



---

## REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

# Controlul și stabilitatea de tensiune în sistemele electroenergetice de distribuție active

Voltage Stability and Control in Active  
Distribution Power Systems

---

### Autor

Ing. Andreea-Georgiana IANȚOC

---

### Conducător de doctorat

Prof. dr. ing. Constantin BULAC

---



**Universitatea POLITEHNICA din București**  
**Școala Doctorală de INGINERIE ENERGETICĂ**

---

**REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT**

**Controlul și stabilitatea de tensiune în sistemele  
electroenergetice de distribuție active**

---

**Autor**

**Ing. Andreea-Georgiana IANȚOC**

---

**București**  
**Septembrie 2022**

## CUPRINSUL TEZEI

Mulțumiri .....	3
Abrevieri .....	4
Rezumat .....	5
Introducere .....	7
Contextul și motivația studiului .....	7
Obiective principale .....	8
Structura tezei.....	8
1. Mijloace de control al tensiunii în sisteme electroenergetice de distribuție active .....	11
1.1. Evoluția rețelelor de distribuție către rețele electrice active .....	11
1.2. Cadrul legislativ pentru asigurarea funcționării sigure a rețelei.....	14
1.3. Generatoarele distribuite .....	15
1.3.1. Condiții reglementate pentru controlul tensiunii.....	17
1.3.2. Tipuri de generatoare distribuite.....	20
1.4. Comutatorul de ploturi al transformatorului electric .....	21
1.5. Elemente clasice utilizate pentru compensare .....	25
1.6. Dispozitive bazate pe electronică de putere .....	26
1.7. Întărirea rețelei .....	29
1.8. Sistem de comandă-control în sistemele de distribuție active .....	29
2. Regimul permanent în sisteme electroenergetice de distribuție active.....	33
2.1. Ipoteze simplificatoare considerate.....	34
2.1.1. Tipuri de noduri utilizate .....	35
2.2. Modelarea elementelor sistemului electroenergetic.....	36
2.2.1. Modelarea elementelor responsabile cu transferul puterii .....	37
2.2.2. Modelarea elementelor care asigură conversia energiei electrice... ..	37
2.4. Metode de rezolvare ale problemei de regim permanent.....	42
2.4.1. Metoda ascendent-descendent.....	43
2.4.2. Modele matematice bazate pe rezolvarea ecuațiilor de bilanț .....	46

3. Metode de evaluare a stabilității de tensiune în sisteme electroenergetice de distribuție active .....	57
3.1. Instabilitatea de tensiune în rețelele electrice de distribuție. Aspecte fizice	61
3.1.1. Definirea stărilor posibile de funcționare. Puterea maximă transferată .....	61
3.1.2. Determinarea domeniului de existență a stărilor de funcționare ....	63
3.1.3. Determinarea domeniului de existență în condițiile GD .....	66
3.1.4. Dependența tensiunii nodale de circulația de putere în RED .....	67
3.2. Metode de evaluare a stabilității de tensiune și indicatori de stabilitate	67
3.2.1. Caracteristicile PU și QU .....	70
3.2.2. Analiza sensibilităților .....	71
3.2.3. L – index .....	72
3.2.4. Indicatori rezultați din domeniul de existență a soluțiilor de regim permanent .....	74
3.2.5. Metode de evaluare a stabilității de tensiune rezultate din matricea Jacobian .....	76
3.3. Rezerva de stabilitate de tensiune .....	78
4. Controlul optim al puterii reactive în sistemele electroenergetice de distribuție active folosind tehnici meta-euristice multicriteriale .....	81
4.1. Repartiția optimă a puterii reactive .....	82
4.1.1. Modelul matematic al problemei de optimizare .....	83
4.1.2. Modelul matematic al problemei ROPR .....	86
4.2. Metode de soluționare .....	89
4.2.1. Metodele convenționale .....	90
4.2.2. Metode meta-euristice .....	91
5. Studii de caz și rezultate .....	101
5.1. Prezentarea rețelelor electrice test .....	101
5.2. Prezentarea programului de calcul .....	103
5.3. Influența raportului $r/x$ în rețele de distribuție active asupra tensiunii	104
5.4. Influența mijloacelor de control al tensiunii asupra tensiunii .....	105
5.5. Alegerea algoritmului de regim permanent pentru studiul RED-a .....	112
5.5.1. Influența modelului sarcinii asupra rezultatelor regimului permanent	114
5.6. Analiza stabilității de tensiune în RED-a .....	115

5.6.1. Analiza mijloacelor de evaluare a stabilității – cazul RED radială	115
5.6.2. Analiza mijloacelor de evaluare a stabilității – cazul RED arborescentă.....	119
5.6.3. Influența GD asupra mijloacelor de evaluare a stabilității.....	123
5.7. Repartiția optimă a puterii reactive în RED-a	126
5.7.1. Studiul performanțelor tehnicilor meta-euristice pentru rezolvarea ROPR	128
5.7.2. Planificarea funcționării rețelei electrice cu 33 noduri.....	132
5.7.3. Planificarea funcționării unei rețele electrice de distribuție reale	148
6. Concluzii.....	165
6.1. Concluzii generale.....	165
6.2. Contribuții originale.....	167
6.3. Perspective de continuare a cercetării.....	168
Bibliografie.....	169
ANEXA 1 – Datele rețelelor electrice analizate.....	179
ANEXA 2 – Rezultate studii de caz.....	192

## CUVINTE CHEIE

generare distribuită, controlul tensiunii, stabilitatea tensiunii, reglementarea funcționării rețelelor electrice de distribuție, regim permanent, metoda ascendent-descendent, teoria grafurilor, metoda Newton-Raphson cu abateri de curenți, indicatori de stabilitate, analiza sensibilităților, descompunerea valorilor singulare, coeficienți de sarcină, optimizare multicriterială, metoda sumei ponderate, alocarea optimă a puterii reactive, algoritmul meta-euristic de optimizare *Lupul Cenușiu*, curbă zilnică de sarcină, reducerea pierderilor de putere activă, îmbunătățirea rezervei de stabilitate de tensiune, reducerea abaterilor profilului de tensiune

## REZUMAT EXTINS

Prosperitatea unei națiuni este dependentă de funcționarea sigură a sistemelor electroenergetice, iar dezvoltarea economică și socială implică expansiunea acestora în sensul includerii unui număr în creștere a utilizatorilor de energie electrică, dar și a unor mijloace care asigură continuitate în transferul acesteia. Din punct de vedere al stabilității sistemelor este esențială menținerea în limite admisibile a profilului de tensiune, atât în condiții normale, cât și după un dezechilibru apărut în funcționarea sistemului. În caz contrar degradarea tensiunii sub o valoare acceptabilă reprezintă o situație instabilă care poate evolua rapid, printr-o serie de evenimente în avalanșă, la colapsul sistemului. Instabilitatea de tensiune apare, în general, în sisteme supraîncărcate, în care rezerva de putere reactivă nu este suficientă sau apare un dezechilibru al circulației acesteia prin modificarea bruscă a regimului de putere al utilizatorului. În acest context, analiza stabilității de tensiune este esențială în evoluția sistemelor electroenergetice.

Progresul economic din ultimii ani are un impact pozitiv asupra sistemelor electroenergetice globale, însă include și aspecte negative prin influența emisiilor asupra mediului înconjurător care apar inevitabil din cauza combustibililor fosili pentru producerea energiei electrice. Conform Agenției Internaționale a Energiei, cererea de energie electrică și emisiile asociate vor crește cu 70% față de nivelul din 2013, până în anul 2040, [1].

Pentru a facilita reducerea emisiilor, au fost propuse, la nivel internațional, programe de includere a tehnologiilor cu impact redus asupra mediului sau a unor obligații comerciale, care prevăd reducerea acestora, până în 2030, cu 43% față de nivelul din 2005, [2]. Acest sistem este coordonat cu strategia Europa 20-20-20, prin care se dorește reducerea cu 20% a emisiilor de gaze cu efect de seră, creșterea cu 20% a energiei electrice produsă din surse regenerabile și 20% îmbunătățirea eficienței energetice față de nivelurile din 1990, în toate statele membre UE, [3]. Politicile naționale sprijină procesul de integrare a surselor de energie bazate pe surse regenerabile, dar și a tehnologiilor cu eficiență energetică ridicată, precum instalațiile în cogenerare, pentru a facilita impactul neutru al emisiilor produse de hidrocarburile utilizate uzual în centrale. Ca urmare, sursele de generare distribuite au devenit din ce în ce mai răspândite la nivelul sistemelor electroenergetice de distribuție, [4].

Cercetarea doctorală are în vedere aprofundarea conceptului de stabilitatea de tensiune și control al acesteia, la nivelul sistemelor electroenergetice de distribuție, care devin active din perspectiva integrării masive a surselor de

generare distribuită. În contextul creșterii complexității structurii rețelelor electrice, dar și al schimbărilor fundamentale în funcționarea acestora, scopul tezei este de a propune și implementa într-un program de calcul, o metodă de control al tensiunii unui sistem electroenergetic de distribuție activ, pentru a putea beneficia de avantajele generării distribuite. Aceasta urmărește asigurarea stabilității de tensiune, dependentă de regimurile utilizatorilor integrați în sistem, ținând cont de efectele integrării generatoarelor distribuite, precum circulația bidirecțională a puterii, posibile supraîncărcări a elementelor existente, modificarea necontrolată a nivelului tensiunilor nodale, dar și creșterea pierderilor de putere activă. Astfel, obiectivul principal poate fi îndeplinit prin îndeplinirea următoarelor aspecte:

- Recunoașterea particularităților rețelelor electrice de distribuție active, dar și a caracteristicilor care influențează procesul de stabilitate de tensiune;
- Identificarea condițiilor legislative, reglementate pentru planificarea și exploatarea rețelelor electrice de distribuție active;
- Identificarea mijloacelor de control al tensiunii disponibile și a limitărilor tehnologice și reglementate pentru utilizarea acestora;
- Stabilirea modelelor matematice ale elementelor rețelelor electrice de distribuție active și a mijloacelor de control din punct de vedere al analizei regimului de funcționare;
- Evaluarea și alegerea unui algoritm de rezolvare a problemei de regim permanent;
- Identificarea tehnicilor de investigare a stabilității de tensiune;
- Alegerea unor mijloace de evaluare a stabilității de tensiune;
- Identificarea modelului matematic al problemei de optimizare a funcționării rețelelor electrice de distribuție active;
- Evaluarea și alegerea unui algoritm de rezolvare al problemei de optimizare;
- Implementarea într-un program de calcul al mijloacelor și metodelor alese;
- Utilizarea unor rețele electrice test pentru validarea metodelor alese;
- Realizarea unor simulări de optimizare a funcționării unui sistem electroenergetic de distribuție activ;
- Extinderea studiului de planificare asupra unui sistem electroenergetic de distribuție activ localizat pe teritoriul României.

Studiul prezentat în cadrul tezei este diseminat în șase capitole și două anexe utile pentru argumentarea rezultatelor cercetării doctorale din perspectiva studiului stabilității și controlului de tensiune în sistemele electroenergetice de distribuție active. În plus, teza integrează aspecte specifice capitolelor „Introducere” și „Concluzii”, dar și o listă de resurse bibliografice.



Primul capitol, „*Mijloace de control al tensiunii în sisteme electroenergetice de distribuție active*”, are ca scop identificarea capabilităților acestora în sensul integrării într-un sistem coordonat de control al tensiunii.

În contextul asigurării necesarului de energie electrică cerută alături de reducerea impactului asupra mediului în procesul de producere al acesteia, funcționarea sistemelor electroenergetice trebuie să devină suficient de flexibilă pentru a integra schimbările curenți. Analiza stabilității de tensiune la nivelul rețelelor electroenergetice de distribuție active (RED-a) reprezintă un element de actualitate din perspectiva integrării accentuate a surselor de generare distribuită, bazate, în special pe resurse regenerabile, care contribuie semnificativ la modificarea condițiilor de exploatare. Identificarea metodei de control al tensiunii, care să înglobeze capabilitățile acestor surse, alături de mijloacele clasice disponibile la nivelul rețelelor electrice de distribuție este indispensabilă pentru aderarea rețelelor electrice la directivele impuse de transformarea rețelelor electrice tradiționale în rețele de tip „smart grid”.

Astfel, în urma analizei mijloacelor disponibile, prezentate în acest capitol, rezultă că în sistemul coordonat de control al tensiunii vor fi integrate, *generatoare distribuite, comutatorul de ploturi* existent la nivelul stației electrice prin care este furnizată energie către rețeaua arborescentă, dar și *baterii cu condensatoare* integrate în nodurile rețelei electrice.

Pentru controlul tensiunii, utilizarea generării distribuite reprezintă o alternativă atractivă de a menține condițiile sigure de transfer a energiei electrice, fără a implica costuri suplimentare investite în tehnologii destinate exclusiv reglajului de tensiune.

Prin alegerea mijloacelor potrivite, se pot asigura condițiilor sigure de funcționare, în cazul modificării regimului impus de utilizatorii de energie integrați în sistem.

De asemenea, în acest capitol sunt incluse și condițiile legislative pe care trebuie să le îndeplinească atât rețelele electrice de distribuție, cât și mijloacele de control integrate în aceasta pentru asigurarea siguranței și calității energiei electrice furnizate.

În cel de-al doilea capitol este inclus „*Regimul permanent în sisteme electroenergetice de distribuție active*”, având ca scop identificarea unui algoritm care să corespundă din punct de vedere al robusteții, performanței și rapidității la particularitățile rețelelor electrice de distribuție. Alegerea algoritmului potrivit pentru evaluarea stării de funcționare este importantă având în vedere că analiza stabilității de tensiune depinde de rezultatele de regim permanent. Dintre metodele disponibile analizate în cadrul studiului, s-au remarcat metoda clasică „*Ascendent-Descendent*” și o variație a metodei potențialelor nodale și anume „*Newton-Raphson cu abateri de curenți*”.

Pentru metoda „*Ascendent-Descendent*” a fost propus un algoritm de implementare în programul de calcul, care urmărește două etape: sistematizarea datelor de intrare, prin identificarea unui arbore orientat asociat rețelei electrice

de distribuție, obținut pe baza teoriei grafurilor și stabilirea ecuațiilor din care rezultă mărimile atașate laturilor și nodurilor, prin utilizarea calcului matriceal.

Metoda „Newton-Raphson cu abateri de curenți” utilizată în cadrul studiului, a fost adaptată pentru specificul rețelelor de distribuție. În acest sens, prin utilizarea coordonatelor rectangulare, matricea Jacobian poate fi împărțită în blocuri diagonale, ce pot fi actualizate la fiecare iterație și nediagonale, ce rămân constante pe parcursul procesului iterativ.

Adaptarea presupune permutarea elementelor blocurilor diagonale, astfel încât acestea să devină diagonal dominante, datorită părții reale din expresia complexă a admitanțelor nodale. Acestea îi corespunde rezistența laturilor, ce poate fi apreciată prin raportul  $r/x \geq 1$ , specific rețelelor de distribuție.

În plus, în cadrul acestui capitol, sunt analizate modele matematice al sarcinilor de energie electrică și al generatoarelor distribuite, care să includă, cât mai precis caracteristicile acestora în studiul regimului de funcționare.

Capitolul trei urmărește „*Metode de evaluare a stabilității de tensiune în sisteme electroenergetice de distribuție active*” din care rezultă starea sistemelor considerate, dar și elementele sau zonele vulnerabile ale acestora.

Pentru a planifica funcționarea unei sistem electroenergetic de distribuție activ, cu respectarea restricțiilor tehnice reglementate este necesară identificarea proximității dintre punctul curent de funcționare și punctul critic asociat declanșării fenomenului de instabilitate. Pentru aceasta este necesară clasificarea metodelor de evaluare disponibile. Vulnerabilitatea sistemului electroenergetic, din punct de vedere al stabilității de tensiune, depinde de formularea metodelor de evaluare a acesteia. Se remarcă așadar: *profilul tensiunilor nodale*, care descrie dependența sarcinilor de nivelul tensiunii nodului prin care sunt alimentate; *caracteristica P-U*, conform căreia puterea cerută variază în același sens cu tensiunea, indicând condițiile stabile de funcționare; *indicatori de stabilitate de tensiune*, rezultați din analiza sensibilității tensiunii în raport cu puterea nodală și din condiția de obținere a unei soluții reale și pozitive din domeniul de existență al ecuației de regim permanent, pe baza cărora pot fi determinate elementele sensibile și zone vulnerabile ale rețelei electrice ce pot fi întărite prin conectarea unor mijloace de control al tensiunii; *analiza descompunerii valorilor singulare* a matricei Jacobian atașată rețelei electrice, din care rezultă gradul de stabilitate, astfel încât poate fi precizată rezerva de stabilitate de tensiune a sistemului considerat. Pentru metoda bazată pe descompunerea valorilor singulare, în cadrul studiului este propusă o adaptare a metodei clasice, pentru cazul rețelelor electrice de distribuție, pentru care gradul de stabilitate este influențat atât de variația circulației de putere reactivă, cât și a variației puterii active. În plus, în determinarea matricei Jacobian redusă, din care rezultă valorile singulare, sunt incluși coeficienți de sarcină a căror valori reflectă variația puterilor nodale, dependentă de sarcina sau sursa de generare distribuită conectată în nodul respectiv.

Pe baza rezultatelor analizei de stabilitate de tensiune, pot fi identificate ulterior atât reglajele optime de funcționare a echipamentelor responsabile cu controlul tensiunii din rețea, cât și nevoia de integrare a unor dispozitive noi pentru a îmbunătăți local sau global stabilitatea statică a sistemului considerat.

Capitolul patru are ca scop „*Controlul optim al puterii reactive în sistemele electroenergetice de distribuție active folosind tehnici meta-euristice multicriteriale*”, în sensul stabilirii strategiei de control al tensiunii prin managementul mijloacelor de control disponibile.

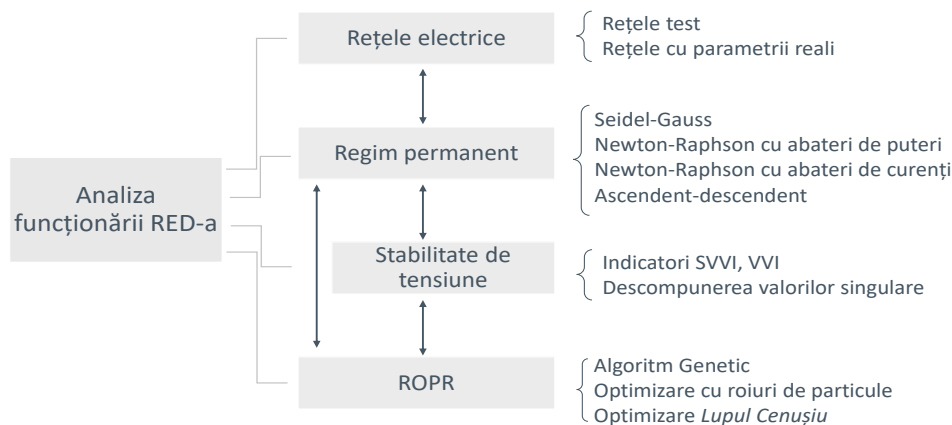
În sistemele electroenergetice, menținerea condițiilor de stabilitate statică și, implicit, un profil dorit al tensiunilor nodale depinde, în general de circulația de putere reactivă, însă, la nivelul rețelelor de distribuție și circulația puterii active are o contribuție semnificativă asupra stabilității de tensiune. Însă puterea activă este dependentă de condițiile impuse de utilizatorii integrați în rețea, astfel încât controlul tensiunii se realizează, cu precădere, prin intermediul unor dispozitive capabile de controlul puterii reactive, ce pot îmbunătăți, local, factorul de putere. Suplimentar, această măsură are ca efect creșterea puterii tranzitate prin elementele rețelei, dar și reducerea căderilor de tensiune și a pierderilor de putere activă, inclusiv prin transformatorul conectat în stația de alimentare a rețelei electrice de distribuție.

Astfel se dovedește necesară alocarea optimă a puterii reactive, ca strategie de control pentru menținerea condițiilor economice și tehnice de funcționare a unui sistem electroenergetic de distribuție activ. Această repartiție optimă rezultă din reglarea coordonată a puterii reactive a generatoarelor distribuite, a treptelor de funcționare a bateriilor cu condensatoare și a prizei de funcționare a comutatorului de ploturi. Aceste elemente constituie variabilele de control dintr-o problemă de optimizare care urmărește obținerea unor pierderi minime de putere activă prin elementele rețelei ( $\Delta P$ ), concomitent cu menținerea unei rezerve de stabilitate cât mai mare, determinată pe baza indicatorului de stabilitate (VSI), rezultat din descompunerea valorilor singulare, și a unui nivel al profilului de tensiune în jurul unei valori de referință (TVD). În acest sens, având în vedere obiective diferite ce trebuie îndeplinite este necesară formularea unei probleme de optimizare multicriterială.

Ulterior sunt investigate moduri de soluționare ale modelului matematic al problemei de optimizare, dar și stabilirea criteriilor de alegere a algoritmului celui mai performant pentru rezolvarea acesteia. Alegerea algoritmului este dependentă de acuratețea rezultatelor obținute, dar și de timpul de rulare până la identificarea soluției. În cazul modelului matematic complex al problemei urmărite am optat pentru utilizarea unei metode meta-euristice inspirată din aspecte ale vieții reale, precum organizarea ierarhică a unui grup de lupi, conform căreia membrii comunică între ei pentru ajustarea poziției în funcțiile de experiențele comune și cele de grup, atunci când se deplasează prin spațiul de căutare a soluției. Acest algoritm a fost adaptat pentru cazul particular al rezolvării repartiției optime a

puterii reactive la nivelul unei rețele electrice de distribuție și inclus într-un programul de calcul.

Capitolul cinci, „*Studii de caz și rezultate*” este structurat în mai multe subcapitole asociate studiilor de validare a mijloacelor implementate în programul de calcul, dar și de planificare a funcționării optime a unui sistem electroenergetic de distribuție activ, situat pe teritoriul României.



**Fig. 1.** Structura programului de calcul

Astfel, aspectele teoretice din primele patru capitole, sunt cuprinse într-un program de simulare, numit „Analiza funcționării RED-a”, utilizat pentru identificarea funcționării optime a unor sisteme electroenergetice, specifice nivelului de distribuție. Acesta este implementat în mediul MATLAB<sup>®</sup>, versiunea R2021b și este structurat în patru module, prezentate în figura 1.

**Tabelul 1. Analiza optimizării multicriteriale**

	Mono-obiectiv		Multi-obiectiv			
	$\Delta P$	VSI	TVD	$\Delta P$ și TVD	$\Delta P$ , VSI și TVD	
					Inițial	Restricție
<b><math>\Delta P</math></b> [u.r.]	<b>0,5002</b>	0,5019	0,6365	0,5675	0,5428	<b>0,5485</b>
<b>VSI</b> [-]	0,9553	<b>0,9561</b>	0,9379	0,9499	0,9524	<b>0,9519</b>
<b>TVD</b>	0,3057	0,2967	<b>0,0107</b>	0,0226	0,0719	<b>0,0596</b>
<b>Nr. comu- tații</b>	2	1	7	5	5	<b>1</b>
<b><math>U_{\text{mediu}}</math></b> [u.r.]	<b>1,0794</b>	<b>1,0782</b>	<b>1,0025</b>	1,0159	1,0360	<b>1,0321</b>

Rezultatele obținute din programul de calcul sunt utile pentru alegerea algoritmului de rezolvare al regimului permanent, determinarea influenței mijloacelor de control al tensiunii asupra condițiilor de funcționare a rețelelor electrice de distribuție, alegerea metodei de evaluare a rezervei de stabilitate și a proximității punctului de funcționare al sistemului de limita de instabilitate, dar

și pentru alegerea algoritmului de rezolvare a problemei de alocare optimă a puterii reactive.

Din studiile de caz, reprezentate prin simulări ale unor rețele electrice consacrate în literatura de specialitate, au putut fi validate adaptările propuse pentru metodele de regim permanent folosite, metodele de evaluare a stabilității de tensiune și algoritmi de rezolvare ai problemei de optimizare, ulterior fiind posibilă planificarea optimă a unui sistem electroenergetic de distribuție localizat pe teritoriul României, pe un interval de timp de o zi, pentru care sarcinile din rețea funcționează în conformitate cu o curbă de sarcină normalizată, în care sunt integrate patru surse de generare distribuită și două baterii cu condensatoare.

O primă apreciere din punct de vedere al stabilității de tensiune a sistemului analizat poate fi realizată pe baza indicatorului rezultat din analiza descompunerii valorilor singulare pentru regimul de bază, a cărui valoare este 0,7672, dar și din gradul maxim posibil de încărcare al rețelei, acesta fiind aproximativ de trei ori mai mare decât încărcarea nominală.

Din analiza rezultatelor optimizării funcționării sistemului de distribuție real, prezentată în tabelul 1, se observă că nivelul de tensiune necesar îndeplinirii obiectivelor  $\Delta P$  și VSI este situat în apropierea limitei admisibile superioare, valoarea medie a acestuia, fiind cu aproximativ 7% mai mare decât valoarea de referință. În urma optimizării multicriteriale, aceasta este cu 3,21% mai mare decât valoarea de referință, în condițiile în care indicatorul de stabilitate VSI se îmbunătățește față de regimul de bază, având valoarea 0,9519.

Prin identificarea reglajelor optime a consemnului de putere reactivă a surselor de generare distribuită existente în rețea, dar și a treptelor unor baterii cu condensatoare, a putut fi stabilit numărul minim de comutații ale prizei de funcționare din stația electrică de alimentare a întregii rețele, astfel încât să fie îndeplinite condițiile impuse. Astfel, numărul de comutații, asociat realizării obiectivului unic, TVD a fost redus de la șapte, la o singură comutație pe parcursul zilei analizate, pentru îndeplinirea tuturor celor trei obiective.

## CONTRIBUȚII ȘTIINȚIFICE

De-a lungul cercetării doctorale sunt incluse contribuții personale în legătură cu asigurarea stabilității de tensiune al sistemelor electroenergetice de distribuție, în contextul generării distribuite.

1. Investigarea literaturii de specialitate cu scopul identificării tendințelor privind:
  - Evoluția rețelelor electrice de distribuție către rețele de tip „smart grid”;
  - Influența generării distribuite asupra funcționării rețelelor electrice;
  - Mijloacele și metodele de control al tensiunii, în condițiile funcționării optime din punct de vedere tehnic și economic al rețelelor electrice de distribuție;
  - Reglementările impuse prin coduri de rețea la nivel european și național, pentru funcționarea rețelelor electrice de distribuție.
2. Analiza a patru metode de regim permanent în scopul alegerii celei mai performante și potrivite pentru evaluarea punctului static de funcționare al unei rețele electrice de distribuție. În acest sens este propusă o nouă abordare a metodei „Ascendent-Descendent”, folosind teoria grafurilor și un calcul matriceal, pe baza căruia rezultă tensiunile nodale direct din dependența acestora de curenții prin laturi. În plus este realizată o adaptare originală a matricei Jacobian din metoda Newton-Raphson cu abateri de curenți, prin inversarea elementelor termenilor diagonali, pentru a evita singularitatea matricei, ca urmare a raportului mare  $r/x$ .
3. Sintetizarea strategiilor de evaluare a stabilității de tensiune pentru a identifica zonele vulnerabile ale rețelei electrice de distribuție și a putea decide tipul de soluție pentru care se poate opta pentru creșterea rezervei de stabilitate. Suplimentar, în matricea singulară redusă, din evaluarea bazată pe descompunerea valorilor singulare, sunt integrați coeficienți de variație ai sarcinii, utili mai ales la nivelul rețelelor de distribuție în care zonele de consum sunt ample.
4. Evaluarea performanțelor a trei algoritmi meta-euristici de optimizare, pentru identificarea repartiției optime a puterii reactive, printr-o analiză statistică și adaptarea algoritmului de optimizare „Lupul Cenușiu” pentru problema de optimizare urmărită.
5. Implementarea într-un program de calcul, dezvoltat în mediul MATLAB, a tuturor modulelor de analiză a funcționării care urmăresc:
  - Analiza regimului de funcționare;
  - Metodele de evaluare a stabilității de tensiune, pe baza indicatorilor VVI, SVVI, dar și prin metoda SVD, caz Q, caz P și caz P-Q;
  - Algoritmul de rezolvare al problemei de optimizare;

- Modelul matematic al problemei repartiției optime a puterii reactive.
- 6. Abordarea unei strategii originale de planificare a funcționării unor rețele electrice de distribuție cu caracteristici specifice României, plecând de la analiza profilului de tensiune, evaluarea stabilității de tensiune și optimizarea multicriterială ținând cont de un număr minim de comutații al prizei de funcționare din stația electrică de alimentare a rețelei în configurație arborescentă.
- 7. Diseminarea rezultatelor studiilor privind tema aleasă prin publicații în cadrul unor conferințe precum CIEM 2019, CIEM 2021, UPEC 2019, dar și reviste internaționale Buletinul Științific al Universității Politehnica din București și *Energies*.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] J. Campillo, „From passive to active electric distribution networks,” Mälardalen University Press Dissertations, Västerås, Sweden, 2016.
- [2] Comisia Europeană, „Raport al Comisiei către Parlamentul European și Consiliu. Raport privind funcționarea pieței europene a carbonului,” Bruxelles, 16 ianuarie 2020.
- [3] R. Marcin, S. Dalia și B. Yuriy, „EU Carbon Emissions Market Development and Its Impact on Penetration of Renewables in the Power Sector,” *Energies*, vol. 12, nr. 2961, 2019.
- [4] ANRE, „Raport privind funcționarea pieței de certificate verzi,” Serviciul Strategii Energetice și Promovarea Surselor Regenerabile de Energie și a Cogenerării, 2005.