

ÎMBUNĂTĂȚIREA FUNCȚIONĂRII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE PRIN UTILIZAREA DISPOZITIVELOR DE TIP FACTS

Teză de doctorat – Rezumat

pentru obținerea titlului științific de doctor la
Universitatea Politehnica Timișoara
în domeniul de doctorat Inginerie Energetică
autor Ing. Salinschi Marin
conducător științific Prof.univ.dr.ing. Ștefan Kilyeni
Septembrie 2025

ACRONIME.....	9
LISTA DE FIGURI, LISTA DE TABELE, LISTA DE ANEXE	11
1. INTRODUCERE.....	27
2. DISPOZITIVE FACTS.....	31
2.1. Dispozitive FACTS în sistemele electrice moderne	31
2.2. Clasificarea dispozitivelor FACTS	32
2.3. Exemple de dispozitive FACTS	32
2.4. Static VAR Compensator (SVC)	33
2.5. Static Synchronous Compensator (STATCOM)	36
2.6. Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC).....	39
2.7. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)	43
2.8. Unified Power Flow Controller (UPFC)	47
2.9. Interline Power Flow Controller (IPFC)	51
2.10. Concluzii.....	56
3. METODE DE AMPLASARE ȘI DIMENSIONARE OPTIMĂ A DISPOZITIVELOR FACTS	57
3.1. Considerații preliminare	57
3.2. Artificial Bee Colony (ABC) și Honey-Bees Mating Optimization (HBMO).....	58
3.3. Algoritmi genetici (AG)	59
3.4. Particle Swarm Optimization (PSO)	60
3.5. Bacterial Swarming Algorithm (BSA).....	60
3.6. Biogeography Based Optimization (BBO)	61
3.7. Metode euristice (HM)	61
3.8. Tabu Search (TS)	61
3.9. Mixed Integer Linear Programming (MILP).....	62
3.10. Squirrel search algorithm (SSA).....	62
3.11. Cuckoo Search Algorithm (CSA)	62
3.12. Imperialist Competitive Algorithm (ICA).....	63
3.13. Alți algoritmi meta-euristici	63
3.14. Concluzii.....	64
4. MODELE MATEMATICE PENTRU AMPLASAREA ȘI DIMENSIONAREA OPTIMĂ A FACTS.....	65
4.1. Modelul matematic utilizat pentru amplasarea optimă a dispozitivelor FACTS.....	65
4.2. Modelul matematic utilizat pentru dimensionarea optimă a dispozitivelor FACTS.....	71
4.3. Concluzii	77
5. AMPLASAREA OPTIMĂ A DISPOZITIVELOR FACTS UTILIZÂND ANALIZA DE SENSIBILITATE U–Q	79
5.1. Sistemul electroenergetic TEST25	79
5.2. Sistemul electroenergetic al Republicii Moldova.....	88
5.3. Concluzii	110
6. AMPLASAREA OPTIMĂ A DISPOZITIVELOR FACTS ÎN FUNCȚIE DE COMPORTAREA ÎN REGIM DINAMIC A SEE	111
6.1. Sistemul electroenergetic TEST25	111
6.2. Sistemul electroenergetic al Republicii Moldova.....	156
6.3. Concluzii	218
7. CONCLUZII GENERALE. CONTRIBUȚII PERSONALE.....	219
BIBLIOGRAFIE.....	221
SINTEZĂ PRIVIND LUCRĂRILE PROPRII.....	233
ANEXE ELECTRONICE	

Un sistem electroenergetic (SEE) modern este o structură complexă, alcătuită din centrale electrice, rețele de transport și distribuție a energiei electrice, stații de transformare și consumatori. În teorie, rolul său este simplu: producerea, transportul și distribuția energiei în condiții de siguranță. În practică însă, apar o multitudine de provocări legate de variațiile de sarcină, de limitările fizice ale liniilor de transport, de pierderile de putere și de perturbările externe. Operatorii de sistem se confruntă cu necesitatea de a menține un echilibru între producție și consum, precum și de a asigura stabilitatea frecvenței și a tensiunii în ansamblul SEE.

Tranziția către surse de energie regenerabilă (de natură eoliană, fotovoltaică, biomasă, microhidrocentrale) a introdus noi provocări legate de stabilitate și de flexibilitatea. Aceste transformări au evidențiat necesitatea unor soluții moderne de control și optimizare a circulațiilor de putere, capabile să mențină siguranța în funcționare și calitatea alimentării cu energie electrică a consumatorilor.

În abordarea clasică, sunt necesare investiții masive în construcția de linii electrice noi și în extinderea stațiilor de transformare, care presupun costuri foarte mari, timp îndelungat de implementare și dificultăți legate de obținerea avizelor de mediu. În acest context, dispozitivele de tip FACTS (Flexible AC Transmission Systems) au apărut ca o alternativă inovatoare, bazată pe utilizarea electronicii de putere pentru controlul rapid și eficient al circulației de putere și al nivelului tensiunii. Aceste dispozitive sunt concepute pentru a optimiza utilizarea infrastructurii existente, fără a fi nevoie de investiții masive în construcția de linii noi.

La nivel internațional, implementarea dispozitivelor FACTS a cunoscut în ultimul deceniu o dezvoltare accelerată. Țări precum India, China sau Statele Unite au investit masiv în aceste tehnologii. În Europa, utilizarea lor este legată de integrarea masivă a energiei regenerabile, în special în Germania și țările nordice, unde există parcuri eoliene extinse.

Și România are un potențial semnificativ pentru aplicarea acestor tehnologii, în special în zona Dobrogea, unde sunt concentrate cele mai multe parcuri eoliene din țară, dar și în alte zone unde există necesitatea creșterii nivelului de putere activă transferată și menținerea profilului de tensiune mai aproape de limitele superioare.

În acest context, tematica tezei de doctorat se încadrează în preocupările actuale legate de implementarea dispozitivelor de tip FACTS în SEE. Ea și-a propus ca obiectiv elaborarea și utilizarea unor metode practice eficiente, rigurose fundamentate științific, pentru optimizarea amplasării și dimensionării dispozitivelor de tip FACTS.

S-a pornit de la un sistem test de dimensiuni relativ reduse, elaborat la Departamentul de Electroenergetică al UPT – TEST25 [Kilyeni1988], ca apoi să se treacă la un SEE real, de mari dimensiuni – SEE al Republicii Moldova.

Rezultatele obținute și concluziile formulate sunt utile atât pentru operatorii de transport și de distribuție, la modul general, cât și pentru cazul particular al Moldelectrica (operatorul de transport al Republicii Moldova).

Teza de doctorat, extinsă pe 234 de pagini, cuprinde 7 capitole, prefață, 4 anexe (în format electronic) și o listă bibliografică, conținând un număr de 313 figuri, scheme și 159 tabele. Bibliografia cuprinde 161 de titluri ale unor lucrări reprezentative, clasice și de dată relativ recentă, apărute în țară sau în reviste de prestigiu din străinătate.

Capitolul 1 are un caracter introductiv. Prima parte vizează încadrarea și justificarea tematicii tezei de doctorat, în contextul stadiului actual de evoluție a electroenergeticii, al preocupărilor existente pe plan mondial. Partea a doua realizează o prezentare succintă a conținutului fiecărui capitol. Ultima parte evidențiază atât modul de valorificare a cercetărilor efectuate în cadrul tezei (lucrări publicate în reviste de specialitate sau în volumele unor conferințe, contracte de cercetare științifică sau asistență tehnică, programe de calcul) cât și utilitatea rezultatelor obținute pentru operatorii de transport și de distribuție. În final se subliniază perspectivele deschise de această teză privind direcțiile posibile de continuare și extindere a investigațiilor.

Capitolul 2 sintetizează succint informațiile privind dispozitivele FACTS, evidențiind clasificarea acestora, principiile de funcționare și modelele matematice utilizate în calculele de circulație de puteri.

Dispozitivele FACTS sunt clasificate, în funcție de poziționarea în rețea, în dispozitive de tip șunt (SVC – Static VAR Compensator, STATCOM – Static Synchronous Compensator), serie (TCSC – Thyristor Controlled Series Capacitor, SSSC – Static Synchronous Series Compensator) și mixte (UPFC – Unified Power Flow Controller, IPFC – Interline Power Flow Controller), iar din punct de vedere al tehnologiei de comutație în dispozitive cu comutație mecanică, cu tiristoare și cu semiconductoare auto-comutate de tip VSC.

SVC este un dispozitiv șunt utilizat pentru reglarea tensiunii prin compensarea puterii reactive. Din punct de vedere matematic, SVC este modelat ca o susceptanță variabilă conectată în paralel la rețea, realizată prin combinații TSC (Thyristor-Switched Capacitor) și TCR (Thyristor-Controlled Reactor). Sunt evidențiate modelul de regim staționar, modelul dinamic și integrarea SVC în matricea de admitanță nodală a SEE [Zhu2009].

STATCOM este un dispozitiv bazat pe convertoare cu sursă de tensiune, care oferă un control rapid și precis al puterii reactive. Modelarea sa se realizează în sistemul de coordonate dq0 și include bucle de reglaj PI pentru tensiunea de c.c. și curent. Sunt evidențiate modelul de regim staționar și cel liniarizat pentru mici perturbații [Singh2015].

TCSC este un dispozitiv de tip serie utilizat pentru controlul impedanței liniei și al circulației de putere activă. Modelul matematic al TCSC evidențiază posibilitatea creșterii sau reducerii puterii transmise prin modificarea reactanței serie, precum și utilizarea canalelor POD (Power Oscillation Damping) pentru amortizarea oscilațiilor [Maruf2015].

SSSC utilizează un convertor VSC (Voltage Source Converter) pentru a injecta o tensiune serie controlabilă, permițând modificarea directă a circulației de putere. Funcționarea sa în regim capacitiv sau inductiv este descrisă prin modele matematice de regim staționar și dinamic [Morsali2018].

UPFC este cel mai complex dispozitiv FACTS, combinând funcționalitățile STATCOM și SSSC. Prin control coordonat al convertoarelor serie și paralel, UPFC permite reglarea simultană a tensiunii, impedanței și unghiului de fază [Mailah2015]. Extinderea acestui concept la mai multe linii este realizată prin IPFC, utilizat pentru echilibrarea sarcinilor și optimizarea utilizării coridoarelor de transport [Talebi2015].

Capitolul 3 prezintă, într-o manieră sistematizată, principalele metode actuale de soluționare a localizării și dimensionării optime a dispozitivelor de tip FACTS în sistemele electroenergetice actuale.

Metodele de soluționare a problemelor discutate se pot împărți în două mari categorii:

- metode bazate pe tehnici clasice de modelare matematică – programare liniară, programare liniară cu numere întregi sau mixtă, programare neliniară, programare dinamică etc.;

- tehnici euristice și meta- euristice: Algoritmi Genetici (AG), Evolutionary Programming (EP), Particle Swarm Optimization (PSO), Harmony Search (HS), Tabu Search (TS), Simulated Annealing (SA), Ant Colony Optimization (ACO), Artificial Bee Colony (ABC), Artificial Immune System (AIS), Charged System Search (CSS), Biogeography Based Optimization (BBO), Cuckoo Search Algorithm (CSA), Firefly Algorithm (FA), Artificial Fish Swarm Algorithm (AFSA), Shuffled Frog Leaping Algorithm (SFLA), Bacterial Swarming Algorithm (BSA), Squirrel search algorithm (SSA), Imperialist Competitive Algorithm (ICA), Dragon Fly (DFA), BrainStorm Optimisation Algorithm (BSOA), Cat Swarm Optimization (CSO) etc.

Câteva exemple de lucrări care utilizează metodele menționate mai sus: Mixed Integer Linear Programming (MILP – Programare liniară cu variabile mixte) [Sharma2005]; Heuristic methods (HM – Metode euristice) [Belkacem2006]; Artificial Bee Colony (ABC – Algoritm inspirat de comportarea roiurilor de albine) [Rafee2016]; Genetic Algorithm (GA – Algoritm genetic) [Bamigbade2020], [Ahmad2020]; Particle Swarm Optimization (PSO – Algoritm de tip "roi de particule") [Raj2018]; Bacterial Swarming Algorithm (BSA – Algoritm inspirat de evoluția bacteriilor) [Ayman2018], Biogeography Based Optimization (BBO – Algoritm inspirat de factori biologici) [Kavitha2018]; Tabu Search (TS – Algoritm de căutare de tip "tabu") [Koster2020]; Squirrel search algorithm (SSA – Algoritm inspirat de mișcarea salpilor) [Yun2020]; Cuckoo Search Algorithm (CSA – Algoritm inspirat de cuibul de cuci) [Shehab2017]; Evolutionary Programming (EP – Programare evolutivă) [Zarkani2021]; Dragon Fly (DA – Algoritm inspirat de comportamentul libelulelor) [Abouazma2019]; Bat Search Algorithm (BSA – Algoritm inspirat din comportamentul lilieciilor) [Akbari2014]; BrainStorm Optimisation Algorithm (BSOA – Algoritm de optimizare de tip "Brain storm") [Jordehi2015]

Există și așa zise metode mixte (hibride), care rezultă prin combinarea a două sau mai multe dintre tehnicile menționate amintite mai sus [Kang2017]. Uneori se includ și tehnici de tip fuzzy [Rabian2020].

Capitolul 4 are ca obiectiv elaborarea modelului matematic pentru amplasarea și dimensionarea optimă a dispozitivelor FACTS.

Subcapitolul 4.1 prezintă modelul matematic și procedeul bazat pe analiza de sensibilitate Q-U, utilizat pentru determinarea amplasării optime a dispozitivelor FACTS. Prima parte a subcapitolului se referă la analiza regimului permanent normal al SEE complexe. A doua parte are ca obiect detaliile legate de analiza de sensibilitate.

Analiza regimului permanent normal constă în determinarea vectorului de stare (tensiunile nodurilor, ca modul și fază), a puterilor care circulă prin elementele de rețea (linii electrice aeriene și subterane, transformatoare, autotransformatoare, bobine de compensare) și a pierderilor de putere (în întregul SEE și în elemente de rețea individuale) [Kilyeni2015b], [Das2018].

Modelul matematic al regimului permanent normal este format dintr-un sistem de ecuații neliniare, de foarte mari dimensiuni, matricele de coeficienți având o structură puternic lacunară. Soluționarea sa se poate realiza eficient exclusiv cu metode numerice de tip Newton pentru sisteme de ecuații neliniare de mari dimensiuni [Kilyeni2019], utilizând și tehnici speciale de memorare și prelucrare a matricelor lacunare [Kilyeni2015b].

Analiza de sensibilitate Q-U studiază relația dintre puterea reactivă și tensiune, pentru a evalua siguranța în funcționarea rețelei din acest punct de vedere [Munikoti2020]. Tensiunea într-un nod al SEE depinde de echilibrul local dintre puterea reactivă absorbită și cea generată. Dacă crește injecția de putere reactivă inductivă, valoarea tensiunii crește. Dacă crește consumul de putere reactivă inductivă într-un anumit nod, valoarea tensiunii scade.

Sensibilitatea Q-U exprimă modificarea tensiunii într-un nod al rețelei la o variație a puterii reactive din acel nod:

$$S_{UQ} = \frac{\partial U}{\partial Q} \quad \text{sau} \quad S_{QU} = \frac{\partial Q}{\partial U}$$

Cele două forme sunt echivalente. În practică, cel mai des se folosește $\partial U / \partial Q$, deoarece arată cât de mult se modifică (scade sau crește) tensiunea atunci când puterea reactivă se modifică (scade sau crește) cu ΔQ . Dacă S_{UQ} are valoare mică, tensiunea este "rigidă", adică se modifică foarte puțin la variații de putere reactivă. SEE este stabil și "bine susținut" de sursele de putere reactivă. Dacă S_{UQ} are valoare mare, tensiunea variază mult la mici schimbări de putere reactivă, ceea ce poate reprezenta un motiv de vulnerabilitate.

În lucrarea de față analiza sensibilității s-a realizat prin modificarea puterii reactive consumate cu o anumită valoare (de exemplu 1 MVar) pentru fiecare nod consumator (de tip PQ). De asemenea, s-a realizat și o analiză de sensibilitate la modificarea puterii reactive generate de dispozitivul de tip FACTS montat în nodul respectiv.

Analiza în sine a vizat valorile tensiunii în toate nodurile sistemului, pentru SEE de dimensiuni relativ mai reduse (SEE TEST25 în cazul lucrării de față, care are 25 de noduri). Pentru sisteme de dimensiuni relativ mai mari (sute de noduri – SEE Moldova în lucrarea de față – 205 noduri) s-a făcut și o analiză suplimentară, având la bază definirea unor zone în cadrul SEE, cu luarea în considerare a tensiunilor doar pentru nodurile din zona în cauză.

Pe lângă sensibilitatea tensiunii, s-a urmărit și influența asupra pierderilor de putere activă în sistem.

Poziționarea optimă a amplasării dispozitivelor de tip FACTS se realizează în ordinea descrescătoare a valorii indicelui de sensibilitate S_{UQ} . Suplimentar, s-a considerat și criteriul valorii pierderilor de putere activă.

Subcapitolul 4.2 este dedicat dimensionării optime a dispozitivelor FACTS, pe baza analizei stabilității la mari perturbații a SEE. Stabilitatea este analizată din perspectiva comportării generatoarelor sincrone (GS) și a sistemelor de reglare automată, utilizând modele dinamice de diferite ordine pentru GS și modele standardizate pentru sistemele de reglare automată [Kilyeni2004], [Eremia2014], [Anderson2003], [Luștea2012], [IEEE2016]. Studiile sunt realizate prin simulări "pas cu pas" în domeniul timp, metodă care permite o evaluare detaliată a proceselor tranzitorii.

La ora actuală nu există o abordare unitară a definirii calității proceselor tranzitorii legate de funcționarea în regimuri perturbate a SEE complexe (cu alte cuvinte stabilitatea SEE). Majoritatea proceselor tranzitorii sunt de natură oscilatorie, numărul proceselor aperiodice fiind foarte redus. În metodele specifice teoriei sistemelor de reglare automată, calitatea proceselor tranzitorii se apreciază în general prin intermediul unor criterii integrale, care oferă o imagine globală, ținând cont de toți indicatorii de calitate: viteza de răspuns, suprareglarea, durata regimului tranzitoriu, amortizarea etc.

Pentru procesele tranzitorii oscilante, în majoritatea cazurilor se utilizează integrala abaterii pătratică, definită de relația de mai jos, drept indice de performanță.

$$I = \int_0^{\infty} (x - x_r)^2 \cdot dt$$

Optimizarea procesului tranzitoriu presupune minimizarea valorii indicelui de performanță. Ținând cont de natura problemei discutate, în studiile de stabilitate este necesară considerarea unui număr mare de variabile la definirea funcției obiectiv (FOB). În consecință, aceasta poate fi de forma de mai jos, unde x_1, x_2, \dots, x_n sunt variabilele considerate, indicele r înseamnă valoarea de referință, iar A_i sunt coeficienți de ponderare:

$$V = \sum_{i=1}^n A_i (x_i - x_{ir})^2$$

Pentru definirea expresiei FOB se fac următoarele precizări suplimentare:

- prezintă interes practic doar valorile relative ale FOB, nu și cele absolute;
- în cazurile practice pentru limita superioară de integrare se consideră o valoare finită T , care se situează în domeniul (5 – 15) s;
- ca valoare de referință x_r se consideră cea determinată în regimul staționar, post-perturbație sau ante-perturbație, starea finală a sistemului determinându-se cu un program clasic de circulație de puteri;
- alegerea coeficienților de ponderare reprezintă o problemă dificilă, care poate influența în mod sensibil rezultatele.

În scopul determinării formei FOB trebuie soluționate următoarele probleme: alegerea formei indicelui de performanță; determinarea expresiei funcției de penalizare a amplitudinii primei oscilații și a amortizării oscilațiilor; alegerea variabilelor care se iau în considerare la definirea FOB; sintetizarea expresiei FOB; modul efectiv de calcul al indicilor de performanță și al FOB.

În lucrare se adoptă pentru indicii de performanță forma pătratică definită mai sus, corectată eventual cu o funcție de penalizare $FP(t)$:

$$I = \int_0^T FP(t) (x - x_r)^2 \cdot dt$$

Detalii despre funcțiile de penalizare se găsesc în [Kilyeni2004].

Indicii de performanță se calculează luând în considerare următoarele variabile:

- a) tensiunea U în toate nodurile SEE;
- b) viteza unghiulară ω pentru toate GS din sistem.

Indici de tip I_U oferă o măsură a intensității electrice a perturbației, iar cei de tip I_ω ilustrează efectul dinamic al dezechilibrului electromecanic asupra mișcării rotoarelor GS.

La calculul concret al valorii indicilor de performanță se menționează următoarele aspecte suplimentare:

- a) pentru I_ω drept mărime de referință se consideră viteza unghiulară sincronă;
- b) dacă configurația SEE din regimul staționar post-perturbație este similară cu cea din regimul ante-perturbație, pentru I_U drept mărime de referință se consideră valoarea tensiunii la borne din regimul ante-perturbație;
- c) dacă configurația SEE din regimul staționar post-perturbație diferă de cea din regimul ante-perturbație, pentru I_U drept mărime de referință se consideră valoarea tensiunii la borne din regimul post-perturbație;
- d) regimul tranzitoriu se analizează pe o durată de 15 s.

Sintetizarea unei funcții obiectiv globale, rezultante, pentru SEE complexe, pe baza indicilor de performanță menționați, este foarte dificilă, neexistând nici o metodă care să asigure analitic soluția optimă. Chiar dacă se realizează empiric acest lucru, nu se poate omite analiza individuală a indicilor de performanță la stabilirea soluției optime, respectiv analiza în detaliu a modului de variație în timp pentru un număr mare de mărimi. În consecință, indicele de performanță I_U , calculat la nivelul ansamblului SEE, sau pentru anumite zone din SEE, va constitui prima componentă a FOB. indicele de performanță I_ω , calculat pentru toate generatoarele sincrone din cadrul SEE, va constitui a doua componentă a FOB. Cele două componente ale FOB se analizează separat, de regulă valorile lor sunt de ordine de mărime diferite.

Practic, același lucru se poate face, fără a comite erori semnificative, prin simpla însumare a abaterilor pătratice.

Capitolul 5, împreună cu capitolul 6, constituie partea aplicativă a tezei de doctorat. În acest capitol se realizează amplasarea optimă a dispozitivelor FACTS de tip SVC pentru două sisteme electroenergetice (SEE): o rețea test cu 25 de noduri – TEST25 [Kilyeni1988] și SEE real al Republicii Moldova. Pentru fiecare SEE s-a considerat câte un regim permanent normal caracteristic, pentru care s-a efectuat analiza de sensibilitate Q–U (tensiune – putere reactivă), în scopul amplasării optime a dispozitivelor de tip FACTS – SVC.

Caracteristicile principate ale SEE TEST25 (Fig. 5.1.1): 25 de noduri – 6 noduri de tip PU (surse), unul dintre acestea fiind nodul de echilibrare (A24), 19 noduri de tip consum (PQ); 29 de elemente de rețea – 18 linii electrice aeriene (LEA) de 110, 220 și 400 kV, 5 transformatoare de medie pe înaltă tensiune (10, 15, 24 kV, respectiv 110, 220, 400 kV) și 6 autotransformatoare (2 de 400 MVA, 400/220 kV, respectiv 4 de 200 MVA, 220/110 kV).

Scopul analizei de sensibilitate constă în găsirea nodurilor pentru care amplasarea dispozitivelor FACTS are efectul pozitiv maxim, atât din punctul de vedere al nivelului de tensiune cât și cel al pierderilor de putere activă.

Pentru început s-a realizat o analiză de sensibilitate pentru regimul fără dispozitive FACTS (SVC), în maniera prezentată în capitolul 4. S-au parcurs succesiv toate nodurile SEE și s-a modificat puterea reactivă cu câte 1 MVar, apoi s-a calculat noul regim de funcționare și s-au extras valorile tensiunilor în noduri.

Sinteza rezultatelor este prezentată în Fig. 5.1.2. Pe axa orizontală figurează nodurile, iar axa verticală corespunde valorilor tensiunii (în % în raport cu valoarea nominală). În Fig. 5.1.3 se prezintă valoarea medie a tensiunii în toate nodurile SEE. Media s-a realizat între cazurile prezentate în Fig. 5.1.2. În Fig. 5.1.4 se prezintă valoarea medie a tensiunii în nodurile SEE în funcție de nodul pentru care s-a efectuat analiza de sensibilitate.

Analiza rezultatelor evidențiază concluziile următoare:

- a) din punctul de vedere al efectului asupra valorilor din întregul SEE un clasament al nodurilor de 110 kV analizate se prezintă în felul următor: MM110, II110, HH110; LL110, NN110, DD110, JJ110 (cu alte cuvinte tensiunea resimte cel mai puternic modificarea puterii reactive în nodul MM110, respectiv cel mai slab în nodul JJ110);

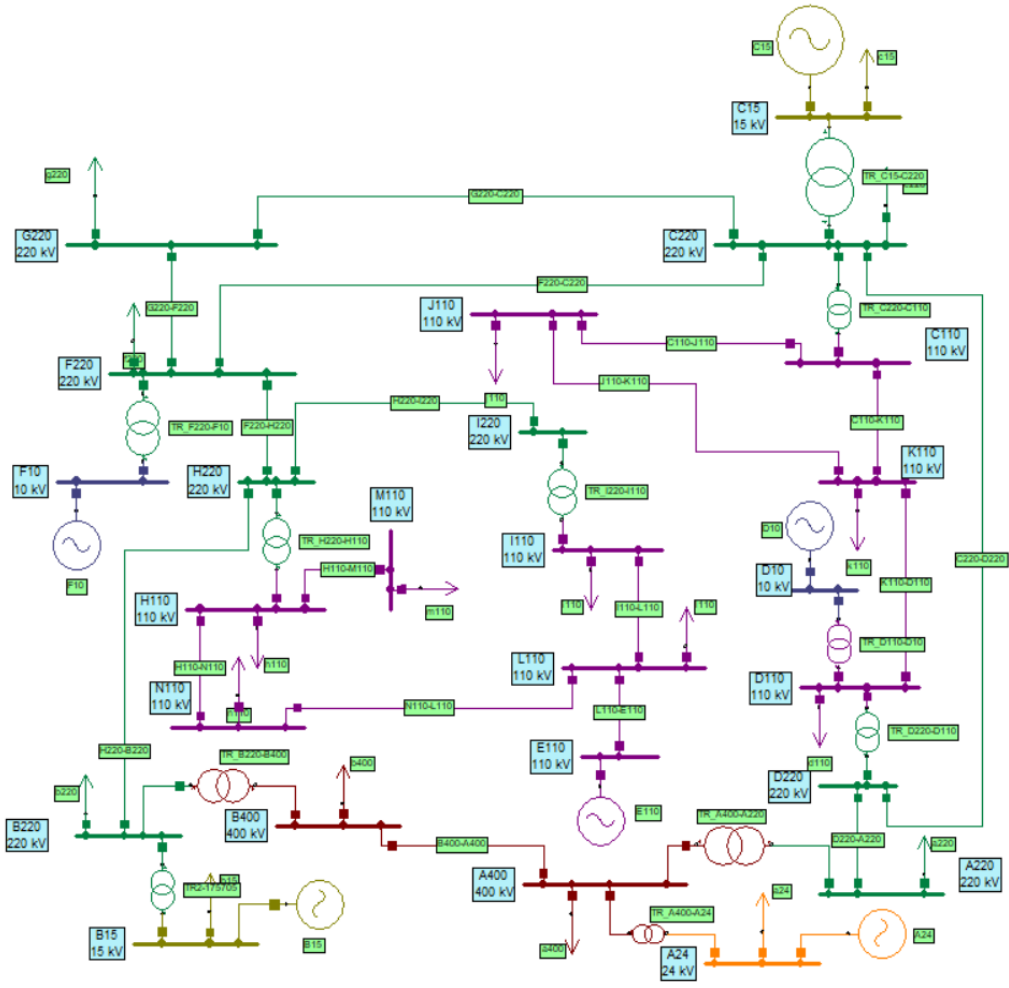


Fig. 5.1.1. SEE TEST25

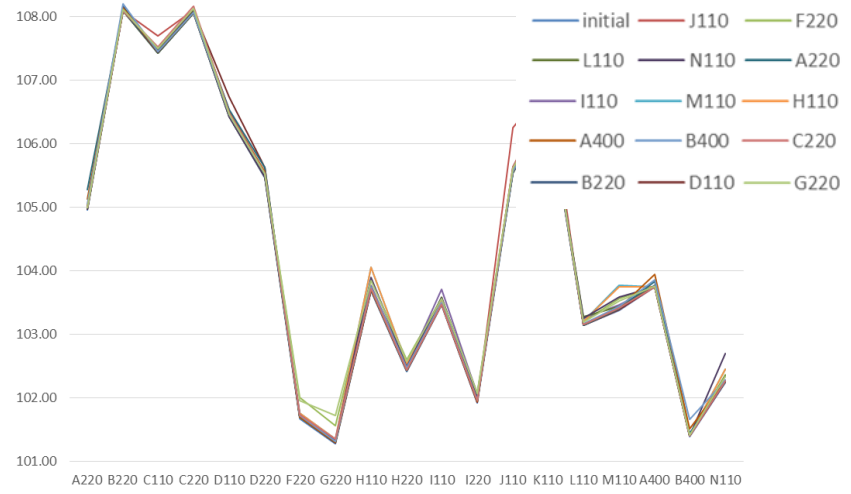


Fig. 5.1.2. Sinteza modificării tensiunii în funcție de modificarea puterii reactive consumate



Fig. 5.1.3. Valoarea medie a tensiunii în nodurile SEE pentru toate analizele efectuate



Fig. 5.1.4. Valoarea medie a tensiunii în noduri în funcție de nodul pentru care s-a analizat sensibilitatea

- b) din punctul de vedere al efectului asupra valorilor din întregul SEE un clasament al nodurilor de 220 kV analizate se prezintă în felul următor: GG220, FF220, BB220; CC220, AA220;
- c) în ceea ce privește nodurile de 400 kV, clasamentul este BB400, AA400);
- d) din punctul de vedere al valorilor tensiunilor, un clasament ascendent al nodurilor de 110 kV analizate se prezintă în felul următor: NN110, LL110, MM110, II110, HH110, FF110, JJ110 (cu alte cuvinte tensiune este cea mai scăzută în nodul NN110, respectiv cea mai ridicată în nodul JJ110);
- e) din punctul de vedere al valorilor tensiunilor, un clasament ascendent al nodurilor de 220 kV analizate se prezintă în felul următor: GG220, FF220, AA220; CC220, BB220;
- f) în ceea ce privește nodurile de 400 kV, clasamentul este BB400, AA400.

Combinând concluziile de la punctele a) și c), respectiv b) și e), apoi c) și f), un clasament al celor mai "interesante" noduri în ceea ce privește sensibilitatea tensiunii la modificarea puterii reactive consumate este următorul:

- a) nodurile de 110 kV – MM110, la egalitate II110, NN110, LL110, apoi HH110 și în final, la egalitate, DD110, JJ110;
- b) nodurile de 220 kV – GG220, FF220, la egalitate BB220, CC220, AA220;
- c) nodurile de 400 kV – BB400, AA400.

În continuare s-a realizat o analiză de sensibilitate pentru regimul cu dispozitive FACTS (SVC). S-au parcurs succesiv toate nodurile SEE și s-a introdus un dispozitiv SVC în nodul analizat, care să injecteze o putere reactivă de 2 MVar, apoi s-a calculat noul regim și s-au extras valorile tensiunilor.

Analiza rezultatelor evidențiază concluziile următoare:

- a) din punctul de vedere al efectului asupra valorilor din întregul SEE un clasament al nodurilor de 110 kV analizate se prezintă în felul următor: MM110, II110, HH110; LL110, NN110, DD110, JJ110;
- b) din punctul de vedere al efectului asupra valorilor din întregul SEE un clasament al nodurilor de 220 kV analizate se prezintă în felul următor: GG220, FF220, BB220; CC220, AA220;
- c) în ceea ce privește nodurile de 400 kV, clasamentul este BB400, AA400;
- d) din punctul de vedere al valorilor tensiunilor, un clasament ascendent al nodurilor de 110 kV analizate se prezintă în felul următor: NN110, LL110, MM110, II110, HH110, FF110, JJ110;
- e) din punctul de vedere al valorilor tensiunilor, un clasament ascendent al nodurilor de 220 kV analizate se prezintă în felul următor: GG220, FF220, AA220; CC220, BB220;
- f) în ceea ce privește nodurile de 400 kV, clasamentul este BB400, AA400.

Combinând concluziile de la punctele a) și c), respectiv b) și e), apoi c) și f), un clasament al celor mai "interesante" noduri în ceea ce privește sensibilitatea tensiunii este următorul:

- a) nodurile de 110 kV – MM110, la egalitate II110, NN110, LL110, apoi HH110 și, în final, la egalitate DD110, JJ110;
- b) nodurile de 220 kV – GG220, FF220, apoi la egalitate BB220, CC220, AA220;
- c) nodurile de 400 kV – BB400, AA400.

Comparând cele două categorii de rezultate, se observă că din punct de vedere calitativ sunt practic similare.

În Fig. 5.1.8 se prezintă valoarea pierderilor de putere activă pe ansamblul SEE în funcție de nodul pentru care s-a efectuat analiza de sensibilitate cu modificarea puterii reactive consumate.

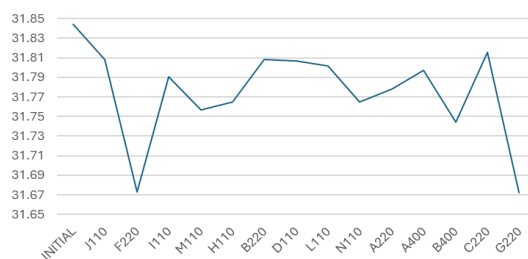


Fig. 5.1.8. Pierderile de putere activă în funcție de nodul pentru care s-a efectuat analiza de sensibilitate

Analiza rezultatelor evidențiază următoarele concluzii:

- a) în toate situațiile pierderile de putere activă sunt mai mici decât cele din regimul inițial;
- b) din punctul de vedere al efectului asupra pierderilor de putere activă, un clasament al nodurilor de 110 kV analizate se prezintă în felul următor: MM110, HH110, NN110, II110, LL110, DD110J, JJ110 (cu alte cuvinte pierderile de putere activă scad cel mai mult la modificarea puterii reactive în nodul MM110, respectiv cel mai puțin în nodul JJ110);
- c) din același punct de vedere, un clasament al nodurilor de 220 kV analizate se prezintă în felul următor: GG220, FF220, BB220; AA220, CC220;
- d) în ceea ce privește nodurile de 400 kV, clasamentul este BB400, AA400.

Comparând rezultatele cu cele de la analiza de sensibilitate Q-U (cu modificarea puterii reactive consumate) singura deosebire este că în clasamentul pentru nodurile de 110 kV nodul HH110 trece de pe locul 5 pe locul 2.

În continuare s-a realizat o analiză similară a pierderilor de putere pentru regimul cu dispozitive FACTS (SVC).

Combinând concluziile de la analizele de sensibilitate și cele referitoare la pierderile de putere activă, rezultă:

- a) există două situații în care amplasarea SVC nu este recomandată – nodurile CC220 și LL110;
- b) un clasament al celor mai "interesante" noduri în ceea ce privește sensibilitatea tensiunii este următorul pentru nodurile de 110 kV – MM110, la egalitate II110, NN110, apoi HH110 și, în final, la egalitate DD110, JJ110;
- c) pentru nodurile de 220 kV – GG220, FF220, apoi, la egalitate BB220, AA220;
- d) pentru nodurile de 400 kV – BB400, AA400.

Caracteristicile principale ale SEE RM (Republica Moldova): 195 de noduri – 18 de tip PU (surse), unul dintre acestea fiind nodul de echilibrare NMoldova CTEM330, 177 de tip consum (PQ); 241 de elemente de rețea – 235 LEA de 110 și 330 kV, 6 autotransformatoare de 300 MVA, 330/110 kV (Fig. 5.2.1).

Având în vedere configurația și dimensiunile SEE RM, pentru analizele următoare el a fost divizat în 5 zone (Fig. 5.2.2): Zona 1 – partea de nord-vest; Zona 2 – partea de nord-est; Zona 3 – partea de centru-est; Zona 4 – partea de centru-vest; Zona 5 – partea de centru-sud.

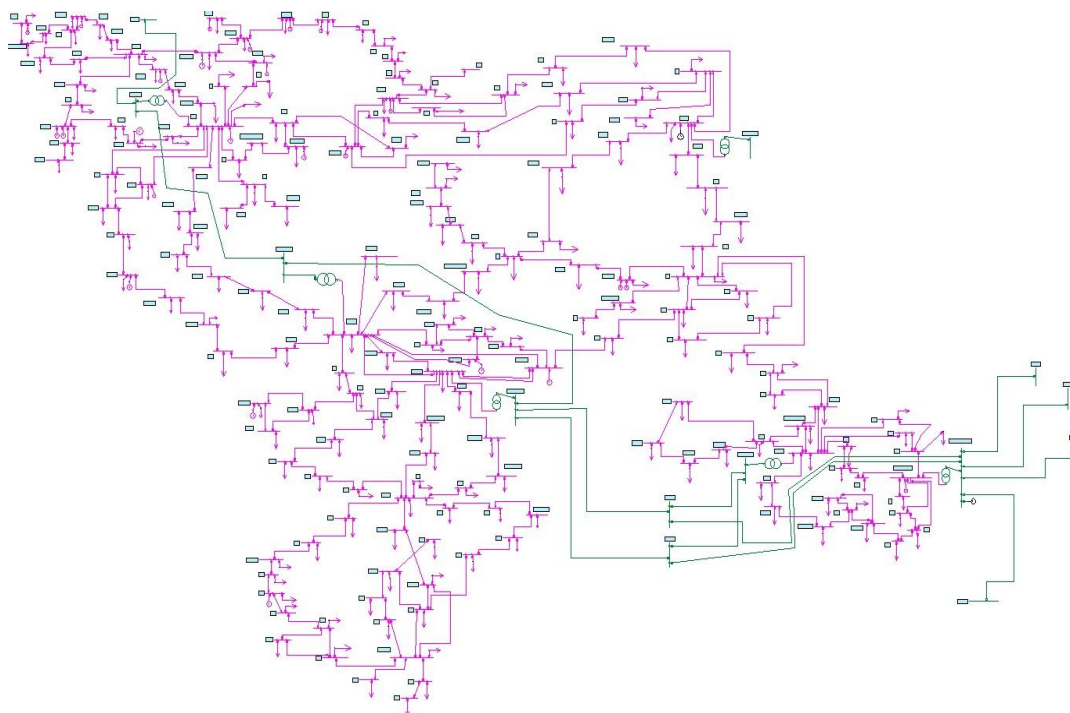


Fig. 5.2.1. Schema monofilară a SEE RM

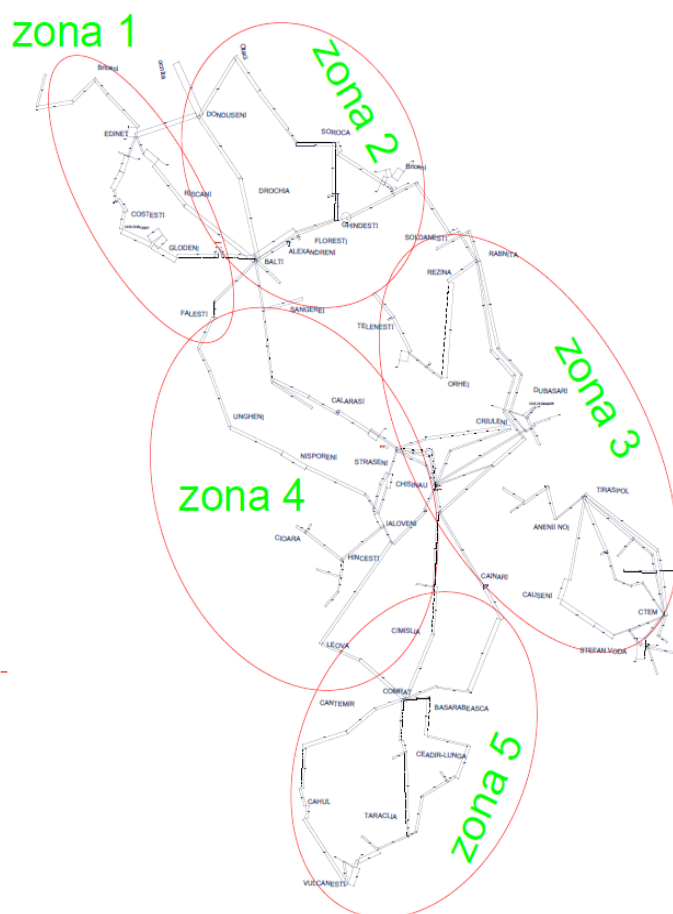


Fig. 5.2.2. Zonele din cadrul SEE RM

Analizând valorile tensiunilor în nodurile SEE RM și configurația rețelei de 110 kV, s-a efectuat o primă selecție a nodurilor în care se conectează dispozitive FACTS (SVC): Zona 1: Briceni, Edineț, Larga; Zona 2: Donușeni, Ocnița, Otaci, Soroca; Zona 3: Kamenka, Orhei, Ribnița, Telești; Zona 4: Anenii noi,

Ungheni; Zona 5: Cahul, Ceadar lunga, Komrat, Vulcănești. Pentru analiza de sensibilitate tensiune – putere reactivă, s-a amplasat succesiv în nodurile selectate câte un dispozitiv FACTS (SVC) de 2 MVar.

În Fig. 5.2.3 se prezintă tensiunea minimă în prezența SVC în toate nodurile SEE RM. Pe axa verticală figurează valorile tensiunilor [kV], iar pe cea orizontală locul de amplasare a SVC. În Fig. 5.2.4 se prezintă tensiunea maximă în prezența SVC în toate nodurile SEE RM. În Fig. 5.2.5 se prezintă tensiunea medie în prezența SVC în toate nodurile SEE RM.

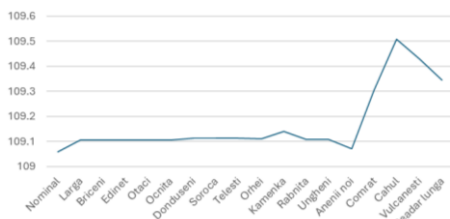


Fig. 5.2.3. Valorile minime ale tensiunilor

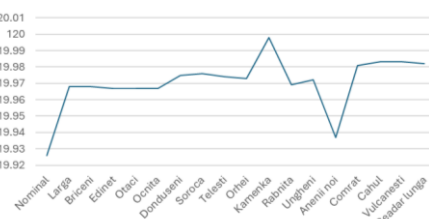


Fig. 5.2.4. Valorile maxime ale tensiunilor

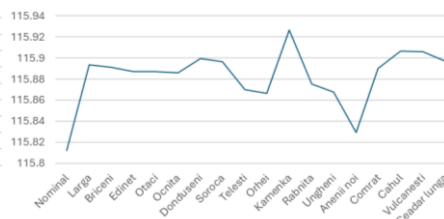


Fig. 5.2.5. Valorile medii ale tensiunilor

S-a efectuat apoi ordonarea nodurilor unde se amplasează SVC în ordinea descrescătoare a tensiunilor, pentru cele 3 situații analizate (Tabelul 5.2.5). S-au însumat pozițiile în clasament și în cele din urmă valorile obținute au fost convertite în note de la 10 la 1 (în ordine crescătoare).

Tabelul 5.2.5. Analiza influenței SVC

	Briceni	Larga	Edinet	Dundu	Ocnita	Otaci	Soroca	Rabni	Orhei	Kamen	Telesti	Unghe	Anenii	Komrat	Cahul	Vulcan	Ceadar
U_{min}	12	13	14	15	16	6	7	8	9	5	11	10	17	4	1	2	3
U_{max}	12	13	14	15	16	7	6	8	9	1	11	10	17	5	2	3	4
U_{med}	7	8	10	11	12	4	6	14	16	1	13	15	17	9	2	3	5
Suma	31	34	38	41	44	17	19	30	34	7	35	35	51	18	5	8	12
Nota	4.92	4.33	3.55	2.96	2.37	7.65	7.26	5.11	4.33	9.61	4.13	4.13	1.00	7.46	10.0	9.42	8.63

Rezultatele din Tabelul 5.2.5 evidențiază următorul "clasament": Cahul, Kamenka, Vulcănești, Ceadar lunga, Otaci, Komrat, Soroca, Rîbnița, Briceni, Larga și Orhei, Telești și Ungheni, Edineț, Dondușeni, Ocnita, Anenii noi.

În Fig. 5.2.6 se prezintă tensiunea minimă în prezența SVC în nodurile din Zona 1. În Fig. 5.2.7 se prezintă tensiunea maximă în prezența SVC în nodurile din Zona 1. În Fig. 5.2.8 se prezintă tensiunea medie în prezența SVC în nodurile din Zona 1.

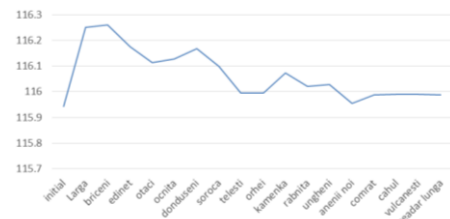


Fig. 5.2.6. Valorile minime ale tensiunilor – Zona 1



Fig. 5.2.7. Valorile maxime ale tensiunilor – Zona 1

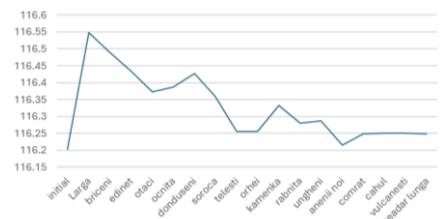


Fig. 5.2.8. Valorile medii ale tensiunilor – Zona 1

Pentru analiza rezultatelor s-a procedat în maniera prezentată anterior (Tabelul 5.2.6).

Tabelul 5.2.6. Analiza influenței SVC

	Briceni	Larga	Edinet	Dundu	Ocnita	Otaci	Soroca	Rabni	Orhei	Kamen	Telesti	Unghe	Anenii	Komrat	Cahul	Vulcan	Ceadar
U_{min}	2	1	3	6	5	4	7	11	12	8	10	9	17	15	13	14	16
U_{max}	1	2	3	6	5	4	7	11	12	8	10	9	17	15	13	14	16
U_{med}	1	2	3	6	5	4	7	11	12	8	10	9	17	15	13	14	16
Suma	4	5	9	18	15	12	21	33	36	24	30	27	51	45	39	42	48
Nota	10.0	9.81	9.04	7.32	7.89	8.47	6.74	4.45	3.87	6.17	5.02	5.60	1.00	2.15	3.30	2.72	1.57

Rezultatele din Tabelul 5.2.6 evidențiază următorul "clasament": Briceni, Larga, Edineț, Otaci, Ocnita, Dondușeni, Soroca, Kamenka, Ungheni, Telești, Rîbnița, Orhei, Cahul, Vulcănești, Komrat, Ceadar lunga, Anenii noi.

S-a procedat într-o manieră similară și pentru celelalte zone.

Pentru concluziile finale se reunes notele obținute, calculând apoi o medie generală (Tabelul 5.2.11).

Tabelul 5.2.11. Calculul mediei generale

	Briceni	Larga	Edinet	Dundu	Ocnita	Otaci	Soroca	Rabni	Orhei	Kamen	Telesti	Unghe	Anenii	Komrat	Cahul	Vulcan	Ceadar
Zona1	10.0	9.81	9.04	7.32	7.89	8.47	6.74	4.45	3.87	6.17	5.02	5.60	1.00	2.15	3.30	2.72	1.57
Zona2	8.20	7.60	7.00	9.60	9.60	10.0	8.80	4.60	4.00	7.20	5.60	5.40	1.00	1.60	3.40	2.80	2.20
Zona3	5.89	5.30	4.72	6.87	5.70	7.85	8.43	9.41	8.83	10.0	9.02	5.30	1.00	1.98	3.54	2.96	2.17
Zona4	6.94	6.36	5.02	5.40	4.03	7.89	7.70	5.60	5.02	9.43	5.60	10.0	3.68	1.0	3.30	2.70	2.15
Zona5	3.81	3.25	3.69	2.13	1.56	6.81	7.00	6.06	5.50	7.75	4.38	4.94	1.00	8.31	10.0	9.44	8.88
Media	6.96	6.46	5.89	6.26	5.75	8.20	7.75	6.02	5.44	8.11	5.92	6.24	1.53	3.01	4.70	4.12	3.39

Apoi se analizează rezultatele separat pentru cele 5 zone, utilizând datele din Tabelele 5.2.5, 5.2.11 și cel aferent zonei respective. Pe baza notelor se întocmește clasamentul aferent. În final, pe baza locului ocupat în fiecare tabel, se determină clasamentul general.

Tabelul 5.2.12. Clasamentul final pentru zona 1

	Briceni		Larga		Edineț	
	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament
Tabel 5.2.5	4.92	1	4.33	2	3.55	3
Tabel 5.2.11	6.96	1	6.46	2	5.89	3
Tabel 5.2.6	10.0	1	9.81	2	9.04	3
Media	7.29	1	6.86	2	6.16	3

Tabelul 5.2.13. Clasamentul final pentru zona 2

	Dondușeni		Ocnița		Otaci		Soroca	
	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament
Tabel 5.2.5	2.96	3	2.37	4	7.65	1	7.26	2
Tabel 5.2.11	6.26	3	5.75	4	8.20	1	7.75	2
Tabel 5.2.7	9.60	2	9.60	2	10.0	1	8.80	4
Media	6.27	3	5.90	4	8.61	1	7.93	2

Tabelul 5.2.14. Clasamentul final pentru zona 3

	Rîbnița		Orhei		Kamenka		Telești	
	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament
Tabel 5.2.5	5.71	2	4.33	3	9.61	1	4.13	4
Tabel 5.2.11	6.02	2	5.44	4	8.11	1	5.92	3
Tabel 5.2.8	9.41	2	8.83	4	10.0	1	9.02	3
Media	7.04	2	6.20	4	9.24	1	6.35	3

Tabelul 5.2.15. Clasamentul final pentru zona 4

	Ungheni		Arieni Noi	
	Notă	Clasament	Notă	Clasament
Tabel 5.2.5	4.83	1	1.00	2
Tabel 5.2.11	6.24	1	1.53	2
Tabel 5.2.6	10.0	1	3.68	2
Media	7.02	1	2.07	2

Tabelul 5.2.16. Clasamentul final pentru zona 5

	Komrat		Cahul		Vulcănești		Ceadar lungă	
	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament	Notă	Clasament
Tabel 5.2.5	7.46	4	10.0	1	9.42	2	8.63	3
Tabel 5.2.11	3.01	4	4.70	1	4.12	2	3.69	3
Tabel 5.2.8	8.31	4	10.0	1	9.44	2	8.88	3
Media	6.26	4	8.23	1	7.66	2	7.06	3

Pe baza rezultatelor obținute se pot formula următoarele concluzii finale: dacă se are în vedere ansamblul SEE RM, instalarea dispozitivelor SVC este cea mai avantajoasă în nodurile, Cahul, Kamenka, Vulcănești și Ceadar lungă; pentru zona 1 nodul cel mai avantajos este Briceni; pentru zona 2 – Otaci; pentru zona 3 – Kamenka; pentru zona 4 – Ungheni; pentru zona 5 – Cahul.

Pentru analizele de regimuri dinamice din capitolul următor se iau în considerare toate nodurile care au calificativul general peste 7: Zona 1 – Briceni; Zona 2 – Otaci, Soroca; Zona 3 – Kamenka, Rîbnița; Zona 4 – Ungheni; Zona 5 – Cahul, Vulcanesti, Ceadar lungă.

Capitolul 6 are ca obiect dimensionarea optimă a dispozitivelor FACTS de tip SVC pentru sistemele electroenergetice (SEE) prezentate în capitolul anterior: sistemul test cu 25 de noduri și SEE RM. S-au efectuat o serie de studii de stabilitate la mari perturbații, în scopul dimensionării optime a dispozitivelor de tip FACTS – SVC din punctul de vedere al comportării în regim dinamic a SEE. Din motive de spațiu, s-au selectat pentru prezentare doar o parte din cazurile studiate, concluziile finale ținând cont rezultatele obținute pentru toate regimurile dinamice analizate.

În urma analizelor efectuate, cu metodele prezentate în capitolul 4, a rezultat puterea optimă a SVC din punctul de vedere al comportării în regim dinamic a SEE. Pe baza acesteia, s-a determinat de fapt o zonă de optim, având în vedere faptul că variația valorii funcției obiectiv (FOB) în jurul celei mai bune valori este destul de "plată".

Analizele de regimuri dinamice au fost efectuate comparativ, în absența și în prezența dispozitivelor SVC. Pentru sistemul TEST25, pe baza concluziilor din capitolul 5, au fost vizate scenarii de perturbație în zona nodurilor NN110, MM110, II110, HH110 (110 kV) și GG220, FF220, BB220, AA220 (220 kV), unde se montează și dispozitivele de tip SVC.

S-au ales pentru prezentare analizele de stabilitate pentru scurtcircuite trifazate pe liniile aflate în zona nodurilor respective (și nu numai), urmate de deconectarea liniei în cauză și reconectarea ei prin intermediul dispozitivului de reanclanșare automată rapidă (RAR). După reconectare s-a considerat atât cazul unui defect nepersistent (RAR reușit) cât și cel al unui defect persistent (RAR nereușit). În situația a doua protecția deconectază

definitiv linia în cauză. În cazul cu RAR reușit regimul staționar post-perturbație este identic cu cel ante-perturbație. În situația cu RAR nereușit, regimul staționar post-perturbație diferă de cel ante-perturbație.

Scenariul de perturbație pentru un scurtcircuit pe o linie de 110 kV (220 kV, 400 kV), cu RAR reușit, este următorul: scurtcircuit trifazat la momentul $t = 1$ s; protecția deconectează linia la momentul $t = 1.2$ s (1.1 s); reconectarea reușită a liniei la momentul $t = 2.2$ s (2.1 s), pauza de RAR – 1 s.

Scenariul de perturbație pentru un scurtcircuit pe o linie de 110 kV (220 kV, 400 kV), cu RAR nereușit, este următorul: scurtcircuit trifazat pe linia de 110 kV la momentul $t = 1$ s; protecția deconectează linia la momentul $t = 1.2$ s (1.1 s); reconectarea nereușită a liniei la momentul $t = 2.2$ s (2.1 s), pauza de RAR – 1 s., din cauza faptului că defectul este persistent; protecția deconectează definitiv linia la momentul $t = 2.4$ s (2.2 s).

Pentru exemplificare se prezintă cazul unui scurtcircuit trifazat pe LEA 110 kV NN110 – HH110, cu RAR reușit, respectiv nereușit. Analiza a fost efectuată cu instrumentul soft Neplan [Neplan], cu pasul de timp de 0.01 s, rezultatele fiind prezentate pentru 15 s. Puterea SVC este de 5 MVAR.

Pentru cazul cu RAR reușit, în fig. 6.1.1 și 6.1.2 se prezintă variația tensiunii pentru toate nodurile SEE, în absența, respectiv în prezența SVC.

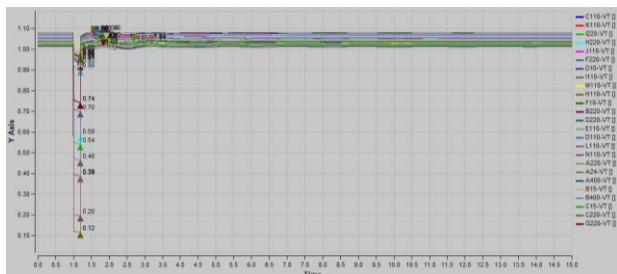


Fig. 6.1.1. Variația tensiunilor în absența SVC

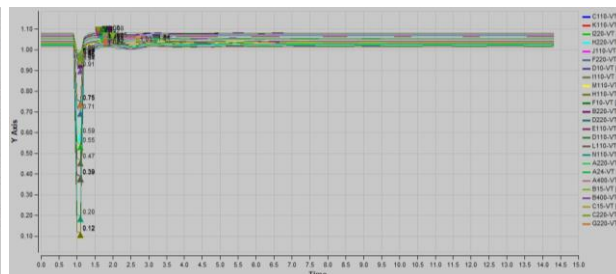


Fig. 6.1.2. Variația tensiunilor în prezența SVC

În tabelul 6.1.1 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE Având în vedere faptul că se analizează cazul cu RAR reușit, abaterile se calculează față de valorile din regimul staționar ante-perturbație (SEE revine la starea inițială). Se observă că efectul SVC este pozitiv – oscilațiile se amortizează mai repede și valorile maxime sunt mai reduse.

Tabelul 6.1.1. Valorile comparative ale FOB_U

FOB_U	
Fără SVC	Cu SVC
87.532	81.720

În fig. 6.1.3 și 6.1.4 se prezintă variația vitezei unghiulare a rotoarelor GS din nodurile BB15 și CC15, în absența, respectiv în prezența SVC.

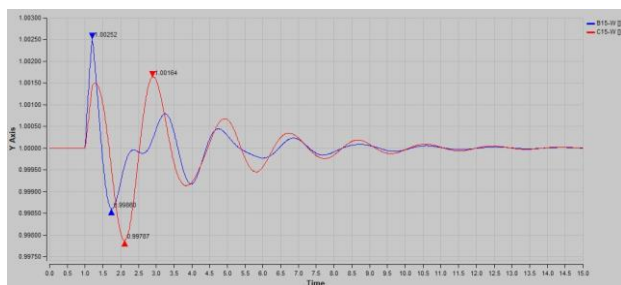


Fig. 6.1.3. Variația vitezelor unghiulare în absența SVC

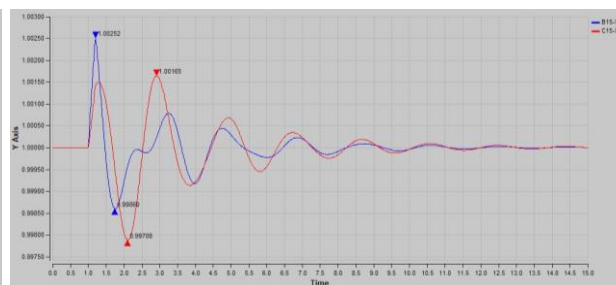


Fig. 6.1.4. Variația vitezelor unghiulare în prezența SVC

În tabelul 6.1.2 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor vitezelor unghiulare (FOB_{ω}), calculată pentru GS din nodurile BB15 și CC15, în absența, respectiv în prezența SVC. Se observă că efectul SVC este pozitiv – oscilațiile se amortizează mai repede și valorile maxime sunt mai reduse.

Tabelul 6.1.2. Valorile comparative ale FOB_{ω}

FOB_{ω}	
Fără SVC	Cu SVC
7.12×10^{-4}	6.48×10^{-4}

În fig. 6.1.5 și 6.1.6 se prezintă variația unghiului intern pentru generatoarele din nodurile B15 și C15, în absența, respectiv în prezența SVC.

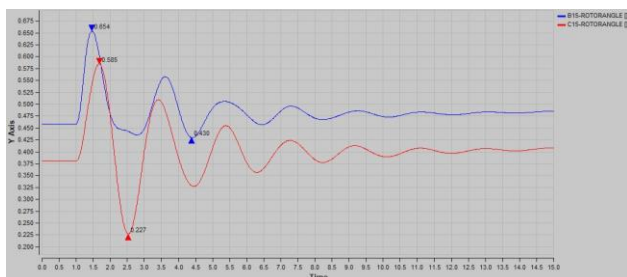


Fig. 6.1.5. Variația unghiului intern în absența SVC

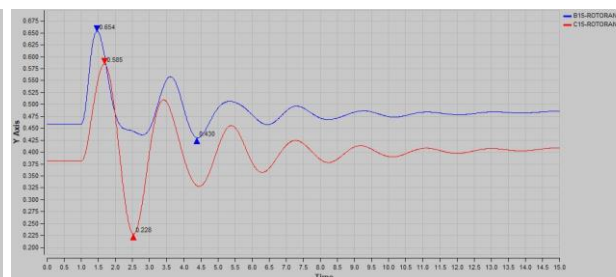


Fig. 6.1.6. Variația unghiului intern în prezența SVC

În continuare s-au repetat analizele prezentate mai sus pentru alte valori ale puterii SVC, cuprinse în gama (1–20) MVar. Sinteza rezultatelor privind suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE, este prezentată în tabelul 6.1.4.

Tabelul 6.1.4. Valorile comparative ale FOB_U pentru diverse valori ale puterii SVC

Q_{SVC} [MVar]	FOB_U	
	Fără SVC	Cu SVC
1	87.532	80.776
2	87.532	80.610
5	87.532	81.720
10	87.532	82.111
20	87.532	83.871

Rezultatele din tabelul 6.1.4 sunt ilustrate grafic în figurile 6.1.11 și 6.1.12.

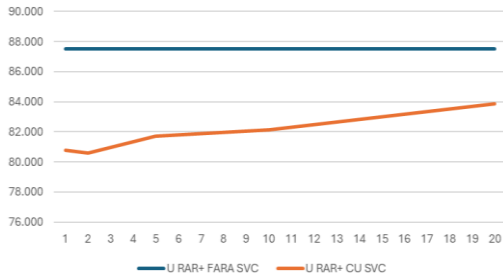


Fig. 6.1.11. Variația FOB_U în funcție de puterea SVC, comparativ cu situația fără SVC

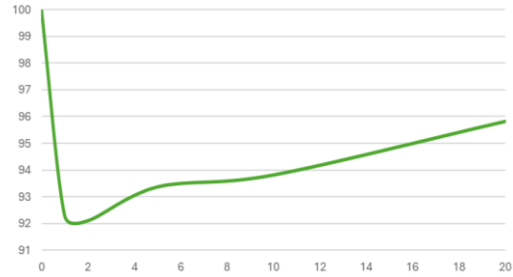


Fig. 6.1.12. Variația FOB_U în funcție de puterea SVC

Analiza rezultatelor din tabelul 6.1.4, respectiv fig. 6.1.11 și 6.1.12, evidențiază concluzia că valoarea optimă a puterii SVC este cuprinsă în gama (0.8–2.1) MVar.

Pentru cazul cu RAR nereușit, în fig. 6.1.29 și 6.1.30 se prezintă variația tensiunii pentru toate nodurile SEE, în absența, respectiv în prezența SVC.

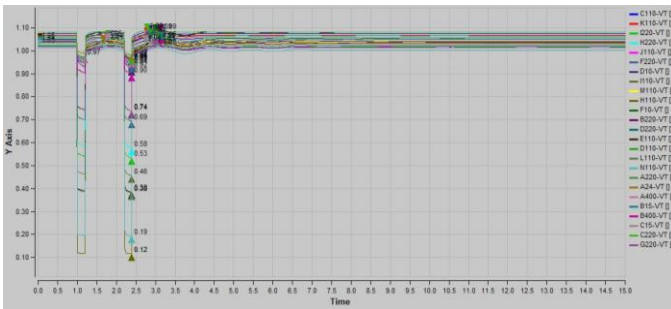


Fig. 6.1.29. Variația tensiunilor în absența SVC

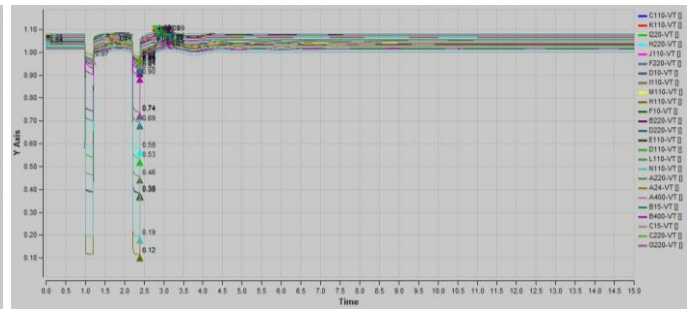


Fig. 6.1.30. Variația tensiunilor în prezența SVC

În tabelul 6.1.13 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE Având în vedere faptul că se analizează cazul cu RAR nereușit, abaterile se calculează față de valorile din regimul staționar post-perturbație (SEE nu revine la starea inițială). Se observă că efectul SVC este pozitiv – oscilațiile se amortizează mai repede și valorile maxime sunt mai reduse.

Tabelul 6.1.13. Valorile comparative ale FOB_U

FOB_U	
Fără SVC	Cu SVC
175.414	170.828

În fig. 6.1.31 și 6.1.32 se prezintă variația vitezei unghiulare a rotoarelor GS din nodurile BB15 și CC15, în absența, respectiv în prezența SVC.

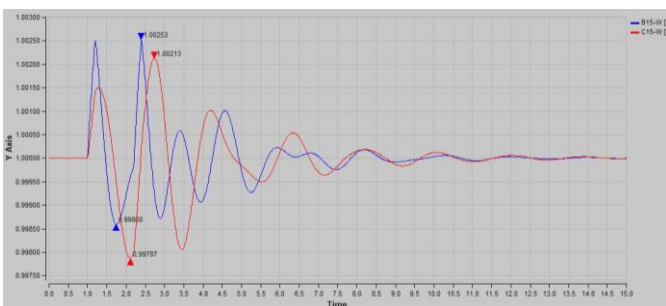


Fig. 6.1.31. Variația vitezelor unghiulare în absența SVC

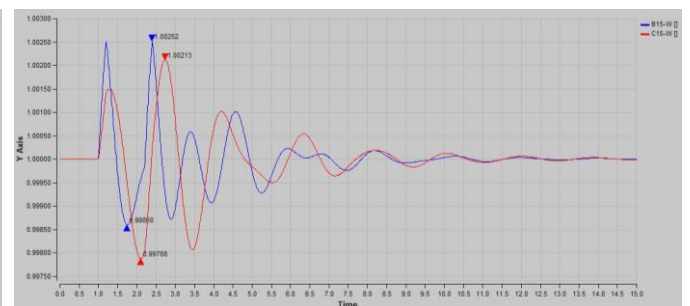


Fig. 6.1.32. Variația vitezelor unghiulare în prezența SVC

În tabelul 6.1.14 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor vitezelor unghiulare (FOB_{ω}), calculată pentru GS din nodurile BB15 și CC15, în absența, respectiv în prezența SVC. Se observă că efectul SVC este pozitiv – oscilațiile se amortizează mai repede și valorile maxime sunt mai reduse.

Tabelul 6.1.2. Valorile comparative ale FOB_{ω}

FOB_{ω}	
Fără SVC	Cu SVC
10.72×10^{-4}	10.07×10^{-4}

În fig. 6.1.33 și 6.1.34 se prezintă variația unghiului intern pentru generatoarele din nodurile B15 și C15, în absența, respectiv în prezența SVC.

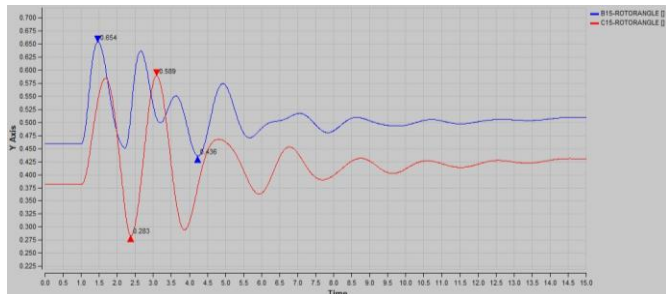


Fig. 6.1.33. Variația unghiului intern în absența SVC

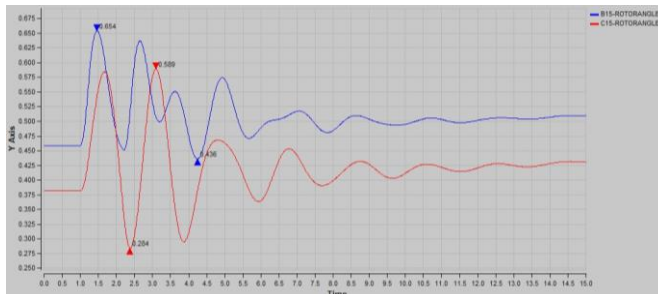


Fig. 6.1.34. Variația unghiului intern în prezența SVC

În continuare s-au repetat analizele prezentate mai sus pentru alte valori ale puterii SVC, cuprinse în gama (1–20) MVar. Sinteza rezultatelor privind suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE, este prezentată în tabelul 6.1.16.

Tabelul 6.1.16. Valorile comparative ale FOB_U pentru diverse valori ale puterii SVC

Q_{SVC} [MVar]	FOB_U	
	Fără SVC	Cu SVC
1	175.414	169.935
2	175.414	169.629
5	175.414	170.828
10	175.414	171.339
20	175.414	172.563

Rezultatele din tabelul 6.1.4 sunt ilustrate grafic în figurile 6.1.11 și 6.1.12.

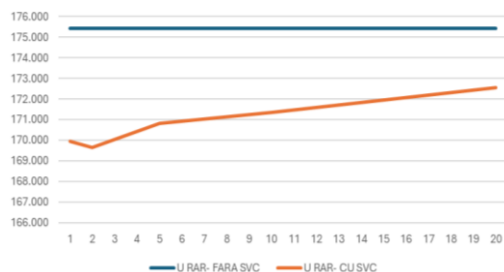


Fig. 6.1.39. Variația FOB_U în funcție de puterea SVC, comparativ cu situația fără SVC



Fig. 6.1.40. Variația FOB_U în funcție de puterea SVC

Analiza rezultatelor din tabelul 6.1.16, respectiv fig. 6.1.39 și 6.1.40, evidențiază concluzia că valoarea optimă a puterii SVC este cuprinsă în gama (0.8–2.1) MVar.

Analiza tuturor rezultatelor pentru nodul NN110 conduce la următoarele concluzii:

- valoarea minimă a limitei inferioare a domeniului de valori optime este de 0.8 MVar, iar cea maximă de 1.2 MVar;
- valoarea minimă a limitei superioare a domeniului de valori optime este de 2.0 MVar, iar cea maximă de 2.4 MVar;
- analizele pentru celelalte noduri de 110 kV au condus la concluzii practic similare;
- în final se poate afirma că domeniul de valori optime pentru nodurile de 110 kV este de (1.0–2.0) MVar.

Analiza tuturor rezultatelor pentru nodul GG220 conduce la următoarele concluzii:

- valoarea minimă a limitei inferioare a domeniului de valori optime este de 4.6 MVar, iar cea maximă de 5.6 MVar;
- valoarea minimă a limitei superioare a domeniului de valori optime este de 7.1 MVar, iar cea maximă de 7.8 MVar;
- analizele pentru celelalte noduri de 220 kV au condus la concluzii practic similare;
- în final se poate afirma că domeniul de valori optime pentru nodurile de 220 kV este de (5.0–7.5) MVar.

Pentru SEE RM analizele de regimuri dinamice au fost efectuate comparativ, în absența și în prezența dispozitivelor SVC, pentru scenariile de perturbație de tipul celor prezentate pentru SEE TEST25. Pe baza concluziilor din capitolul 5, au fost vizate scenariile de perturbație în zona nodurilor de 110 kV selectate: Zona 1 – Briceni; Zona 2 – Otaci, Soroca; Zona 3 – Kamenka, Rîbnița; Zona 4 – Ungheni; Zona 5 – Cahul, Vulcănești, Ceadar-lunga.

Drept exemplu se prezintă cazul unui scurtcircuit trifazat pe LEA 110 kV Vulcănești – Copceac, cu RAR reușit, respectiv nereușit. Analiza a fost efectuată cu instrumentul soft Neplan [Neplan], cu pasul de timp de 0.01 s, rezultatele fiind prezentate pentru 15 s. Puterea SVC este de 5 MVar, fiind amplasat în nodul Vulcănești, zona 5.

Pentru cazul cu RAR reușit, în fig. 6.9.27 și 6.9.28 se prezintă variația tensiunii pentru nodurile din zona respectivă, în absența, respectiv în prezența SVC.

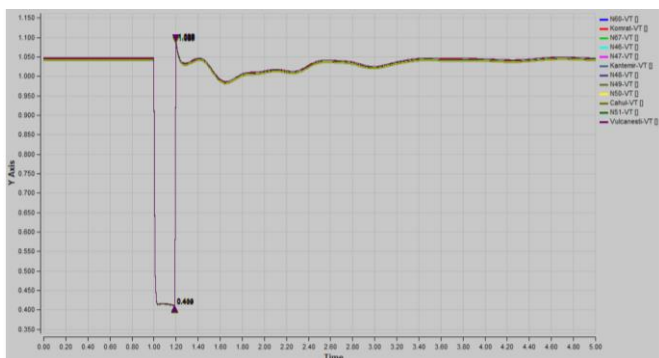


Fig. 6.2.97. Variația tensiunilor în absența SVC

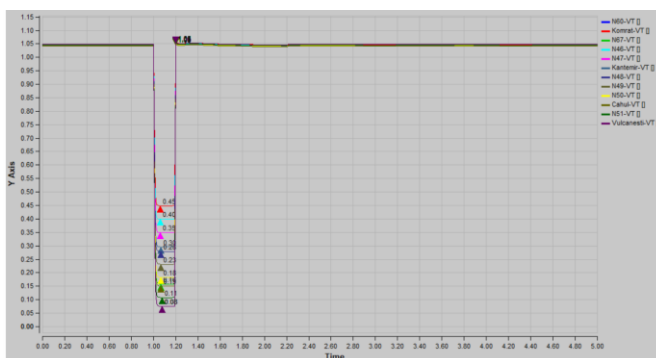


Fig. 6.2.98. Variația tensiunilor în prezența SVC

În tabelul 6.2.49 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE. Se observă că efectul SVC este pozitiv.

Tabelul 6.2.49. Valorile comparative ale FOB_U

FOB_U	
Fără SVC	Cu SVC
201.43	201.01

În fig. 6.2.99 și 6.2.100 se prezintă variația vitezei unghiulare a rotoarelor celor 7 GS din SEE Moldova, în absența, respectiv în prezența SVC.

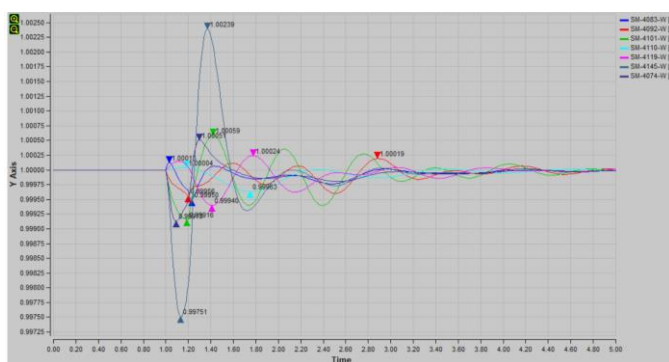


Fig. 6.2.99. Variația vitezelor unghiulare în absența SVC

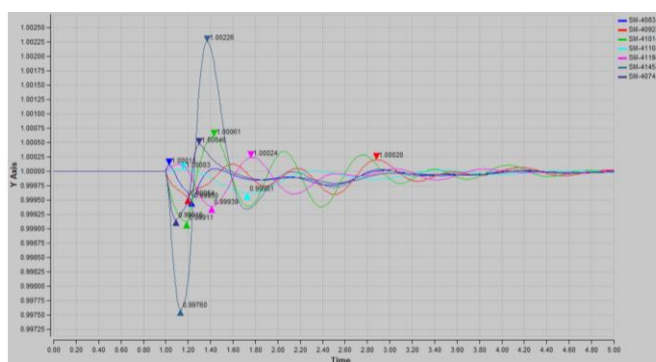


Fig. 6.2.100. Variația vitezelor unghiulare în prezența SVC

În tabelul 6.2.50 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor vitezelor unghiulare (FOB_{ω}), calculată pentru cele 7 GS, în absența, respectiv în prezența SVC. Se observă că efectul SVC este pozitiv – oscilațiile se amortizează mai repede și valorile maxime sunt mai reduse.

Tabelul 6.2.50. Valorile comparative ale FOB_{ω}

FOB_{ω}	
Fără SVC	Cu SVC
2.625×10^{-3}	2.480×10^{-3}

În continuare s-au repetat analizele prezentate mai sus pentru alte valori ale puterii SVC, cuprinse în gama (1–20) MVar. Sinteza rezultatelor privind suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE, este prezentată în tabelul 6.2.51.

Tabelul 6.2.51. Valorile comparative ale FOB_U pentru diverse valori ale puterii SVC

Q_{SVC} [MVar]	FOB_U	
	Fără SVC	Cu SVC
1	201.43	198.81
2	201.43	198.41
5	201.43	199.42
10	201.43	199.82
20	201.43	201.03

Rezultatele din tabelul 6.2.51 sunt ilustrate grafic în figurile 6.2.101 și 6.2.102.

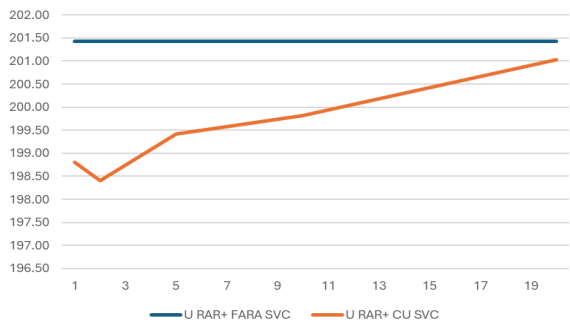


Fig. 6.2.101. Variația FOB_U în funcție de puterea SVC, comparativ cu situația fără SVC

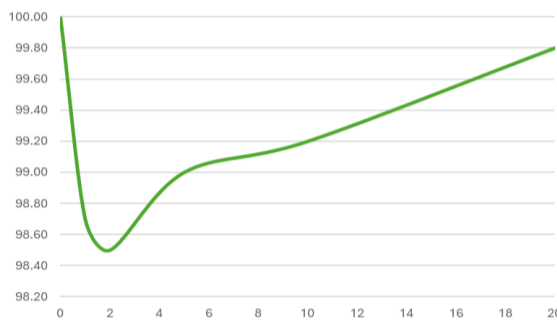


Fig. 6.2.102. Variația FOB_U în funcție de puterea SVC

Analiza rezultatelor evidențiază concluzia că valoarea optimă a puterii SVC este cuprinsă în gama (0.8–2.3) MVar.

Pentru situația cu RAR nereușit, în fig. 6.2.103 și 6.2.104 se prezintă variația tensiunii pentru nodurile din zona respectiva, în absența, respectiv în prezența SVC.

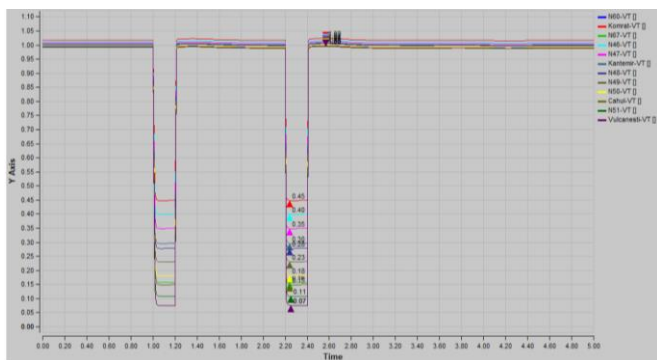
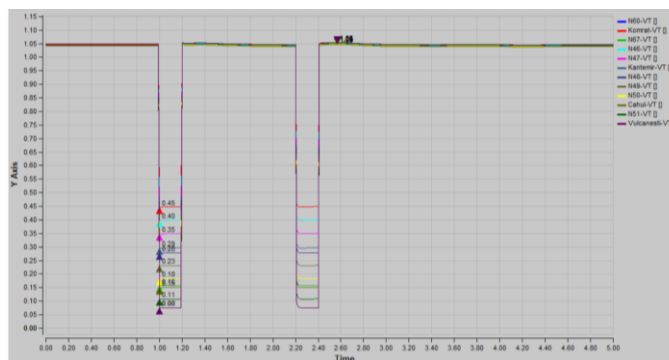


Fig. 6.2.103. Variația tensiunilor în absența SVC



c Fig. 6.2.104. Variația tensiunilor în prezența SVC

În tabelul 6.2.52 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor tensiunilor (FOB_U), calculată pentru toate nodurile SEE. Se observă că efectul SVC este pozitiv – oscilațiile se amortizează mai repede și valorile maxime sunt mai reduse.

Tabelul 6.2.52. Valorile comparative ale FOB_U

FOB_U	
Fără SVC	Cu SVC
434.82	423.11

În fig. 6.2.105 și 6.2.106 se prezintă variația vitezei unghiulare a rotoarelor celor 7 GS din SEE Moldova, în absența, respectiv în prezența SVC.

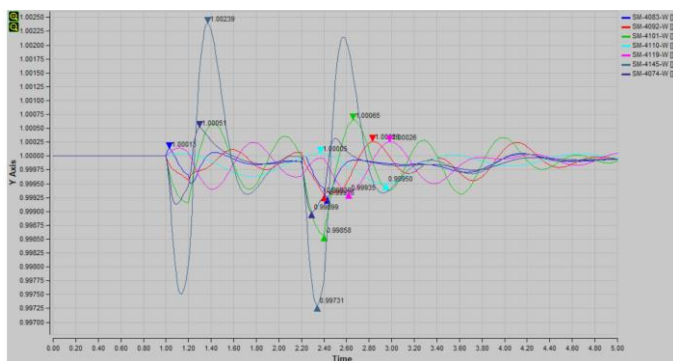


Fig. 6.2.105. Variația vitezelor unghiulare în absența SVC

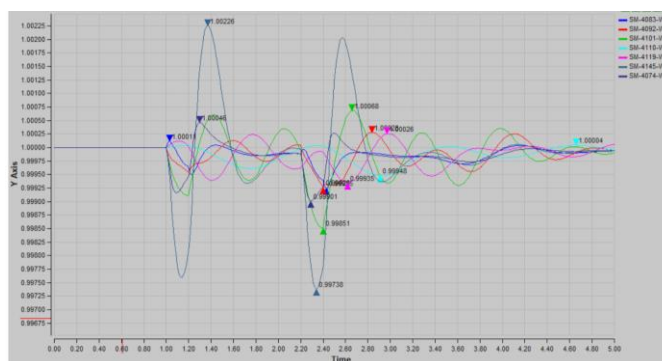


Fig. 6.2.106. Variația vitezelor unghiulare în prezența SVC

În tabelul 6.2.53 se prezintă comparativ suma pătratelor abaterilor vitezelor unghiulare (FOB_{ω}), calculată pentru cele 7 GS, în absența, respectiv în prezența SVC. Se observă că efectul SVC este pozitiv.

Tabelul 6.2.53. Valorile comparative ale FOB_{ω}

FOB_{ω}	
Fără SVC	Cu SVC
5.569×10^{-3}	5.246×10^{-3}

În continuare s-au repetat analizele prezentate mai sus pentru alte valori ale puterii SVC, cuprinse în gama (1–20) MVar. Sinteza rezultatelor privind FOB_U , calculată pentru toate nodurile SEE, este prezentată în tabelul 6.2.54.

Tabelul 6.2.54. Valorile comparative ale FOB_{ij} pentru diverse valori ale puterii SVC

Q_{SVC} [MVar]	FOB_{ij}	
	Fără SVC	Cu SVC
1	434.82	386.47
2	434.82	385.69
5	434.82	387.64
10	434.82	388.43
20	434.82	390.78

Rezultatele din tabelul 6.2.54 sunt ilustrate grafic în figurile 6.2.107 și 6.2.108.

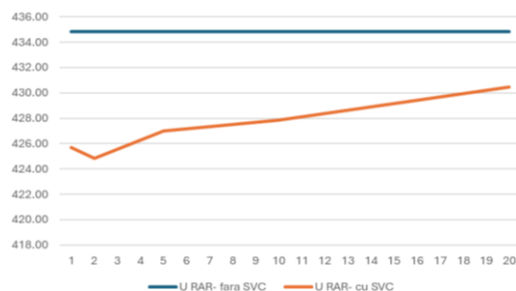


Fig. 6.2.107. Variația FOB_{ij} în funcție de puterea SVC, comparativ cu situația fără SVC



Fig. 6.2.108. Variația FOB_{ij} în funcție de puterea SVC

Analiza rezultatelor evidențiază concluzia că valoarea optimă a puterii SVC este cuprinsă în gama (0.7–2.3) MVar.

Analiza tuturor rezultatelor conduce la următoarele concluzii:

- valoarea minimă a limitei inferioare a domeniului de valori optime este de 0.7 MVar, iar cea maximă de 1.2 MVar;
- valoarea minimă a limitei superioare a domeniului de valori optime este de 1.9 MVar, iar cea maximă de 2.6 MVar;
- analizele pentru alte scenarii de perturbație și pentru alte noduri de 110 kV au condus la concluzii asemănătoare;
- în final se poate afirma că domeniul de valori optime pentru nodurile de 110 kV ale SEE Moldova este de (1.0–2.0) MVar.

Capitolul 7 cuprinde concluziile generale ale tezei și prezentarea sistematizată a contribuțiilor originale ale autorului, precum și reliefaarea direcțiilor și perspectivelor oferite de lucrarea de față pentru continuarea cercetărilor și aplicarea rezultatelor și a experienței obținute. Metodologiile de calcul elaborate sunt de aplicabilitate generală, oferind un instrument eficient operatorilor de transport și de distribuție a energiei electrice.

Anexele oferă o serie de elemente și rezultate de detaliu referitoare la partea aplicativă (capitolele 5, 6) privind bazele de date pentru studiile de caz și detalii despre rezultatele obținute.

Rezultatele prezentate în teza de doctorat au fost și vor fi valorificate în cadrul unor contracte încheiate între Universitatea Politehnică Timișoara, Centrul de cercetare pentru analiza și optimizarea regimurilor de funcționare a SEE, și PPC Rețele Electrice Banat, Muntenia Sud și Dobrogea, DEER Electrica Muntenia Nord, Transilvania Nord și Transilvania Sud, DEO Oltenia, Delgaz Grid Moldova, Transelectrica, Electroechipament Industrial Reșița, Romproiect Electro Cluj-Napoca, MD Electric Timișoara și Eurotulip Tg. Jiu. De altfel, la baza stabilirii temei tezei de doctorat a stat și interesul manifestat de operatorii de transport și de distribuție în ceea ce privește echipamentele de tip FACTS.

De asemenea, o parte a rezultatelor obținute în cadrul tezei au fost publicate și sunt în curs de publicare. Se remarcă faptul că din totalul de 5 lucrări proprii până în prezent, 2 lucrări sunt cotate ISI [Barbulescu2021], [Luputi2024] și 3 lucrări sunt indexate în alte BDI (Baze de Date Internaționale) [Simo2018], [Bittenbinder 2021], [Salinschi2021].

Analizele teoretice și practice efectuate în cadrul tezei de doctorat, precum și rezultatele prezentate, deschid o serie de perspective și de direcții de continuare și aprofundare ulterioară a cercetărilor în domeniul tezei de doctorat:

- utilizarea metodelor elaborate pentru cazul sistemului electroenergetic al României sau ale unor zone ale SEN;
- utilizarea metodelor elaborate rețelele de 110 kV ale companiilor de distribuție a energiei Electrice din România;
- efectuarea unor studii similare cu cele din teză pentru alte tipuri de dispozitive FACTS;
- implementarea unor tehnici meta-euristice pentru amplasarea și dimensionarea optimă a dispozitivelor de tip FACTS.

Bibliografie selectivă

- [Abouazma2019] Abouazma M. Advanced Method for Optimal Allocation of FACTS Devices Using Line Stability Index Combined with Meta-Heuristic Optimization Techniques, 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), 2019, pp.324-329
- [Ahmad2020] Ahmad A.A., Sirjani R., Optimal placement and sizing of multi-type FACTS devices in power systems using metaheuristic optimisation techniques: Updated review, Ain Shams Engineering Journal, vol.11, nr.3, 2020, pp.611-628
- [Akbari2014] Akbari-Zadeh M.R., Kokabi R., Gerami S., STATCOM allocation in the distribution system considering load uncertainty. Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2014, vol.27. nr.2, pp.691-700
- [Anderson2003] Anderson P.M., Fouad A.A., Power System Control and Stability, 2nd ed., IEEE Press & John Wiley & Sons, 2003
- [Ayman2018] Alhejji A.K., Salem F., Mosaad M.I., Optimal Location, Size of SVC Devices in Interconnected Electrical Power System Using Quadratic Adaptive Bacterial Foraging Algorithm, IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), Rochester, MI, USA, 2018, pp.817-821
- [Bamigbade2020] Bamigbade A.T., Oluseyi P.O., Optimal Placement of Single, Multiple FACTS Controllers Using Genetic Algorithm, IEEE PES/IAS PowerAfrica, Nairobi, Kenya, 2020, pp.1-5

7. [Barbulescu2021] Barbulescu C., Kilyeni S., Oros C., Bittenbinder A., Salinschi M., Heuristic and Metaheuristic Techniques based Distribution Network Reconfiguration. Case study: IEEE 33 Bus System, International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), 2021, pp.1-6
8. [Belkacem2006] Belkacem M., Bouktir T., Srairi K., Strategy of location, control of FACTS devices for enhancing power quality, IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), Malaga, Spain, 2006, pp.1068-1072
9. [Bittenbinder2021] Bittenbinder A., Barbulescu C., Salinschi M., Kilyeni S., Technical Power Losses in Electrical Distribution Networks with Renewable Energy Sources. Case Study: Galati Zone, Electrica Muntenia Nord, 10th International Conference on Energy and Environment (CIEM), Bucharest, Romania, 2021, pp.1-5
10. [Das2018] Das J.C., Power Systems Handbook, vol.2. Load Flow Optimization and Optimal Power Flow, CRC Press, 2018
11. [Eremia2014] Eremia M., Shahidehpour M., Handbook of Electrical Power System Dynamics. Modeling, stability and control, IEEE Press & Wiley, 2014
12. [IEEE2016] IEEE Std 421.5-2016, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies
13. [Jordehi2016] Jordehi A.R., Optimal allocation of FACTS devices for static security enhancement in power systems via imperialistic competitive algorithm (ICA), Applied Soft Computing, 2016, vol.48, pp.317-328
14. [Kang2017] Kang T., A hybrid approach for power system security enhancement via optimal installation of flexible AC transmission system (FACTS) devices, Energies, vol.10, nr.9, 2017, pp.1305-1312
15. [Kavitha2016] Kavitha K., Neela R., Comparison of BBO, WIPSO & PSO techniques for the optimal placement of FACTS devices to enhance system security, Procedia Technology, vol.25, 2016, pp.824-837
16. [Kilyeni1988] Kilyeni S., Nemeş M., Moga M., Buta A., Luştea B., Velicescu C., Şurianu F., Sistem test de 25 de noduri, CNE Bucureşti, 1988, vol.5, 5.05
17. [Kilyeni2004] Kilyeni S., Stabilitatea sistemelor electroenergetice, Note de curs pentru master, Universitatea Politehnica Timişoara, 2004
18. [Kilyeni2015b] Kilyeni S., Tehnici numerice de analiză asistată de calculator a regimurilor de funcţionare a sistemelor electroenergetice, ed.3, Orizonturi Universitare, Timişoara, 2015
19. [Kilyeni2019] Kilyeni D., Metode numerice. Algoritme, programe de calcul, aplicaţii în energetică, ed.6, Orizonturi Universitare, Timişoara, 2019
20. [Koster2020] Koster D., Coronado O., Artal-Sevil J.S., Dominguez-Navarro J.A., Multi-type FACTS location in a microgrid. Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles, Renewable Energies (EVER), 2020, pp.1-5
21. [Luputi2024] Luputi A., Salinschi M., Ciocarlie H., Babescu M., The Dependence between the Optimal Mechanical Angular Speed and the Variable Wind Speed From an Energetic Point of View, Revue Roumaine des Sciences Techniques – Serie Electrotechnique et Energetique, vol.69, nr.1, 2024, pp.49-55
22. [Lustrea2012] Luştea B., Modelarea generatorului sincron şi a reglajelor sale cu aplicaţie în studiile de sistem, ed. 3, Orizonturi Universitare, 2012
23. [Mailah2015] Mailah N., Bashi S., Single Phase Unified Power Flow Controller: Simulation and Construction, European Journal of Scientific Research, vol.30, nr.4, 2015, pp.677-384
24. [Maruf2015] Maruf M., Mohsin A., Shoeb M., Study of Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC) as a useful FACTS Device. International Journal of Engineering Science and Technology, vol.2, nr.9, 2015, pp.4357-4360
25. [Morsali2018] Morsali J., Zare K., Hagh M., A novel dynamic model and control approach for SSSC to contribute effectively in AGC of a deregulated power system, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol.95, 2018, pp.239-253
26. [Munikoti2020] Munikoti S., Jhala K., Lai K., Analytical voltage sensitivity analysis for unbalanced power distribution system, IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), 2020, pp.1-5
27. [Rabiah2020] Rabiah B., Mohammad Z.K., Muhammad Awais Javed. MIMO adaptive bspline-based wavelet neurofuzzy control for multi-type facts. IEEE Access, vol.8, 2020, pp.28109-28122
28. [Rafee2016] Shaik M.R., Reddy A.S., Optimal placement, sizing of FACTS device to overcome contingencies in power systems, International Conference on Signal Processing, Communication, Power, Embedded System (SCOPEs), Paralakhemundi, India, 2016, pp.838-842
29. [Raj2018] Raj S., Bhattacharyya B., Optimal placement of TCSC, SVC for reactive power planning using Whale optimization algorithm, Swarm, Evolutionary Computation, vol.40, 2018, pp.131-143
30. [Salinschi2021] Salinschi M., Barbulescu C., Kilyeni S., Bittenbinder A., Technical Power Losses Management in Electrical Distribution Networks with Renewable Energy Sources. Case Study: Braila Zone, Electrica Muntenia Nord Operator. Proceedings of the 16th International Symposium in Management, Timişoara, Romania, 2021. In: Prostean G., Lavios J., Brancu L., Sahin F. (eds), Management, Innovation and Entrepreneurship in Challenging Global Times. Lecture Notes in Management and Industrial Engineering, Springer, 2014, pp.409-419
31. [Sharma2005] Sharma A., Chanana S., Parida S., Combined optimal Location of FACTS controllers, loadability enhancement in competitive electricity markets using MILP, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, San Francisco, CA, vol.1, 2005, pp.670-677
32. [Shehab2017] Shehab M., Khader A.T., Al-Betar M.A., A survey on applications and variants of the cuckoo search algorithm, Applied Soft Computing, 2017, vol.61, pp.1041-1059
33. [Simo2018] Simo A., Barbulescu C., Salinschi M., LoRaWAN based industrial emission monitoring with self-flying drone, 18th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM), Vienna, Austria, 2018, pp.503-510
34. [Singh2015] Singh M., Mehta R., Current Source Converter Based D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation. International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization, nr.6, 2015, pp.1-10
35. [Talebi2015] Talebi N., Abedi A., Automatic Generation Control using Interline Power Flow Controller, 2nd International Conference on Power Electronic and Intelligent Transportation System, Shenzhen, China, 2015, pp.75-79
36. [Yun2020] Yun H., Lv G., Mokaramian E., A review modeling of optimal location, sizing integrated M-FACTS with wind farm, fuel cell, Journal of Cleaner Production, vol.68, 2020, pp.1-10
37. [Zarkani2021] Zarkani M.K., Tukkee A.S., Optimal placement of facts devices to reduce power system losses using evolutionary algorithm Indonesian Journal of Electrical Engineering, Computer Science, vol.21, nr.3, 2021, pp.1271-1278
38. [Zhu2009] Zhu J., Voltage profile evaluation of power systems with coordinated SVC devices, IEEE/PES Power Systems Conference, Exposition, 2009, pp.1-7