DC („nod de echilibru”), altele reglează tensiunea în noduri AC prin modulația puterii active și/sau reactive. Acestea sunt descrise în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**. Prin listarea explicită a acestor roluri și a conexiunilor lor, rețeaua devine un „banc de probă” configurabil pentru studii de reglaj și de distribuție a fluxurilor într-o structură AC-DC cu mai multe terminale.

Metoda de simulare și calitatea rețelei de test au fost validate incremental. Mai întâi, s-a demonstrat concordanța dintre evoluția tensiunii pe bara DC alimentată dintr-un condensator și predicțiile analitice pentru scenarii de descărcare controlată, prezentate în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**: rezultatele QSTS au arătat corect momentele de atingere a pragurilor de tensiune și au arătat că pasul temporal poate fi ales suficient de fin pentru ca fiecare treaptă să poată fi considerată cvasi-statică. Această validare asigură că noțiunea de „inerție electrostatică” introdusă de capacitatea de pe bara DC este corect captată de model și că ea poate fi utilizată în strategiile de amortizare a perturbațiilor cauzate de variațiile de putere.

Ulterior, a fost verificată controlabilitatea nodală în rețeaua la t.a. prin bucle de reglaj care urmăresc tensiunea în noduri reprezentative, descrisă în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**. Compararea scenariilor a arătat că atât modularea puterii active, cât și a celei reactive, conduc la stabilizări robuste, diferențele fiind dependente de topologie, poziționarea convertoarelor și profilurile utilizate de consum și generare. Analizele de sensibilitate au justificat, pentru medie tensiune, utilizarea controlului cu P ca instrument practic (alături de reglajul clasic cu Q), mai ales acolo unde interfața DC oferă grade suplimentare de libertate în redistribuirea fluxurilor. Concluzia nu este una absolută, ci contextuală, însă poată fi adaptată atât în studii viitoare, cât și în utilizări reale. În rețele cu impedanțe și încărcări similare celor studiate, controlul bazat pe P poate fi la fel de performant precum cel bazat pe Q, iar combinațiile ponderate sunt o cale naturală de optimizare.

Pe măsură ce complexitatea a fost crescută, rețeaua a inclus mai multe subrețele DC multi-terminal, cu convertoare suplimentare plasate în noduri-cheie ale părții AC, alese atât pentru a rezolva problemele rețelei, cât și empiric. Fiecare nod are un rol definit: menținerea tensiunii în rețeaua la t.c, în cea la t.a. și transfer de putere bidirecțional. Această extindere a permis evaluarea coordonării buclelor de reglaj, a limitărilor fluxurilor pe rute alternative și a compromisurilor dintre stabilitatea tensiunii și pierderile globale în cadrul rețelei, în timp ce cadrul QSTS a rămas stabil și transparent pentru comparații între scenarii, elemente prezentate în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**.

După consolidarea părții electrice, lucrarea a integrat o rețea generică de gaz, denumită sugestiv „Gas Valley”, prezentată în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**. Aceasta a fost concepută modular și parametric, fiind conectată la rețeaua electrică hibridă prin două interfețe: conversia energiei electrice în hidrogen/gaz metan verde (P2G) — bazată pe electroliză și, opțional, pe reacția Sabatier, respectiv conversia gazului înapoi în energie electrică (G2P) — bazată pe turbine de gaz și celule cu combustibil, elemente prezentate în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**. Modelul include stocarea de gaz și o interfață cu rețeaua publică de gaz similară celei electrice, astfel încât fluxurile să poată fi dirijate în ambele sensuri, iar vectorul adecvat să preia surplusurile de producție sau să acopere vârfurile de consum în funcție de sezon și context operațional. Definirea clară a componentelor și a relațiilor lor face posibilă „cuplarea” de tip plug-and-play a rețelei de gaz la cadrul electric. Un aspect important al acestei cuplări este faptul că este un fenomen care se întâmplă în realitate, însă nu este modelat, cele două tipuri de rețea fiind privite separat.

Pornind de la acest fundament, în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**, au fost efectuate simulări sezoniere care leagă perioadele cu producție electrică abundentă, din surse de energie regenerabilă, de perioadele cu consum crescut. Conversia P2G permite păstrarea energiei în timp prin vectorul gaz, stocarea îi prelungește utilitatea, iar conversia G2P o readuce în rețeaua electrică atunci când aceasta are cel mai mult nevoie, iar metodele de stocare directă a energiei electrice nu ar face față. Rezultatul operațional este aplatizarea golurilor și reducerea stresului în perioade critice, fără a încărca infrastructura electrică prin utilizarea infrastructurilor existente. În plus, injecțiile G2P calibrate pot susține reglajul de tensiune și pot diminua necesarul de acțiuni corective în rețeaua hibridă indiferent de perioadă. Analizele de sensibilitate privind costurile evidențiază dependența prețului gazului din „Gas Valley” de costul energiei electrice și de investițiile specifice în echipamente, ceea ce recomandă optimizări multicriteriale asupra proporțiilor H_2/CH_4 și asupra capacităților instalate.

Avantajele integrării multi-vector pot fi rezumate pe trei paliere. Tehnic, apare un nou tip de flexibilitate cu volum și durată pe care stocările electrice o pot livra cu dificultate; inerția electrostatică din rețeaua la t.c. și posibilitatea de a comuta fluxurile prin linii noi și către gaz oferă amortizare și manevrabilitate în fața variațiilor rapide sau a profilelor sezoniere. Operațional, comunitățile energetice pot construi scenarii în care energia este mutată între vectori și între intervale de timp, crescând reziliența la perturbații și permițând exploatarea mai eficientă a infrastructurii existente. Economic și climatic, amestecul de hidrogen cu metan reduce emisiile fără schimbări radicale de infrastructură, iar reacția Sabatier creează premisele unui ciclu aproape circular al emisiilor de CO_2. Alegerea între variante depinde topologia și resursele locației, de prețurile echipamentelor, de reglementări și de dinamica prețului energiei. Aceste elemente au fost prezentate în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**.

Contribuția lucrării se coagulează, astfel, în câteva rezultate practice: (i) criterii explicite pentru proiectarea rețelelor de test hibride (topologie, zone și reconfigurări, trasee alternative, poziționarea convertoarelor și definirea rolurilor acestora), (ii) un protocol pentru metoda integrată QSTS-RP — de la selecția datelor și implementarea buclelor de reglaj până la verificări de robustețe și confruntări teorie-simulare —, (iii) o analiză nuanțată a reglajului tensiunii la medie tensiune bazată pe sensibilități specifice, care motivează folosirea controlului prin P, Q sau o combinație a acestora, în funcție de topologie și de context, și (iv) un model generic de rețea de gaz interconectată cu cea electrică, capabil să susțină evaluări tehnico-economice și de reziliență într-o logică cu multipli vectori energetici.

Direcțiile naturale de continuare vizează validări rafinarea modelelor de stocare și de transport în funcție de presiune/volum pentru rețeaua de gaz, explorarea conversiei prin tehnologii alternative, și definirea unor indicatori integrați de performanță pentru planificarea și operarea comunităților cu multipli vectori energetici, integrarea vectorului căldură, precum și identificarea de noi scenarii unde studierea interconectării aduce îmbunătățiri rezilienței rețelelor viitorului. Prin aceste extensii, cadrul propus poate facilita tranziția de la simulare la implementări pilot și, ulterior, la exploatare asistată de model în rețele hibride AC/DC interconectate cu rețele de gaz și nu numai.

Contribuții ale tezei de doctorat

În cadrul prezentei teze de doctorat, pornind de la stadiul existent al cercetării, au fost realizate contribuții originale menite a crește nivelul de cunoaștere asupra rețelelor de medie tensiune prin punerea unei pietre de temelie în privința rețelelor de medie tensiune hibride AC-DC. Pornind de la literatura existentă, care a fost analizată în capitolul **Eroare! Fără sursă de referință.**, cu scopul de a agrega cunoștințele actuale asupra tehnologiilor dedicate rețelelor de medie tensiune la tensiune continuă, modul în care echipamentele, utilizările etc. existente la nivel de înaltă tensiune pot pătrunde la nivelul MVDC sau chiar LVDC. Aceste informații au fost adaptate într-un mod personalizat pentru a putea anticipa necesitățile din viitor ale acestui domeniu și reprezintă **Contribuția I** a tezei de doctorat**.**

Ca o continuare naturală a cercetării literaturii, a fost identificată nevoia de realizare a unei rețele de medie tensiune de test de tip hibrid (AC și DC), care să permită analize complexe ale interacțiunii între rețeaua la t.a. și mai multe rețele la t.c. Această rețea a fost dezvoltată, pornind de la o rețeaua clasică de test IEEE-33, de la un număr relativ mic de noduri la t.a. și o legătură la t.c. alcătuită din două noduri (convertoare) și o linie, apoi

crescând numărul de noduri pe parcursul capitolului **Eroare! Fără sursă de referință.**, ajungându-se la 25 de noduri la t.a. și două rețele la t.c., prima de patru noduri (convertoare) și trei linii, iar a doua de opt noduri (convertoare) și opt linii. Importanța deosebită pe care o au rețelele de test o reprezintă crearea cadrului de cunoștințe necesar pentru implementarea acestora. Aceasta reprezintă **Contribuția II** a tezei de doctorat.

Cu ajutorul rețelei de test hibride a fost dezvoltată o metodă de modelare acesteia prin integrarea tehnicilor QSTS cu programe de calcul a regimurilor permanente, folosind pași de evoluție având perioade de sub 1 s. A fost dezvoltată o abordare care să permită descrierea unei rețele hibride AC-DC, prin punerea în evidență a elementelor specifice aplicațiilor de regimuri permanente.

În acest sens, s-a realizat o analiză a cerințelor specifice și o sistematizare a tipului de obiecte de interacțiune dintre nod la t.a și un nod la t.c., care să poate fi ușor reprezentate și integrate în calculele de regim permanent, care stă la baza tehnicii QSTS-RP; în continuare, s-au sistematizat următoarele obiecte: a) convertor AC-DC cu sursă de tensiune (acționând ca nod de echilibru) pe partea rețelei la t.c.; b) convertor DC-AC, cu adăugarea funcției de reglaj al puterii active sau reactive pe partea la t.a. cu scopul de a regla tensiunea nodală în nodul de conectare la t.a. al convertorului, iar funcția de reglare a tensiunii cu puterea reactivă Q a emulat funcția specifică unui dispozitiv FACDS de tip STATCOM. Aceasta reprezintă **Contribuția III** a tezei de doctorat.

Prin simulările efectuate pe rețeaua hibridă dezvoltată în cadrul tezei s-a făcut o analiză comparativă a efectului controlului nivelului de tensiune în rețeaua de medie tensiune la t.a., fie prin puterea activă P la ieșirea bornelor convertoarelor cuplate la t.a., fie prin puterea reactivă Q obținut la ieșirea unui dispozitiv STACOM sau echivalent cuplat în același nod, fie printr-o combinație a acestora. Prin teste de rețea folosind QSTS s-a pus în evidență faptul că pierderile minime în rețeaua aleasă sunt obținute pentru o combinație a reglajului de P și Q în nodul de reglaj, ca o soluție diferită față de abordările practice curente bazate exclusiv pe reglaj Q. Aceasta reprezintă **Contribuția IV** a tezei de doctorat.

În cadrul simulărilor QSTS au fost integrate automatizări specifice și elemente de sisteme SCADA legate de interacțiunea t.a. – t.c.. Printre aceste automatizări implementate, au fost puse în evidență aspecte privind inerția rețelei la t.c., care asigură încetinirea deteriorării nivelului de tensiune în rețeaua la t.c. Astfel, a putut fi realizată analiza evoluției dinamice a rețelelor hibride AC-DC. Aceasta reprezintă **Contribuția V** a tezei de doctorat.

În cadrul variațiilor de putere studiate pentru validarea reglajelor implementate, au fost studiate variații în formă de treaptă și de rampă, care sunt specifice stațiilor de încărcare a mașinilor electrice, precum și producătorilor distribuiți pe bază de surse de energie regenerabilă, elemente din ce în ce mai prezente în rețelele de medie tensiune și care au potențialul de a modifica semnificativ modul de operare al acestora. Aceasta reprezintă **Contribuția VI** a tezei de doctorat.

Pentru extinderea în rețeaua la t.c. a conceptului de reglaj, a fost implementată o funcție de statism de tensiune, ce reglează puterea de ieșire în funcție de tensiunea la borne. Funcția poate fi implementată pentru un convertor, pentru un generator sau pentru o instalație de stocare. În mod similar, această funcție poate fi implementată și în rețeaua la t.a., complementar funcției de statism clasic, de frecvență. Aceasta reprezintă **Contribuția VII** a tezei de doctorat.

Conceptele de reglaj al tensiunii în rețetele la t.c. cu mai multe terminale au fost analizate și din perspectiva unei combinații de reglaj de tensiune local pe bază de statism ca

reglaj primar și de reglaj la distanță al tensiunii, ca reglaj secundar, care sa îmbunătățească nivelul de tensiune în nodurile critice prin algoritmi mai complecși. Analizele de funcționalitatea a reglajului mixt de tensiune în rețeaua la t.c. au fost realizate cu succes folosind tot tehnica QSTS. Aceasta reprezintă **Contribuția VIII** a tezei de doctorat.

Pornind de la rețeaua hibridă și de la utilitatea considerării și analizării rețelelor cu multipli vectori energetici, apropiind modelarea de realitatea actuală, a fost propus modelul generic de „Gas Valley". Acesta reprezintă un mod de a descrie interacțiunea simplificată între rețelele hibride AC-DC și un model de generic de rețea de gaz conținând hidrogen, gaz metan verde sau un amestec al celor două, descris printr-un parametru de mixare. A fost analizate cerințele specifice ale modelării acestui tip de rețea și au fost sistematizate tipul de obiecte pentru interacțiuni: convertor P2G și convertor G2P. Aceasta reprezintă **Contribuția IX** a tezei de doctorat.

Ca o contribuție generală, teza a demonstrat aplicabilitatea tehnicilor QSTS-RP în analiza evoluției dinamice a unor rețele hibride t.a. – t.c. la medie tensiune, avansând cu diverse aspecte de modelare și reglaj care să permită studiul unor astfel de rețele și este considerata ca fiind **contribuția X** a tezei de doctorat.

În încheiere, teza a abordat o temă actuală a cercetării dedicate rețelelor de medie tensiune, prin punerea unei pietre de temelie în domeniul rețelelor hibride AC-DC. Aceste rețele, prin adăugarea și a altor vectori energetici precum gazul, ajută la consolidarea cunoașterii necesare modelării și implementării în viitor a acestora, de exemplu, în cazul realizări unor comunități energetice complexe și complete din punct de vedere energetic. Această abordare comună - rețea electrică hibridă t.a. – t.c. de medie tensiune în interacțiune cu o rețea de gaz (gaz metan, hidrogen sau combinație a acestora) este considerată ca fiind **Contribuția XI** a tezei de doctorat.