UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ENERGETICĂ
DEPARTAMENTUL SISTEME ELECTROENERGETICE
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ENERGETICĂ

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA DISPOZITIVELOR FACTS DE TIP SVC ÎN REȚELELE ELECTRICE DE TRANSPORT ÎN VEDEREA ÎMBUNĂTĂȚIRII PARAMETRILOR DE FUNCȚIONARE AI SISTEMULUI ȘI CREȘTERII CAPACITĂȚII DE INTEGRARE A SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

TEZĂ DE DOCTORAT

Doctorand: Andrei-Gabriel COTEANU

Conducător de doctorat: Prof.dr.ing. Ștefan GHEORGHE

București 2025

UNIVERSITATEA NAȚIONALĂ DE ȘTIINȚĂ ȘI TEHNOLOGIE POLITEHNICA DIN BUCUREȘTI
FACULTATEA DE ENERGETICĂ
DEPARTAMENTUL SISTEME ELECTROENERGETICE
ȘCOALA DOCTORALĂ DE INGINERIE ENERGETICĂ

CONTRIBUȚII PRIVIND UTILIZAREA DISPOZITIVELOR FACTS DE TIP SVC ÎN REȚELELE ELECTRICE DE TRANSPORT ÎN VEDEREA ÎMBUNĂTĂȚIRII PARAMETRILOR DE FUNCȚIONARE AI SISTEMULUI ȘI CREȘTERII CAPACITĂȚII DE INTEGRARE A SURSELOR REGENERABILE DE ENERGIE

Doctorand: Andrei-Gabriel Coteanu

COMISIA DE ÎNDRUMARE ȘI INTEGRITATE

Prof. dr. ing. Radu Porumb	Președinte comisie doctorală
Prof. dr. ing. Ștefan Gheorghe	Conducător doctorat
Prof. dr. ing. Lucian Toma	Membru comisie
Prof. dr. ing. Ion Triștiu	Membru comisie
Prof. dr. ing. Mihai Sănduleac	Membru comisie
Prof. dr. ing. Valentin Brănescu	Membru comisie

CUPRINS

1. CAPITOLUL 1 – INTRODUCERE 1

1.1. CONTEXTUL ACTUAL 1
1.2. IDENTIFICAREA PROBLEMEI 1
1.3. OBIECTIVUL LUCRĂRII 2
1.4. METODOLOGIA LUCRĂRII 2

2. CAPITOLUL 2 – CONCEPTE DE BAZĂ PRIVIND SISTEMELE ELECTROENERGETICE 4

2.1. NOȚIUNI GENERALE 4
2.2. CLASIFICAREA SI CONFIGURAȚIILE SPECIFICE REȚELELOR DIN SISTEMUL ELECTROENERGETIC 6
2.2.1. Arhitectura sistemului electroenergetic 6
2.2.2. Clasificarea rețelelor electrice 7
2.2.2.1. Rețelele electrice de transport 7
2.2.2.2. Rețelele electrice de distribuție 8
2.3. REGIMUL STAȚIONAR SIMETRIC AL SISTEMELOR ELECTROENERGETICE 8
2.4. REGIMURILE DINAMICE ȘI STABILITATEA SISTEMELOR ELECTROENERGETICE 9
2.4.1. Aspecte generale privind regimurile dinamice 9
2.4.2. Noțiuni generale privind stabilitatea sistemelor electroenergetice 10
2.4.3. Clasificarea stabilității sistemelor electroenergetice 11

3. CAPITOLUL 3 – DISPOZITIVE FACTS, COMPESATORUL STATIC DE PUTERE REACTIVĂ ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

3.1. TEHNOLOGII FACTS UTILIZATE ÎN SISTEMELE ELECTROENERGETICE 16
3.2. COMPENSATORUL STATIC DE PUTERE REACTIVĂ 21
3.2.1. Elemente componente ale instalației SVC 21
3.2.2. Configurații ale SVC 25
3.2.2.1. Configurația SVC cu condensator fix în paralel cu bobină controlată prin tiristoare 25
3.2.2.2. Configurația SVC cu condensator controlat prin tiristoare în paralel cu bobină controlată prin tiristoare 26
3.2.3. Modele de implementare a dispozitivelor SVC în stațiile electrice 26
3.2.4. Strategii de control a SVC 29

4. CAPITOLUL 4 – UTILIZAREA SOLUȚIEI SOFTWARE NEPLAN ELECTRICITY PENTRU SIMULAREA REGIMURILOR DE FUNCȚIONARE ALE REȚELEI 31

4.1 DESCRIERE GENERALĂ 31
4.2 MODULE SI FUNCȚIONALITĂȚI 31
4.2.1. Calculul regimului permanent si analiza contingențelor: 31
4.2.2. Analiza de scurtcircuit 32
4.2.3. Analiza stabilității tensiunii 34

5. CAPITOLUL 5 - STUDIUL DE CAZ 1: NECESITATEA ȘI BENEFICIILE UTILIZĂRII SVC ÎN VEDEREA ÎMBUNĂTĂȚIRII REGIMURILOR STAȚIONARE DE FUNCȚIONARE 35

5.1. OBIECTIVUL STUDIULUI DE CAZ 35
5.2. REȚEAUA NORDIC32 35
5.3. METODOLOGII 37
5.3.1. Utilizarea metodologiilor pentru integrarea dispozitivelor FACTS în rețeaua electrică de transport 37
5.3.2. Metodologie alegere tip dispozitiv FACTS 38
5.3.3. Metodologie alegere nod amplasare dispozitiv SVC 40
5.4. MODELAREA DISPOZITIVULUI SVC ÎN NEPLAN10 PENTRU CALCULUL REGIMULUI PERMANENT 43
5.5. IMPLEMENTAREA METODOLOGIILOR PROPUSE ÎN REȚEAUA NORIDC32 46
5.5.1. Alegerea dispozitivului FACTS în rețeaua NORDIC32 46
5.5.2. Determinarea locației optime pentru dispozitivului SVC în rețeaua NORDIC32 52
5.6. CONCLUZIILE STUDIULUI DE CAZ 64

6. CAPITOLUL 6 – STUDIUL DE CAZ 2: ANALIZA IMPACTULUI SURSELOR REGENERABILE ASUPRA STABILITĂȚII DINAMICE A REȚELELOR ȘI OPORTUNITATEA UTILIZĂRII DISPOZITIVELOR SVC 66

6.1. OBIECTIVUL STUDIULUI DE CAZ 66

6.2. SIMULAREA REGIMURILOR DINAMICE DE FUNCȚIONARE ALE REȚELELOR DE TRANSPORT 66
6.2.1. Structuri de interconectare a regulatoarelor 66
6.2.2. Regulatoare utilizate pentru controlul funcționării hidrocentralelor 68
6.2.2.1. Regulator de tensiune – ST6B 69
6.2.2.2. Regulator PSS2B 70
6.2.2.3. Regulatorul pentru turbină GOVHYDRO1 72
6.2.3. Regulatoare utilizate pentru controlul funcționării termocentralelor 73
6.2.3.1. Regulatorul de excitație AC1A 73
6.2.3.2. Regulatorul PSS1A 74
6.3.3.3. Regulatorul pentru turbina GGOV1 75
6.2.4. Regulatoare utilizate pentru controlul funcționării SVC 76
6.2.4.1. Regulatorul pentru SVC tip CSVGN1 76
6.2.4.2. Regulatorul pentru SVC tip CSVGN3 78
6.2.4.3. Regulatorul pentru SVC tip CSVGN4 79
6.2.4.4. Regulatorul pentru SVC tip CSVGN5 80
6.2.4.5. Regulatorul pentru SVC tip CSVGN6 81
6.2.5. Turbine eoliene 82
6.2.5.1. Turbine eoliene de tip 1 82
6.2.5.2. Turbine eoliene de tip 2 83
6.2.5.3. Turbine eoliene de tip 3 84
6.2.5.4. Turbine eoliene de tip 4 86
6.2.5.5. Alegerea modelului de turbină eoliană pentru studiul de caz 88
6.2.6. Scenarii analizate 89
6.2.6.1. Scenariul inițial – S0 89
6.2.6.2. Scenariul cu surse regenerabile de energie – S1 90
6.2.7. Analiza comportamentului dinamic al rețelei în scenariile studiate 92
6.2.7.1. Evenimentul dinamic 1 – declanșarea liniei de 400 kV L432-444 92
6.2.7.2. Evenimentul dinamic 2 – deconectarea și reconectarea consumatorului C3 97
6.2.7.3. Evenimentul dinamic 3 – declanșarea transformatorului de putere 400/130 kV T144-444101
6.2.7.4. Evenimentul dinamic 4 – declanșarea termocentralei G16 104
6.2.7.5. Evenimentul dinamic 5 – scurtcircuit in nodul de 130kV 141 108
6.2.7.6. Evenimentul dinamic 6 – scurtcircuit trifazat pe linia de 400 kV L446-447 112
6.2.8. Concluzii 115

7. CAPITOLUL 7 - STUDIUL DE CAZ 3: ANALIZA OPORTUNITĂȚII INSTALĂRII DE DISPOZITIVE SVC IN SEN 117

7.1. DESCRIEREA SITUAȚIEI ACTUALE LA NIVELUL SEN 117
7.2. PERSPECTIVE DE DEZVOLTARE ȘI INTEGRARE A SURSELOR REGENERABILE 118
7.3. Analiza regimurilor staționare de funcționare 119
7.3.1. Analiza regimului inițial de funcționare 119
7.3.2. Palierul de funcționare VDV 121
7.3.3. Palierul de funcționare GNV 123
7.3.4. Palierul de funcționare VDI 124
7.3.5. Palierul de funcționare VSI 125
7.4. CONCLUZII 127

8. CAPITOLUL 8 – CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE 128

8.1.CONCLUZII 128
8.2. CONTRIBUȚII PERSONALE 129
8.3. DIRECȚII DE URMAT ÎN CERCETARE 133

BIBLIOGRAFIE 134

ANEXE

1. CAPITOLUL 1 – INTRODUCERE

1.1. Contextul actual

În prezent sistemele electroenergetice trec printr-o transformare profundă în sensul tranziției de la generarea clasică centralizată realizată în centrale electrice de puteri mari și foarte mari la generarea distribuită ce presupune unități mici de producție a energiei electrice și în același timp se face simțită o dezvoltare pe scară largă a surselor regenerabile pentru producerea energiei electrice (eolian, fotovoltaic, biomasă, micro-hidrocentrale etc). Totodată, consumatorii care în trecut aveau un rol exclusiv pasiv devin tot mai activ implicați în funcționarea sistemelor energetice prin asumarea rolului de prosumator, dar și aplicarea metodelor DSM (Demand Side Management) și creșterea interesului pentru eficiența energetică. Această tranziție, deși aduce noi provocări, este necesară pentru asigurarea sustenabilității din punct de vedere climatic și reducerea la minim a impactului asupra mediului.

Principala provocare întâlnită în procesul de tranziție la nivelul sistemelor electroenergetice este reprezentată de creșterea siguranței și asigurarea continuității în alimentare pentru toți utilizatorii într-un mod eficient atât din punct de vedere tehnic cât și economic. Este necesară evaluarea impactului tuturor acestor procese de tranziție atât din punct de vedere al regimurilor statice de funcționare cât și din punct de vedere al regimurilor dinamice.

Un exemplu recent îl reprezintă evenimentele, petrecute pe 28 aprilie în Spania, unde în urma deconectării mai multor centrale electrice fotovoltaice, a rezultat o scădere bruscă a energiei generate, iar frecvență în sistem a scăzut până la valoarea de 48 Hz [1]. Această scădere rapidă în cantitatea de energie produsă a generat o creștere bruscă a importurilor de energie din Franța până la nivelul în care separarea celor două sisteme a fost inevitabilă. În urma acestor evenimente blackout-ul a afectat doar Peninsula Iberică și o mică parte din Franța [1]. Acest exemplu ilustrează perfect provocările generate de tranziția către sursele regenerabile de energie asupra stabilității sistemelor electroenergetice. Problemele legate de scăderea inerției mecanice și implicit a siguranței în funcționare în urma tranziției energetice sunt studiate la nivelul politicilor europene pentru a identifica soluțiile optime.

Toate aceste provocări au nevoie de soluții tehnice pe măsură care să ajute la buna funcționare a sistemelor energetice într-un mediu aflat în continuă schimbare.

Un set de soluții pentru aceste probleme este reprezentat de dispozitivele FACTS (Flexible AC Transmission System) care permit creșterea flexibilității în operare și a siguranței în exploatare a sistemelor energetice prin utilizarea tehnologiilor bazate pe electronică de putere [2]. Echipamentele de tip FACTS oferă o gamă largă de beneficii putând fi utilizate în sistemele de transport și distribuție a energiei electrice pentru a crește stabilitatea sistemului, reglajul nivelului de tensiune, reducerea pierderilor de energie și controlul circulației de putere [3].

Pentru a putea determina soluțiile optime de răspuns pentru toate aceste provocări este necesară utilizarea rețelelor standardizate de testare și a mediilor de simulare. Rețelele standardizate de testare ajută la evaluarea impactului și modelarea scenariilor de răspuns pentru multiple scenarii de funcționare. Prin utilizarea rețelelor de testare pot fi comparate regimurile de funcționare în mai multe situații de tranziție pornind de la regimul de bază în care sursele de energie sunt cele convenționale (hidrocentrale, termocentrale, centrale nucleare) și până la regimuri în care sursa principală de energie într-o anumită zonă a rețelei este regenerabilă.

1.2. Identificarea problemei

Sistemele energetice sunt într-o continuă schimbare încercând în permanență să se adapteze atât nevoilor utilizatorilor cât și politicilor de mediu pentru a asigura o tranziție eficientă către sursele

de energie cu impact redus asupra mediului. Toate aceste procese de schimbare generează probleme din punct de vedere al asigurării siguranței în funcționare a sistemelor electroenergetice.

Principalele probleme identificate în acest proces de tranziție sunt:

- Creșterea siguranței în funcționare;
- Controlul circulației de puteri în sistemele interconectate pentru a asigura o funcționare eficientă cu pierderi de energie cât mai reduse;
- Controlul nivelului de tensiune în rețea din cauza variațiilor în procesele de producere și consum a energiei electrice;
- Asigurarea stabilității dinamice a sistemelor în cazul unor evenimente cu impact crescut.

1.3. Obiectivul lucrării

Obiectivul prezentei lucrări este acela de a realiza o analiză complexă în care să se identifice principalele probleme în funcționarea sistemelor electroenergetice care pot fi rezolvate prin utilizarea dispozitivelor FACTS de tip SVC și cum poate fi crescută capacitatea de integrare a surselor regenerabile de energie la nivelul rețelei electrice de transport.

Pentru a atinge acest obiectiv este necesar:

- Să se parcurgă un proces de cercetare al stadiului actual din punct de vedere al funcționării sistemelor electroenergetice, al dispozitivelor FACTS și al modului de funcționare și parametrizare a echipamentelor tip SVC.
- Utilizarea rețelelor standardizate de testare pentru a realiza o analiză detaliată privind impactul surselor regenerabile de energie asupra funcționării sistemelor electroenergetice.
- Studiul comportamentului și modelării principalelor elemente componente ale rețelei în regimurile dinamice de funcționare.
- Realizarea de studii privind comportamentul rețelelor electrice de transport a energie în diverse scenarii de funcționare și pentru o serie de evenimente dinamice.
- Analiza oportunității de a implementa dispozitive SVC în sistemul energetic național din România, prin realizarea de simulări pentru mai multe scenarii, analiza nodului optim de conectare și dimensionarea dispozitivului FACTS.

1.4. Metodologia lucrării

În procesul de cercetare au fost parcurse o serie de etape cu scopul de a determina oportunitatea utilizării dispozitivelor FACTS de tip SVC în rețele electrice de transport în contextul tranziției energetice către sursele regenerabile de energie. Pentru aceasta, într-o primă etapă a fost parcurs un proces de documentare privind subiecte precum regimurile dinamice de funcționare a sistemelor electroenergetice și echipamentele FACTS. Toate aceste noțiuni teoretice au fost necesare pentru a fi preluate și cu ajutorul lor realizate studiile de caz care stau la baza concluziilor prezentei lucrări.

În prima etapă a studiului de caz s-au propus, analizat și implementat două metodologii aplicabile în rețelele electrice de transport. Prima metodologie are ca scop alegere dispozitivului FACTS optim pentru a răspunde problemelor identificate la nivelul sistemului, iar a doua metodologie are ca obiectiv dimensionarea corectă și amplasarea echipamentelor SVC în rețea. Ambele metodologii au fost implementate, testate și validate folosind rețeaua test NORDIC32. După o serie de simulări au rezultat primele concluzii privind oportunitatea utilizării dispozitivelor SVC pentru a îmbunătății controlul tensiunii în nodurile rețelei, în vederea reducerii pierderilor în funcționare și pentru a crește capacitatea de integrare a surselor regenerabile de energie.

A doua etapă a studiului de caz a avut ca obiectiv analiza regimurilor dinamice de funcționare a rețelei și beneficiile implementării soluțiilor SVC. Acest proces a început cu analiza și parametrizarea regulatoarelor folosite în controlul generatoarelor în regimurile dinamice de

funcționare. O altă etapă importantă a fost alegerea modelului de turbină eoliană pentru a fi utilizată în simulări în funcție de caracteristicile constructive și de funcțiile de control disponibile. Pentru evaluarea impactului dinamic s-au studiat mai multe scenarii inclusiv un caz dedicat tranziției către sursele regenerabile. În cadrul studiului s-a analizat comparativ răspunsul SVC cu cel al compensatorului sincron clasic. Această comparație a fost realizată pentru o serie de evenimente dinamice care au avut ca scop evaluarea stabilității dinamice a sistemului. În urma simulărilor a rezultat că dispozitivul SVC îmbunătățește semnificativ stabilitatea dinamică a rețelei, în special stabilitatea de tensiune, fiind ideal pentru a fi utilizat în rețele cu grad ridicat de integrare a surselor regenerabile.

În cea de a treia etapă a studiului de caz au fost testate ipotezele prezentate anterior pentru o rețea complexă, de mari dimensiuni, respectiv sistemul energetic din România. În urma simulărilor s-a concluzionat faptul că dispozitivele SVC reprezintă o soluție la o serie de provocări produse de sursele regenerabile în sistem, cum ar fi controlul tensiunii, creșterea stabilității și reducerea pierderilor de putere.

2. CAPITOLUL 2 – CONCEPTE DE BAZĂ PRIVIND SISTEMELE ELECTROENERGETICE

2.1. Noțiuni generale

Un sistem electroenergetic poate fi definit ca totalitatea instalațiilor electrice al căror rol este consumul, producerea, distribuția și transportul energiei electrice. Pentru a forma un sistem electroenergetic între toate elementele componente trebuie să existe o formă de conexiune. În funcționarea unui sistem electroenergetic sunt necesare elemente precum: generatoare electrice, transformatoare electrice de putere, linii electrice de transport și linii electrice de distribuție a energiei și consumatori. În cazul sistemelor electroenergetice toate aceste elemente sunt prezente într-un număr ridicat [4].

2.3. Regimul staționar simetric al sistemelor electroenergetice

În procesul de proiectare și exploatare al sistemelor electroenergetice este considerat că regimul normal de funcționare și dimensionare este regimul staționar simetric. Pentru determinarea regimului de funcționarea al unui SEE este necesară rezolvarea unui sistem de ecuații neliniare, în acest sens, în timp, au fost dezvoltate o serie de metode de determinarea a circulației de puteri, cele mai des folosite fiind metodele nodale [12].

Putem caracteriza starea electrică a unui nod prin folosirea a patru mărimi: valoarea tensiunii, puterea activă, puterea reactivă și faza tensiunii față de o axă de referință. Mărimile electrice ale nodurilor din sistem au o relație de interdependență între ele, astfel nu pot fi impuse într-un nod toate cele patru mărimi caracteristice simultan.

Pentru un nod pot fi impuse două mărimi, celelalte două rezultând în urma calculului regimului permanent. Acest mod de atribuire al mărimilor impuse în fiecare nod împarte nodurile unei rețele în trei categorii: noduri de echilibru, noduri generatoare și noduri consumatoare [13].

2.4. Regimurile dinamice și stabilitatea sistemelor electroenergetice

2.4.1. Aspecte generale privind regimurile dinamice

Analiza regimurilor dinamice de funcționare datorate unor defecte în rețea, precum scurtcircuitele sau declanșarea unor elemente, reprezintă o activitate cu un nivel de complexitate crescut. În primul rând, localizarea și tipul defectelor ce pot apărea prezintă o varietate crescută, iar în al doilea rând întregul proces de desfășurare a unui eveniment dinamic are multiple aspecte ce pot influența desfășurarea. Un alt aspect considerat în analiza fenomenelor dinamice este prezența unor defecte în modul de acționare al echipamentelor de protecție având o funcționare diferită în timpul defectului decât cea normală [15]. În prezent, pentru sistemele energetice interconectate, o problemă deosebit de importantă, ce este intens analizată, este reprezentată de studiul posibilității de extindere a evenimentelor care pot genera instabilitate asupra unei zone mari a rețelelor de transport. Alegerea și parametrizarea corectă a echipamentelor de protecție și automatizare din rețeaua de transport reprezintă un aspect deosebit de important în buna funcționare a sistemelor electroenergetice ajutând la evitarea extinderii fenomenelor în regimuri instabile [15] [16].

În analiza regimurilor dinamice, o importanță deosebită o au evenimentele care sunt generate de variații mari de putere în sistem ce pot genera oscilații ale nivelului de tensiune pe barele colectoare ale centralelor cu grupuri de peste 15% și care pot produce modificări ale unghiurilor rotorice relative ce depășesc 50º. În general, evenimentele dinamice care pot genera un astfel de impact ridicat asupra sistemului au una din următoarele cauze[17]:

- Declanșări ale unor linii importante din rețeaua de înaltă tensiune, cu o încărcare ridicată, cu precădere în cazurile în care în urma declanșării respective se generează un nou regim de funcționare al rețelei care este caracterizat de un nivel scăzut al tensiunii ce poate favoriza pendulații ale generatoarelor din cauza epuizării rezervei de stabilitate statică.

- Producerea unui scurtcircuit trifazat sau a unui scurtcircuit bifazat cu pământul, în anumite situații, pentru zone cu încărcare ridicată regimurile dinamice intense pot fi generate și de scurtcircuite monofazate.
- În cazul grupurilor generatoare mari, declanșarea acestora poate genera un regim dinamic intens cu risc pentru funcționarea sistemului.
- În cazul generatoarelor de putere mare, un eveniment dinamic puternic poate fi declanșat și de o defecțiune în circuitele de reglaj automat al excitației [12].

Evenimentele dinamice prezentate mai sus au fost analizate în capitolul 6.2.7. pentru a determina stabilitatea rețelei NORDIC32 în prezența surselor regenerabile de energie.

2.4.2. Noțiuni generale privind stabilitatea sistemelor electroenergetice

Așa cum este cunoscut, noțiunea de stabilitate a sistemelor electroenergetice poate fi definită prin raportare la capabilitatea unui sistem de a rămâne într-o stare de echilibru după producerea unei mici perturbații și de a se întoarce într-o stare acceptabilă de echilibru după producerea unei perturbații mari. Perturbația este un fenomen care produce o schimbare rapidă sau o serie de schimbări rapide ale unuia sau mai multor parametri ai sistemului. [5]

Fenomenele de instabilitate în sistemele electroenergetice pot avea manifestări diferite în funcție de modul de operare și de configurația sistemului. În cele mai multe cazuri, problemele de stabilitate fac referire la menținerea sincronismului în funcționare [18].

2.4.3. Clasificarea stabilității sistemelor electroenergetice

Raportat la dinamica fenomenelor, stabilitatea sistemelor electroenergetice poate fi grupată în trei mari concepte: stabilitatea unghiului rotoric, stabilitatea frecvenței și stabilitatea tensiunii.

În funcție de interpretarea fizică a fenomenului de stabilitate acestea pot fi clasificate în:

a. **Stabilitatea unghiului rotoric**, asociată fenomenelor rapide;

Stabilitatea unghiului rotoric se referă la capacitatea fiecărei mașini sincrone de a-și menține sincronismul față de celelalte mașini din sistem. Concret, aceasta presupune ca unghiul relativ dintre rotoarele a două mașini sincrone să nu se modifice semnificativ, astfel încât nicio mașină să nu efectueze o rotație completă (alunecare de 2π radiani) față de alta, indiferent dacă sistemul funcționează în regim normal sau după o perturbație [25].

b. **Stabilitatea frecvenței**, influențată de dinamici lente și/sau rapide;

Stabilitatea frecvenței se referă la capacitatea sistemului de a menține frecvența în limite admise după o perturbație majoră, asigurând echilibrul între puterea generată și consumată. Una dintre măsurile de restabilire este descărcarea de sarcină.

c. **Stabilitatea tensiunii**, caracterizată ca fenomen cu evoluție lentă.

Stabilitatea tensiunii se referă la capacitatea sistemului de a menține un nivel în nodurile rețelei, prevenind colapsul. Este determinată în principal de echilibrul puterilor reactive [16].

Un sistem electroenergetic poate intra într-o stare de instabilitate de tensiune atunci când, în urma unei perturbații (precum creșterea bruscă a sarcinii sau o modificare topologică a rețelei), apare o scădere progresivă și necontrolabilă a nivelului tensiunii, fie într-un nod, fie într-o zonă mai extinsă, sau chiar în întregul sistem. Cauza principală a instabilității de tensiune este pierderea tensiunii în rețea, provocată de circulația puterii prin componentele inductive ale rețelei de transport.

Stabilitatea tensiunii (condiționată de sarcină) [16].

Noțiunile teoretice prezentate în acest capitol sunt necesare în realizarea studiului de caz din capitolul 6 privind analiza impactului surselor regenerabile asupra stabilității dinamice a rețelelor și oportunitatea utilizării dispozitivelor SVC. În cadrul studiului de caz au fost analizate toate tipurile de stabilitate, accentul fiind pus pe stabilitatea de tensiune și pe îmbunătățirea acesteia prin utilizarea dispozitivelor SVC.

3. CAPITOLUL 3 – DISPOZITIVE FACTS, COMPESATORUL STATIC DE PUTERE REACTIVĂ

3.1. Tehnologii FACTS utilizate în sistemele electroenergetice

O definiție acceptată în comunitățile profesionale internaționale pentru dispozitivele de tip FACTS (Flexible AC Transmission Systems) este: soluțiile de tip FACTS sunt sisteme de transport a energiei electrice la tensiune alternativă care au în componență comutatoare statice bazate pe electronică de putere și care cresc capacitatea de transfer și controlabilitatea. [2]

O definiție acceptată de organizațiile internaționale profesionale din domeniul energetic pentru compensatoarele VAr este: compensatoarele VAr statice reprezintă generatoare statice de putere reactivă în cazul cărora prin schimbarea curentului capacitiv sau inductiv rezultă o schimbare a mărimilor de ieșire care permite controlul sau menținerea anumitor parametrii ai sistemului electroenergetic, în general tensiunea într-un nod al rețelei [31] [32]. SVC-urile sunt conectate în derivație având în componență bobine și condensatoare a căror comandă este realizată folosind tiristoare. Acestea sunt utilizate pentru creșterea performanțelor sistemelor în care sunt conectate, fiind utile atât în rețele de transport cât și în rețelele de distribuție a energiei electrice [33]. Principalele beneficii obținute prin utilizarea dispozitivelor SVC sunt: controlul nivelului de tensiune și limitarea variațiilor rapide ale acestuia, mărirea capacității de transport a liniilor electrice, diminuarea pierderilor de putere și îmbunătățirea stabilității sistemului. În figura 3.1 este prezentată schema de principiu a unui echipament SVC.

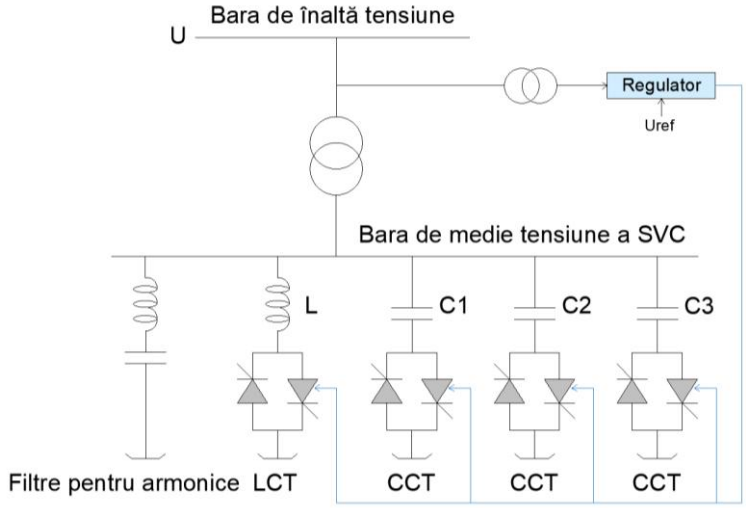


Figura 3.1. Schema de principiu a unui SVC [2]

3.2. Compensatorul static de putere reactivă

3.2.1. Elemente componente ale instalației SVC

Dispozitivele de tip SVC au un grad ridicat de utilizare în rețele electrice complexe în care există probleme privind oscilațiile nivelului de tensiune și stabilitatea dinamică în funcționare. Acestea sunt conectate în stații importante din sistem prin intermediul unei celule de racord [57]. Din punct de vedere al elementelor componente ale instalației SVC acestea sunt prezentate în figura 3.8.

În figura 3.8. este ilustrată o vedere 3D a unei instalații SVC pe care sunt prezentate principalele elemente ce intră în componența dispozitivului FACTS. În funcție de cerințele specifice fiecărui amplasament configurația poate fi adaptată, dar elementele principale prezentate în figura 3.8 sunt necesare.

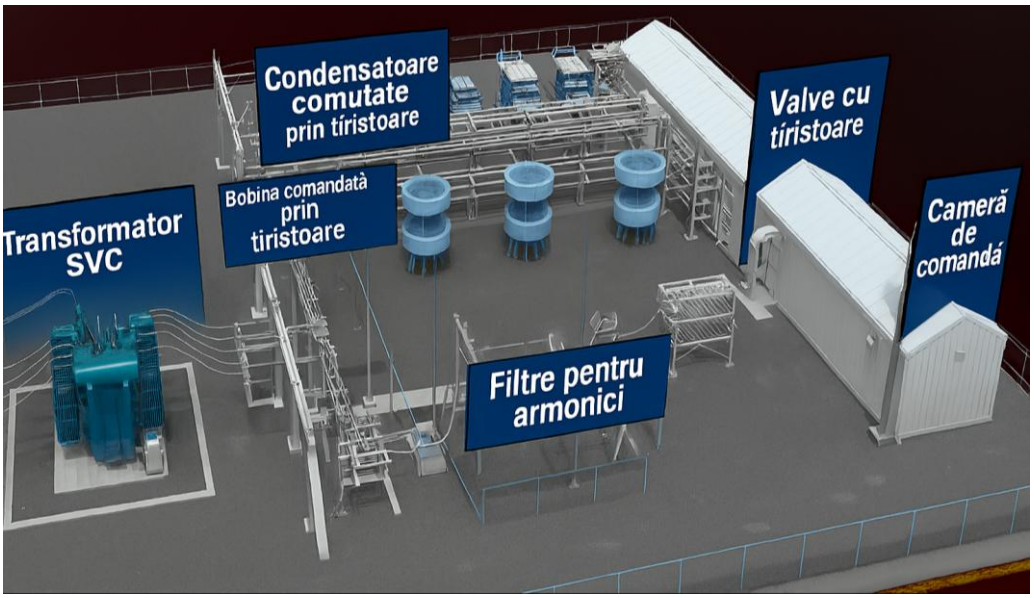


Figura 3.8 Vedere 3D a principalelor elemente componente a instalației SVC [58]

3.2.2.2. Configurația SVC cu condensator controlat prin tiristoare în paralel cu bobină controlată prin tiristoare

O variantă constructivă de realizare a dispozitivului SVC în care pierderile sunt mai reduse și în care capacitatea de control este mult mai crescută este cea cu condensator controlat prin tiristoare în paralel cu bobina controlată prin tiristoare. Caracteristica V-I de funcționare pentru această variantă constructivă a dispozitivului SVC este prezentată în figura 3.17 [63].

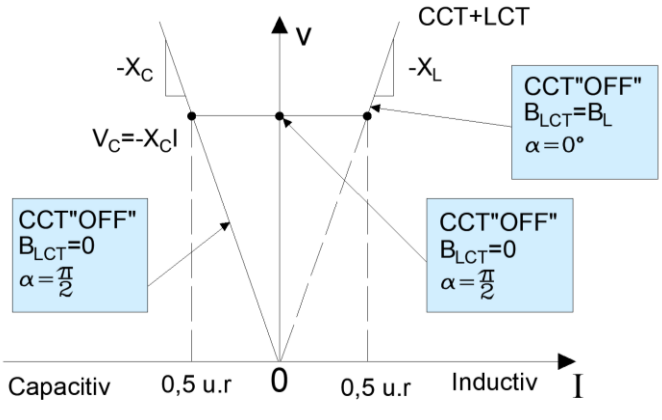


Figura 3.17. Caracteristica V-I pentru SVC în configurația CCT în paralel cu LCT [2]

În această situație curentul total reprezintă suma algebrică a curentului produs de condensator și curentul preluat de bobină. Dacă condensatorul controlat prin tiristoare este deconectat curentul va avea valoare curentului inductiv din bobină. Pentru această situație caracteristica de funcționare a SVC este similară cu caracteristica de funcționare a bobinei controlate cu tiristoare, iar controlul curentului se realizează în intervalul zero – maxim inductiv prin modificarea unghiului α în intervalul 0 π/2. În cazul în care CCT este conectat variația curentului de la maxim inductiv la maxim capacitiv se realizează prin modificarea unghiului α între 0 și π/2 [2] [64].

5. CAPITOLUL 5 - STUDIUL DE CAZ 1: NECESITATEA ȘI BENEFICIILE UTILIZĂRII SVC ÎN VEDEREA ÎMBUNĂTĂȚIRII REGIMURILOR STAȚIONARE DE FUNCȚIONARE

5.1. Obiectivul studiului de caz

Pentru a determina oportunitatea, necesitatea și beneficiile obținute prin utilizarea dispozitivelor FACTS de tip SVC este necesar să se realizeze o analiză detaliată asupra regimurilor de funcționare ale rețelei în diverse scenarii de evoluție a acesteia. Astfel, pentru realizarea primului studiu de caz s-a utilizat rețeaua de test NORDIC32. Având în vedere structura rețelei de test NORDIC32 în care producția de energie electrică este bazată pe hidrocentrale si termocentrale de putere mare aceasta a fost considerată potrivită pentru a fi adaptată contextului actual privind integrarea surselor regenerabile de energie.

S-a analizat regimul inițial de funcționare al rețelei NORDIC32 pentru a determina punctele optime pentru utilizarea dispozitivelor FACTS și tipul acestora. Pornind de la modelul inițial al sistemului NORDIC32 s-au realizat mai multe scenarii de funcționare pentru a analiza problemele ce pot apărea atunci când crește consumul în rețea sau în situația în care o parte din sursele clasice de producere a energiei electrice sunt înlocuite de surse regenerabile de energie. Pentru deficiențele apărute în funcționarea sistemului în scenariile prezentate au fost utilizate tehnologii de tip FACTS, respectiv dispozitive de tip SVC. Acestea au fost utilizate atât pentru a menține nivelul de tensiune în noduri în limitele maxime admisibile cât si pentru reducerea pierderilor de putere în rețea.

Pentru a calcula regimul permanent de funcționare al rețelei atât în situația inițială cât și în scenariile ulterioare a fost necesară utilizarea unei soluții software dedicată pentru calculul regimurilor de funcționare a sistemelor electroenergetice. Toate regimurile de funcționare ale rețelei NORDIC32 în prezența surselor regenerabile de energie și a dispozitivelor de tip FACTS au fost calculate folosind softul NEPLAN10. Principalele module de funcționare ale softului NEPLAN10 au fost prezentate în capitolul 4 al prezentei lucrări.

În urma regimurilor de funcționare analizate au rezultat principalele concluzii și recomandări privind utilizarea mijloacelor moderne de compensare a energiei reactive în rețelele electrice de transport pentru a crește capacitatea de integrare a surselor de energie regenerabilă.

5.3. Metodologii

5.3.1. Utilizarea metodologiilor pentru integrarea dispozitivelor FACTS în rețeaua electrică de transport

Rețelele electrice de transport sunt caracterizate prin complexitate, număr crescut de elemente ce funcționează interconectate și întindere pe o zonă geografică mare. Având în vedere aceste caracteristici definitorii, în analizele realizate pentru a determina tipul de dispozitiv FACTS dar și locația optimă pentru implementarea acestuia sunt necesare metodologii clare, cu o etapizare corectă și cu o funcție obiectiv bine definită. În acest sens, au fost elaborate și prezentate în acest capitol două metodologii distincte. Prima dintre ele are ca obiectiv determinarea dispozitivului FACTS optim pentru a fi utilizat în cadrul unei rețele electrice din transport. Aceasta pornește de la identificarea deficiențelor de funcționare la nivelul sistemului și prin pași succesivi determină dintr-o serie de dispozitive FACTS care este cel mai indicat pentru a fi utilizat. A doua acoperă un domeniu cu un spectru mai restrâns, respectiv alegerea nodului optim pentru conectarea unui echipament de tip SVC. Această metodologie identifică zonele în care SVC poate aduce beneficii în funcționarea sistemului, iar ulterior alege nodul de conexiune pentru a maximiza rezultatele funcției obiectiv.

5.3.2. Metodologie alegere tip dispozitiv FACTS

Alegerea dispozitivului FACTS adaptat necesităților sistemului este un proces complex care are nevoie o abordare multidimensională care să respecte atât cerințele tehnice cât și restricțiile de natură economică. Procesul pornește de la determinarea regimului inițial de funcționare al rețelei. Din această etapă sunt obținute principalele informații privind starea sistemului și principale deficiențe care pot afecta siguranța în funcționare. Pornind de la cerințele tehnice definite în cadrul etapei de analiză a regimului inițial de funcționare al rețelei se stabilește funcția obiectiv. În concordanță cu obiectivul ales sunt analizate principalele tipuri de echipamente FACTS având în vedere beneficiile aduse de fiecare dar și condițiile specifice pentru instalare. După o comparație detaliată este aleasă varianta optimă care îndeplinește criteriile tehnice, maximizând rezultatele funcției obiectiv și respectând în același timp și constrângerile de natură economică. În final, soluția aleasă este validată printr-o serie de simulări care analizează mai multe scenarii posibile de evoluție a rețelei astfel încât soluția să fie corect dimensionată pentru un orizont de timp de lungă durată în ceea ce privește dezvoltarea rețelei. Din această cauză, în metodologia de alegere a dispozitivului FACTS au fost definite cinci etape principale care trebuie să fie urmate.

Etapa 1 – Analiza situației energetice inițiale

În aceasta etapă se colectează datele privind elementele componente ale rețelei electrice studiate, se calculează regimul permanent al rețelei, se determină principalele contingențe ce pot afecta siguranța funcționării rețelei, se identifică evenimentele dinamice cu impact major și se calculează valoarea curentului de scurtcircuit în principalele noduri ale rețelei. Acești pași inițiali sunt esențiali pentru a putea avea o imagine de ansamblu clară asupra situației energetice la nivelul rețelei.

În urma acestei analize se vor obține următoarele informații privind situația rețelei:

- Circulația de putere la nivelul întregii rețele;
- Nivelul de tensiune în nodurile rețelei;
- Pierderile de putere activă și reactivă la nivelul rețelei și repartiția pe zone;
- Evenimentele dinamice care pot afecta siguranța în funcționare a rețelei;
- Elementele al căror grad de încărcare depășește limita maximă admisibilă;
- Zonele din rețea în care pot fi îmbunătățiți parametrii de funcționare;
- Contingențele care generează depășiri ale gradului maxim de încărcare;
- Principalele deficiențe în regimul normal de funcționare.

Etapa 2 – Stabilirea funcției obiectiv raportat la problemele identificate în funcționarea rețelei

În această etapă pornind de la rezultatele obținute în etapa 1 se analizează principalele deficiențe identificate și se realizează o ierarhizare a acestora în funcție de pericolul pe care îl generează pentru siguranța în funcționare a sistemului și în funcție de impactul economic pe care îl au. Astfel, după această clasificare clară a deficiențelor în funcționare ale rețelei și impactului pe care acestea îl generează se poate stabili o funcție obiectiv care trebuie urmărită în procesul de selecție al dispozitivului FACTS. Fiecare caz analizat are particularitățile sale, dar în general principalele obiective urmărite atunci când se instalează un dispozitiv FACTS sunt:

- Reglajul de tensiune, în situația în care la nivelul rețelei s-au identificat fluctuații sau depășirea limitelor acceptabile. Prin instalarea unui dispozitiv FACTS nivelul tensiunii poate fi adus în limitele admisibile sau pot fi limitate variațiile în cazul evenimentelor dinamice;
- Îmbunătățirea stabilității sistemului, în cazul sistemelor care au o inerție scăzută și în care evenimentele dinamice puternice pot cauza fenomene de instabilitate;
- Rezolvarea problemelor de congestie, în cazul în care s-a constatat capacitatea limitată a liniilor de transport pentru scenariile analizate;

- Controlul fluxului de putere activă și reactivă la nivelul rețelei pentru a optimiza circulația de putere.
- Reducerea situațiilor în care anumite contingențe produc suprasarcini asupra altor elemente din rețea în scenariul de funcționare cu N-1 elemente.
- Reducerea pierderilor de putere activă și reactivă la nivelul rețelei.

Etapa 3 - Analiza categoriilor de dispozitive FACTS

În etapa 3 se realizează selecția dispozitivului FACTS ale cărui caracteristici tehnice se potrivesc cel mai bine cu problema identificată la nivelul rețelei. Acesta este ales în funcție de beneficiile pe care le poate aduce, dar și în funcție de zona și elementul unde urmează să fie conectat (stație electrică sau linie electrică). În funcție de problemele identificate în funcționarea rețelei și de obiectivele urmărite se realizează următoarea împărțire a dispozitivelor FACTS:

1. Dispozitive de compensare statică (SVC, STATCOM)
   a. SVC (Static Var Compensator)
      - Este recomandat în situațiile în care este necesară compensarea energiei reactive;
      - Este eficient pentru stabilizarea tensiunii, dar mai puțin flexibil în cazul variațiilor rapide.
   b. STATCOM (Static Synchronous Compensator)
      - Este recomandat în situațiile în care este necesar un răspuns rapid la variațiile de tensiune;
      - Este recomandat în situațiile în care este necesară compensarea energiei reactive.
2. Dispozitive pentru controlul fluxului de putere (SSSC, UPFC, IPFC)
   a. SSSC (Static Synchronus Series Compensator)
      - Este utilizat pentru compensarea serie și controlul fluxului de putere prin linie.
      - Eficient în cazul congestiilor pe anumite linii.
   b. UPFC (Unified Power Flow Controller)
      - Este utilizat pentru controlul fluxului de putere activă și reactivă;
      - Permite reglajul tensiunii, impedanței și fluxului de putere.
   c. IPFC (Interline Power Flow Controller)
      - Este recomandat pentru coordonarea fluxului de putere între mai multe linii;
      - Se utilizează în rețele complexe cu fluxuri interdependente.

O descriere mai detaliată asupra beneficiilor și modului de utilizare pentru fiecare tip de dispozitiv FACTS se regăsește în capitolul 3.1.

Etapa 4 – Alegerea variantei optime din punct de vedere tehnic și economic

În această fază este aleasă varianta optimă pentru a fi implementată. Pentru a alege dispozitivul optim pentru fiecare situație studiată trebuie analizate atât necesitățile tehnice ale rețelei cât și implicațiile economice. Astfel, principalele criterii considerate sunt:

- Din punct de vedere tehnic:
  - Viteza de răspuns necesară;
  - Capacitatea de control necesară;
  - Stabilitatea și siguranța în funcționare a sistemului;
  - Locația și nivelul de integrare.
- Din punct de vedere economic:
  - Costurile de realizare ale investiției (achiziție și montaj);
  - Costurile de întreținere și exploatare;
  - Beneficiile obținute în urma realizării investiției;
  - Rentabilitatea pe termen lung.

Etapa 5 – Validarea soluției alese

Tipul de dispozitiv FACTS ales în etapa 4 este validat prin integrarea și simularea în rețeaua electrică. Simularea modului de funcționare a dispozitivului FACTS se realizează utilizând medii de calcul specializate și analizând multiple scenarii de funcționare a rețelei. În cadrul acestei etape se studiază multiple scenarii care includ și etapele viitoare de dezvoltare ale sistemului. Având în

vedere costurile ridicate și perioadele lungi de implementare pentru un dispozitiv FACTS acesta este ales și dimensionat astfel încât să corespundă utilizării pentru un orizont de timp mai îndepărtat.

5.3.3. Metodologie alegere nod amplasare dispozitiv SVC

Dispozitivele SVC sunt echipamente complexe cu costuri ridicate de implementare, din această cauză este foarte important să se realizeze o analiză completă înainte de a se alege locația unde vor fi conectate și dimensionarea acestora. Pentru a atinge rezultatele dorite este important să se respecte o metodologie bine definită privind locul de amplasare al dispozitivelor SVC în rețelele electrice de transport. Astfel, în acest capitol este prezentată o metodologie care poate fi aplicată atât pentru determinarea nodului de racord a SVC cât și pentru optimizarea puterii acestuia. Prima etapă este reprezentată de analiza situației inițiale a rețelei pentru a identifica zonele în care există deficiențe în funcționare și pentru a deține o imagine de ansamblu asupra condițiilor de operare. Următorul pas în acest proces este stabilirea funcției obiectiv, aceasta are rolul de a stabili exact beneficiile care sunt urmărite prin instalarea dispozitivului SVC și ierarhizarea acestora în funcție de deficiențele identificate în etapa anterioară. După acest proces, în etapa următoare sunt alese mai multe noduri care sunt considerate potrivite pentru amplasarea dispozitivului SVC. Dintre acestea este ales nodul în care conectarea echipamentului FACTS maximizează rezultatele funcției obiectiv. Odată ales nodul este realizată dimensionarea dispozitivului din punct de vedere al capacității de injecție și absorbție de putere reactivă. Următoarea etapă este reprezentată de verificarea dimensionării dispozitivului SVC pentru etapele viitoare de dezvoltare ale rețelei astfel încât acesta să poată asigura o funcționare optimă o perioadă cât mai lungă. După finalizarea acestor procese este necesară refacerea regimurilor de funcționare ale rețelei cu dispozitivul SVC conectat pentru a determina toate beneficiile obținute. Beneficiile se vor cuantifica și se va analiza dacă investiția este fezabilă din punct de vedere al costurilor de implementare și exploatare. În final se va concluziona dacă există oportunitatea să se conecteze în rețea un dispozitiv SVC și care este nodul optim pentru a fi conectat la sistem.

Etapa 1 – Analiza situației energetice inițiale:

În aceasta etapă se colectează datele privind elementele componente ale rețelei electrice studiate și se calculează regimurile de funcționare ale rețelei. În analiză sunt incluse scenariile pentru regimul permanent, analiza contingențelor și studiul comportamentului dinamic al rețelei.

În urma acestei analize se vor obține următoarele informații privind situația inițială a rețelei:

- Identificarea nodurilor în care nivelul de tensiune nu se încadrează în limitele admisibile sau este apropiat de limită minimă/maximă;
- Variația nivelului de tensiune în rețea în cazul anumitor evenimente (avarii, declanșări, retrageri din exploatare, reconfigurări ale schemei normale de funcționare);
- Determinarea pierderilor de putere activă și de putere reactivă în rețea și a modului cum este repartizată pe principalele zone ale rețelei;
- Determinarea elementelor cu încărcarea apropiată de valoarea maximă nominală în regimul normal de funcționare;
- Determinarea elementelor supraîncărcate în cazul unei contingențe în rețea (scenariul cu N-1 elemente în funcțiune).
- Nivelul de stabilitate al sistemului în cazul producerii unor evenimente dinamice majore.

Etapa 2 – Definirea funcției obiectiv

În acest pas pornind de la rezultatele determinate în pasul anterior se definesc principalele beneficii ce vor fi obținute după instalarea dispozitivului SVC. Astfel se stabilesc principalele criterii de optimizare urmărite prin utilizarea dispozitivului SVC în rețeaua studiată din lista de mai jos:

- Stabilizarea nivelului de tensiune în nodurile rețelei;
- Reducerea pierderilor de putere pe linii;
- Creșterea capacității de transport a liniilor electrice;

- Amortizarea oscilațiilor de tensiune în nodurile rețelei;
- Îmbunătățirea stabilității sistemului.

Etapa 3 – Identificarea nodurilor

Pornind de la situația rețelei determinată în etapa 1 se identifică zonele din rețea în care au fost identificate probleme în funcționare. Având în vedere funcția obiectiv stabilită în pasul 2 se selectează nodurile în care s-a constatat necesitatea și oportunitatea instalării unui dispozitiv SVC. Aceste noduri vor fi analizate în etapele următoare pentru a alege poziția optimă de conectare a SVC.

Etapa 4 – Alegerea nodului

Se analizează nodurile identificate în etapa 3 si se realizează o serie de estimări privind beneficiile ce se pot obține pentru fiecare nod. În fiecare situație se analizează cât de mult este afectată siguranța în funcționare a sistemului de problema identificată dar și care sunt beneficiile care urmează a fi obținute după instalarea SVC. La sfârșitul acestei etape este selectat nodul care conduce la maximizarea rezultatelor funcției obiectiv.

Etapa 5 – Dimensionarea dispozitivului SVC

Pornind de la rezultatele regimului permanent de funcționare se stabilește necesarul de putere reactivă generată/absorbită. Se recalculează regimul permanent de funcționare al rețelei după conectarea dispozitivului SVC și se analizează dacă sunt atinse obiectivele propuse în etapa 2. În cazul în care obiectivele nu sunt atinse se reanalizează parametrii dispozitivului SVC și amplasarea acestuia.

Etapa 6 – Verificare dimensionare

Pentru a verifica dacă dimensionarea dispozitivului SVC corespunde și situațiilor viitoare ce pot apărea la nivelul rețelei se realizează scenarii de funcționare prin modificarea parametrilor actuali ai acesteia (putere generată, putere consumată, tipul surselor din sistem). În cazul în care obiectivele propuse nu mai pot fi respectate pentru scenariile studiate se reanalizează parametrii dispozitivului SVC și amplasarea acestuia. Aceste etape sunt repetate până când este identificată locația optimă pentru conectarea SVC și capacitatea de compensare a acestuia.

Etapa 7 – Analiza beneficiilor

După ce a fost finalizată analiza tehnică privind zona de racordare și capacitatea dispozitivului modern de compensare a energiei reactive este necesar să se realizeze o analiză cost beneficiu pentru a determina dacă investiția este fezabilă din punct de vedere economic. Analiza și cuantificarea beneficiilor obținute în urma utilizării dispozitivului de tip SVC în rețeaua studiată raportat la costurile de realizare va avea în vedere urătoare elemente:

Principalele beneficii:

- Reducerea pierderilor de energie activă și reactivă în rețea;
- Creșterea capacității de transport pe liniile electrice din zona de racord a SVC;
- Creșterea capacității de integrare a surselor de energie regenerabilă la nivelul sistemului;
- Mărirea gradului de siguranță în funcționare al rețelei;
- Scăderea numărului de congestii în cazul producerii unei contingențe;
- Creșterea stabilității dinamice a sistemului.

Principalele costuri:

- Costul de achiziție al dispozitivului SVC și al echipamentelor asociate funcționării acestuia;
- Costul lucrărilor de montaj, parametrizare, testare și punere în funcțiune;
- Costul generat de etapele de provizorat necesare (întreruperi în funcționare, modificarea schemei normale de funcționare);
- Costurile de mentenanță și exploatare pe întreaga perioadă de viață a instalației SVC.

Etapa 8 – Concluziile analizei

În această etapă pe baza analizei tehnice și evaluării economice privind amplasarea, dimensionarea, necesitatea și oportunitatea utilizării unui dispozitiv de tip SVC în rețeaua studiată sunt trasate direcțiile finale privind realizarea și implementarea investiției.

5.5. Implementarea metodologiilor propuse în rețeaua NORIDC32

În tabelul 5.10 sunt evidențiate toate scenariile studiat și elementele identificate în funcționarea rețelei din perspectiva nivelului de tensiune, a pierderilor de putere și a nivelului de încărcare al elementelor.

Tabelul 5.10. Centralizatorul scenariilor analizate

Scenariul	Descriere	Nivel de tensiune	Pierderi putere	Nivel încărcare elemente
S0	Scenariul inițial de funcționare al rețelei în care nu au fost realizate modificări a schemei de funcționare sau a parametrilor elementelor de rețea.	Se încadrează în limitele admisibile	Pierderi crescute de putere reactivă	Nu există depășiri ale capacității nominale
S1	În scenariul S1 s-a crescut consumul proporțional în toată rețeaua cu 5 % față de consumul din scenariul de bază S0.	Tensiune in nodul 141 scade sub limita minimă 90% Un	Mai mari decât în scenariul S0	Nu există depășiri ale capacității nominale
S2	În scenariul S2 pentru a îmbunătăți parametri energetici ai rețelei (pierderile de putere și nivelul de tensiune) pornind de la scenariul S1 s-au adăugat pe rând dispozitive de tip SVC în nodurile 461, 422, 232 și 141.	Se încadrează în limitele admisibile	Mai mici decât în scenariul S0	Nu există depășiri ale capacității nominale
S3	În scenariul S3 s-a pornit de la scenariul de bază S0 și s-a redus la jumătate capacitatea de producție a sursei existente în nodul 143, GEN-G7 și s-a adăugat o sursă nouă de energie eoliană GEN-G21 cu o putere totală instalată de 180 MW.	Se încadrează în limitele admisibile	Mai mari decât în scenariul S6	Nu există depășiri ale capacității nominale
S4	În scenariul S4 s-a pornit de la scenariul S3 si s-a deconectat sursa regenerabilă de energie GEN-G21.	Tensiune in nodul 141 scade sub limita minimă 90% Un	Mai mari decât în scenariul S5	Linia dublu circuit 143-144 atinge un nivel de încărcare de 102,4%
S5	În scenariul S5 s-a pornit de la scenariul S4 si s-a adăugat un dispozitiv SVC conectat în nodul 141.	Se încadrează în limitele admisibile	Mai mici decât în scenariul S4	Nu există depășiri ale capacității nominale
S6	În scenariul S6 pornind de la scenariul S3 s-a adăugat un dispozitiv SVC conectat în nodul 141.	Se încadrează în limitele admisibile	Mai mici decât în scenariul S3	Nu există depășiri ale capacității nominale

5.6. Concluziile studiului de caz

În cadrul studiului de caz s-a analizat modul de funcționare și provocările cu care se confruntă rețelele electrice de transport. Principalele provocări analizate au fost reprezentate de conectarea noilor consumatori și capacitatea de integrare a producătorilor de energie electrică din surse regenerabile.

Pentru exemplificarea situațiilor prezentate mai sus a fost necesară utilizarea unei rețele de test, astfel s-a ales rețeaua NORDIC32. NORDIC32 este o rețea de test dezvoltată de K. Walve și

reprezintă o adaptare in mod simplificat a unui sistem electroenergetic similar cu cel al Suediei. Rețeaua este împărțită în patru zone principale: zona de nord, zona de sud, zona centrală si zona echivalentă.

Un set de soluții care promite să rezolve aceste probleme este reprezentat de FACTS (Flexible AC Transmission System) care permit creșterea flexibilității în operare și a siguranței în exploatare a sistemelor energetice prin utilizarea tehnologiilor bazate pe electronica de putere.

Pentru a reproduce într-un mediu de simulare elementele prezentate mai sus s-a utilizat softul NEPLAN10 în care s-a modelat rețeaua NORDIC32. Pentru dispozitivele FACTS de tip SVC s-a prezentat modul de configurare și simulare în NEPLAN10. Astfel s-au realizat mai multe scenarii care au inclus creșterea consumului în rețea și înlocuirea unei surse clasice de energiei cu o sursă regenerabilă. Aplicând metodologiile prezentate s-a analizat în funcție de deficiențele rețelei și de obiectivele stabilite tipul de echipament FACTS ce urmează a fi utilizat.

În urma analizei s-a ales utilizarea dispozitivelor de tip SVC pentru a crește siguranța în funcționare a sistemului și capacitatea acestuia de a face trecerea de la sursele clasice de producție a energiei electrice la sursele bazate pe energie regenerabilă. Din punct de vedere al noțiunilor teoretice s-au prezentat aspecte privind: structura și funcționarea SVC, configurații ale compensatorului static de putere reactivă, controlul funcționării unui SVC, amplasarea acestuia în rețea și modelul simplificat pentru calculul regimului permanent.

Pentru realizarea analizei de sistem, stabilirea punctului de conexiune și dimensionarea dispozitivului FACTS s-a pornit de la prezentarea situației energetice inițiale a rețelei NORDIC32, astfel s-au calculat pierderile de putere activă și reactivă, încărcările elementelor de rețea, nivelul de tensiune în nodurile rețelei și suprasarcinile ce pot apărea în cazul producerii unei contingențe. În regimul inițial nu s-au identificat suprasarcini și nici depășiri ale nivelului admisibil de tensiune în noduri.

Pentru a realiza analiza rețelei în contextul principalelor provocări privind integrarea în sistem a noilor surse de energie regenerabilă și capacitatea sistemului de a alimenta în condiții de siguranță noi consumatori s-au pregătit 6 scenarii distincte.

După parcurgerea scenariilor privind modificările ce pot apărea în regimul normal de funcționare al rețelei NORDIC32 și prin aplicarea metodologiilor propuse a rezultat că dispozitivul FACTS de tip SVC, va fi conectat în nodul de 130 kV 141 fiind dimensionat să poată injecta în rețea 200 Mvar și absorbi 100 Mvar.

În urma analizei scenariilor mai sus prezentate s-a putut concluziona că dispozitivele de tip SVC ajută atât la reglajul nivelului de tensiunii în rețea cât și la reducerea pierderilor de energie și reducerea încărcărilor pe liniile electrice din zonă.

Astfel, folosind rețeaua de test NORDIC32 au fost implementate și validate cele două metodologii propuse. S-a determinat faptul că prin utilizarea dispozitivului SVC sunt îmbunătățiți parametri de funcționare ai rețelei și este crescută capacitatea de integrare a surselor regenerabile de energie.

6. CAPITOLUL 6 – STUDIUL DE CAZ 2: ANALIZA IMPACTULUI SURSELOR REGENERABILE ASUPRA STABILITĂȚII DINAMICE A REȚELELOR ȘI OPORTUNITATEA UTILIZĂRII DISPOZITIVELOR SVC

6.1. Obiectivul studiului de caz

În prezent politicile globale privind decarbonizarea impun schimbări majore în funcționarea sistemelor electroenergetice. Obiectivul principal al studiului de caz este analiza impactului asupra stabilității dinamice a SEE determinat de tranziția de la sursele clasice de energie care au un impact crescut asupra mediului la sursele de energie regenerabilă. Acest proces generează o serie de provocări privind stabilitatea dinamică a sistemelor electroenergetice. Obiectivul studiului de caz îl reprezintă evaluarea impactului generat de integrarea masivă a surselor de energie regenerabilă la nivelul rețelei electrice de transport și analiza oportunității utilizării dispozitivelor SVC în acest context. Pentru această analiză a fost utilizată rețeaua de test NORDIC32, configurația și parametrii acesteia au fost prezentați în capitolul 5.2. Pentru realizarea simulărilor este necesară configurarea parametrilor specifici generatoarelor, dar și alegerea corectă a tipurilor de regulatoare. În cadrul studiului de caz a fost analizat modul în care dispozitivele moderne tip SVC îmbunătățesc răspunsul dinamic al rețelei în cazul producerii unor evenimente. Pentru a evidenția contribuția dispozitivului FACTS pentru același eveniment dinamic au fost studiate patru scenarii distincte: scenariul inițial de funcționare al rețelei, scenariul cu integrare masivă a centralelor eoliene, scenariul cu centrale eoliene și compensator sincron și scenariul cu centrale eoliene și SVC. Din punct de vedere al evenimentelor dinamice ce pot apărea în funcționarea rețelei de transport au fost studiate următoarele situații: declanșarea unei linii electrice, modificări rapide de sarcină în sistem, declanșarea unei unități de transformare, declanșarea unui generator și producerea unui scurtcircuit în rețea. În procesul de analiză și simulare dinamică a fost realizată selecția și parametrizarea regulatoarelor utilizate pentru hidrocentrale, termocentrale și centrale eoliene. A fost prezentată schema logică de conectare a regulatoarelor la generator și a fost analizat modul de funcționare al fiecărui tip de regulator. Pentru definirea scenariilor în care termocentralele au fost înlocuite cu centrale eoliene, a fost realizată o analiză a tipurilor de turbine eoliene, a principalelor caracteristici ale acestora și a modelelor dinamice. Răspunsul sistemului pentru fiecare eveniment în toate cele patru scenarii studiate a fost reprezentat grafic pentru a realiza o comparație din punct de vedere al tensiunii în noduri, frecvenței în sistem și al comportamentului generatoarelor.

6.2. Simularea regimurilor dinamice de funcționare ale rețelelor de transport

6.2.6. Scenarii analizate

6.2.6.1. Scenariul inițial – S0

Pentru a avea o viziune de ansamblu asupra impactului generat de procesul de tranziție de la sursele clasice de generare a energiei electrice la sursele regenerabile de energie s-au analizat două scenarii de funcționare pentru rețeaua de test NORDIC32. În scenariul de funcționare S0 a fost păstrată structura clasica a rețelei NORDIC32 în care sursele de energie electrică sunt hidrocentralele și termocentralele.

În scenariul S0 se observă ca nu exista depășiri ale nivelului de tensiune sau a capacității nominale a elementelor sistemului. În figura 6.28 se observă repartiția surselor de energie la nivelul rețelei și în zona Centru în scenariul S0. Având în vedere faptul că producția în zona Centru a rețelei este exclusiv din termocentrale s-a considerat oportună analiza unei tranziții în această zona de la termocentrale la centrale electrice eoliene.

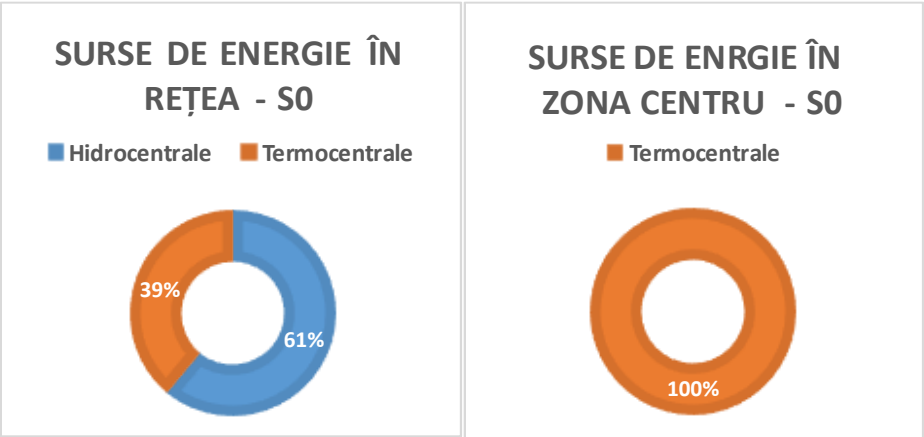


Figura 6.28. Repartiția surselor de energie în rețea în scenariul S0

6.2.6.2. Scenariul cu surse regenerabile de energie – S1

Scenariul S1 a fost propus pentru studiul impactului generat de tranziția de la sursele clasice de producție a energiei electrice la sursele regenerabile de energie. Având în vedere distribuția surselor de energie la nivelul rețelei NORIDC32 a fost aleasă zona Centru pentru integrarea surselor regenerabile. Zona Centru reprezintă o zona de rețea echivalentă cu zona de sud a Suediei astfel este considerat oportun instalarea centralelor electrice eoliene.

Scenariul S1 reprezintă un model de analiză pentru studiul impactului tranziției energetice de la sursele clasice de generare a energiei electrice către sursele regenerabile. În acest scenariu au fost deconectate mai multe centrale clasice cu putere mare din zona centrală a rețelei iar în locul acestora au fost conectate centrale eoliene distribuite în mai multe noduri ale rețelei.

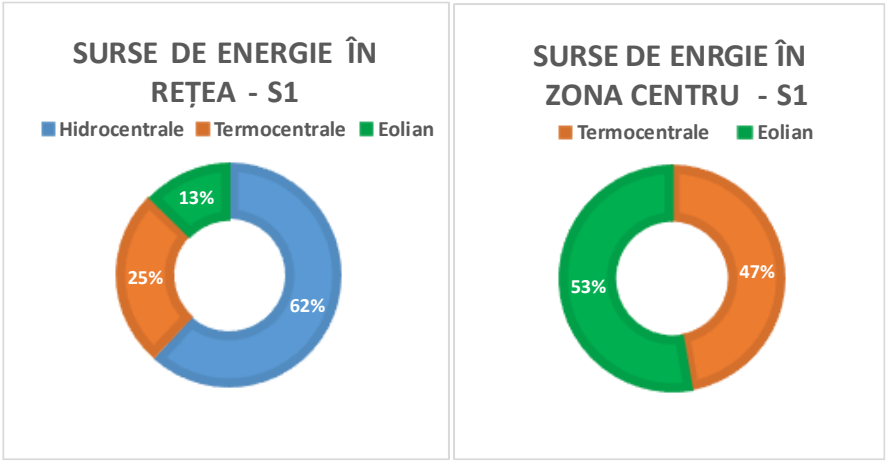


Figura 6.29. Repartiția surselor de energie în rețea în scenariul S1

Repartiția surselor de energie în rețea este prezentată în figura 6.29, se observă că în acest scenariu în zona centrală mai mult de jumătate din energie este produsă de centralele eoliene. Această situație a fost determinată de o serie de modificări comparativ cu scenariul inițial S0:

- S-au modificat parametrii următoarele termocentrale:

Tabelul 6.10. Parametrii termocentrale scenariul S0

Centrala	Putere in S0 [MW]	Putere in S1 [MW]	Nod racord	Tip
G15	1080	0	447	Termocentrala
G16	600	300	451	Termocentrala
G7	180	0	143	Termocentrala

După cum se observă în tabelul 6.10 termocentralele G15 și G7 au fost complet deconectate de la rețea în scenariul S1 în timp ce pentru termocentrala G16 puterea injectată în rețea a fost redusă la jumătate.

- S-au adăugat următoarele centrale electrice eoliene:

Tabelul 6.11. Centrale eoliene în scenariul S1

Centrala	Putere in S0 [MW]	Putere in S1 [MW]	Nod racord	Tip
Wind1	0	360	447	eolian
Wind2	0	360	446	eolian
Wind3	0	100	444	eolian
Wind4	0	150	143	eolian
Wind5	0	170	144	eolian
Wind6	0	300	451	eolian

În tabelul 6.11 sunt prezentate centralele eoliene conectate la rețea în scenariul S1, pentru fiecare dintre ele a fost precizată puterea și nodul de racord. Toate modificările de funcționare a rețelei au fost realizate în zona Centru studiul de caz analizând funcționarea din punct de vedere dinamic a acestei zone după integrarea surselor de energie eoliană. În figura 6.30 este prezentată schema zonei Centru pe care au fost marcate cu roșu termocentralele care au fost deconectate din sistem sau a căror putere a fost redusă. Culoarea verde a fost folosită pentru a evidenția punctul de racord al noilor centrale eoliene din rețea. Se poate observa că spre deosebire de termocentrale care erau în număr mai redus si cu o putere unitară mult mai ridicată, centralele electrice eoliene sunt distribuite la nivelul rețelei de 400 kV și 130 kV având o putere unitară mai redusă.

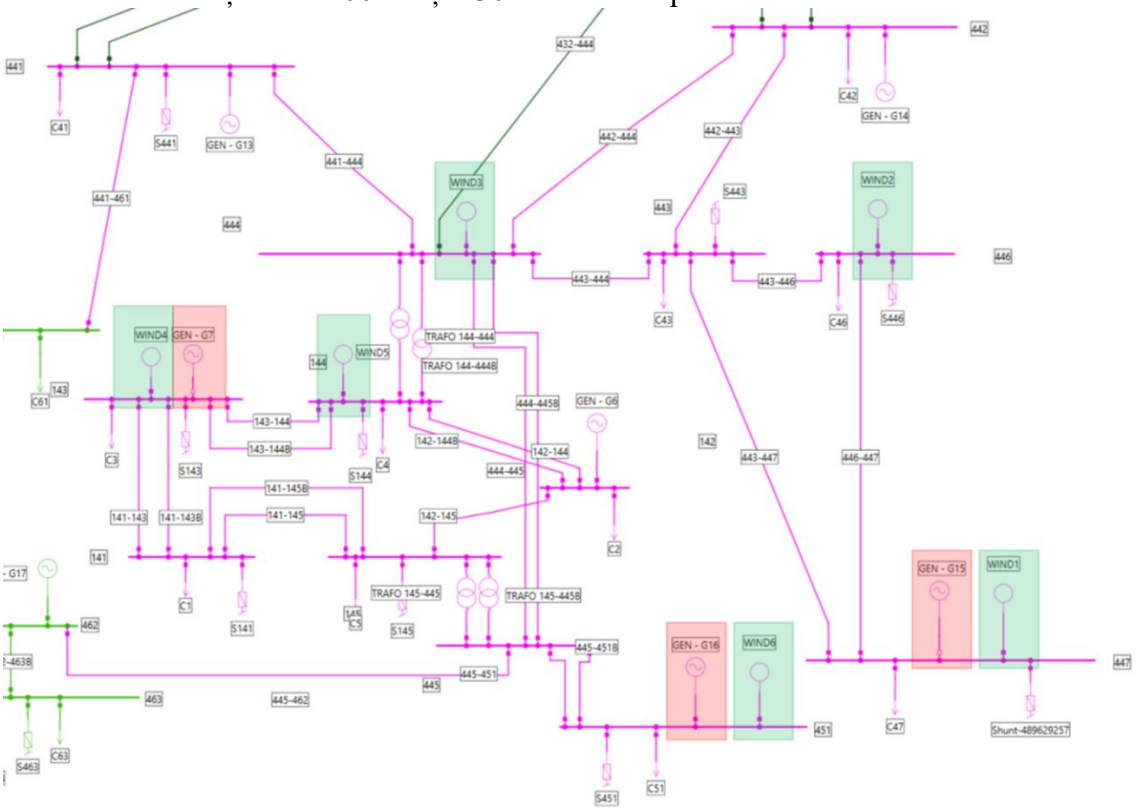


Figura 6.30. Schema rețelei pentru scenariul S1 – regimul permanent în zona Centru

6.2.7. Analiza comportamentului dinamic al rețelei în scenariile studiate

Scopul urmărit este determinarea comportamentului dinamic al rețelei în mai multe scenarii de funcționare în care s-au introdus masiv la nivelul rețelei surse regenerabile de energie, respectiv centrale electrice eoliene. În vederea atingerii obiectivelor propuse au fost studiate o serie de scenarii

de funcționare, iar în cadrul fiecărui scenariu s-au analizat șase evenimente dinamice distincte pentru a determina reacția sistemului. Evenimentele dinamice studiate în analizele de stabilitate dinamică sunt:

- Evenimentul dinamic 1 constă în declanșarea unei linii electrice de 400 kV, cu importanță crescută în sistem, care realizează legătura între zona Centru și zona Nord. Pentru acest studiu a fost aleasă linia L432-444.
- Evenimentul dinamic 2 este reprezentat de variația bruscă a consumului în rețea. Este studiată situația în care un consumator este deconectat iar după un interval scurt de timp este reconectat la rețea, a fost ales consumatorul C3.
- Evenimentul dinamic 3 prezintă situația unui defect care conduce la deconectarea unei unități de transformare care realizează legătura între zona de transport și zona de distribuție a energiei electrice. În acest eveniment a fost utilizat transformatorul T144-444.
- Evenimentul dinamic 4 este o variație bruscă a producției de energie în sistem, respectiv în urma unui defect rezultă declanșarea completă a grupurilor dintr-o termocentrală. În calculele de sistem realizate a fost analizată situația prezentată pentru generatorul G16.
- Evenimentul dinamic 5 este reprezentat de producerea unui scurtcircuit pe barele unei stații de 130 kV, pentru acest caz a fost ales nodul N143.
- Evenimentul dinamic 6 constă într-un scurtcircuit trifazat pe o linie de 400 kV care duce la declanșarea liniei. A fost considerat ca loc de producere al defectului linia L446-447.

Pentru toate cele șase evenimente dinamice prezentate au fost analizați următorii parametrii ai sistemului în zona din vecinătatea zonei studiate: variația tensiunii, frecvența măsurată în nodurile din zona defectului, viteza de rotație unghiulară a rotorului pentru generatoarele din zona Centru și viteza de variație a frecvenței. S-au realizat grafice comparative pentru cele patru scenarii studiate:

- Scenariul S0 care reprezintă varianta inițială a rețelei înainte de conectare centralelor electrice eoliene;
- Scenariul S1 prezintă situația în care o parte din termocentralele din zona Centru sunt înlocuite cu centrale electrice eoliene;
- Scenariul S2 prezintă aceeași situație ca scenariul S1 cu diferența că în scenariul S2 este conectat un compensator sincron în nodul din imediata apropiere a locului de producere al evenimentului dinamic studiat (S1 + compensator sincron);
- Scenariul S3 are ca punct de pornire scenariul S1 în care este adăugat un dispozitiv SVC care se conectează în nodul cel mai apropiat de zona de producere a evenimentului dinamic analizat (S1 + SVC).

6.2.7.1. Evenimentul dinamic 1 – declanșarea liniei de 400 kV L432-444

Evenimentul constă în declanșarea liniei de 400 kV L432-444, aceasta fiind una dintre liniile cele mai importante din zona Centru asigurând legătura cu zona Nord. Această legătură este foarte importantă deoarece prin ea este asigurat importul de putere din zona Nord pentru a acoperii consumul ridicat din zona Centru. Declanșarea liniei are loc la momentul t=3 s de la momentul de începere al simulării dinamice. Simularea dinamică se oprește după 20 s. Pentru acest eveniment, în scenariul S2 se conectează în nodul 444 un compensator sincron cu capacitatea de compensare 300 MVAr, iar pentru scenariul S3 este adăugat în rețea un SVC cu puterea reactivă de ± 300 MVAr.

În cazul acestui eveniment se va analiza evoluția în timp a următorilor parametri ai rețelei pentru ambele scenarii studiate:

- Tensiunea în nodul 444, acestea fiind nodul de capăt ale liniei din zona Centru;
- Evoluția frecvenței măsurată în nodul 444;
- Rata de variație a frecvenței – ROCOF în nodul 444;
- Viteza unghiulară a rotorului pentru generatoarele din zona centrală a rețelei Nordic32.

Rezultatele obținute în urma simulărilor pentru evenimentul 1 în toate cele patru scenarii analizate sunt prezentate în figura 6.31.

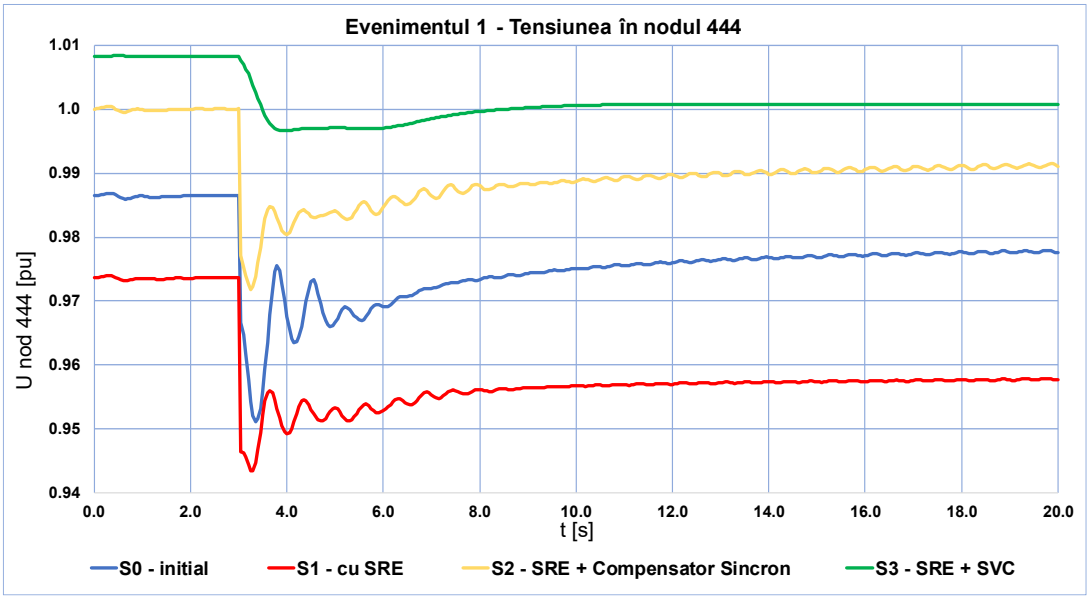


Figura 6.31. Evenimentul 1 – tensiunea în nodul 444

În scenariul S0, înainte de conectarea surselor regenerabile de energie, tensiunea în nodul 444 are valoarea de 0.98 pu. După declanșarea liniei 432-444 la momentul t=3 s se produce o scădere bruscă a tensiunii până la valoarea de 0.95 pu urmată de o perioadă de oscilații. Oscilațiile se amortizează după aproximativ 4 s de la deconectarea linie. Răspunsul sistemului în acest scenariu este stabil. În scenariul S1 din cauza deconectării termocentralelor scade inerția sistemului și capacitatea de control a tensiunii, astfel răspunsul în cazul declanșării liniei de 400 kV este mai puternic, tensiunea scade sub limita minimă admisibilă iar oscilațiile se atenuează într-o perioadă mai mare de timp. Prin conectarea compensatorului sincron se observă o îmbunătățire a nivelului de tensiune dar din punct de vedere al oscilațiilor și timpului de amortizare această soluție nu rezolvă complet problemele generate de conectarea masivă a centralelor eoliene. În scenariul S3 prin conectarea dispozitivului SVC în nodul 444 se obține un răspuns dinamic foarte bun din punct de vedere al stabilității de tensiune și al oscilațiilor. Variația tensiunii în urma defectului este redusă, variind între 0.997 pu și 1.001 pu. Timpul de răspuns este foarte mic, dispozitivul FACTS acționând precis asupra nivelului de tensiune, acesta fiind stabilizat după aproximativ o secundă de la producerea evenimentului. Oscilațiile sunt foarte mici fiind insesizabile în comparație cu celelalte scenarii analizate. Din punct de vedere al controlului tensiunii se poate concluziona că dispozitivul SVC este soluția optimă pentru un răspuns rapid și stabil chiar și în cazul sistemelor cu un grad ridicat de integrare al surselor regenerabile de energie.

Tabel 6.12. Evenimentul 1 – analiza tensiunii în nodul 444

Criteriu	**S0 (inițial)**	**S1 cu SRE**	**S2 cu SRE + Compensator sincron**	**S3 cu SRE +SVC**
Valoarea inițială [pu]	0.986	0.974	1	1.008
Valoare minimă [pu]	0.951	0.943	0.972	0.997
Valoare maximă [pu]	0.987	0.974	1.0	1.008
Valoare stabilizată [pu]	0.978	0.958	0.991	1.001
Timp de stabilizare [s]	4	5.5	4.5	1
Oscilații	Prezente, medii	Pronunțate, persistente	Pronunțate, persistente	Insesizabile
Stabilitate generală	Bună	Acceptabilă	Bună	Foarte bună

În tabelul 6.12 este prezentată o sinteză a rezultatelor obținute pentru simularea evenimentului dinamic 1. Sunt prezentate valorile tensiunii în fiecare scenariu, timpul de stabilizare, tipul de oscilații și o concluzie privind stabilitatea generală a sistemului în situația analizată.

În figura 6.32 este prezentată evoluția frecvenței măsurate în nodul 444 după declanșarea liniei electrice de 400 kV 432-444.

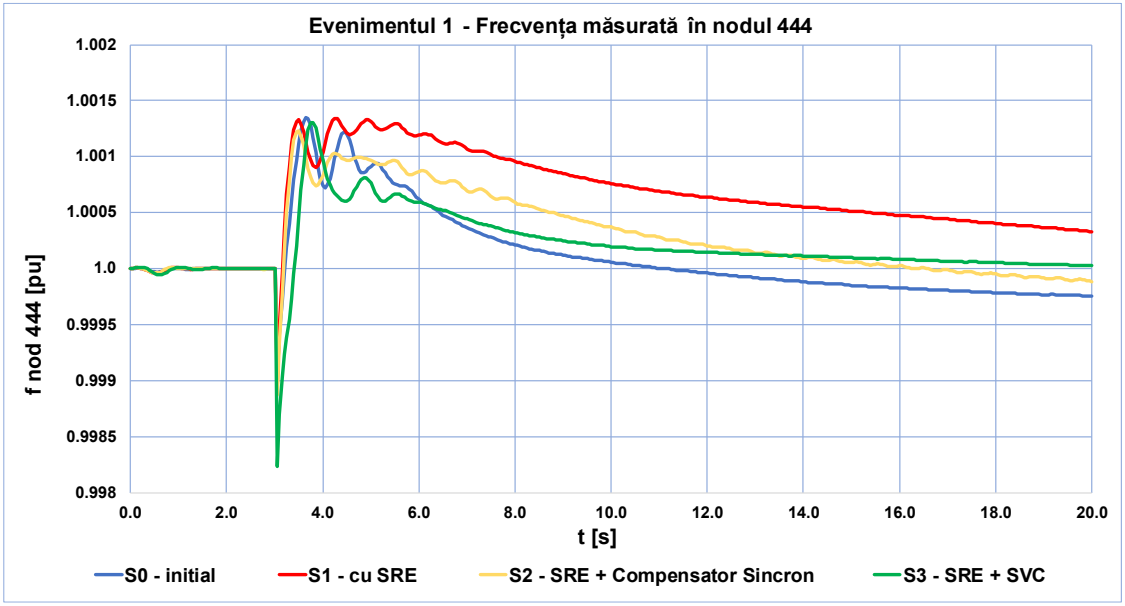


Figura 6.32. Evenimentul 1 - variația frecvenței măsurată în nodul 444

În scenariul S0 se observă o variație rapidă a frecvenței măsurate în nodul 444 până la valoarea de 1.001 pu, ulterior oscilațiile se amortizează sistemul rămânând stabil. În urma conectării centralelor eoliene, în scenariul S1 frecvență are o evoluție mai oscilantă în nodul 444 dar fără a genera probleme de stabilitate. În scenariul S2 după conectarea compensatorului oscilațiile sunt mai reduse ca amplitudine dar timpul de amortizare este similar cu cel din scenariul S1. Prin conectarea SVC în scenariul S3 răspunsul este mai stabil, cu oscilații mai scăzute ca amplitudine și cu un timp de stabilizare mai mic. Din punct de vedere al frecvenței răspunsul sistemului în cazul declanșării liniei electrice de 400 kV 432-444 este îmbunătățit prin utilizarea dispozitivului FACTS de tip SVC fiind superior răspunsului din scenariul S0. Astfel, se desprinde concluzia că dispozitivul SVC este necesar în procesul de tranziție energetică spre sursele regenerabile de energie.

Tabel 6.13. Evenimentul 1 – analiza frecvenței măsurate în nodul 444

Criteriu	**S0 (inițial)**	**S1 cu SRE**	**S2 cu SRE + Compensator sincron**	**S3 cu SRE +SVC**
Valoarea inițială [pu]	1	1	1	1
Valoare minimă [pu]	0.999	0.999	0.999	0.998
Valoare maximă [pu]	1.001	1.001	1.001	1.001
Valoare stabilizată [pu]	0.99976	1.00033	0.99988	1.00003
Timp de stabilizare [s]	10	12	13	9
Oscilații	Slabe, bine amortizate	Prezente, medii	Prezente, medii	Slabe, bine amortizate
Stabilitate generală	Foarte bună	Bună	Bună	Foarte bună

Tabelul 6.13 conține sinteza informațiilor obținute în urma calculelor pentru regimul dinamic de funcționare al rețelei în cazul evenimentului 1 pentru toate cele patru scenarii studiate. Sunt expuse concluziile privind stabilitatea răspunsului sistemului și modul în care se diminuează oscilațiile după defect. Pentru fiecare scenariu este evidențiat intervalul în care variază frecvența măsurată în nodul 444 și timpul de stabilizare.

În figura 6.33 este prezentată rata de variație a frecvenței – RoCoF în nodul 444 în cazul producerii evenimentului dinamic 1.

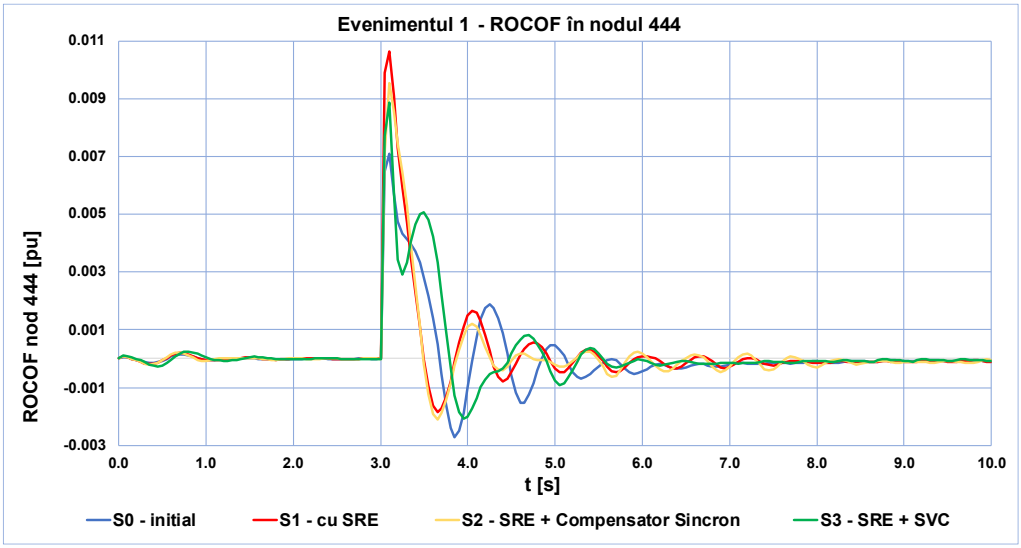


Figura 6.33. Evenimentul 1 - ROCOF în nodul 444

Din punct de vedere al vitezei de variație a frecvenței în nodul 444 în cazul evenimentului 1 se observă ca cele patru scenarii studiate au un răspuns similar. În scenariul S4 după conectarea dispozitivului amplitudinea oscilațiilor are o ușoară scădere iar timpul de amortizare al oscilațiilor este mai redus.

Tabel 6.14. Evenimentul 1 – analiza ROCOF în nodul 444

Criteriu	**S0 (inițial)**	**S1 cu SRE**	**S2 cu SRE + Compensator sincron**	**S3 cu SRE +SVC**
Valoarea inițială [pu]	0	0	0	0
Valoare minimă [pu]	-0.0027	-0.0019	-0.0021	-0.0021
Valoare maximă [pu]	0.0071	0.0106	0.0095	0.0089
Valoare stabilizată [pu]	0	0	0	0
Timp de stabilizare [s]	4.5	6	6	4
Oscilații	Puternice inițial dar bine amortizate	Puternice inițial cu amortizare treptată	Puternice inițial cu amortizare treptată	Puternice inițial dar bine amortizate
Stabilitate generală	Foarte bună	Bună	Bună	Foarte bună

În tabelul 6.14 sunt centralizate rezultatele obținute pentru ROCOF în nodul 444 după evenimentul dinamic 1. În toate scenariile studiate sistemul are un răspuns stabil, cele mai bune rezultate fiind obținute în cazul scenariului S0 și în cazul scenariului S1.

În figura 6.34 este prezentată evoluția în timp pentru viteza unghiulară a rotorului generatoarelor din zona Centru în cele patru scenarii studiate.

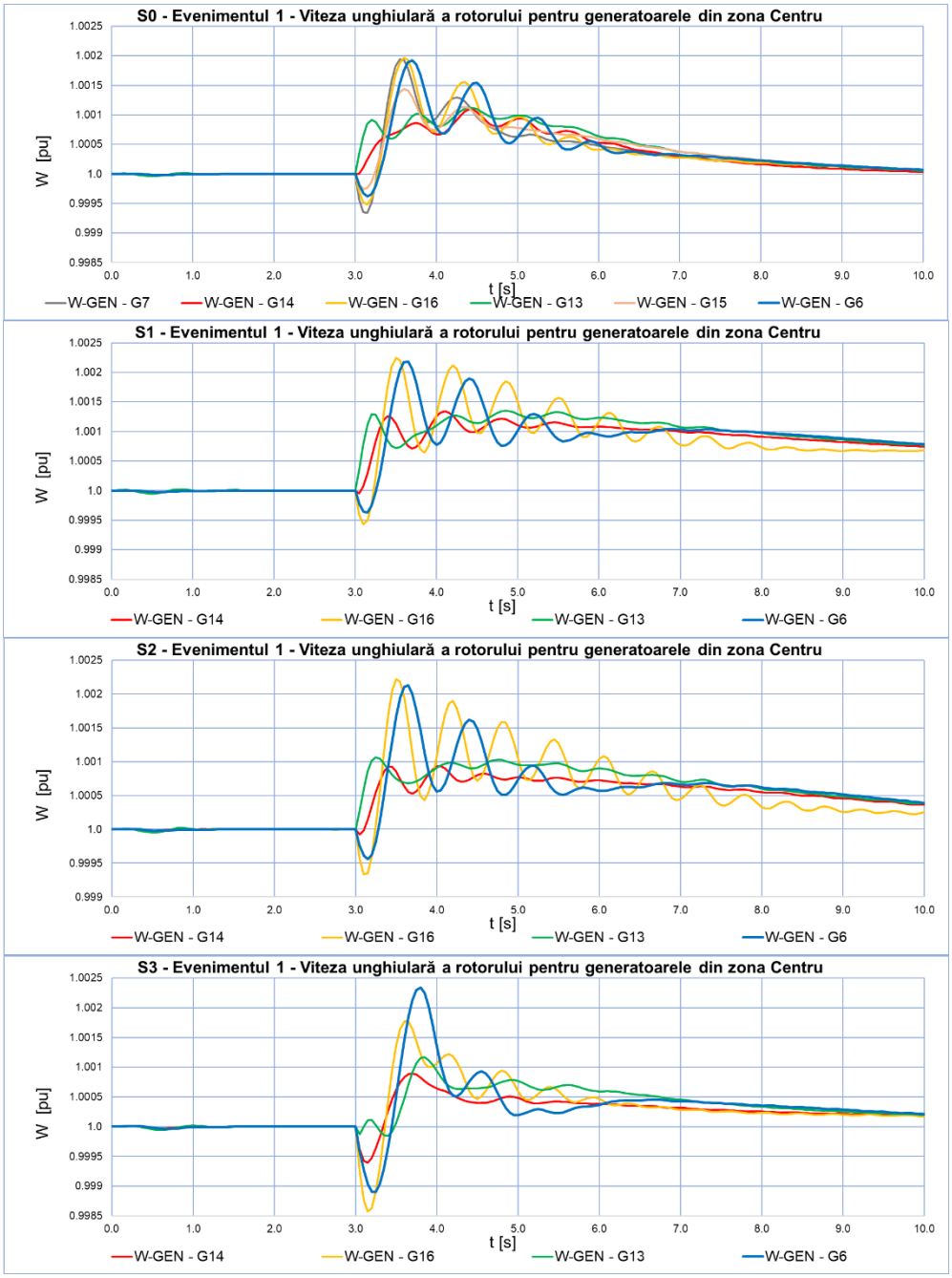


Figura 6.34. Evenimentul 1 – Viteza unghiulară a rotorului pentru generatoarele din zona Centru

În figura 6.34 este prezentată viteza unghiulară a rotorului pentru fiecare generator din zona Centru după evenimentul 1 în toate cele patru scenarii analizate. Cel mai bun comportament al generatoarelor după deconectarea liniei 432-444 este observat în scenariul S0 și scenariul S3. În scenariile S1 și S2 răspunsul generatoarelor are o oscilație cu amplitudine mai mare și un timp de stabilizare mai ridicat, în special în cazul generatorului G6.

6.2.8. Concluzii

Studiul de caz 2 a avut ca scop realizarea unei analize dinamice complexe privind funcționarea rețelei în condițiile tranziției energetice de la sursele clasice de energie, în cazul NORDIC32 termocentrale, la surse regenerabile de energie, respectiv centrale electrice eoliene. În prima etapă a studiului s-a realizat o descriere a parametrilor dinamici ai rețelei și s-au parametrizat regulatoarele pentru termocentralele și hidrocentralele din rețea. O definire corectă a parametrilor din regulatorul de excitație, PSS și regulatoarele pentru turbine este esențială pentru a asigura un răspuns stabil la perturbații. Următorul pas a fost alegerea tipului de turbină eoliană pentru a fi

utilizat în rețea în funcție de caracteristicile constructive și de răspunsul dinamic. Astfel, în urma unei analize a caracteristicilor constructive dar și a modelelor de control dinamic al turbinelor eoliene s-a ales implementarea în rețea a modelului de turbine 4A.

Pentru a studia impactul surselor regenerabile de energie asupra rețelei s-au simulat mai multe scenarii de funcționare pentru rețeaua NORDIC32:

- Scenariul S0 – regimul inițial de funcționare al rețelei.
- Scenariul S1 – regimul de funcționare al rețelei în prezența RES. Au fost înlocuite o parte din termocentralele din zona Centru cu centrale electrice eoliene distribuite la nivelul rețelei.
- Scenariul S2 – în care s-a studiat o soluție clasică de compensare a puterii reactive respectiv compensatorul sincron.
- Scenariul S3 – în care au fost analizate beneficiile utilizării dispozitivului SVC pentru a îmbunătății stabilitatea dinamică de tensiune și a crește capacitatea de integrare a surselor regenerabile.

Simulările dinamice au arătat că în scenariul cu generatoare clasice răspunsul sistemului este mai stabil. Aceasta se datorează inerției naturale a mașinilor sincrone, capacității lor de a amortiza variațiile bruște ale frecvenței și de a furniza răspuns inerțial imediat. Pentru a crește siguranța în funcționare a rețelei au fost utilizate dispozitive de tip SVC. Beneficiile generate de integrarea dispozitivelor FACTS la nivelul rețelei electrice de transport au fost evidențiate prin analiza mai multor scenarii de rețea, variante de funcționare și evenimente dinamice.

Simulările dinamice au fost realizate în toate cele patru scenarii pentru 6 evenimente dinamice care pot genera probleme de stabilitate:

- Evenimentul 1 constă în declanșarea liniei de 400 kV L432-444, aceasta fiind una dintre liniile cele mai importante din zona Centru asigurând legătura cu zona Nord.
- Evenimentul dinamic 2 analizează comportamentul dinamic al rețelei în situația în care apar variații rapide ale puterii consumate în sistem.
- Evenimentul 3 constă în deconectarea transformatorului 400/130 kV T144-444, acesta având un rol important în asigurarea legăturii între rețeaua de 400 kV din zona centrală și rețeaua de 130 kV.
- Evenimentul 4 este reprezentat de declanșarea generatorului G16 – 360 MVA , acesta reprezintă cea mai mare termocentrala din interiorul zonei centrale.
- Evenimentul 5 analizează răspunsul sistemului în situația unui scurtcircuit in nodul de 130kV 141.
- Evenimentul 6 constă în producerea unui scurtcircuit pe linia L446-447 la jumătatea distantei dintre nodurile de capăt.

Analizele efectuate asupra celor șase evenimente evidențiază clar rolul și eficiența dispozitivului SVC în menținerea stabilității dinamice a rețelei electrice de transport. Din punct de vedere al stabilității de tensiune în toate cele patru evenimente, utilizarea unui SVC a condus la:

- Limitarea amplitudinii variațiilor de tensiune în nodurile rețelei imediat după producerea evenimentului dinamic.
- Amortizarea rapidă a oscilațiilor tranzitorii și creșterea stabilității în funcționare.
- Revenirea tensiunii la valori apropiate de nominal într-un timp mult redus față de scenariile fără SVC.
- Evitarea supratensiunilor excesive în cazul restabilirii rapide.
- Prin compensarea rapidă a dezechilibrelor, SVC-ul stabilizează fluxurile de putere și susține profilul de tensiune în noduri critice.

În cazul stabilității de frecvență și de unghi rotoric și de frecvență se observă o îmbunătățire în cele mai multe cazuri prin conectarea dispozitivului SVC dar efectele cele mai clare au fost identificate pentru creșterea stabilității de tensiune.

Studiul de caz a avut ca scop și realizarea unei analize comparative, din punct de vedere al comportamentului dinamic, între soluțiile clasice de compensarea a puterii reactive, respectiv compensatorul sincron și soluțiile moderne de tip FACTS, în acest caz dispozitivul SVC. În urma analizei s-a determinat că din punct de vedere al răspunsului dinamic în cazul unui eveniment, dispozitivul SVC are un răspuns mai rapid, mai precis și mai stabil decât compensatorul sincron.

În urma studiului realizat concluzia este că dispozitivele SVC reprezintă o soluție fezabilă pentru creșterea stabilității dinamice a rețelelor electrice de transport în prezența surselor regenerabile de energie, având un impact crescut asupra stabilității nivelului de tensiune în cazul producerii unui eveniment dinamic.

7. CAPITOLUL 7 - STUDIUL DE CAZ 3: ANALIZA OPORTUNITĂȚII INSTALĂRII DE DISPOZITIVE SVC IN SEN

7.1. Descrierea situației actuale la nivelul SEN

În prezent rețeaua electrică de transport din România trece printr-un proces de dezvoltare determinat de schimbările majore generate de obiectivele asumate la nivelul Uniunii Europene privind decarbonizarea și reducerea la maxim a impactului asupra mediului. Astfel, la nivelul rețelei se produce o tranziție de la sursele clasice de producere a energie precum termocentralele la sursele regenerabile de energie. Deși acest proces are un impact pozitiv asupra mediului, la nivelul rețelei electrice de transport generează o serie de provocări privind siguranța în funcționare și controlul nivelului de tensiune în rețea. Pornind de la acest set de date de intrare s-a realizat o analiză atentă asupra funcționării sistemului energetic național pentru a determina necesitatea si oportunitatea utilizării dispozitivelor SVC în RET.

Având în vedere complexitatea rețelei și numărul mare de elemente componente, în studiile de sistem rețeaua este împărțită pe mai multe zone în funcție de amplasarea geografică și legăturile electrice care există între nodurile rețelei. În cadrul studiului de caz a fost analizată oportunitatea utilizării dispozitivelor de tip SVC în secțiunea 1 a rețelei.

În simulările realizate au fost analizate patru paliere de funcționare ale rețelei respectiv: vârful de sarcină de dimineață pentru iarnă și vară, vârful de sarcină pentru seară iarnă și golul de sarcină pe timpul nopții vara.

În figura 7.1. este prezentată împărțirea rețelei electrice de transport de zone de studiu, fiind marcată zona de interes.

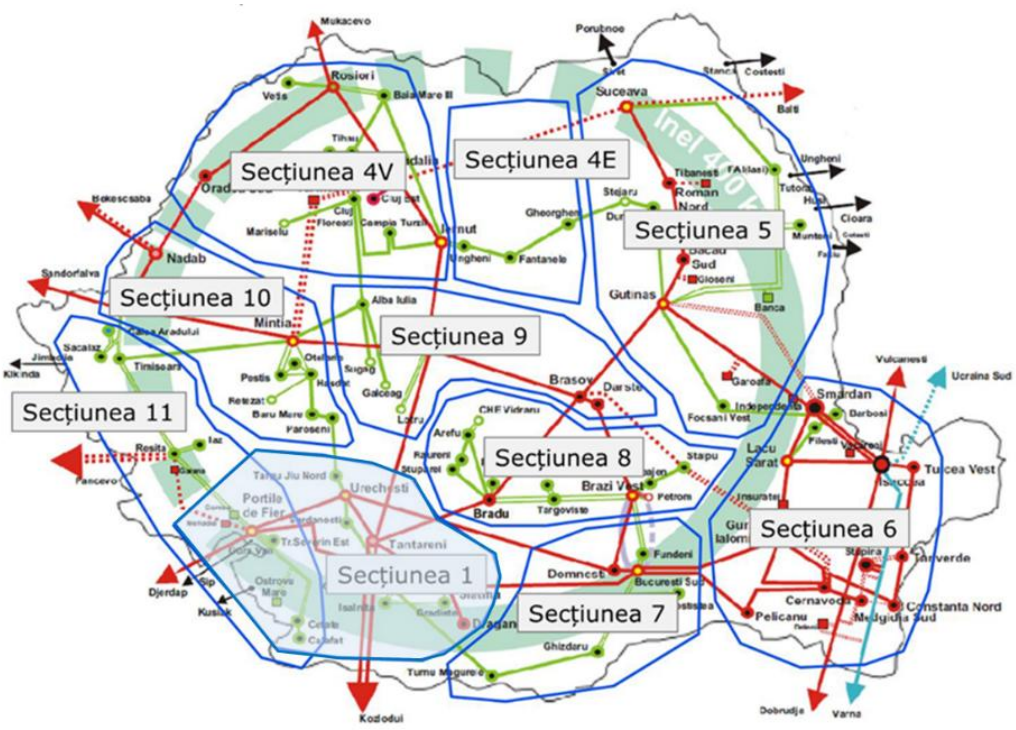


Figura 7.1. Harta SEN cu secțiunile de funcționare [126]

7.2. Perspective de dezvoltare și integrare a surselor regenerabile

Din punct de vedere al perspectivei de dezvoltare a rețelei pentru această zonă este preconizată închiderea completă a termocentralelor din zonă, respectiv Rovinari și Turceni. În cadrul

studiului de caz este analizat scenariul în care un grup de 300 MW al termocentralei Rovinari este retras din funcțiune și producția în zonă este înlocuită cu surse regenerabile de energie. Având în vedere caracteristicile climatice ale zonei de studiu, după cum se poate observa și în figura 7.2, zona permite integrarea centralelor fotovoltaice asigurând un potențial energetic ridicat.

Este preconizat că grupurile de producere a energie electrice bazate pe cărbune vor fi închise până în anul 2030. Astfel, în cadrul simulărilor realizate s-a avut în vedere această perioadă corelată cu perioada de implementare necesară atât pentru centralele electrice fotovoltaice cât și pentru instalarea dispozitivului SVC la nivelul rețelei. Pentru a realiza o dimensionare cât mai corectă a dispozitivului FACTS s-a considerat necesar să se actualizeze în funcție de palier consumul sau producția de energie electrică astfel încât să fie asigurate condițiile de bună funcționare și în cele mai defavorabile perspective. În acest sens următoarele modificări au fost aduse în regimul mediu de bază al rețelei pentru a obține scenariul S0 de funcționare al rețelei:

- Pentru palierul VDV consumul de energie electrică la nivelul zonei de studiu a fost crescut cu 15 %, producția de energie a rămas nemodificată.
- În cazul palierului GNV consumul de energie electrică a fost menținut iar producția a fost mărită cu 15 %.
- Pentru regimul de funcționare VSI consumul de energie electrică la nivelul zonei studiate a fost crescut cu 15 %, fără a aduce modificări în producția de energie.
- Pentru palierul VSI a fost mărit consumul de energie în rețea cu 15% păstrând producția constantă.

În scenariul S1 de analiză al sistemului a fost deconectat grupul 6 al centralei Rovinari cu o putere de 300 MW și au fost conectate în noduri diferite ale rețelei centralele electrice fotovoltaice prezentate în tabelul 7.1.

Tabelul 7.1. Centrale electrice fotovoltaice utilizate în studiul de caz

Nume	Nod racord	Tensiune racord	Putere nominală [MW]	Putere GNV [MW]	Putere VDI [MW]	Putere VDV [MW]	Putere VSI [MW]
CEF 1	Işalnița	220 kV	120	0	36	96	0
CEF 2	Tântăreni	400 kV	250	0	75	200	0
CEF 3	Târgu Jiu	220 kV	100	0	30	80	0

În scenariul S2 de analiză a sistemului este utilizat un dispozitiv SVC pentru a îmbunătății parametrii de funcționare a sistemului si pentru a verifica eficiența acestuia în funcționare în scenariile cu o componentă crescută a energiei regenerabile.

7.3. Analiza regimurilor staționare de funcționare

7.3.1. Analiza regimului inițial de funcționare

În studiul de caz au fost analizate 12 scenarii de funcționare ale rețelei, prezentate în tabelul 7.2, pentru a realiza o dimensionare corectă a dispozitivului SVC și a alege poziția optimă de conectare. Obiectivul principal urmărit prin utilizarea dispozitivului SVC a fost controlul nivelului de tensiune în rețea.

Tabelul 7.2. Regimuri de funcționare studiate

Scenariul	Caracteristici	Palier
Scenariul de funcționare S0	Regimul inițial cu o creștere de 15% a consumului	VDV
	Regimul inițial cu o creștere de 15% a producției	GNV
	Regimul inițial cu o creștere de 15% a consumului	VDI
	Regimul inițial cu o creștere de 15% a consumului	VSI

Scenariul	Caracteristici	Palier
Scenariul de funcționare S1	VDV S0 + deconectare G6 Rovinari + conectare 3 CEF	VDV
	GNV S0 + deconectare G6 Rovinari + conectare 3 CEF	GNV
	VDI S0 + deconectare G6 Rovinari + conectare 3 CEF	VDI
	VSI S0 + deconectare G6 Rovinari + conectare 3 CEF	VSI
Scenariul de funcționare S2	VDV S1 + conectare dispozitiv SVC în rețeaua de 400 kV	VDV
	GNV S1 + conectare dispozitiv SVC în rețeaua de 400 kV	GNV
	VDI S1 + conectare dispozitiv SVC în rețeaua de 400 kV	VDI
	VSI S1 + conectare dispozitiv SVC în rețeaua de 400 kV	VSI

Prima etapă a studiului de caz a constat în analiza regimului S0 și S1 pentru a determina nodurile în care este necesar să se instaleze dispozitivul modern de compensare a puterii reactive.

În urma calculelor de regim permanent au rezultat următoarele valori ale tensiunii în nodurile de 400 kV ale rețelei în scenariile de funcționare S0 și S1 pentru cele patru paliere studiate.

Rezultatele obținute pentru scenariile S0 și S1 sunt prezentate în tabelul 7.3.

Tabelul 7.3. Tensiunea în nodurile de 400 kV în scenariile S0 și S1

Scenariu	S0 – U [%]				S1 – U [%]			
Nume stație	GNV	VDI	VDV	VSI	GNV	VDI	VDV	VSI
Arefu	96.79	99.59	100.03	100.16	97.59	100.14	100.41	99.43
Drăgănești	96.7	96.45	97.69	96.63	96.86	96.92	98.02	96.07
PDF	98.83	98.68	100.3	99.56	99.3	99.38	100.73	98.85
Slatina	96.73	96.72	98.04	96.86	96.89	97.2	98.39	96.31
Tânțăreni	97.4	99.33	100.63	99.33	97.58	99.74	100.95	98.78
Urechești	97.32	99.03	99.65	98.6	97.49	99.21	99.82	97.62

Având în vedere rezultatele obținute în urma simulărilor de regim permanent pentru cele două scenarii studiate rezultă că din punct de vedere al nivelului de tensiune în rețeaua de 400 kV avem două noduri care pot beneficia în urma instalării unui dispozitiv SVC, respectiv stația 400 kV Slatina și stația 400 kV Drăgănești. În ambele noduri în 6 din cele 12 regimuri analizate au rezultat tensiuni sub 97,5% din Un. Acestea prezintă riscul de a scădea sub limita minimă admisă de 95% în cazul unor scenarii de funcționare nefavorabile. Având în vedere că cele două noduri au legătură directă prin linia de 400 kV Slatina – Drăgănești și faptul că stația Slatina este mai bine conectată cu restul sistemului s-a considerat oportun ca dispozitivul SVC sa fie conectat pe barele de 400 kV ale stației Slatina.

După ce s-a ales nodul de racord al SVC s-a determinat necesarul de putere reactivă în fiecare palier de funcționare și astfel a rezultat că pentru a avea un răspuns bun în toate cazurile studiate dispozitivul SVC trebuie dimensionat cu capacitatea de a injecta 250 MVAr și a absorbi 100 MVAr.

În continuarea studiului de caz s-au realizat simulări pentru toate regimurile de funcționare în vederea verificării atingerii obiectivului principal al SVC de control al nivelului de tensiune. Un alt beneficiu analizat a fost reducerea pierderilor de putere la nivelul zonei analizate ca urmare a utilizării SVC.

Astfel în scenariul S2 configurația rețelei va fi cea prezentată în figura 7.3.

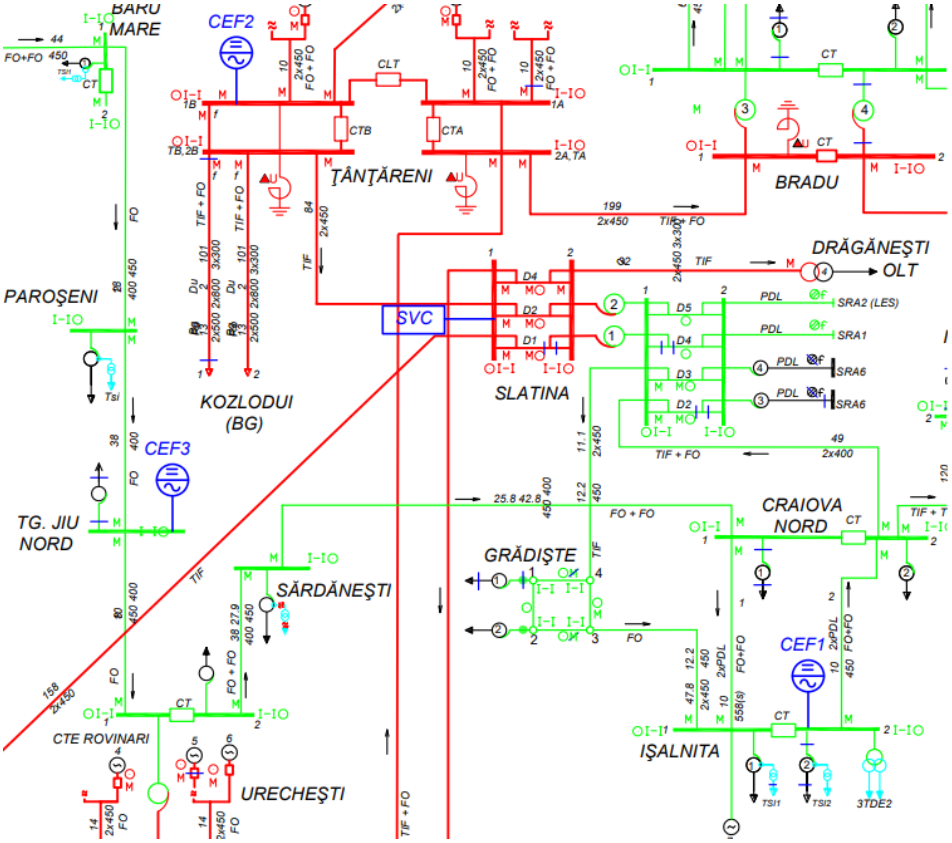


Figura 7.3. Amplasare CEF și a SVC în schema normală de funcționare

7.3.2. Palierul de funcționare VDV

Pentru palierul de funcționare VDV a fost realizată o analiză comparativă din punct de vedere al nivelului de tensiune în rețea și al pierderilor de putere. Analiza nivelului de tensiune a fost împărțită în două componente respectiv nodurile de 400 kV și nodurile cu tensiunea nominală de 220 kV din zona analizată.

În figura 7.4 este realizată o analiză comparativă a valorii tensiunii în cele 3 scenarii studiate, pentru palierul de funcționare VDV, în nodurile de 400 kV.

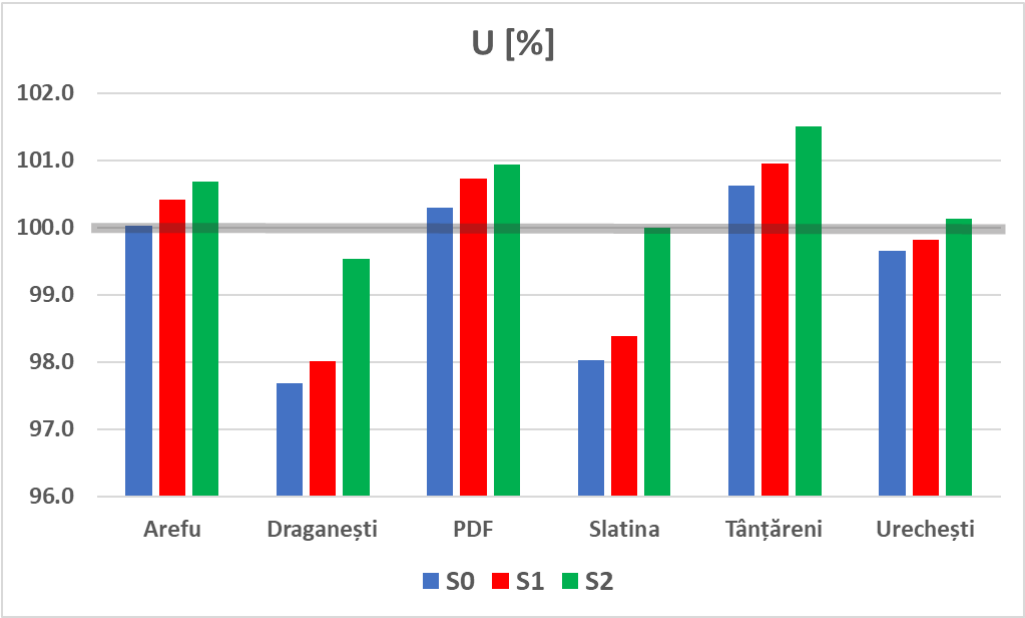


Figura 7.4. Nivelul de tensiune în nodurile de 400 kV din zonă – palier VDV

În figura 7.4 se observă o îmbunătățire semnificativă a nivelului de tensiune în nodurile de 400 kV, în special în cele două noduri identificate în etapa anterioară, respectiv Slatina și Urechești. În toate nodurile de 400 kV din zonă nivelul de tensiune este în limitele admise asigurând buna funcționare a sistemului.

În figura 7.5 este prezentată în mod similar situația pentru rețeaua de 220 kV. Se constată că și pentru nodurile din rețeaua de 220 kV se respectă toate limitele impuse pentru tensiune, iar după conectarea dispozitivului SVC în stația Slatina se observă o îmbunătățire și în nodurile de 220 kV din vecinătate, respectiv Craiova, Grădiște și Slatina. Acest aspect confirmă eficiența dispozitivului SVC de control al tensiunii în rețelele cu o componentă importantă de surse regenerabile de energie.

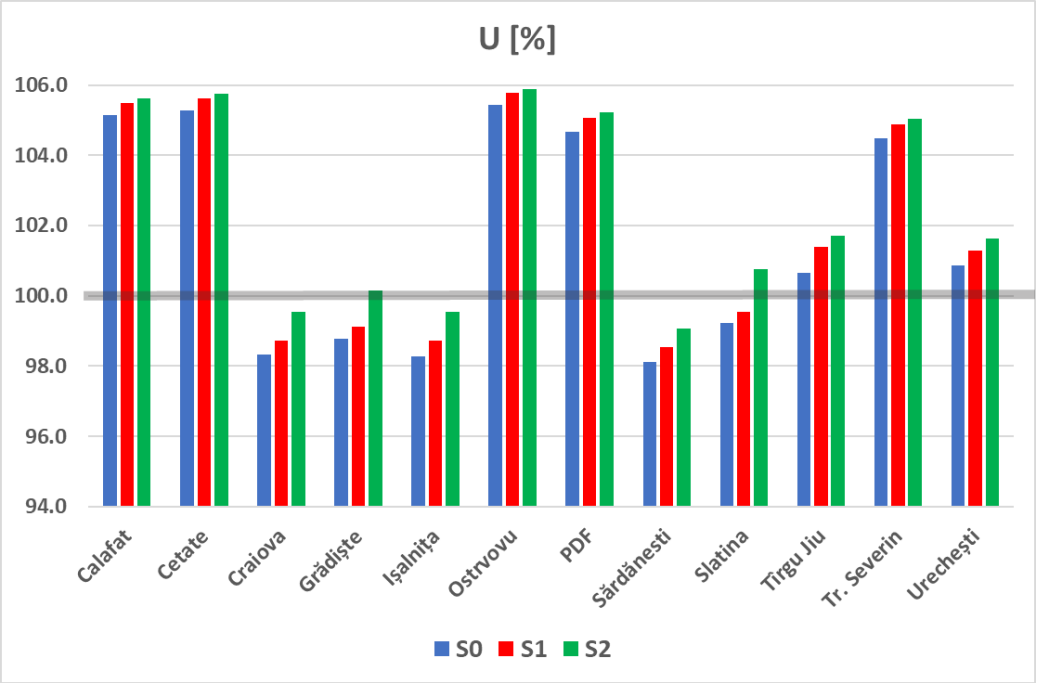


Figura 7.5. Nivelul de tensiune în nodurile de 220 kV din zonă – palier VDV

Un alt aspect urmărit în cadrul analizei este influența dispozitivului SVC și a surselor regenerabile de energie asupra pierderilor de energie în rețea. În tabelul 7.4 este realizată o comparație între cele trei scenarii din punct de vedere al pierderilor de energie activă în fiecare județ.

Tabelul 7.4. Analiza pierderilor de putere – palier VDV

Zona	Pierderi P [MW]	Pierderi P [MW]	Pierderi P [MW]	Contribuție SVC [MW]
	S0	S1	S2	S1-S2
DJ	2.424	2.444	2.208	0.237
GJ	12.558	10.304	8.845	1.459
MH	9.675	8.198	7.086	1.112
OT	4.647	4.668	4.331	0.337
Total	**29.304**	**25.614**	**22.469**	**3.144**

Din datele prezentate în tabelul 7.4 se poate concluziona că dispozitivul SVC are un efect pozitiv asuprea pierderilor de putere activă în zona studiată. În toate regiunile din zonă în scenariul S2 se constată o scădere a pierderilor, în total acestea fiind reduse cu 3.1 MW. Un alt aspect constatat este că prin distribuția în mai multe noduri a surselor regenerabile de energie se reduc pierderile de putere la nivelul rețelei comparativ cu scenariul S0.

7.4. Concluzii

Studiul de caz a avut ca scop analiza unei rețele complexe pentru a determina necesitatea și oportunitatea utilizării dispozitivelor FACTS de tip SVC pentru a controla nivelul de tensiune și a îmbunătății parametrii de funcționare ai sistemului în prezența surselor regenerabile de energie. Astfel, pentru a testa metodologiile și principiile studiate în cazul unui sistem complex, robust și bine dimensionat s-a utilizat sistemul energetic național din România. Prin această tranziție s-a efectuat trecerea de la rețelele standardizate de testare la implementarea dispozitivelor SVC într-o rețea existentă de mari dimensiuni.

A fost aleasă ca funcție obiectiv principală controlul tensiunii în nodurile rețelei, iar ca obiectiv secundar îmbunătățirea funcționării sistemului prin reducerea pierderilor de putere activă.

În procesul de analiză a fost aleasă secțiunea 1 a SEN pentru care s-a determinat locația optimă pentru amplasarea SVC astfel încât să îmbunătățească nivelul de tensiune în zonă. În urma calculelor de regim permanent s-a determinat poziția optimă de conectare la barele de 400 kV ale stației Slatina.

Pornind de la palierele de funcționare ale sistemului, respectiv VDV, GNV, VDI și VSI s-au construit trei scenarii. Scenariile includ atât dezvoltarea sistemului din punct de vedere al creșterii consumului și producției de energie în rețea cât și procesul de tranziție de la centralele convenționale la sursele regenerabile de energie.

În urma analizelor de sistem s-a demonstrat că metodologiile și principiile enunțate în capitolele anterioare pentru rețeaua de test NORDIC32 pot fi aplicate și în cazul unei rețele complexe cum este SEN. Rezultatele calculelor de sistem confirmă că utilizarea dispozitivelor SVC este o soluție pentru controlul nivelului de tensiune în rețelele cu un grad ridicat de integrare al surselor regenerabile. Un beneficiu suplimentar este și obținerea unei scăderi a pierderilor de putere în rețea.

8. CAPITOLUL 8 – CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

8.1.Concluzii

Obiectivul activităților de documentare, cercetare, și simulare a fost reprezentat de analiza impactului asupra regimurilor de funcționare a sistemelor electroenergetice determinat de tranziția de la sursele clasice de energie la sursele de energie regenerabilă și oportunitatea utilizării dispozitivelor FACTS de tip SVC în rețelele electrice de transport pentru îmbunătățirea parametrilor de funcționare în special în contextul creșterii capacității de integrarea surselor regenerabile de energie.

Teza a avut ca obiectiv demonstrarea beneficiilor ce pot fi obținute prin utilizarea dispozitivelor SVC, situațiile în care este recomandată implementarea și limitările observate în funcționare. Pentru a realiza aceste aspecte pe lângă procesul de documentare și sinteză care a stat la baza cercetării au fost realizate trei studii de caz cu scopul de a demonstra ipotezele extrase.

În urma procesului de documentare a fost realizată o prezentare a noțiunilor teoretice privind funcționarea sistemelor electroenergetice, a configurațiilor de funcționare a rețelelor și a aspectelor referitoare la stabilitatea sistemelor electroenergetice.

În etapa de analiză s-au studiat principalele tipuri de soluții FACTS din punct de vedere al principiului de funcționare și al recomandărilor de utilizare. Ulterior a fost prezentat în mod detaliat dispozitivul SVC, principiul de funcționare al acestuia, elementele componente și modul de control. Pentru dispozitivul SVC a fost explicat modul de proiectare în vederea integrării într-o stație de înaltă tensiune. Au fost ilustrate schema electrică monofilară, modul de amplasare al echipamentelor în vederea în plan și un exemplu de compartimentare al clădirii aferente dispozitivului SVC.

Primul studiu de caz s-a concentrat pe regimurile staționare de funcționare ale rețelelor electrice de transport. În cadrul acestui studiu s-au propus, implementat și testat două metodologii distincte. Prima metodologie abordează problema alegerii dispozitivului FACTS corespunzător în funcție de necesitățile identificate la nivelul rețelei, iar cea de a doua are ca obiectiv alegerea locației optime pentru conectarea dispozitivului SVC în rețea și dimensionarea acestuia. Ambele metodologii au fost implementate, testate și validate folosind rețeaua test NORDIC32.

Au fost realizate simulări pentru mai multe scenarii de funcționare incluzând și variante în care sursele regenerabile de energie sunt conectate în rețea.

Rezultatele obținute pentru fiecare dintre scenariile studiate au confirmat beneficiile utilizării dispozitivelor SVC pentru reglajul tensiunii în rețea în prezența integrării surselor regenerabile de energie.

În urma analizelor a rezultat că dispozitivul SVC este recomandat pentru a fi utilizat în rețele de transport a energie electrice pentru îmbunătățirea controlului nivelului de tensiune, reducerea pierderilor de putere și creșterea siguranței în funcționare. În scenariile cu surse regenerabile de energie SVC s-a dovedit adecvat pentru a răspunde problemelor identificate inclusiv controlul injecție/absorbției de putere reactivă.

Al doilea studiu de caz a avut ca obiectiv principal analiza regimurilor dinamice de funcționare ale rețelelor electrice de transport. Din această perspectivă au fost analizate atât regimurile de funcționare cu surse regenerabile de energie cât și utilizarea SVC și a compensatoarelor sincrone.

Pentru realizarea studiului de caz a fost necesară parcurgerea unei etape de alegere, modelare și parametrizare a tipurilor de regulatoare utilizate pentru controlul hidrocentralelor și termocentralelor în regimurile dinamice de funcționare studiate. În vederea realizării scenariului de funcționare cu integrarea masivă a surselor regenerabile de energie a fost necesară efectuarea unei comparații între modelele de turbină eoliana atât din punct de vedere al caracteristicilor constructive cât și din punct de vedere al dispozitivelor de control disponibile. Astfel în urma analizei

comparative a rezultat ca variantă recomandată pentru simularea regimurilor dinamice, modelul de turbină WT4A. Pentru acest model a fost realizată configurarea parametrilor de funcționare în regim dinamic.

Au fost definite mai multe scenarii de funcționare pentru rețeaua de test NORDIC32 în scopul evaluării impactului integrării masive a surselor regenerabile de energie într-o zona a rețelei. Analizele efectuate asupra celor șase evenimente în cele 4 scenarii studiate evidențiază clar rolul și eficiența dispozitivului SVC în menținerea stabilității dinamice a rețelei electrice de transport.

Din punct de vedere al stabilității de tensiune în toate cele patru evenimente, utilizarea unui SVC a condus la:

• Limitarea amplitudinii variațiilor de tensiune în nodurile rețelei imediat după producerea evenimentului dinamic.

• Amortizarea rapidă a oscilațiilor tranzitorii și creșterea stabilității în funcționare.

• Revenirea tensiunii la valori apropiate de nominal într-un timp mult redus față de scenariile fără SVC;

• Evitarea supratensiunilor excesive în cazul restabilirii rapide

• Prin compensarea rapidă a dezechilibrelor, SVC-ul stabilizează fluxurile de putere și susține profilul de tensiune în noduri critice.

În cazul stabilității de frecvență și de unghi rotoric se observă o îmbunătățire în cele mai multe cazuri prin conectarea dispozitivului SVC dar efectele cele mai clare au fost identificate pentru creșterea stabilității de tensiune.

În cadrul studiului de caz a fost realizată o analiză comparativă între răspunsul dinamic al mijloacelor clasice de compensare a puterii reactive, respectiv compensatorul sincron și echipamentele moderne de tip FACTS, mai precis dispozitivul SVC. În urma analizei și a simulărilor efectuate s-a determinat că dispozitivul SVC are un răspuns dinamic mai bun decât compensatorul sincron, fiind capabil de o reacție rapidă și o compensare precisă a variațiilor rezultate în urma producerii unui defect.

Al treilea studiu de caz a avut ca obiectiv validarea concluziilor obținute privind utilizarea dispozitivelor SVC într-un sistem energetic complex, de mari dimensiuni și puternic interconectat. Astfel simulările au fost realizate folosind o rețea reală, respectiv sistemul energetic național din Romania.

A fost studiat un scenariu de tranziție către sursele regenerabile, respectiv integrarea mai multor centrale fotovoltaice în rețea și deconectarea unei termocentrale pe cărbune.

Pentru scenariile analizate SVC a fost folosit în scopul creșterii controlului tensiunii în nodurile rețelei și optimizarea funcționării prin reducerea pierderilor. Ipotezele de la care a fost pornit studiul de caz au fost demonstrate SVC fiind capabil de un control exact al tensiunii în sistem.

8.2. Contribuții personale

Principalele contribuții personale aduse în cadrul procesului de cercetare și realizare a tezei de doctorat pot fi împărțite în următoarele categorii:

A. Documentare și cercetarea privind următoarele aspecte:

- Documentare și analiză asupra noțiunilor teoretice privind funcționarea sistemelor electroenergetice.
- Clasificarea și prezentarea configurațiilor specifice rețelelor din sistemul electroenergetic.
- Documentare și analiză privind regimurile de funcționare dinamice și staționare ale rețelelor electrice de transport.

- Prezentarea aspectelor teoretice privind stabilitatea sistemelor electroenergetice, clasificare tipurilor de stabilitate și modul cum aceste noțiuni pot fi utilizate în studiile de caz realizate.
- Analiza principalelor dispozitive de tip FACTS din punct de vedere al principiului de funcționare și al recomandărilor de utilizare.
- Documentare privind principul de funcționare al dispozitivelor FACTS de tip SVC și modul de control al acestora în multiple regimuri de funcționare.
- Prezentarea modului de implementare a unui dispozitiv SVC într-o stație electrică de înaltă tensiune incluzând elemente precum schema electrică monofilară a instalației, vederea în plan cu amplasarea principalelor componente și modul al clădirii aferente sistemului FACTS.
- Descrierea softului de simulare a regimurilor de funcționare a rețelelor electrice NEPLAN10 și explicarea modulelor de funcționare ale acestuia.
- Analiza regimurilor de funcționare, a elementelor componente și a zonelor de delimitare din sistem pentru rețeaua de test NORDIC32.

B. Simulări, calcule, analize și metodologii dezvoltate:

- Elaborarea și dezvoltarea unei metodologii privind alegerea tipului de dispozitiv FACTS adaptat la condițiile și necesitățile rețelei electrice studiate. Acesta este un proces complex care are nevoie o abordare multidimensională care să respecte atât cerințele tehnice cât și restricțiile de natură economică.
- Elaborarea și dezvoltarea unei metodologii pentru alegerea nodului optim de conectare a dispozitivului SVC într-o rețea electrică de transport.
- Implementarea, testarea și validarea celor două metodologii propuse utilizând ca mediu de testare rețeaua Nordic32.
- Modelarea parametrilor de funcționare ai dispozitivului SVC în vederea realizării calculelor de regim permanent pentru toate scenariile studiate.
- Definirea, simularea și analiza mai multor scenarii de funcționare a rețelei de test Nordic32, inclusiv în prezența surselor regenerabile de energie.
- Dimensionarea optimă a dispozitivului SVC pentru a corespunde criteriilor impuse prin funcția obiectiv propusă pentru o serie de ipoteze privind dezvoltarea sistemului analizat.
- Centralizarea și interpretarea rezultatelor obținute pentru toate scenariile studiate în vederea extragerii concluziilor principale privind beneficiile utilizării dispozitivelor SVC în rețelele electrice de transport și cum pot acestea crește capacitatea de integrare a surselor regenerabile de energie în sistemele electroenergetice.
- Alegerea și parametrizarea regulatoarelor folosite pentru controlul modului de funcționare al hidrocentralelor în vederea asigurării dinamice în analizele de sistem efectuate.
- Alegerea și parametrizarea regulatoarelor care asigura controlul termocentralelor pentru a determina un răspuns dinamic stabil în regimurile studiate.
- Realizarea unei analize comparative între tipurile de turbine eoliene în funcție de caracteristicile constructive și echipamentele de control disponibile. Scopul acestei analize este alegerea modelului de turbina eoliană optim pentru a fi utilizat în procesul de tranziție către sursele regenerabile de energie.

- Configurarea și simularea modelelor dinamice pentru turbinele eoliene tip WT4A în vederea implementării scenariilor de integrare masivă a surselor regenerabile de energie în rețeaua de transport.
- Descrierea și implementarea scenariilor de funcționare a rețelei de test Nordic32 cu scopul de a evalua impactul surselor regenerabile de energie asupra stabilității sistemului și determinarea beneficiilor utilizării SVC.
- Definirea și simularea mai multor evenimente dinamice în toate scenariile analizate pentru a determina impactul acestora asupra stabilității sistemului.
- Realizarea unei analize comparative complexe privind impactul integrării masive a surselor regenerabile de energie asupra sistemului energetic.
- Analiza comparativă, din punct de vedere al comportamentului dinamic, între soluțiile clasice de compensare a puterii reactive, cum este cazul compensatorului sincron, cu o soluție modernă de tip FACTS, respectiv dispozitivul SVC.
- Reprezentarea grafică a tuturor valorilor obținute în urma scenariilor studiate în cazul fiecărui eveniment dinamic analizat pentru a determina principalele diferențe în ceea ce privește stabilitatea sistemului.
- Evaluarea situației energetice actuale în sistemul energetic național al României și analiza perspectivelor de dezvoltare în contextul tranziției către sursele de energie regenerabile și respectarea reglementărilor Uniunii Europene privind sustenabilitatea și eficiența energetică.
- Definirea, implementarea și simularea mai multor scenarii privind evoluția rețelei electrice de transport din România, inclusiv scenarii privind reducerea puterii instalate în termocentrale și creșterea capacității de producție a energiei electrice în centrale electrice fotovoltaice.
- Modelarea unei secțiuni din sistemul energetic național pentru mai multe paliere de funcționare în vederea realizării calculelor de regim permanent.
- Validarea metodologiilor propuse în etapele de studiu anterioare prin testarea eficienței acestora într-un sistem energetic real, cu o complexitate crescută și un număr foarte mare de elemente.
- Determinarea influenței procesului de tranziție către sursele regenerabile de energie asupra sistemului energetic național pentru mai multe paliere de funcționare a rețelei.
- Evaluarea nivelului de tensiune și a pierderilor de putere în SEN pentru zona analizată în toate scenariile și palierele de funcționare studiate.
- Analiza beneficiilor utilizării dispozitivelor SVC în sistemul energetic național în vederea îmbunătățirii parametrilor de funcționare ai rețelei.
- Identificarea oportunității instalării dispozitivelor SVC în sistemul energetic național în perspectiva creșterii capacității de integrare a surselor regenerabile.

C. În cadrul activității de cercetare au fost publicate următoarele articole:

- **USE OF FACTS TYPE SVC DEVICES IN HIGH-VOLTAGE ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEMS IN ORDER TO INCREASE DYNAMIC STABILITY IN THE PRESENCE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES**
  Autori: Andrei Coteanu, Ștefan Gheorghe, Lucian Toma
  Publicat în: Buletin științific UPB, în curs de publicare

- **FACTS SOLUTIONS IMPLEMENTED IN THE TRANSMISSION POWER GRID TO ENHANCE THE INTEGRATION CAPACITY OF RENEWABLE ENERGY SOURCES**
  Autori: Andrei Coteanu, Ștefan Gheorghe, Lucian Toma
  Publicat în: CSCS 2025, pp 502 – 509 DOI 10.1109/CSCS66924.2025.00080

- **BENEFITS OF USING SVC FACTS DEVICES IN POWER TRANSMISSION SYSTEMS**
  Autori: Andrei COTEANU, Stefan GHEORGHE
  Publicat în: EMERG Volume IX, Issue 2/2023, pp 120 – 128, DOI: 10.37410/EMERG.2023.2.08

- **UTILIZAREA SISTEMELOR DE TIP FACTS ÎN REȚEAUA ELECTRICĂ DE TRANSPORT.**
  Autori: Coteanu Andrei , Vasiliu Ioan, Ivan Filip, Fabian Andrei
  Publicat în: SIER 2023 1.16. ISSN 1842-4392

- **INTEGRAREA MIJLOACELOR MODERNE DE COMPENSARE ÎN SISTEMUL ENERGETIC NAȚIONAL**
  Autori: Mihail Coteanu, Ruxandra Fotin, Florin Balașiu, Ioan Vasiliu, Costel Constantin, Andrei Coteanu
  Publicat în: SIER 2021 1.9. ISSN 1842-4392

D. În cadrul activității de cercetare au fost susținute următoarele prezentări:

- **UTILIZAREA TEHNOLOGIILOR MODERNE ÎN REȚEAUA ELECTRICĂ DE TRANSPORT: FACTS, STAȚII DIGITALE, ECHIPAMENTE CU IMPACT REDUS ASUPRA MEDIULUI**
  Autori: Andrei Coteanu
  Eveniment: Conferința CNR-CME, Sibiu, 28 februarie 2025, ,,Noi tehnologii în sistemele electroenergetice”

- **UTILIZAREA STATCOM ÎN REȚELELE ELECTRICE DE TRANSPORT**
  Autori: Andrei Coteanu
  Eveniment: Conferința CNR-CME, Poiana Brașov, 17 martie 2023 ,,Tehnologii noi în energie”

E. În perioada studiilor doctorale am participat la realizarea următoarelor proiecte pentru CNTEE Transelectrica:

- **INSTALAREA A DOUĂ MIJLOACE MODERNE DE COMPENSARE A PUTERII REACTIVE ÎN STAȚIILE 400/220/110/20 KV SIBIU SUD ȘI 400/220/110/20 KV BRADU – FAZELE DE PROIECTARE STUDIU DE SISTEM, STUDIU DE FEZABILITATE ȘI CAIET DE SARCINI;**

  Lucrare pentru care a fost obținută scrisoarea de recomandare Nr. 15598 /07.04.2021 din partea CNTEE Transelectrica S.A. pentru contribuțiile aduse.

- **OPTIMIZAREA REGLAJULUI DE TENSIUNE ȘI A PARAMETRILOR DE CALITATE A ENERGIEI ELECTRICE PRIN INSTALAREA ECHIPAMENTELOR DE TIP FACTS ÎN STAȚIILE GUTINAȘ, SUCEAVA ȘI ROȘIORI FAZELE DE PROIECTARE STUDIU DE SISTEM, STUDIU DE FEZABILITATE ȘI CAIET DE SARCINI.**

  Lucrare pentru care a fost obținută scrisoarea de recomandare Nr. 59965 /22.12.2023 din partea CNTEE Transelectrica S.A. pentru contribuțiile aduse.

Experiența și cunoștințele dobândite în cadrul celor două proiecte au fost transpuse în realizarea studiilor de caz prezentate.

8.3. Direcții de urmat în cercetare

În viitor pot fi cercetate în continuare prezentei lucrări următoarele teme:

- Analiza oportunității utilizării altor tipuri de dispozitivelor FACTS, spre exemplu dispozitivele de tip STATCOM, pentru a creste capacitatea de integrare a surselor regenerabile și pentru a crește performanțele statice și dinamice ale rețelei.
- Analiza oportunității din punct de vedere tehnic și economic a utilizării dispozitivelor SVC în prezența surselor regenerabile de energie și a instalațiilor de stocare a energiei.

BIBLIOGRAFIE SELECTIVĂ

[1] Nicolas Omont, Guillaume Lhermet, João Gorenstein Dedecca, Pierre Henneaux „ Assessment of Policy Options for Securing Inertia" , Publications Office of the European Union, 2025, DOI:10.2833/8332305
[2] Mircea Eremia, Mihai Sănduleac, Lucian Toma, Constantin Bulac, Alisa Manoliu, „Dispozitive FACTS Concepte și aplicații în electroenergetică'', Editura Agir, București, 2017
[3] Mircea Eremia „Electric power systems, Volume 1 electric networks", Editura Academiei Române, București, 2006
[4] Ovidiu Crișan „Sisteme electroenergetice" , Editura didactică și pedagogică București, 1978.
[8] CIGRÉ Study Committee C1, "Transmission systems planning and development—A theoretical framework," CIGRÉ Technical Brochure No. 759, Paris, France, Jun. 2019. ISBN: 978-2-85873-452-5.
[13] E. Potolea „Calculul regimurilor de functionare ale sistemelor electroenergetice" Editura Tehnică București, 1977
[14] Paul Dimo „Analiza nodală a sistemelor electroenergetice", Editura Academiei Republicii Socialiste România, 1968
[15] P. Kundur, Power System Stability and Control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994. ISBN: 978-0070359581.
[16] Constantin Bulac, „Curs Dinamica Sistemelor Electroenergetice'', Universitatea Politehnica din București, Facultatea de Energetică.
[44] Erinmez, I.A., Foss, A.M. (Editori) ș.a., Static synchronous compensator (STATCOM). CIGRE Working Group 14.19, Broșură Tehnică nr. 144, august 2000.
[45] Static synchronous compensator (STATCOM), CIGRÉ Technical Brochure No. 144, Study Committee B4, Paris, France, 1999.
[67] T. Van Cutsem, et al., "Test Systems for Voltage Stability Studies," IEEE PES Task Force Report, Tech. Rep., 2010.
[81] EEE Power & Energy Society, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, IEEE Std 421.5-2005, New York, NY, USA, 2006, pp. 19–20.
[85] IEEE Power & Energy Society, IEEE Std 421.5-2016, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, New York, NY, USA, 2016.
[91] IEEE Standards, IEEE Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units, IEEE Std 1207-2011
[104] CIGRÉ Study Committee B4, Static Var Compensators (SVC) and Their Applications, CIGRÉ Technical Brochure No. 95, Paris, France, 1995. ISBN: 978-2858731104.
[107] CIGRÉ Study Committee B4, Static Var Compensators—Application and Benchmark Models, CIGRÉ Technical Brochure No. 229, Paris, France, 2003. ISBN: 978-2858738912.
[109] CIGRÉ Study Committee B4, Benchmark Models for FACTS Studies of Power System Dynamics, CIGRÉ Technical Brochure No. 183, Paris, France, 2001. ISBN: 978-2858736734.
[113] CIGRÉ Study Committee B4, FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution, CIGRÉ Technical Brochure No. 144, Paris, France, 1999. ISBN: 978-2858731104.
[116] IEEE Power & Energy Society, IEEE Recommended Practice for Wind Turbine Generator Modeling in Power System Studies, IEEE Std 2009 (rev. 2013), New York, NY, USA, 2013
[123] CIGRÉ Study Committee C4, Benchmark Models for the Integration of Wind Power into Transmission Systems, CIGRÉ Technical Brochure No. 328, Paris, France, 2007