



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

**FACTS tehnoloogiliste lahenduste kasutamise võimalused Eesti
elektrisüsteemi talitluse planeerimisel ja juhtimisel**

Elektroenergeetika õppekava

Kõrgepingetehnika õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja	prof. Juhan Valtin
Juhendaja	M.Sc. Eero Ülavere
Lõpetaja	Gunnar Pallas

Tallinn 2014

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile magistri haridustaseme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

Autor: Gunnar Pallas

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: „FACTS TEHNOLOOGILISTE LAHENDUSTE KASUTAMISE VÕIMALUSE EESTI ELEKTRISÜSTEEMI TALITLUSE PLANEERIMISEL JA JUHTIMISEL“

Kuupäev: 02.06.2014.

70 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Energeetikateaduskond

Instituut: Elektroenergeetika instituut

Õppetool: Kõrgepingetehnika õppetool

Töö juhendaja(d): Eero Ülavere

Sisu kirjeldus: Antud töö eesmärgiks on uurida paindlike vahelduvvoolu ülekandesüsteemi ehk FACTS tehnoloogiliste lahenduste kasutamise võimalusi Eesti elektrisüsteemi talitluse planeerimisel ja juhtimisel. Töös uuritakse, mil viisil on mõistlik rakendada FACTS tehnoloogilisi lahendusi Elering ASle kuuluva põhivõrgu ja tema klientide primaarparameetrite hoidmiseks.

Töö on koostatud viisil, mis võimaldaks lugejal, kellel puuduvad teadmised käsitlevatest teemadest, mõista töö sisu ja analüüsi käigus kaasa mõelda. Töö sisaldab kirjanduses esitatud teoreetilist osa, autori kogemuse ning teoreetiliste aluste järgi koostatud ohtlike talitluste seletavat osa, nimetatud režiimide ning nende lahenduste modelleerimise tulemustest ülevaadet andvat seksiooni ja viimaks ka majanduslikku hinnangut nimetatud lahendustele.

Töö põhiliseks avastuseks oli, et FACTS seadmeid ei ole lähitulevikus majanduslikult mõistlik kasutada Eesti elektrisüsteemis püsitalitluse pingete hoidmiseks. Lisaks tuli tööst välja Tartu alajaama kompenseerimisseadme liitmise täiendav uurimisvajadus. Samuti selgus töö tulemusena, et alalisvoolühendust Estlink I ei ole mõistlik püsivalt kasutada pingete kompenseerimiseks ning Lääne-Eesti ei vaja lähiajal rohkem lisa kompenseerimisseadmeid.

Märksõnad: Reaktiivvõimsus, kompenseerimine, Eesti elektrisüsteem, paindlik vahelduvvoolu ülekandesüsteem, FACTS, pinge, SVC, STATCOM

Summary of the diploma work

Author: Gunnar Pallas

Kind of the work: Master's Thesis

Title: "THE POSSIBLE USAGE OF FACTS TECHNOLOGY IN ESTONIAN POWER SYSTEM'S OPERATIONAL PLANNING AND MANAGEMENT"

Date: 02.06.2014.

70 pages

University: Tallinn University of Technology

Faculty: Faculty of Power Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering

Chair: Chair of High Voltage Engineering

Tutor(s) of the work: Eero Ülavere

Abstract: Aim of this thesis is to determine the possible usage of flexible alternative current transmission system technology also known as FACTS devices in Estonian power system's operational planning and management. Further, the thesis examines whether and how the FACTS technologies could be implemented to increase the quality of services provided by Elering AS.

The thesis is constructed in a manner assisting the reader without prior knowledge of the topic to understand the conclusions made. The thesis is divided into three sections. The first section comprises on a theoretical part gathered from earlier academic writings. The second part describes and examines the voltage problems, that might occur in the power system and the possible preventive actions taken to help alleviate these issues. Finally, an overview of economic benefits of different solutions is presented.

The main discovery was that the implementation of FACTS devices to help compensate steady-state voltages is not economically feasible in Estonian power system in the near future. The point was made that compensating units could be added to Tartu substation and that this idea should be investigated more thoroughly. Other minor conclusions include that HVDC link Estlink I should not be used in year-around voltage compensation and that the west Estonia does not need any additional compensators besides the planned devices.

Key words: Reactive power, compensation, Estonian power system, flexible alternative current system, FACTS, voltage, SVC, STATCOM

Sisukord

Sisukord	5
Lõputöö ülesanne	7
Teema põhjendus:	7
Töö eesmärk:.....	8
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	8
Lähteandmed:.....	8
Eessõna	9
Sissejuhatus	10
Ülesande püstitus	11
Kitsendused.....	11
Töö analüüsimeetodid ja ülesehitus	12
1. Reaktiivvõimsus	14
1.1. Kompenseerimata ülekandeliin.....	16
1.1.1. Lihtsustatud olukord.....	16
1.2. Reaktiivvõimsuse kompenseerimine.....	18
1.2.1. Ideaalne põikkompensaator	18
1.2.2. Ideaalne pikikompensaator	19
2. FACTS seadmed	25
2.1. Türistorreguleerimisega reaktor	26
2.2. Türistorlülitamise ja kondensaator	27
2.3. Staatile reaktiivvõimsuse kompensaator	27
2.4. Türistorlülitamise ja jadakondensaator	29
2.5. Türistorreguleerimisega jadakondensaator	29
2.6. Türistorreguleerimisega faasinurga regulaator	32
2.7. Staatile sünkroonkompensaator	33
2.8. Staatile sünkroonpikikompensaator	34
2.9. Paiskontrollitav jadakondensaator	35
2.10. Unifitseeritud võimsuste jagunemise kontrollid	37
3. FACTS seadmete võrdlus ja kasutus	39
3.1. Sarnase kasutusega tehnoloogiate võrdlus	41
3.1.1. SVC vs STATCOM.....	41
3.1.2. TCSC vs TSSC vs GCSC.....	41
3.1.3. UPFC vs TCPAR.....	41
4. Eesti elektrisüsteem aastal 2014	42
4.1. Lähiajaloo statistiline ülevaade reaktiivenergia kompenseerimisest põhivõrgus.....	42
4.2. Põhivõrgu nõuded püsitalitlusele	44
5. Probleemaatilised seisundid	46
5.1. Ülepinge stsenaarium.....	47
5.1.1. Modelleerimine normaalskeemiga	47
5.1.2. Modelleerimine Tartu n-1 olukorras	49
5.1.3. Täiendavad algseisud.....	50
5.2. Alapinge stsenaariumi.....	51
5.2.1. Stsenaarium, kus alalisvooluühendused on maksimaalses ekspordis.....	51
5.2.2. Stsenaarium, kus Narva elektrijaamad turule ei pääse	52

6. FACTS seadmete potentsiaalsed kasutuskohad Eesti elektrisüsteemis	53
6.1. Kompenseerimisseade Paide alajaamas	54
6.2. Kompenseerimisseade Püssi alajaamas	55
6.3. Kompenseerimisseade Tartu alajaamas	56
7. Majandusliku tasuvuse analüüs.....	57
7.1. Türistorventiilidega ning võimsuslülitiga juhitava reaktori võrdlus.....	57
7.2. Kompenseerimisseade Lääne-Eestisse tuulikute kompenseerimiseks	58
7.3. Kompenseerimisseade Tartu alajaama ülepinge eemaldamiseks.....	59
7.4. Tallinna piirkonna pingete kompenseerimine kasutades Estlink 1-te.....	59
Lõputöö kokkuvõte	61
L.1. Staatilised reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed.....	69
L.2. Eesti 110kV-330kV elektrivõrk.....	70

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	FACTS tehnoloogiliste lahenduste kasutamise võimalused Eesti elektrisüsteemi talitluse planeerimisel ja juhtimisel
Üliõpilane:	Gunnar Pallas, 121857
Lõputöö juhendaja:	Eero Ülavere
Õppetool:	Kõrgepingetehnika õppetool
Õppetooli juhataja:	Juhan Valtin
Lõputöö esitamise tähtaeg:	2. juuni 2014

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Seoses Estlink2 tulekuga ning samas elektrituru toime koosmõjul, kus genereerimine on suures ulatuses varieeruv ja raskesti etteennustatav ning maksimeerimaks olemasolevaid ülekandevõimsusi, on oluline Eesti elektrisüsteemis saavutada paindlikum ja kiirem reaktsioon ja juhitavus talitluse kiiretele muutustele häiringute esinemisel. Üheks väljundiks nimetatud olukorraga toimetulekuks on rakendada SmartGrid komponendina FACTS tehnoloogial baseeruvaid lahendusi (sh SVC, STATCOM, TCSC jms.), mis võiksid aidata tulevikus Eesti tarbijatele tagada kvaliteetselt ja töökindlalt elektrienergiat. Teema aktuaalsust aitavad tõsta muudatused Eesti elektrivõrgus ja kiire areng SCADA juhtimissüsteemide ning süsteemiautomaatika tehnoloogias. Näiteks käesoleval ajal on elektriturul võimalik tekkida olukord, kus Eesti elektrisüsteemis olevad suure tootmisvõimsusega elektrijaamad Narvas ei tööta või töötavad miinimum seadmete koosseisus. Seoses sellega võib aga kaasneda oht, et süsteem ei suuda vajalikul määral reaktiivenergiat kompenseerida (toota/tarbida) tagamaks 330kV pinge hoidmise lubatud talitluslikes piirides. Teine talitlusliku pinge tagamise probleemistik on seotud nõrgalt liidestatud 110kV toitevõrguga, mis varustab Lääne-Eestit ja Saarte piirkonda ning kuhu on liitunud/liitumas palju tuuleparke.

Eelmainitud aspekte arvestades uuritakse võimalust FACTS tehnoloogiliste lahenduste kasutuselevõttu kriitilistes ülekandevõrgu punktides talitluslike pingete stabiliseerimisel

lubatud piirides nii normaal- kui ka avariitalitluses ning tagamaks aktiivkoormuste sundjagunemise raskeima häiringu tagajärgede leevendamiseks.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida FACTS seadmete kasutamise võimalusi Eesti elektrisüsteemi talitluse planeerimisel ja juhtimisel.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- a. Kaardistada FACTS seadmete jaotus, kasutusotstarve, tehnilised parameetrid. Esitada ülevaade kirjandusest.
- b. Kirjeldada lähteandmed ja uurimismetoodika FACTS seadmete kasutuse analüüsiks.
- c. Analüüsi teel leida, millistes võrgu punktides võiks seadmeid rakendada ning millised on optimaalsed tehnilised nõuded. Käsitletavad piirkonnad on 330kV alajaamad Eesti elektrisüsteemis ja 110kV alajaamad Lääne-Eestis / saartel. Aluseks võtta ülekandevõrgu eeldatav struktuur 2015-2020.
- d. Modelleerimise (režiimiarvutused) abil välja selgitada, kuidas seadmed neis punktides elektrisüsteemi toimimisele kaasa aitavad. Kitsenduseks saab olema, et käesoleva töö mahus piirdutakse aeglaselt muutuvate protsessidega ehk statsioonarsete talitluse arvutustega.
- e. Hinnata FACTS seadmete investeringute ulatust ja võimalikku majanduslikku efekti .

Lähteandmed:

FACTS seadmete põhimõtete kohta saadakse informatsioon raamatutest ja tootjate spetsifikatsioonidest. Elektrisüsteemi potentsiaalsetest arengutest võetakse informatsioon arengukavadest, Eleringi varustuskindluse aruannetest ning põhivõrgu ekspertidelt. Analüüsiks kasutatakse Siemensi modelleerimise tarkvara PSS/E ning selles koostatud Eesti elektrisüsteemi mudelit, arvestades naabersüsteemide mudelite ekvivalente. Majanduslik tasuvus ja võrdlus alternatiividega tugineb samuti raamatutarkusele ja tootjate andmetele.

Eessõna

Antud töö teema pakuti esmalt välja Eesti põhivõrgu ettevõtja Elering AS stipendiumi konkursile. Töö autor Gunnar Pallas ja juhendaja Eero Ülavere, kes on mõlemad tööl elektrisüsteemi juhtimiskeskuse režiimitalitluse osakonnas, leidsid arutelude käigus, et paindlike vahelduvvoolu ülekandesüsteemide tehnoloogilised lahendused võiksid teoreetiliselt olla mõistlikuks lahenduseks juhtimiskeskuse töö parendamisel. Töö kitsenduseks määrati aeglaselt mööduvate protsesside ning nendega kaasnevate pingete kompenseerimise probleemidele lahenduse leidmine. Algandmed koguti varem avaldatud kirjandusest, Elering AS-e aruannetest ning andmebaasidest, ABB AS tarnijaga suhtlemisel ja modelleerimise tarkvara PSS/E tulemustest.

Töö autor tahab tänada juhendaja Eero Ülaveret ning kolleege Elering Asist, kes abistasid andmete kogumise ning praktiliste nõuannetega. Erinevad arutelud olid suureks abiks töö suundade leidmisel.

Töö autor Gunnar Pallas elab Eestis, Harjumaal, Tabasalus aadressil Kooli 2-37, postiidex 76901 ning töötab Elering AS juhtimiskeskuses püsitalitluse planeerija ametikohal. Autoriga on võimalik kontakti saada telefoni numbril +372 56 206 216 või e-kirja aadressil gunnar.pallas@elering.ee.

Sissejuhatus

Üle maailma toimuvad elektrienergiaga varustamise turul suured muutused. Elektri vabaturule üleminek, roheinitsiatiivid ning kasvav nõudlus defineerivad nende muutuste suunda. Nende arengute taustal on mitmete elektritettevõtjate investeerimisprogrammid leidnud vastaseisu maakasutuse, keskkonna nõuete ning reguleerivate piirangute näol, mis takistavad uute ülekandeliinide ning genereerivate üksuste püstitamist. Tekkinud väljakutsete ületamiseks võidakse leida lahendus jõupooljuht elektroonika baasil töötavate seadmete näol, mis võivad lähitulevikus asendada mitmeid elektromehaanilistel seadmetel põhinevaid traditsioonilisi lahendusi, millest nad nõuavad väiksemaid hoolduskulusid ning millest nad on kiiremini kommuteeritavad. [1, 2]

FACTS¹ ehk paindlik vahelduvvoolu ülekandesüsteem on mõiste järgi jõuelektroonikal põhinev süsteem ja temaga seotud staatilised seadmed, mis võimaldavad kontrollida ühte või rohkemaid vahelduvvoolu ülekandevõrgu parameetreid, et suurendada kontrollitavust ja tõsta võrgu võimsusvoogude ülekandmise võimekust. Seega saab FACTS seadmetega lahendada probleeme, mille lahendamiseks traditsiooniliselt oli tarvis püstitada uusi elektrijaamu ning ülekandeliine. [3]

Nõudluse ja selle rahuldamiseks kasvava genereerimisega, tekib lisa koormus ülekandevõrkudele. Kui ülekandevõrke ei tugevdata koormuse kasvamisega samas tempos, siis süsteem võib muutuda haavatavaks. Võivad tekkida staatilise ning dünaamilise stabiilsuse probleemid, sest stabiilsusvahemikud jäävad kitsamaks.

Ülekandesüsteemi võimekus edastada elektrienergiat võib halveneda ühe või mitme järgneva staatilise ja dünaamilise stabiilsuse piirangu tõttu [1, 4]:

- Nurgastabiilsus;
- Pingestabiilsus;
- Elementide termilised limiidid;
- Dünaamiline stabiilsus.

Need limiidid defineerivad maksimaalse ülekantava elektrilise võimsuse, millega ei kahjustata ülekandeliine ning teisi elektriseadmeid. Põhimõtteliselt saab neid limiite laiendada uute

¹ FACTS – *Flexible Alternative Current Transmission System*

võimsust ülekandvate ahelate ning genereerimise lisamise teel. Alternatiivina on FACTS kontrollid mõeldud sama eesmärgi jaoks, ent nende lisamisel ei tehta süsteemile suuri ümberehitamisi ja seega potentsiaalselt vähendatakse opereerimise ning investearingute kulusid samas parandades talitluskindlust, suurendades ülekandevõimsusi ja parandades elektrienergia kvaliteeti, mis jõuab tarbijateni. [2]

Ülesande püstitus

Antud töö eesmärgiks on uurida FACTS seadmete kasutamise võimalusi Eesti elektrisüsteemi talitluse planeerimisel ja juhtimisel. Töös proovitakse leida kuidas ja kas üldse on mõistlik rakendada FACTS tehnoloogilisi lahendusi Elering ASle kuuluva põhivõrgu ja tema klientide primaarparameetrite hoidmiseks. Eesti elektrisüsteemi ülekandevõrgus ei ole 2014. aasta seisuga kasutusel ühtegi klassikalise FACTS seadme definitsiooni alla minevat rajatist. Küll aga on Eesti elektrivõrguga ühendatud kaks kõrgepinge alalisvooluühendust (*HVDC² link*) Estlink I ja Estlink II. [5]

HVDC ja FACTS on mõlemad saanud teoks tänu jõupooljuht tehnoloogia märkimisväärsele arengule. Kõrgepinge alalisvoolu tehnoloogia, mille näol leiti alternatiiv vahelduvvoolu pikkade vahemaade taht ülekandmises, võeti kasutusele varem. Paljuski samasid põhimõtteid rakendades leiti, et ka vahelduvvooluvõrk tuleks teha kontrollitavamaks, ja seoses sellega pandi alus FACTS seadmete välja töötamisele. [6]

Kitsendused

Töös keskendutakse püsitalitluse ning aeglaselt mööduvate protsesside käigus elektrivõrgu primaarparameetrite lubatud piirides hoidmisele. Kitsamalt veel keskendutakse analüüsi osas reaktiivenergia ning pingete kompenseerimisele kasutades FACTS tehnoloogial põhinevaid lahendusi. Töös ei vaadelda kiiresti mööduvaid siirdetalitlusi. Töö aluseks on võetud Eesti elektrivõrgu 2018. aasta tõenäoline skeem ning sellele vastavalt on täiendatud Siemens'i tarkvara PSS/E 33-e [7] Eesti põhivõrgu ettevõtja Elering AS operatiivmudelit. Töös on eeldatud, et Eesti elektrisüsteemi arendatakse plaanipäraselt ning investearingud nii elektri ülekandmisse kui ka tootmisse on tehtud vastavalt Elering AS tootmispiisavuse aruandes [8] ning varustuskindluse aruandes [9] toodule. Seega on mudel koostatud vastavalt olukorrale,

² HVDC – High voltage direct current

kus Eesti elektrisüsteem töötab sünkroonselt ühendsüsteemiga BRELL ning kus märkimisväärset tuuleparkide süsteemiga liitumist ei oodata. Täpsemalt on modelleerimise aluseid kirjeldatud peatükis 5.

Töö analüüsimeetodid ja ülesehitus

Töö praktiliste tulemusteni jõudmiseks on töö jagatud osadeks, kus on kasutatud erinevaid analüüsi ning kirjeldamise võtteid. Töö on ülesehitatud selliselt, et lugeja, kes ei oma väga suuri akadeemilisi teadmisi elektrisüsteemist ning selle toimimisest oleks võimeline ilma täiendavaid materjale kasutamata looma seoseid ja mõistma miks jõutakse töös vastavate järeldusteni.

Töö võib sisuliselt jagada kolmeks. Esimesed kolm peatükki annavad ülevaate reaktiivenergiast, selle kompenseerimisest ning kitsamalt selle juhtimiseks kasutatavatest FACTS seadmetest. See osa on mõeldud paindlike vahelduvvoolu ülekandesüsteemi tehnoloogiliste lahenduste ning nende aluste lahti seletamiseks. Jaotis põhineb puhtalt kirjanduses toodud teoreetilistel alustel ning seal puuduvad antud töö autori analüütilised järeldused. Selle osa lõpus on toodud FACTS seadmete võrdlus koos seadmete maksumuse ning võimalike rakendustega.

Töö teiseks osaks võib lugeda Eesti elektrisüsteemi analüüsivat osa, mis sisaldub neljandas, viiendas ning kuuendas peatükis. Neljandas peatükis antakse ülevaade hetkeseisust Eesti elektrisüsteemi reaktiivenergia kompenseerimisel. Selleks on kogutud pealiskaudne statistika mõne olukorda kirjeldava kuu kohta ja proovitud selgitada juhtimiskeskuse tegevust antud kuu vältel. Samuti leidub eelnimetatud peatükis ülevaade ülekandevõrgus primaarparameetritele ning elektrienergia ülekandele esitatavatest nõuetest. Sektsioon põhineb reaalsel statistikal ja põhivõrgus paikapandud nõuete kirjeldamisel.

Viies peatükk kirjeldab autori teadmiste ning kogemuste põhinevalt Eesti elektrisüsteemis tekkida võivaid ekstreemolukordasid. Need olukorrad on lahti kirjeldatud ning Siemensi tarkvara PSS/E 33 kasutades läbi arvatud. Seejärel on esitatud modelleerimise tulemused ning kirja pandud elektrisüsteemi juhtimiskeskuse operatiivtöötajate eeldatav tegevus. Peale dispetšeri juhtimiskäsku on taaskord talitus läbi modelleeritud ja tulemus kirja pandud.

Lisaks on viiendas peatükis reaalsele olukorrale lähema ja ohtlikuma talitluse analüüsimiseks eeldatud, et elektrisüsteem ei tööta oma normaalskeemiga. Traditsiooniliselt on elektrivõrgus mõned seadmed erinevatel põhjustel ajutiselt kasutuskõlbmatud. Seega on tegeliku kompenseerimisseadmete vajaduse nägemiseks loodud arvatavad režiimid, kus erinevatel

põhjustel on tööst väljas kaks üksteist mõnevõrra reserveerivat kompenseerimisseadet. Üksiku elemendi väljas olemise põhjuseks võib olla nii plaaniline hooldus, rikkeline remont või seadme väljakukkumine häiringu tõttu.

Kuues peatükk põhineb viienda peatüki modelleerimise tulemustel. Uuritakse FACTS seadmete rakendamise teel leida lahendus eelnevalt kirjeldatud pingeprobleemidele. Sektsiooni põhiliseks analüüsi vahendiks on Siemens'i tarkvara PSS/E 33, mille abil uuritakse kompenseerimisseadmete mõju elektrivõrgu parameetritele erinevates 330 kV võrgu sõlmpunktides.

Seitsmendat peatükki võib vaadelda kui eraldiseisvat osa, kus proovitakse vastavate tehnoloogiliste lahenduste rakendamise majanduslikku tasuvust määrata. Tasuvuse määramiseks on kasutatud kirjanduses leiduvaid ning tootjatega suhtlemisel kogutud andmeid, samuti ka Elering AS-i reaalseid ning teoreetilisi kulunumbreid. Peatüki eesmärgiks on näidata erinevate lahenduste rakendamise majanduslikku poolt ning sellega kaasnevat kasumit või kahjumit.

Töö lõpus on antud kokkuvõtlik ülevaade töö käigus avastatud leidudest. Kokkuvõttes sisaldub kõik oluline, mida lugeja antud tööst peab kaasa võtma. Samuti on antud töö tulemustele autori poolne hinnang ning suunised võimalikuks edasiseks uurimustööks antud teemal.

1. Reaktiivvõimsus

Mõistmaks FACTS ehk paindliku vahelduvvoolu ülekandesüsteemi rakendamiseks kasutatavaid seadmeid on tarvis aru saada, mida antud seadmed teevad. Seadmete eesmärk on minimeerida kadusid, hoida teatud võrgupunktides soovitud pinget või tõsta elektrivõrgu töökindlust juhtides võimsusvooge ja maksimeerides seadmeid läbivat kasulikku võimsust. Selleks, et neid eesmärke saavutada tarbivad või toodavad enamik neist seadmetest reaktiivvõimsust. Selle peatüki eesmärk on teha selgeks, mis on reaktiivvõimsus.

Reaktiivvõimsus on vajalik selleks, et tekitada elektrisüsteemis kasutatavates seadmetes elektromagnetvälju. Ta küll mõjutab voolutugevuse ja pinge suurusi, ent temast ei tulene keskmise (aktiiv-) võimsuse tarbimise muutust. Kõrgepingevõrgus mõõdetakse aktiivvõimsust megavattides (MW) ja reaktiivvõimsust megavarides (Mvar). [10]

Vahelduvvoolu elektrivõrgud ja seadmed, mis on nendega ühendatud, toodavad pingestatult ajas muutuvaid ning neile rakendatavast pingest sõltuvaid elektrivälju. Samuti toodavad nad voolutugevusest sõltuvaid magnetvälju. Need väljad salvestavad neid tekitava komponendi kasvades energiat ja vabastavad selle, kui antud komponent kahaneb. Peale energia hajumise aktiivkomponentides, kõik energiaedastus seadmed, kaasa arvatud transformatorid ja energia muundamise seadmed (näiteks mootorid ja generaatorid), opereerivad tänu oma võimele salvestada ja vabastada energiat. [11]

Mitmel pool antud töös on kasutatud jooniseid inglise keelsest kirjandusest, kus pinge tähistamiseks kasutakse u ja U asemel vastavalt v -d ja V -d. Joonisel 1.1. kujutatud vahelduvvooluahelas võib vooluallikast koormusele Z_L hetkvõimsust kirjeldada hetkvoolutugevuse i ja hetkpinge u kaudu:

$$p = u * i \quad (1.1)$$

Püsitalitlusel, kus $u = U_{\max} * \cos \omega t$ ja $i = I_{\max} * \cos(\omega t - \phi)$:

$$\begin{aligned} p &= \frac{U_{\max} * I_{\max}}{2} * [\cos \phi + \cos(2\omega t - \phi)] = \\ &= U * I * \cos \phi * (1 + \cos 2\omega t) + U * I * \sin \phi * \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1.2)$$

Kus U ja I on u ja i ruutkeskmised (rms) väärtused.

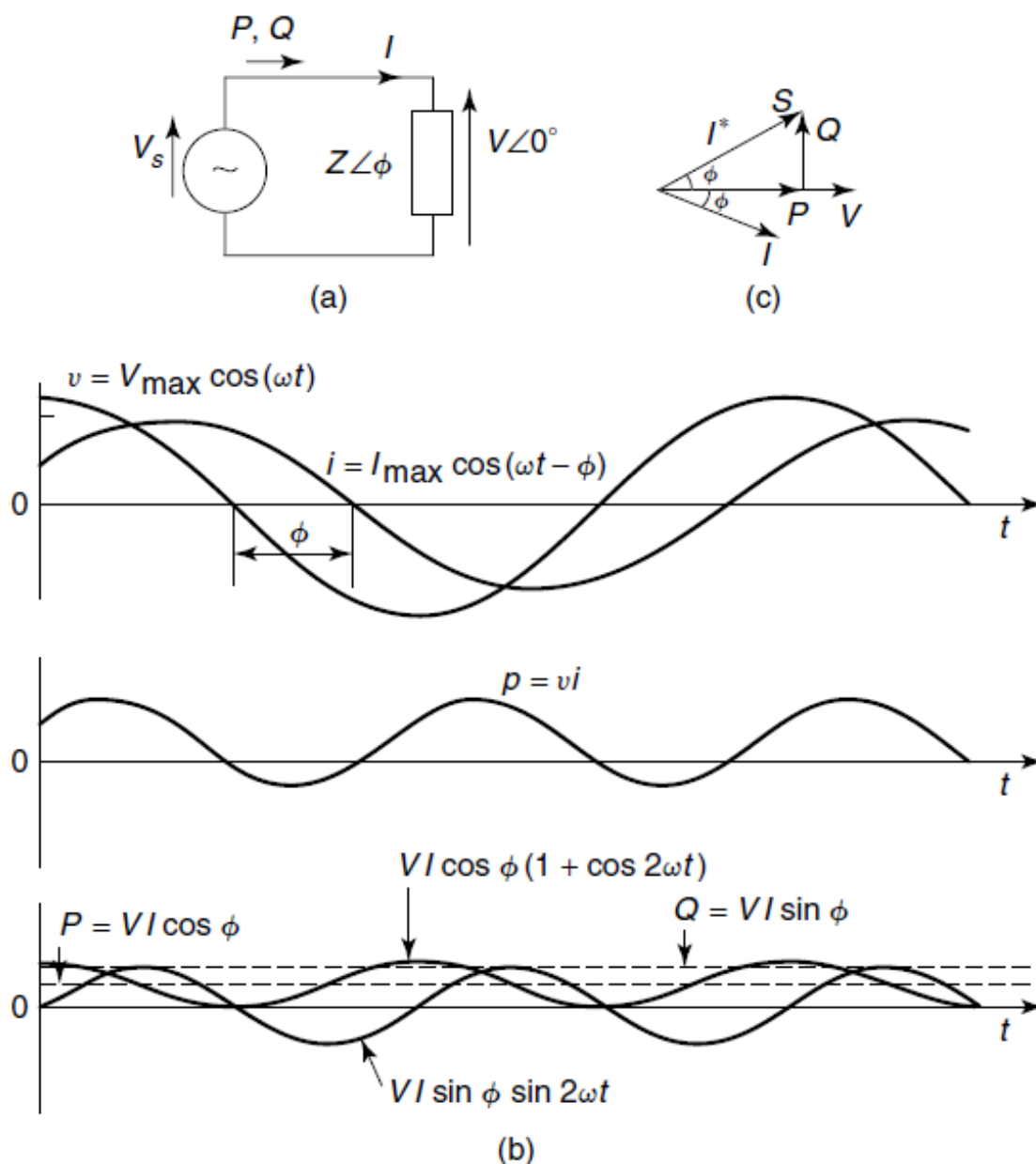
Valemid 1.1 ja 1.2 on graafiliselt kujutatud joonisel 1.1.(b). Valem 1.2 koosneb kahest topeltsageduslikust ($2 * \omega$) komponendist. Esimese liidetava keskmine väärtus on $U * I * \cos \phi$. Seda

keskmist väärtust loetaksegi aktiivvõimsuseks P , mis liigub allikast koormuse poole. Teise liidetava keskmine väärtus on null, ent tema maksimaalne väärtus on $U \cdot I \cdot \sin \phi$. [12]

Faasordiagrammina (joonis 1.1.(c)) kujutades võib kompleksvõimsuse kirja panna valemiga:

$$S = U \cdot I^* = P + jQ = UI \cos \phi + jUI \sin \phi \quad (1.3)$$

kus P on aktiivvõimsus, mida mõõdetakse vattides (W) ja Q on reaktiivvõimsus, mida mõõdetakse varrides (var). Võrreldes valemite 1.2 ja 1.3 on näha, et hetkvõimsuse teise komponendi maksimaalne väärtus valemis 1.2 on määratletud reaktiivvõimsusena.



Joonis 1.1. Vahelduvvooluvõrgu elektrilised parameetrid [11]

Elektromagnetilistes seadmetes salvestatakse energiat nende magnetväljades. Need seadmed toodavad mahajäävat voolu ja seega positiivseid reaktiivvõimsuse väärtusi. Sellel põhjusel kutsutakse neid ka reaktiivenergia tarbijateks. Elektrostaatilised seadmed seevastu salvestavad energiat elektriväljades ja tekitavad juhtivaid voole tekitades negatiivset reaktiivvõimsuse väärtust. Seega neid nähakse kui reaktiivenergia tootjaid. Märkide rakendamise tava tootjate ja tarbijate jaoks on erinev ning seega soovitatakse reaktiivvõimsuse märgi määramisel kasutada voolutugevuse ja pinge tähistamisel ühtset süsteemi. Vastasel korral võib reaktiivenergia tarbijate ja tootjate eristamine tekitada suurt segadust. [10]

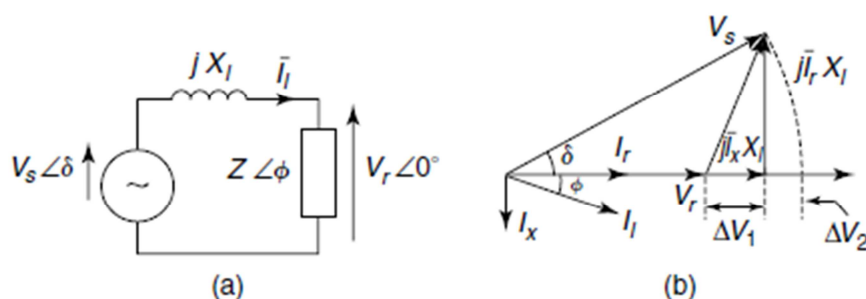
1.1. Kompenseerimata ülekandeliin

1.1.1. Lihtsustatud olukord

Reaktiivenergia kompenseerimise vajalikkuse paremaks arusaamiseks kujutame ette olukorda, kus kadudeta lühike ülekandeliin ühendab allikat U_s ja koormust $Z \angle \phi$. Indeks s märgib siin ja edaspidi allikat (*source*) ning indeks r tähistab siin ja edaspidi koormust (*receptor*). Lihtsustamise mõttes esineb liinil vaid tema induktiivne reaktants X_l . Joonis 1.2. kujutab sellist võrku tema parameetritega ning faasordiagrammiga, mis näitab pingete ning voolude suhteid. Jooniselt 1.2. (b) on selgelt näha, et tootva ja tarbiva otsa pingete faasivektorid on erinevas faasis ja ka erineva pikkusega. Kõige märkimisväärsem osa pingelangust liini reaktantsil on põhjustatud koormusvoolu reaktiivse komponendi I_x poolt.

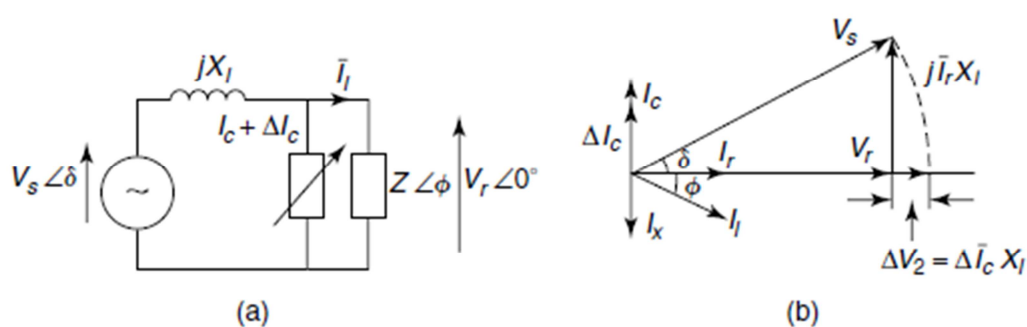
Pingete lubatud piires hoidmiseks elektrivõrgus on kolm võimalust [13]:

1. Individuaalne kompenseerimine
2. Grupiline kompenseerimine
3. Tsentraalne kompenseerimine



Joonis 1.2. Lühike kadudeta ülekandeliin toitmas koormust [11]

Lokaalne kompenseerimine toimub enamasti mahtuvusliku koormuse tarbijaga paralleelselt lülitamise teel nii, et kondensaatori vool I_c oleks suuruselt võrdne ja suunalt vastupidine koormusvoolu reaktiivse elemendi I_x -ga ($I_c = -I_x$). Eelmainitud konfiguratsioon põhjustab kombinatsiooni võimsusteguri paranemist. I_x -i eemaldamine elimineerib pingelangu ΔU_1 tuues resultantpinge U_r faasori pikkuse lähemale toitepinge faasori pikkusele U_s . Reaktiivenergia eest tasu küsides võib võrguettevõtja tekitada olukorra, kus tarbijal tekib majanduslik initsiatiiv kasutada oma liitumispunkti koormuse kompenseerimist. Kompenseeritud koormus vähendab võrgu osa pingelangu, ent ta ei elimineeri seda. Tarbijale mõjub endiselt pingelang $\Delta U_2 = j \cdot \bar{I}_r \cdot X_1$.



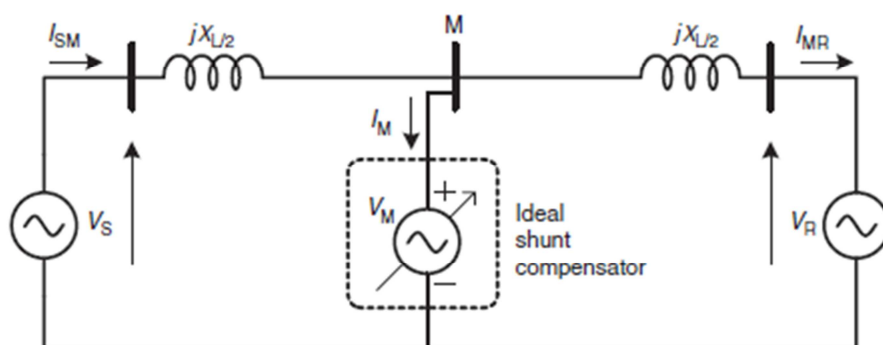
Joonis 1.3. Reaktiivenergia kompenseerimine pingereguleerimiseks [11]

Tsentraalseks või grupiliseks kompenseerimiseks ja tarbijale toitepingega võrdse pingetagamiseks võib võrguettevõtte installeerida reaktiivenergia kompensaatori nagu on toodud joonisel 1.3. Selline kompensaator tasakaalustab mõlemad pingelangude komponendid ΔU_1 ja ΔU_2 , mis tekib koormusvoolu I_l läbimisel liini reaktantsi X_1 . ΔU_2 kompenseerimiseks on tarvis veel lisaks voolule I_c , mis kompenseerib voolu I_x , ka ekstra mahtuvusliku voolu ΔI_c . Kui $\Delta U_2 = \Delta \bar{I}_c \cdot X_1$, siis allikapinge U_s on võrdne pingega U_r , mis jõuab tarbijani. Sellist kompensaatorit kasutatakse võrguettevõtete poolt, et tagada oma klientidele kvaliteetne toide.

1.2. Reaktiivvõimsuse kompenseerimine

1.2.1. Ideaalne põikkompensaator

Eelmises osas kirjeldasime põgusalt, millist kasu võiks olla põikkompensaatorist. Selles peatükis vaatame lähemalt joonisel 1.4. kujutatud lihtsat kadudeta vahelduvvoolusüsteemi, mis koosneb kahest ideaalsest generaatorist ja lühikesest ülekandeliinist ning mida võiks kasutada põikkompensaatori tööpõhimõtte kirjeldamiseks. Ülekandeliini iseloomustatakse tema induktiivse reaktantsi X_L -ga ja ülekandeliini keskele on ühendatud püsivalt kontrollitav pingesallikas. Eeldatakse, et pinge faasivektorid U_S ja U_R on sama pikad, ent nende vahel esineb faasivahe δ . Joonis 1.5. kujutab süsteemi, mis on kujutatud joonisel 1.4., faasordiagrammi, kus kompensatsioonipinge faasor U_M on samuti sama pikkusega, kui U_S ja U_R , ja võrreldes U_S -ga on tema faasivahe $-\delta/2$ ning võrreldes U_R -ga $+\delta/2$. [14]



Joonis 1.4. Ideaalne põikkompensaator ühendatud ülekandeliini keskele [14]

Sellisel skeemil väljub allikast vool I_{SM} ja tarbijasse siseneb vool I_{MR} . I_M on resulteeriv vool, mis läbib ideaalset põikkompensaatorit. Jooniselt 1.5. on näha, et vool I_M on antud olukorras pinges faasoriga U_M risti, mis tähendab, et kompensaator ei genereeri ega tarbi aktiivvõimsust ja on puhtalt reaktiivne. Allikast tarbijani ülekantavat võimsust saame arvutada valemiga 1.9:

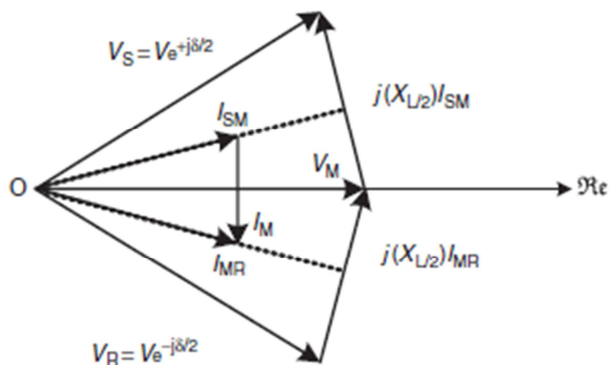
$$P_S = \frac{2U^2}{X_L} \sin(\delta/2) \quad (1.10)$$

Kus P_S on aktiivvõimsusvoog ja U on pingete U_R ning U_S faasorvektorite pikkus.

Kui skeemile poleks rakendatud põikkompensaatorit, siis aktiivvõimsusvoog väljenduks valemiga:

$$P_S = \frac{U^2}{X_L} \sin \delta \quad (1.11)$$

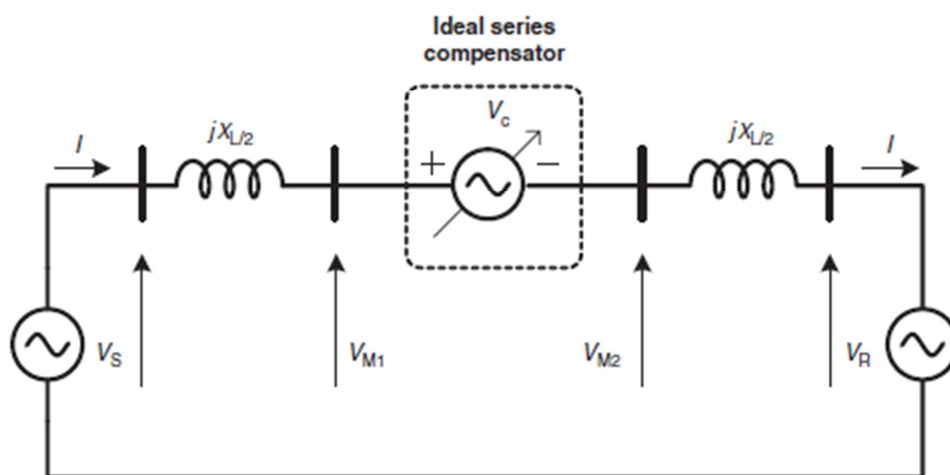
δ vahemikus $[0, 2\pi]$ on $2 \cdot \sin(\delta/2)$ alati suurem kui $\sin \delta$. Seega parandab põikkompensaator ülekandeliini maksimaalset ülekandevõimsust. Skeemil kujutatult töötav vahelduvvooluallikas ongi ideaalne põikkompensaator.



Joonis 1.5. Põikkompensaatoriga süsteemi faasordiagramm [14]

1.2.2. Ideaalne pikikompensaator

Kujutleme ideaalset pikikompensaatorit sarnaselt põikkompensaatoriga pingevallikana faasoriga U_C , mis ühendatakse kadudeta liini keskele nagu kujutletud joonisel 1.6..



Joonis 1.6. Ideaalne pikikompensaator ühendatud ülekandeliini keskele [14]

Voolu, mis läbib antud ülekandevõrku saab esitada valemiga:

$$I = (U_{SR} - U_C) / jX_L \quad (1.12)$$

Kus $U_{SR} = U_S - U_R$

Kui ideaalse pikikompensaatori genereeritava pingefaasor U_C on risti vooluga I , siis pikikompensaator ei genereeri ega tarbi aktiivvõimsust. Seega on meil tegu puhtalt reaktiivse pingeaallikaga, mille antud juhul võib asendada ekvivalentse induktiivse või mahtuvusliku impedantsiga.

Ekvivalentse impedantsi suuruse võib esitleda kujul:

$$X_{eq} = X_L(1 + s), \quad (1.13)$$

Kus

$$s = \frac{X_{Comp}}{X_L}; \quad (0 \leq |s| \leq 1) \quad (1.14)$$

on kompenseerimise faktor ja X_{comp} on ekvivalente jadamisi ühendatud kompenseeriv reaktants, mis on negatiivne kui ta on mahtuvuslik ja positiivne kui induktiivne. Antud juhul on kompensatsiooni pingeaallik kujul

$$U_C = I_L X_{eq} \quad (1.15)$$

Ja edastatav võimsus on võrdne

$$P_s = \frac{U^2}{X_L(1-s)} \sin \delta \quad (1.16)$$

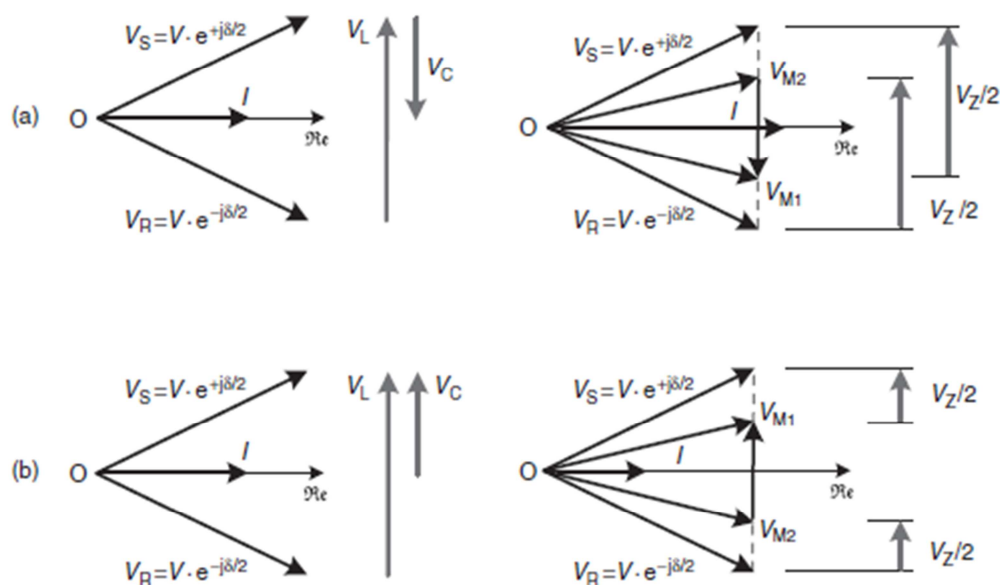
Valem (1.16) näitab, et edastatavat võimsust saab pikikompensatsiooniga tunduvalt suurendada, kui valitakse sobiv kompensatsiooni faktor s . Jadamisi ühendatud allika reaktiivvõimsuse saab kirja panna valemiga:

$$Q_{CS} = \frac{2U^2}{X_L} \frac{s}{(1-s)^2} (1 - \cos \delta) \quad (1.17)$$

Joonise 1.7. vasakul pool on kujutatud joonisel 1.6. näidatud süsteemi faasordiagrammi ilma kompensatsioonita. Sama joonise paremal käel on kujutatud sama skeemi kompensatsiooniga. Pingefaasor U_L on liini reaktantsil X_L esinev pingelang ja U_C on kompensaatori tekitatud pingefaasor. 1.7.(a) kujutatud juhul on meil tegemist mahtuvusliku kompensatsiooniga ja liini voolutugevuse faasor on pingefaasorist 90° võrra ees. Summaarne pingelang liinil on $U_Z = U_S -$

U_R-U_C , mis on suurem kui esialgne pingelang U_L . Sellise kompenseerimise puhul näeme, et voolutugevus liinis on tõusnud. Antud juhul on pikikompenseerimist kasutatud võimsusvoo suurendamiseks.

Joonise 1.7.(b) vasakul on taaskord sama skeem kompenseerimata kujul. Paremalt on kujutatud pikikompenseerimist induktiivse kompensatsiooniga. Sellisel juhul on kompensaatori pinge U_C liini pingelanguga U_L samas faasis. Summaarne süsteemi pingelang U_Z on väiksem, kui esialgsel olukorral ja seega ülekandeliinis esinev voolutugevus I väiksem, kui enne kompenseerimist. Sellist kompenseerimist võib kasutada kui soovitakse ülekandeliini läbivat võimsusvoogu vähendada. Antud juhtudel kujutatud mahtuvuslikul ja induktiivsel jadamisi ühendatud kompensaatoril puudus aktiivvõimsuse tarbimine ning genereerimine.



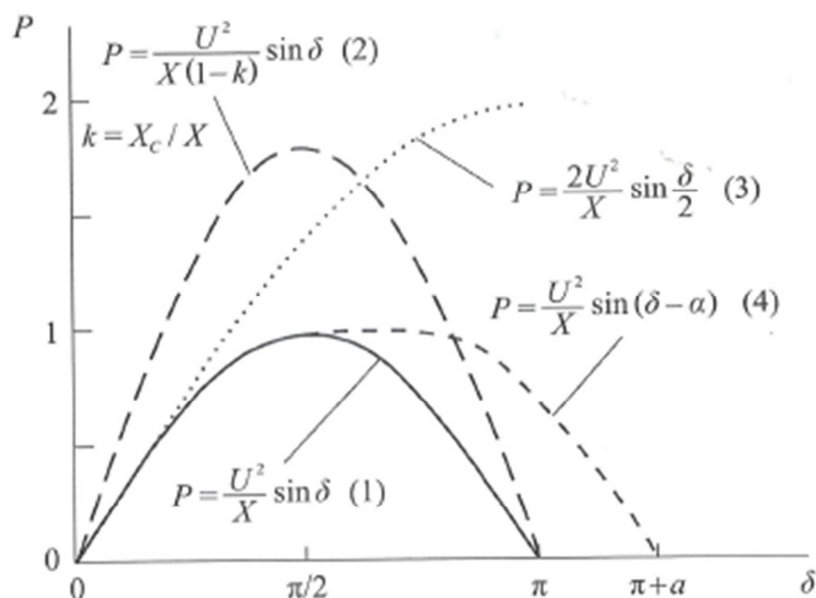
Joonis 1.7. Pikikompenseerimise faasordiagramm: (a) mahtuvuslik ning (b) induktiivne töörežiim [14]

Pikikompensaatorit pinge U_C ei ole standardsel juhul liini läbiva vooluga risti. Sellisel juhul võimaldab kompensaator reguleerida kahe süsteemi vahel olevat faasivahet ja seeläbi ka nende vahelisi aktiiv- ning reaktiivvõimsuse vooge. Pingeallikas U_C peab sellisel juhul tarbima või genereerima aktiivvõimsust P_C , samuti ka kontrollima reaktiivvõimsust Q_C . [14]

Kompenseeriva pinge U_C saab lisada allikapingele U_S sellisel moel, et resultantpinge U_{S1} on pikkuselt võrdne U_S -iga, ent nende vahel esineb faasivahe α . Sellisel juhul saab antud kompensaatorit kutsuda faasinihutiga kompensaatoriks ja võimsust, mis läbib ülekandeliini saab kirjeldada valemiga:

$$P_S = \frac{U^2}{X_L} \sin(\delta - \alpha) \quad (1.18)$$

Valem 1.18 näitab, et edastav võimsusvoog suureneb, kui faasinihe ($\delta - \alpha$) läheneb 90° -le. Samas on tema maksimaalne väärtus sama, kui ilma kompensatsioonita skeemis. Faasinihkega kompensaatori kasulikkus peitub selles, et temaga on võimalik traditsioonilistest vahenditest, näiteks sünkroongeneraatorist, kiiremini kontrollida süsteemi võimsus nurka ja faasivahet, mis esineb kahe pingeallika terminalide vahel.



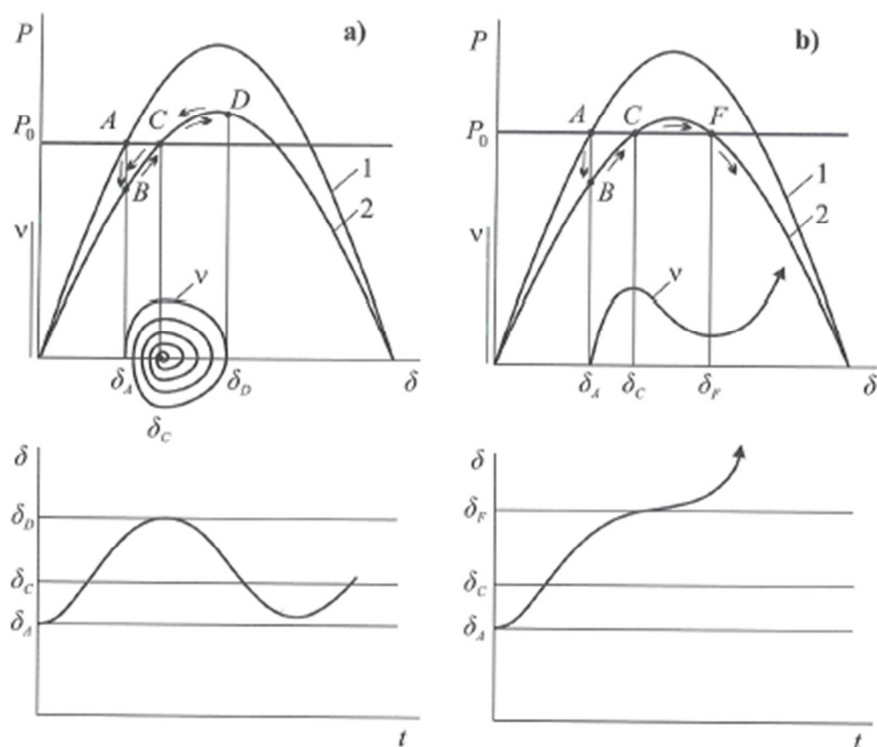
Joonis 1.8. Elektriülekanne nurkkarakteristikud [4]

Joonisel 1.8. võtab kokku aktiivvõimsuse edastamise võimekuse erinevate kompenseerimise lahendustega ülekandeliinides funktsioonina faasivahest δ . On võrreldud kompenseerimata (kõver 1), piki- (kõver 2) ning põikkompenseerimisega (kõver 3) ja faasinihutiga (kõver 4) liini. Kõik karakteristikud on joonistatud eeldusel, et allikapingete U_S ja U_R faasorid on pikkuselt võrdsed. 50%-ne pikikompensatsioon ($s=0,5$) nagu valemis (1.13) on defineeritud, toob endaga kaasa märkimisväärse ülekandeliini läbilaskevõime suurenemise. Üldiselt ongi pikikompensatsioon parim valik liini läbilaskevõime parandamiseks. [4]

Faasinihuti on oluline aitamaks ühendada kahte ülemäärase või kontrollimatu faasivahega süsteemi. Selline seade ei paranda oluliselt liini läbilaskevõimet, kuid ta võimaldab kohandada suuri või kiirelt muutuvaid faasinihkeid. Põikkompensaator samuti ei paranda oma normaalses tööregioonis, kus δ on alla 90° ja tavaliselt 30° ümber, liini läbilaskevõimet. Põikkompensaatori olulisus seisneb süsteemi stabiilsusvahemiku suurendamises.

Joonis 1.9. kujutab ülekandeliini võimsus ülekannet karakteristikute P_δ ja δ abil, kus enne häiringut läbib süsteemi võimsus P_0 faasivahega δ_A . Ülekandeliini häiringu korral ei suuda toitva allika turbiin, mis veab ringi generaatorit, koheselt oma mehaanilist sisendvõimsust muuta isegi siis, kui tema ühendus koormusega katkeb. See põhjustab generaatori kiirenemist, mis toob kaasa ka sageduse tõusu ning faasinihke muutumise δ_A -st δ_B -ni. Kui toimub koormatud ülekandeliini väikese viitega taaslülitus faasinihkel δ_B , siis on generaatori elektriline võimsus väiksem kui mehaaniline võimsus P_0 (turbiini võimsus jääb muutumatuks), mille tõttu generaatori rootor kiireneb ja nurk δ hakkab kasvama. Tööpunkt nihkub punktist B punkti C poole, kus on elektriline ja mehaaniline võimsus tasakaalus, ent rootori inertsi tõttu nurga suurenemine jätkub, generaatori elektriline võimsus saab suuremaks mehaanilisest ja rootori suhteline kiirus v väheneb. Punktis D saab rootori liikumise suhteline kiirus nulliks. Kuna kiirendus on endiselt negatiivne, siis muutub kiirus negatiivseks ja tööpunkt nihkub tagasi punkti C. Inertsi tõttu võnkumine ümber tasakaalu punkti jätkub ning lõpuks saavutab püsiseisundis punktis C nurgaga δ_C . [4]

Joonisel 1.9.(b) on kujutatud sama süsteemi nagu joonisel 1.9(a)-gi, ent nüüd on turbiini võimsus P_0 ja süsteem on ebastabiilne. Sellisel juhul kiireneb generaator rohkemgi kui esimesel juhul ning faasinihe kasvab üle kriitilise piiri, mis on natuke vähem, kui 90° ja läheneb δ_F -le. Kuna rootori kiirenemine on nüüd intensiivsem ja pidurdumine nõrgem, siis võib juhtuda, et nurk δ -i kasv jätkub pidurdamatult. [4]



Joonis 1.9 Elektrisüsteemi stabiilne (a) ja mittestabiilne (b) siirdeprotsess [4]

Jooniselt 1.8. näeb, et kõik kolm kompenseerimise meetodit suurendavad stabiilsusvahemikku, kuna ala, mis jääb ülekantavavõimsuse P_δ sõltuvusest faasinurga δ moodustatud graafiku kurvi alla, suureneb. Ideaalne pöikkompenaator suurendab seda ala kõige rohkem ja seega loetakse seda parimaks stabiilsusvahemiku tõstmise vahendiks.

2. FACTS seadmed

Mõiste FACTS on defineeritud IEEE³ poolt järgmiselt: „Jõuelektroonikal põhinev süsteem ja temaga seotud staatilised seadmed, mis võimaldavad kontrollida ühte või rohkemaid vahelduvvoolu ülekandevõrgu parameetreid, et suurendada kontrollitavust ja tõsta võrgu võimsusvoogude ülekandmise võimekust” [3]. Seega on antud seadmete eesmärk nii kiirelt kui võimalik varustada elektrisüsteemi induktiivse või mahtuvusliku reaktiivvõimsusega, mis on kohandatud täpsemate vajadustega parandamiseks süsteemi läbilaskevõimet ning ülekantava elektrienergia parameetreid.

Fundamentaalsed alused, millel FACTS seadmed põhinevad on arenenud mitmete dekaadide jooksul. Sellegipoolest ühtne kontseptsioon sai esmaselt kirjeldatud Narain Hingorani poolt 1980. aastatel Põhja-Ameerika elektriettevõtete koostöökogus „Electric Power Research Institute“ (EPRI) [15]. Paindlikes vahelduvvoolu ülekandesüsteemides otsitakse võimalusi rakendada teaduslikke läbimurdeid, mis on leidnud aset kõrgepinge ja tugevvoolu jõupooljuht elektroonikas. Nende rakendamise eesmärk on teha kõrgepingevõrk juhitavamaks nii püsiseisundis, kui ka siirdeprotsesside käigus. Uus lähenemine on muutmas viise, kuidas elektrijaama seadmeid projekteeritakse ja jaotus- ning ülekandevõrke planeeritakse ja opereeritakse. Need arengud võivad samuti mõjutada tuleviku elektriturge, sest sellise ehitusega elektrivõrgus on majanduslikult mõistlik kontrollida energiavoogusid. Tänu lubavatele tehnilistele ja majanduslikele kasudele on FACTS seadmed leidnud elektriseadmete tootjate, elektrivõrgu haldajate ning arendusorganisatsioonide ühtse toetuse [1].

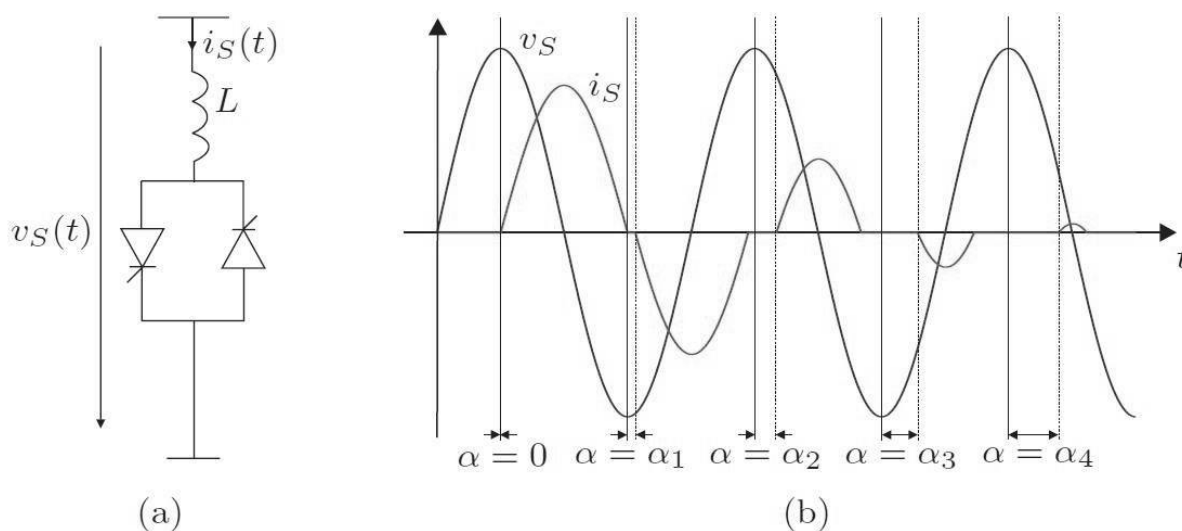
Mitmeid erinevaid FACTS seadmetel põhinevaid lahendusi on installeeritud maailma eri paigus. Neist populaarsemad on koormus-astmelülitid, faasinurga regulaatorid, staatilised reaktiivvõimsuse kompensatorid, türistorjuhtimisega pikikompensatorid, faasidevahelised võimsuse kontrollid, staatilised kompensatorid ning unifikseeritud võimsuste jagunemise kontrollid. [2]

³ IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

Antud peatüki alampeatükkides 2.1. - 2.6. on toodud türistoridel põhinevad FACTS seadmed ja peatükkides 2.7. - 2.10. on juttu omakommutatsiooniga lülititel põhinevatest FACTS seadmetest.

2.1. Türistorreguleerimisega reaktor

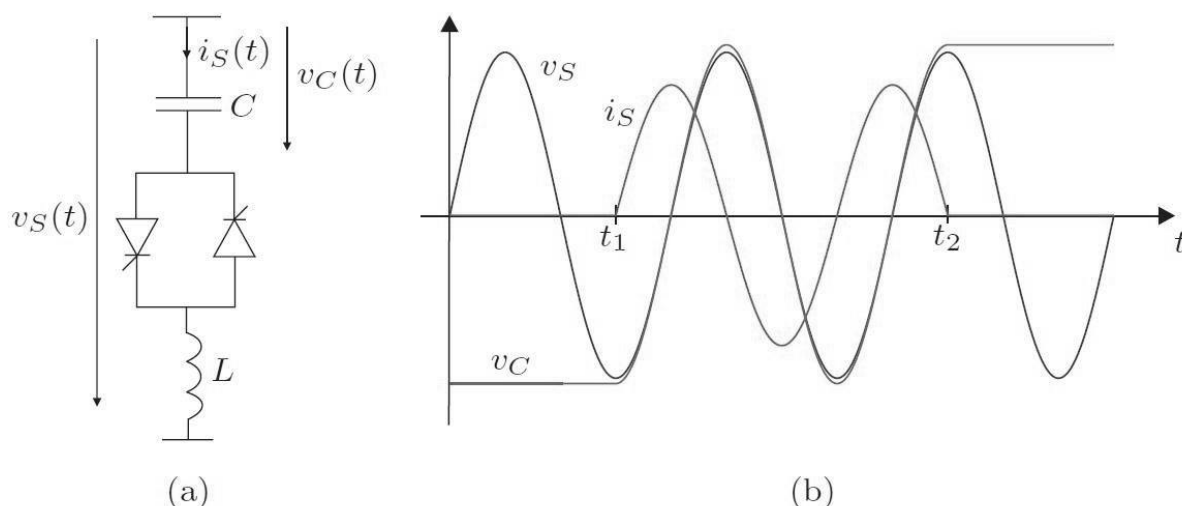
Enim kasutatud leidev türistoridel põhinev FACTS seade on türistorreguleerimisega reaktor (TCR), mida on kujutatud joonisel 2.1.(a). See on kompensator, mille väljundiks on püsiv muutlik induktiivne reaktants. [16] Joonisel 2.1.(b) on kujutatud TCRi pinge ja voolu signaali kujud. Reaktorit läbivat voolu kontrollitakse vastuparalleelselt ühendatud türistoride avamisnurga α abil, mis jääb vahemikku 90° kuni 180° mõõdetuna mõjuva pinge nullkohast. Vool liigub katkendlike impulssidena, mis tekivad sümmeetriliselt positiivsetel ja negatiivsetel poolperioodidel. 90° juures on türistorreguleerimisega reaktor oma maksimaalse väljund reaktiivvõimsusega võrku ühendatud ja 180° juures on ta täielikult lahutatud. Türistor avamisnurgaga alla 90° tekitab võrku alalisvoolu komponenti ja häirib kahe vastuparalleelse ahela sümmeetrilist tööd. TCRi juhtivus sõltub avamisnurgast α .



Joonis 2.1. TCRi põhimõtte skeem (a) ning signaali kuju (b) [16]

2.2. Türistorlülitamisega kondensaator

Joonisel 2.2. on kujutatud türistorlülitamisega kondensaatorit (TSC). Sõna reguleerimisega on asendatud siin sõna lülitamise, sest türistori lülitatakse sisse vaid siis kui pinge läbib nullpunkti. Reaalsuses võib pinge olla kergelt positiivne, sest türistorid vajavad positiivset anood-katood pinget, et juhtivaks muutuda. Mida suurem on pinge, seda suurema voolutugevuse tipu lülitamine tekitab. Suured voolud võivad kahjustada türistorit ja seega siirdeprotsesside tõttu kasutatakse türistorit vaid kondensaatori võrku lülitamiseks või võrgust lahutamiseks. Samuti ei võimalda TSC muutliku amplituudiga mahtuvuslikku voolu süsteemi genereerida. Nende väljund on kas maksimaalne reaktiivne vool või null. Täpse türistorite avamisega saab enamike transiente lülitamisel ära hoida. Türistorlülitamisega kondensaator ei tekita korrektsel lülitamisel võrku harmoonikuid. [16]



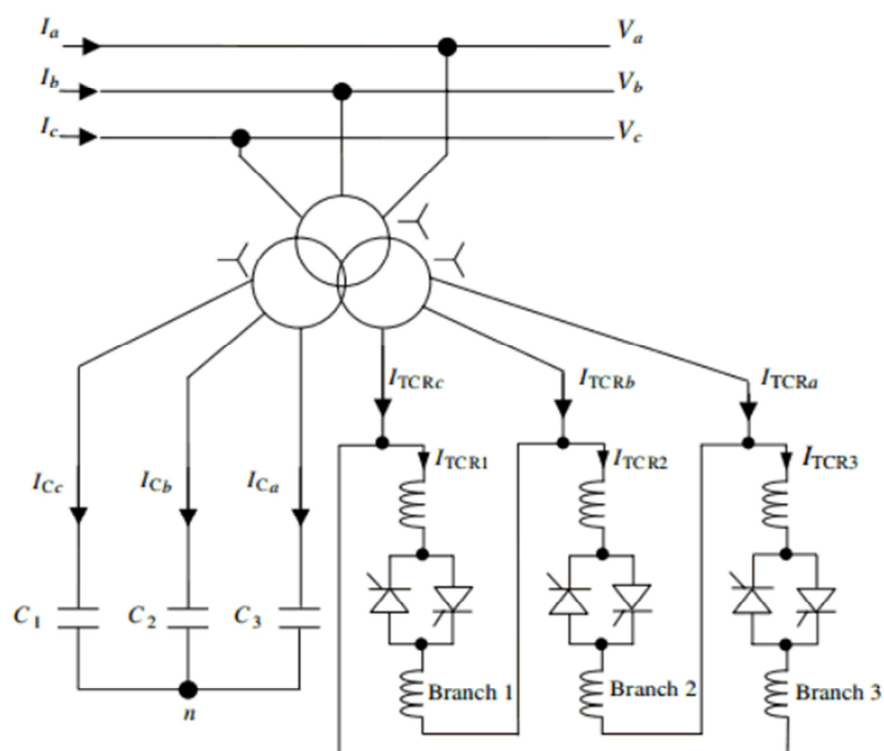
Joonis 2.2. TSC põhimõtte skeem (a) ning signaali kuju (b) [16]

2.3. Staatiline reaktiivvõimsuse kompensaator

Joonisel 2.1. kujutatud türistorreguleerimisega reaktor ja joonisel 2.2. kujutatud türistorlülitamisega kondensaator võimaldavad ainult pidevat induktiivset või ebapidevat mahtuvuslikku kompensatsiooni. Enamikes rakendustes aga oleks tarvis püsivat mahtuvusliku või induktiivset kompensatsiooni. Staatiline reaktiivvõimsuse kompensaator (SVC) on enamasti mõeldud opereerima nii induktiivses kui ka mahtuvuslikus režiimis. Seda võib kasutada reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks, pinge reguleerimiseks või võimsusteguri parandamiseks. Standardne kolmefaasiline SVC skeem koosneb paralleelselt ühendatud

kolmefaasilisest TCRist ning kondensaatorpatareidest. Mõningatel juhtudel võib kondensaatorpatarei olla TSC. TCR on traditsioonilise SVC kontrollitav osa. [2]

Joonisel 2.3. kujutab ühejoonelist skeemi SVCst, kus TCR on kolmnurkühenduses ja kondensaatorpatareid tähtühenduses. Jooniselt puuduvad filtrid, mida on enamasti tarvis lülitamiste põhjustatud harmoonikute summutamiseks. Fikseeritud kondensaatorpatareide asendamisel TSCdega on võimalik SVC veelgi suuremal amplituudil reguleeritavaks muuta.

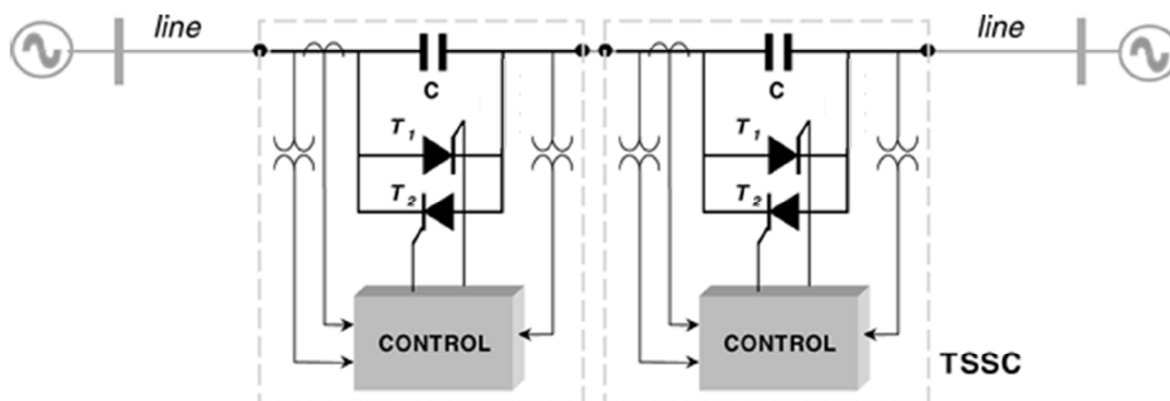


Joonis 2.3. Kolmefaasilise SVC ühejooneline skeem, mis koosneb kondensaatoritest ja TCRidest [2]

SVC kondensaatorpatarei mahtuvus määratakse maksimaalse vajamineva võrku toodetava mahtvusliku reaktiivvõimsuse järgi. Kui türistorid on välja lülitatud ($\alpha=180^\circ$), siis just sellise reaktiivvõimsuse SVC võrku genereeribki. Samas peab TCRi maksimaalne tarbitav reaktiivvõimsus olema suurem sellest, mis toodab kondensaatorpatarei. See on selle jaoks, et SVC oleks võimeline töötama nii induktiivses kui ka mahtvuslikus režiimis. Maksimaalne induktiivne reaktiivvõimsus väljastatakse võrku SVC poolt siis, kui türistorid on sisse lülitatud minimaalse avamisnurgaga ($\alpha=90^\circ$). Seega saab SVC reaktiivvõimsust kontrollida maksimaalsest induktiivsest $\alpha=90^\circ$ kuni maksimaalse mahtvusliku $\alpha=180^\circ$ väljundini. [2]

2.4. Türistorlülitamisega jadakondensaator

Joonisel 2.4. on kujutatud türistorlülitamisega jadakondensaatorit (TSSC). Selles seadmes peaks olema kondensaatorpatarei jadamisi ühendamiseks türistor suletud. Kui türistor avatakse, siis kondensaatorpatarei šunteeritakse. Ka TSSC puhul peab türistorid sisse lülitama pinge nullpunktis, et vältida tugevaid siirdevoole.



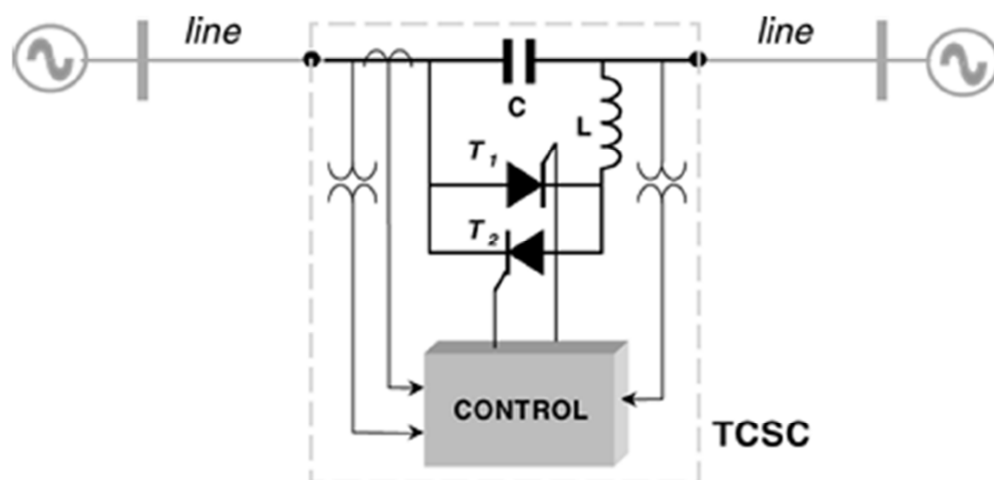
Joonis 2.4. Türistorlülitamisega jadakondensaator

Selle kompenseerimisseadme suureks eeliseks on tema lihtsus. Tema probleemiks aga on pideva reguleeritavuse puudumine. Sõltuvalt sagedusest võib türistoride lülitamisel tekkida harmoonikuid. TSSC-del on soovitatav valida kondensaatorpatareid selliselt, et ta väljundiks saaksid olla võimalikult paljud erinevad reaktiivvõimsuse väärtused. Näiteks kui installeeritakse 3 kondensaatorpatareid, siis nende proportsionaalsete väärtuste 1, 2 ja 3 juures on võimalik neid kombineerides saada väärtused 1, 2, 3, 4, 5 ja 6, millega saavutatakse suurem paindlikus. [11]

2.5. Türistorreguleerimisega jadakondensaator

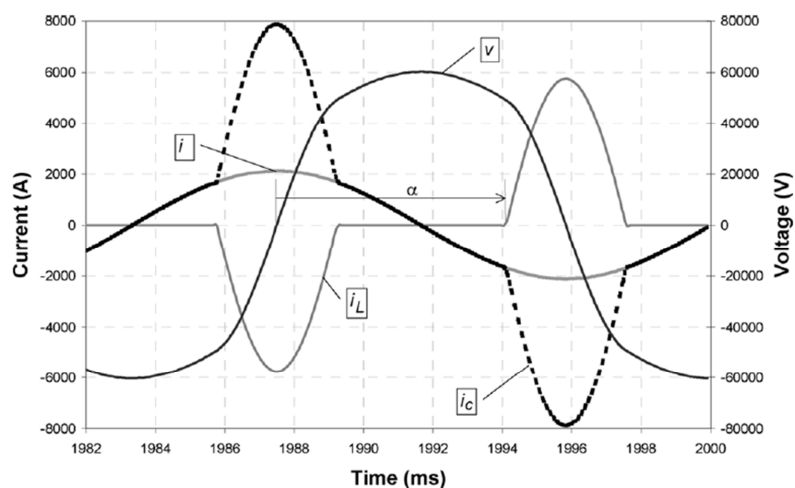
Joonisel 2.5. on kujutatud türistorreguleerimisega jadakondensaatorit (TCSC). Sellel joonisel on ülekandeliini ja pingesallikaid kujutatud vooluallikana, sest see esitab enamike ülekande süsteemide reaalset käitumist paremini. Ka see kompensaator põhineb TCRil, mis oli esmaselt projekteeritud elektrivõrguga põiki töötama. Kui TCR on ühendatud liiniga jadamisi, siis ta peab olema kondensaatorpatareiga paralleelselt, sest juhul kui ülekandeliini ning toiteallika ekvivalent on vooluallikas, siis ei ole võimalik kontrollida skeemis voolutugevust. TCSC on väga sarnane traditsioonilise SVC seadmega. Nende vaheks on see, et TCSC on ühendatud

liiniga jadamisi. Selles kompensatoris on võimalik kontrollida türistoride avamisnunrga reguleerimise teel jadamisi ühendatud reaktori väljundit. Selle tulemusena on kogu seadme väljundmahtuvus reguleeritav. Seda seadet on võimalik kasutada võimsusvoogude kontrolliks ning võnkumiste summutamiseks. [17]



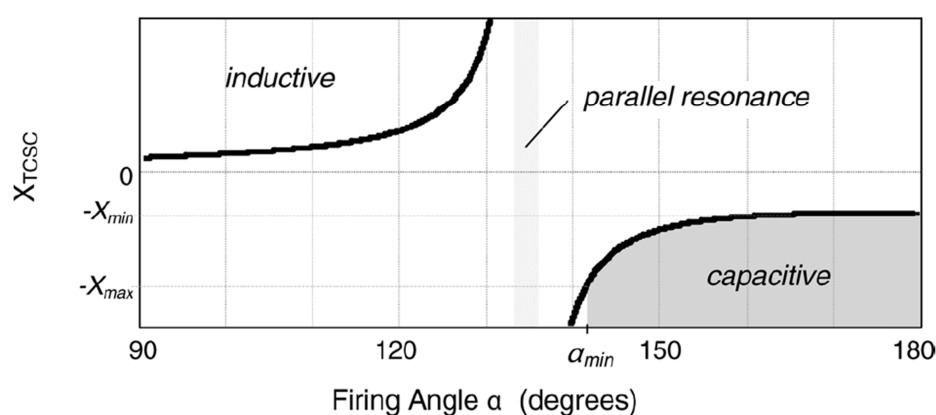
Joonis 2.5 Türistorreguleerimisega jadakonensaatoreid [18]

Joonisel 2.6. on kujutatud TCSC voolu ja pinget signaalikujude, mis näitab, et kuigi kondensaatoripatarei ja reaktori vooludes esineb märkimisväärselt harmoonikuid, siis kondensaatoripatarei pinget on peaaegu ideaalne siinus. Reaalselt ei ole need harmoonikud tõsiseks probleemiks ning nad filtreeritakse kondensaatoripatarei ning ülekandeliini takistuse poolt välja. [18]



Joonis 2.6 TCSC signaalikujud [18]

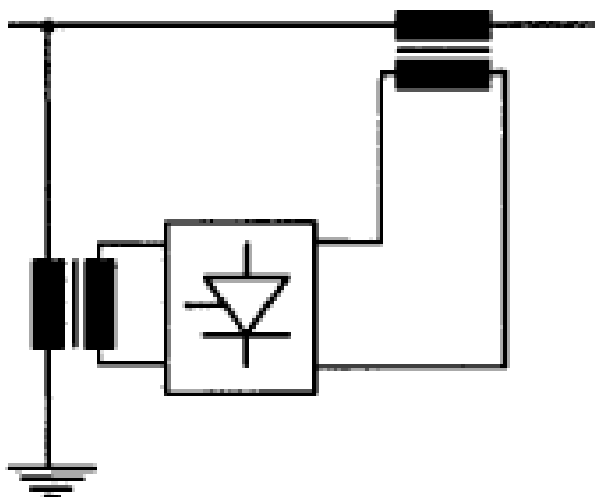
Joonisel 2.7, on kujutatud TCSC ekvivalentset takistust funktsioonina avamisnurgast α . See joonis näitab, et seadmel on olemas nii mahtuvuslik kui ka induktiivne töörežiim, mille vahel asub resoneeriv piirkond, mis joonisel on tehtud tumedamaks. Näites toimub resonants avamisnurga 135° juures. Normaalses režiimis töötab TCSC vahemikus, kus tema impedants muutub minimaalsest väärtusest $-X_{\min}$ -st avamisnurga $\alpha=180^\circ$ juures kuni maksimaalse turvalise väärtuse X_{\max} -ni, kus $\alpha \approx 142^\circ$. Töö avamisnurgaga α , mis on lähedal resoneerivale regioonile, ei ole turvaline. TCSC võib töötada ka induktiivses regioonis, aga sellises režiimis vähendatakse liini läbivaid võimsusvooge. [18]



Joonis 2.7 TCSC ekvivalentne reaktants [18]

2.6. Türistorreguleerimisega faasinurga regulaator

Türistorreguleerimisega faasinurga regulaator (TCPAR või TCPST), mida kujutatakse joonisel 2.8., on võimeline oluliselt parandama ülekandevõrgu kontrollitavust. Joonisel on kujutatud vaid a faasi kontrollmehhanismi. Faasi a indutseeritud pinge tuleb transformaatore kolmest sekundaarmähisest, mille primaarmähis on ühendatud faaside b ja c vahele. Kõiki kolme sekundaarmähist on võimalik türistorlülitite abil liiniga ühendada. Türistorid on ühendatud vastuparalleelselt moodustades kahesuunalised naturaalselt kommuteeritavad lülitid. Türistoride avamisega tekib ülekandeliinile pinge, mille suurust saab kontrollida. Sekundaarmähiste hulk on valitud selliselt, et vähendada harmooniliste teket pikikompenseerimise pingel. [17]

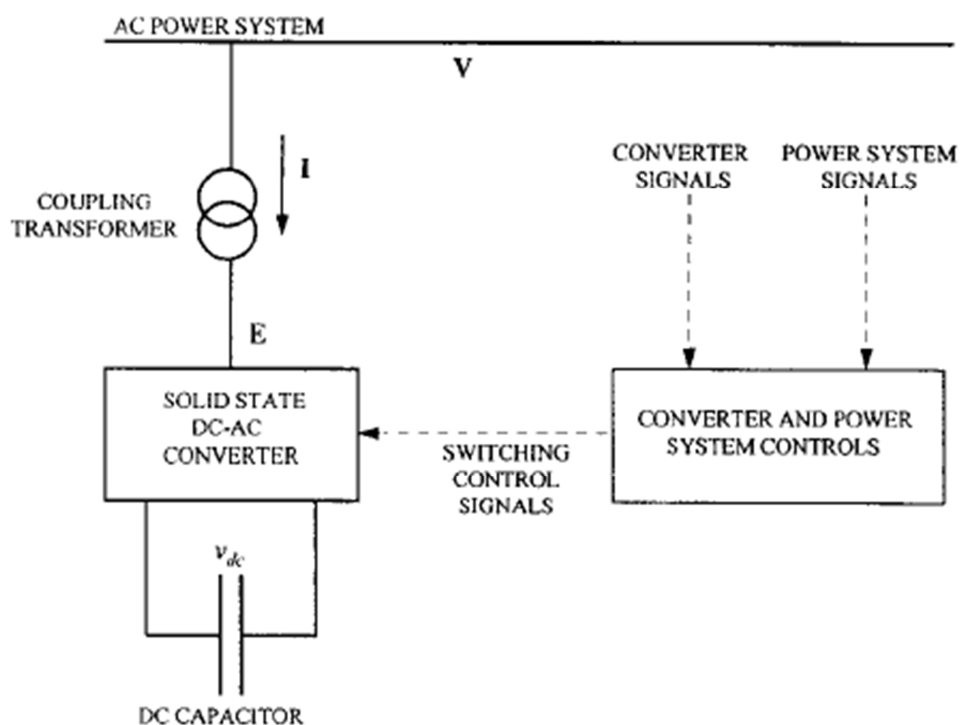


Joonis 2.8. Türistorreguleerimisega faasinurga regulaator [19]

Klassikalise faasinihuti põhiliseks funktsiooniks on pakkuda võimalust kontrollida võimsusvoogu ülekandeliinis. See võimsusvoog on proportsionaalne faasinurga siinusega ja seetõttu on võimalik teda kontrollida läbi selle nurga muutmise. See saavutatakse ülekandeliiniga jadamisi ühendatud muudetava pingega. Väljundpinget on võimalik varieerida sõltuvalt sellest sisendpingest, muutes selle jadamisi ühendatud pinge suurust. [17]

2.7. Staatiline sünkroonkompensaator

Türistorid on hetkel ülekandevõrgu seadmetes eelistatuid jõupooljuhid. Viimasel ajal aga on suletavate türistorite (GTO) võimsustaluvus tõusnud traditsiooniliste türistoridega võrreldavale tasemele. Mitmes aspektis on konverter süsteemid, mis kasutavad GTO välja lülitamise võimalust paremad, kui klassikalised türistoridega konverterid. [11]

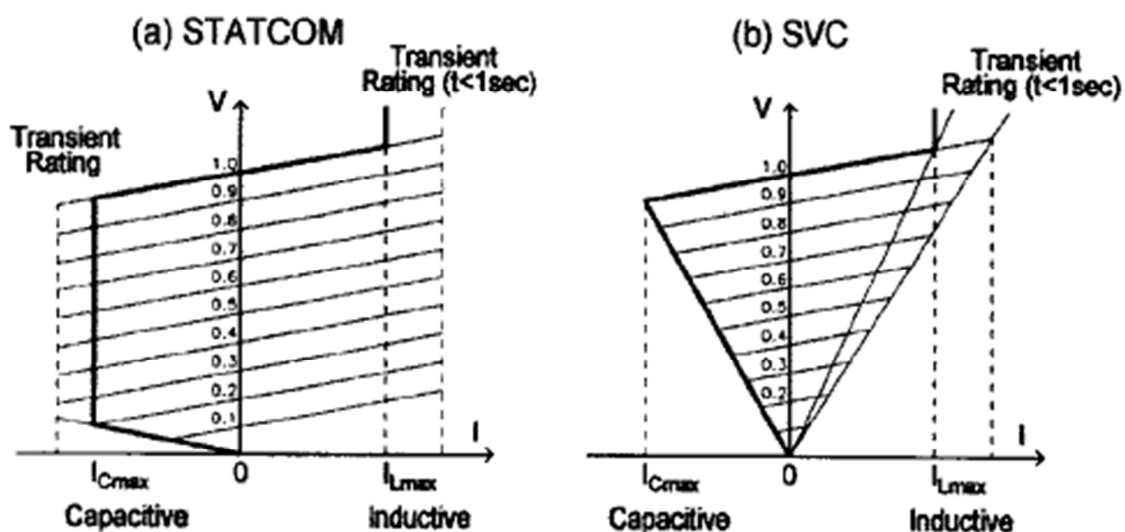


Joonis 2.9. STATCOMi skeem [20]

Üks GTO-del põhinev konvertersüsteem on staatiline sünkroonkompensaator (STATCOM). Joonisel 2.9. on kujutatud STATCOM-i skeemi. STATCOMi väljundi kontrollmehhanismi saab vaadelda kui transformatori lekke reaktantsi taga toodetavat pingefaasorit, mille pikkust ja faasi on võimalik tüüpiliselt mõne millisekundi jooksul muuta. Kui seadet läbib vool ulatub maksimaalse lubatuni, siis seadme pingefaasor viiakse vastavusse kontrollitud voolu režiimiga. [20]

Joonisel 2.10.(b) on kujutatud SVC volt-amper karakteristikut ja joonisel 2.10.(b) STATCOMi sama karakteristikut. Nimipingel on mõlema seadme kontrollvahemik sama, ent SVC voolu kompenseerimise võimekus madalamate pingete juures langeb ja STATCOMil see märkimisväärselt ei muutu. Seda saab põhjendada faktiga, et SVC põhineb impedantsi kontrollil ja STATCOM pingel allika kontrollil. Seega SVC vool väheneb pingevähenedes,

kuid STATCOMi konverterite voolu kontrollimise vahemik sõltub ainult kasutatud lülitusseadmest ja seega on võimalik maksimaalset kompenseerimisvoolu hoida ka madala pingega olukordades. Seega pingelohu olukorras esineb STATCOM paremini. [20]

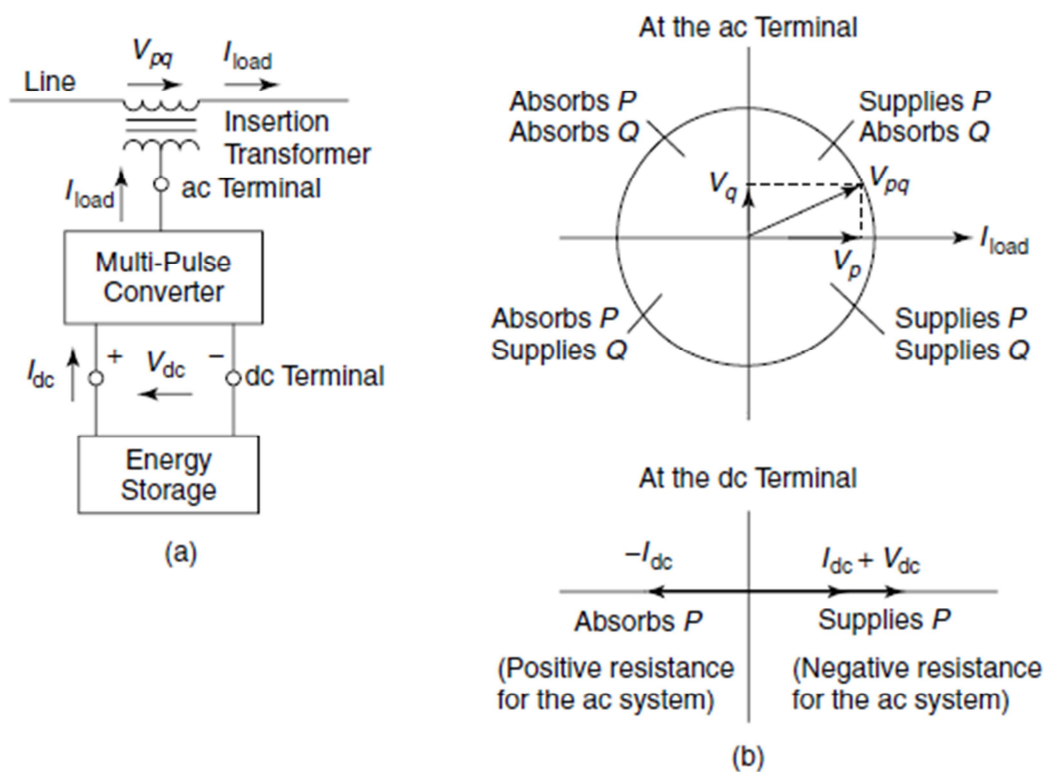


Joonis 2.10. SVC ja STATCOMi võrdlus [20]

2.8. Staatiline sünkroonpikikompensaator

Staatiline sünkroonpikikompensaator (SSSC või S^3C) on jadamisi ühendatud sünkroonne pingeliin, millega on võimalik liinivooluga soovitud faasinihkes olevat pinget võrku sisestada ning seeläbi muuta ülekandeliini efektiivset impedantsi. SSSC on võimeline süsteemiga vahetama nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust. Näiteks kui süsteemi sisestatav pinge on liinivooluga samas faasis, siis seade toodab või tarbib aktiivvõimsust ja kui see pinge on liinivooluga risti, siis vahetatakse süsteemiga reaktiivvõimsust. SSSC eeliseks TCSC ees on tema võime peale liini reaktantsi vastavalt vajadusele ka liini takistust kohandada ja see läbi pakkuda generaatoritele lisa summutust. [11]

SSSC koosneb mitmefaasilisest pingemuundurist (VSC), millel on alalisvoolu energia salvesti kontrollid nagu on näidatud joonisel 2.11.(a). Seade on ühendatud ülekandeliiniga jadamisi. Erinevad SSSC talitlusviisid on näidatud joonisel 2.11.(b).

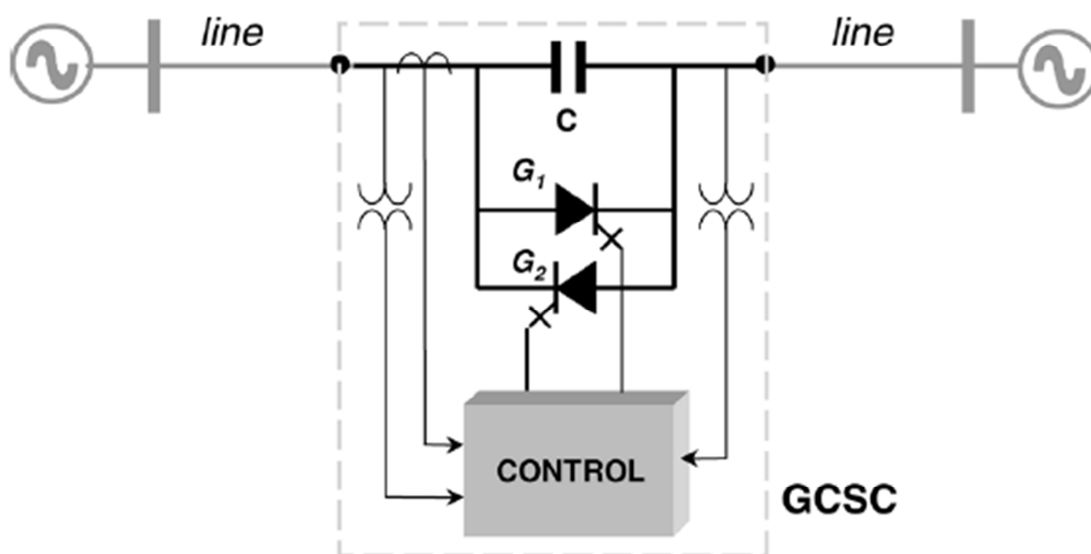


Joonis 2.11. (a) Staatiline sünkroonkompensaator; (b) SSSC erinevad töörežiimid [11]

2.9. Paiskontrollitav jadakondensaator

TCSC-ga oli võimalik võimsusvoogude suunamiseks ning võnkumiste summutamiseks juhtida süsteemile mõjuvat ekvivalentset mahtvuslikku reaktantsi. Tema nõrgaks küljeks oli resoneeriva piirkonna esinemine.

Selleks, et juhtida mahtvuslikku reaktantsi ilma resoneeriva piirkonnata võeti kasutusele pidevalt reguleeritav jadakondensaator, mille juhtimiseks kasutatakse GTO türistorit. Joonisel 2.12. on näidatud GTO türistoriga kontrollitavat jadakondensaatorit, edaspidi kutsutakse seda paiskontrollitavaks jadakondensaatoriks (GCSC), sest seda võib juhtida ka teiste omakommutatsiooniga lülititega. [18]



Joonis 2.12. Paiskontrollitav jadakondensaator [18]

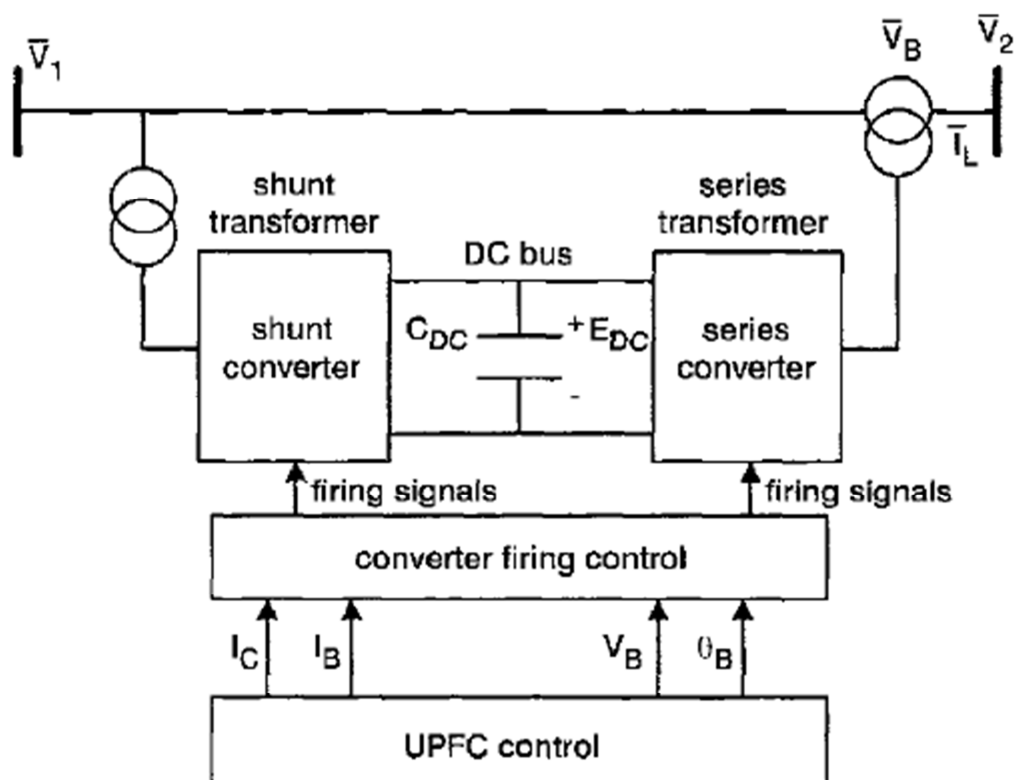
GCSC skeem koosneb kondensaatorist ja kahest antiparalleelselt ühendatud omakommutatsiooniga lülitist. Lülitid opereerivad vahelduvpingega ja seega peavad nad võimelised olema blokeerima nii positiivseid, kui ka negatiivseid pinge väärtusi ning kontrollima voolu mõlemas suunas.

Kui lülitid on sisselülitatud asendis, siis kondensaator on šunteeritud ning ta ei oma kompenseerivat mõju. Kui lülitid on välja lülitatud, siis on kondensaator täies mahus skeemi ühendatud. Kui lülitid on juhtivas asendis ja nad lülitatakse välja antud blokeerimismuruga γ , mida mõõdetakse alates liinivoolu nullpunkti läbimisest, juures, siis kondensaatori pinge U_c tekib seadet läbiva liinivoolu tulemusel. Kui kondensaatori pinge läbib nullpunkti, siis lülitid lülitatakse taas sisse ja välja, kui saavutatakse blokeerimismurk γ . Sellise lülitamisviisiga peab olema kindel, et lüliteid lülitatakse ainult kondensaatoril oleva pinge nullpunktis. [18]

GCSC eeliseks TCSC ees ongi tema blokeerimismuruga muutmise võimekus ja paindlikkus. Blokeerimismurk 90° tähendab, et kondensaator on täies mahus võrguga liidetud ja 180° tähendab, et kondensaator on šunteeritud ja kompenseerimist ei toimu.

2.10. Unifitseeritud võimsuste jagunemise kontrollid

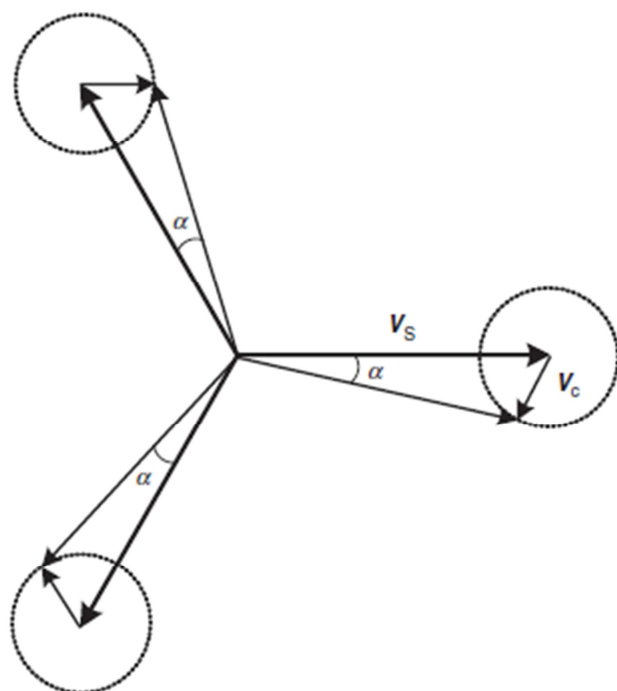
Unifitseeritud võimsuste jagunemise kontrollid (UPFC) on teistest siin toodud seadmetest täiuslikum ülekandeliini kompensator, mille skeemi kujutatakse joonisel 2.13.. Seda seadet võib kujutada kui STATCOMi ja SSSCd, millel on ühine alalisvoolu ühendus. Energia, mida alalisvoolu seadmes salvestatakse on enamasti väike ning põikikonverter peab võrgust tarbima või võrku genereerima sama palju aktiivvõimsust, kui palju jadakonverter võrku genereerib või sealt tarbib. Kui seade selliselt ei tööta, siis alalispinge võib võrreldes nimipingega tõusta või langeda sõltuvalt netovõimsusest, mida mõlema muunduri poolt võrku antakse või võrgust võetakse. Tema eeliseks on seadme võimekus kontrollida reaktiivenergiat jada- ja põikikonverteris eraldi ja seega saavutada märkimisväärne paindlikkus võimsusvoo kontrollimises. [11]



Joonis 2.13. UPFC skeem [21]

Joonisel 2.14. toodud faasordiagrammist on näha, et UPFC on võimeline tootma ükskõik, millist pinge faasorit, mis mahub kriipsjoone sisse. Maksimaalne ringi raadius on piiratud jadakonverteri pingetaluvus piiridega. See, et U_C tööpiirkond on ring, on üks tema suurimaid eeliseid türistoride baasil töötava faasinihuti ees. Kui UPFC genereerib võrku või tarbib võrgust reaktiivvõimsust süsteemiga paralleelselt, siis pinge U_S suurus saab vastavalt tõsta

või langetada. See lisa võimalus suurendab pinget U_C töö piirkonda veelgi. Muidugi see omadus on võimalik ainult siis kui pingesallikaga U_S on jadamisi ühendatud induktiivne impedants, mis tavaliselt ka nii on. [14]



Joonis 2.14. UPFC-ga süsteemi faasordiagramm [14]

UPFC põikkompeensaatorit kasutatakse tavaliselt kahel eesmärgil. Esiteks kontrollitakse temaga pinget hoidmiseks ühenduspunkti reaktiivvõimsust. Teiseks kontrollitakse temaga sarnaselt alalisvooluühenduse pinget kontrollile aktiivvõimsust. Nende põhieesmärkide kõrval on tal teiste seadmete ees veel palju teisigi eeliseid, sest ta on võimeline muutma kõiki ülekande parameetreid. Tema põikkompeenseerimise kontrollimise meetod võib olla samasugune nagu STATCOMil. Pikikompeenseerimise kontrollimise meetod võib olla samasugune nagu SSSCI, kuid nende erinevuseks on see, et nüüd kontrollitakse nii aktiiv- kui ka reaktiivvõimsust. Mõistagi mõjutab aktiivvõimsus, mida kontrollitakse jadakompensaatoris, kondensaatori pinget, mida peab tasakaalustama põikkompeensaator [17].

3. FACTS seadmete võrdlus ja kasutus

Peatükis 1 on kirjeldatud erinevate kompensatorseadmete ja ühendamisviiside mõjusid ning peatükis 2 erinevaid FACTS seadmeid. Neist seadmetest kolm on ennast teistest paremini tõestanud ja leiavad laialdast kasutust: türistoride baasil TCSC, väljalülitamisvõimekusega jõupooljuhtidel põhinev STATCOM ning kõige pikema ajaliselt on kasutusel olnud türistoride baasil SVC. Samuti loetakse neid kolme kõige kuluefektiivsemaks [15]. Tabelis 3.1. on toodud kokkuvõtlik tabel FACTS kontrollieritest ning nende võimalikest funktsioonidest. Töö eesmärk on vaadata vaid aeglaselt mööduvaid protsesse ja seega analüüsis me kõiki neid võimekusi ei vaatle. Töö skooopi kuuluvad neist võimekustest pinge kontroll ja reaktiivvõimsuse kompenseerimine.

Tabel 3.1. Erinevate FACTS seadmete võimekuse võrdlus [17]

Kontroller	Pinge kontroll	Dünaamiline stabiilsus	Võnkumiste summutamine	Reaktiivvõimsuse kompenseerimine	Võimsusvoogude kontrollimine	Subsünkroonresonantsi leevendus
SSSC	X	X	X	X	X	X
STATCOM	X	X	X	X		
SVC	X	X	X	X		
TCPAR		X	X		X	X
TCSC	X	X	X		X	X
TSSC	X	X	X		X	
GCSC	X	X	X		X	X
UPFC	X	X	X	X	X	X

Joonisel 3.1. on toodud erinevate FACTS seadmete mõju ulatus süsteemile.

	Load Flow Control	Voltage Control	Transient Stability	Oscillation Damping	
SVC/STATCOM Static Var Compensator/STATCOM					Influence: small medium strong
TCSC Thyristor Controlled Series Compensator					
SSSC Static Synchronous Series Compensator					
TCPAR Thyristor Controlled Phase Angle Regulator					
UPFC Unified Power Flow Controller					

Joonis 3.1 Erinevate FACTS seadmete mõju ulatus vahelduvvoolu süsteemile [6]

Tabelis 3.2. on toodud erinevate kompenseerimisseadmete orienteeruvad maksumused. Hindade aluseks on erinevad EPRI raportid ning konsultatsioonid FACTS seadmete tarnijatega. UPFC hind on võrdne kahe STATCOMi hinnaga – üks on ühendatud jadamisi ja teine paralleelselt. Konventsionaalsete piki- ja põikkondensaatorite ning traditsioonilise faasinurga regulaatoriga (PAR) transformaatori hind on toodud võrdluseks.

Tabel 3.2. Kompenseerimisseadmete orienteeruvad maksumused [19, 22]

Seadme nimetus	Hind, €/kVA, €/kvar
Põikkondensaator	5,76
Šuntreaktor	5,76
Pikikondensaator	14,4
Konventsionaalne PAR transformaator	14,4
SVC (kontrollitav osa)	28,8
TCSC (kontrollitav osa)	28,8
TCPAR	36
SSSC/UPFC jadamisi ühendatud osa (kontrollitav osa)	36
STATCOM/UPFC põiki ühendatud osa (kontrollitav osa)	36

Tabelis 3.3. on toodud -125/+425 MVar SVC projekti seadmete maksumused Ameerika Ühendriikides, Maineis. Chester SVC jaam liideti 345kV võrguga ja oli osa New England II HVDCi projektist. Tegu oli võtmed kätte projektiga, millest 14% moodustasid kaudsed kulud ning 86% maksti SVC võtmed kätte projekti tarnijale. [22]

Tabel 3.3. Chester SVC kulude läbilõige [22]

Elemendi kirjeldus	Protsent kogumaksumusest
Türistorventiilid	16,39
345/42 kV transformaatorid	19,82
AC jaotla seadmed	22,48
Omatarbe seadmed	5,47
Kontroll- ja kaitseseadmed	8,47
Krundi maksumus	23,04
AC ülekandeliini väljaviik	2,88
AC võrgu kindlustamine	1,45
Kokku	100

3.1. Sarnase kasutusega tehnoloogiate võrdlus

Selles alapeatükis võrdleme töös ära märgitud ja sarnasel eesmärgil kasutust leidvaid FACTS seadmeid. [14] [17] [18]

3.1.1. SVC vs STATCOM

STATCOM lubab võrreldes SVC-ga pakkuda oluliselt suuremat reaktiivvõimsuse tuge. Eriti tuleb vahe välja nimipingest oluliselt madalamatel pingetel. STATCOMi teiseks suureks plussiks on võimekus pakkuda ajutist liigvoolu nii mahtuvuslikus kui induktiivses töörežiimis. Need omadused kombineeritud tema kiire tagasisidega teevad STATCOMist oluliselt efektiivsema seadme kui seda on SVC. Niisiis, suudab STATCOM oluliselt kiiremini tasakaalustada siirdeprotsesse.

3.1.2. TCSC vs TSSC vs GCSC

Suurim TSSC ja TCSC vahe on see, et TSSC on lihtsam kompenseerimisseade, mis koosneb jadamisi ühendatud kondensaatoritest, mida saab ükshaaval liini reaktantsi kontrollimiseks sisse ja välja lülitada. TCSC on oluliselt paindlikum. Temaga on püsivalt võimalik kontrollida liini reaktantsi nii mahtuvuslikus, kui ka induktiivses regioonis. Veelgi enam TCSC on väga efektiivne subsünkroon resonantsi leevendamises ning TSSC seda ei ole. TCSC nõrgaks küljeks on resoneeriva piirkonna esinemine. GCSC eeliseks TCSC ees on selle resoneeriva piirkonna puudumine ning võimekus muuta blokeerimisnurka. GCSCl puudub samuti võimekus töötada induktiivses režiimis.

3.1.3. UPFC vs TCPAR

UPFC on kombinatsioon STATCOMist ja SSSCst, millel on ühine alalisvoolu ühendus, mis lubab kahesuunalist võimsus vahetust SSSC ja STATCOMi vahel. UPFC on võimeline kontrollima ülekandeliini pinget, impedantsi, nurka ning seega ka aktiiv- ning reaktiivvõimsust liinis. UPFC on võimeline pakkuma ka põikireguleerimist. TCPAR on võimeline ainult nurka ja seega ka aktiivvõimsusvoogu liinis kontrollima.

4. Eesti elektrisüsteem aastal 2014

Lisas 2 on Eesti elektrisüsteemi kaartskeem 2013. aasta seisuga [5]. Kaardile on kantud ka mitmed olulised planeeritud investeeringud ning sealt on võimalik saada ülevaade töös mainitud alajaamadest ning ülekandeliinidest.

2014. aasta seisuga on Eesti elektrisüsteemis 17 šuntreaktorit ning 8 kondensaatorit. Lisas 1 on toodud nende seadmete loetelu koos nende suuruste ja asukohtadega. Lisaks neile staatilistele seadmetele on reaktiivvõimsuse genereerimise või tarbimise võimekus ka enamikel süsteemiga liidetud genereerivatel üksustel. Samuti on võimalik reaktiivenergiat toota ja neelata ka Estlink 1-ga. Estlink 1 reguleerimise võimekus sõltub tema ülekantavast aktiivkoormusest ning suunast. Maksimaalselt on alalisvooluühendusega võimalik võrku anda ning võrgust võtta reaktiivvõimsust kuni 125 Mvar-i. Kui Estlink 1 on täiskoormatud, siis on ta võimeline reguleerima vaid pluss/miinus 10 Mvar-i. [23]

Kompenseerimise juures tuleb silmas pidada, et elektrivõrk ise on koormusest sõltuv ebalinearne reaktiivvõimsuse tarbija. Madala koormuse juures toodavad ülekande liinid reaktiivvõimsust, seda kutsutakse Ferranti efektiks. Suure koormuse all olevad liinid tarbivad reaktiivvõimsust. [10]

4.1. Lähiajaloo statistiline ülevaade reaktiivenergia kompenseerimisest põhivõrgus

Hetke kompenseerimisseadmete piisavuse analüüsimiseks on valitud üks ekstreemsem suvekuu, 2013. aasta juuli ning üks reaaljale lähedane kuu 2014. aasta aprill. 2013. Aasta juulikuul olid põhivõrgu reaktiivenergia tarbimise võimekusega seadmetest hoolduses kaks reaktorit Arukülas ja üks Paides. Seega oli juhtimiskeskuse dispetšeritel võimalik kasutada 14 reaktorit. Kondensaatorpatareisid reeglina suvel ei kasutata, sest vastupidiselt mitmetele lääne ülekande võrkudele [24] [25], on Eesti elektrisüsteemis probleemiks mitte tugevalt koormatud liinidel tarbitava energia kompenseerimine vaid nõrgalt koormatud võrgu toodetud reaktiivenergia tarbimine. Seda viimast fakti näitas ka kompenseerimisseadmete kasutamise statistika.

Juuli 31-st päevast olid kõik töökorras reaktorid öistes režiimides sisse lülitatud 20-l. Kokku olid põhivõrgu omanduses olevad kõik staatilised reaktiivvõimsuse tarbijad sisse lülitatud 19% ajast. Lisaks selle, et töös olid kõik võimalikud seadmed, pidasid juhtimiskeskuse

operatiivtöötajad vajalikuks lülitada välja ühe nõrgalt koormatud 330kV liinidest 32% ajast. Põhjuseks, miks ülekandeliin kauem väljas oli, on Tsirguliina reaktori nõrk mõju Põhja-Eesti pingetele. Kui vaadelda sama statistikat, ilma Tsirguliina reaktorita, siis olid kõik teised põhivõrgu reaktorid maksimaalselt kasutuses ja 330 kV liin väljas umbes võrdse aja vältel. [26]

Tänaasel päeval võrreldes antud juuliga on lahendatud probleemid antud reaktoritega, võrguga on liitunud Estlink 2 ning AS Elering on omandanud alalisvooluühenduse Estlink 1. Viimane fakt on oluline põhjusel, et enne omandi staatuse saavutamist küsis kaabli omanik kompenseerimisevõimekuse kasutamise eest tasu. Rahaliselt kompensatsioon maksab ka põhivõrk kõigile elektriijaamadele, kelle pinge reguleerimise võimekust võrgu parameetrite hoidmiseks kasutatakse. Samuti peavad aga reaktiivvõimsuse voogude põhjustajad maksma võrguettevõtja jaoks juhtimatute võrku sisenevate või võrgust väljuvate reaktiivenergia koguste eest. [27]

Reaalsema pildi kompenseerimisallikate vajadusest saamiseks vaadeldi ka 2014. aasta aprilli. Antud kuu jooksul olid pikemalt hoolduses 3 reaktorit: üks Arukülas, üks Sindis ning alates 18. aprillist kuni kuu lõpuni üks Tartus. Lisaks oli alates 14. aprillist kuni 30. aprillini hoolduses üks Tallinn – Narva suunaline 330kV liin. Antud ülekandeliini väljasolek põhjustas võrgu poolt genereeritava reaktiivenergia vähenemist. [26]

Samuti vähendas pinge probleemide esinemist Estlink 2 kasutusele võtmine ning alalisvooluühenduste koormamise loogika, kus kadude vähendamise eesmärgil koormatakse eelisjärjekorras Estlink 2-te ning alles siis vajaduse korral Estlink 1-te. Sellise konfiguratsiooni eeliseks on ka see, et Estlink 1-te on vajaduse korral võimalik kasutada maksimaalsel määral reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks. Siin juures on oluline aga märkida, et juhul kui turutulemuste järgi on Estlink 1 koormavaba ehk koormus on 0 MW, siis alalisvoolu ühendus blokeeritakse ning sellises režiimis toodab konverterjaam Harku alajaama 330kV lattidele 40 Mvar-i reaktiivvõimsust ehk mõjub just kui täiendava kondensaatorina. Juhul kui Soome või Eesti põhivõrgu operaator soovib ühenduse deblokeerida, siis katab soovija ka kõik kadudega tekkivad kulud.

Aprilli kuu statistika põhjal ei pidanud juhtimiskeskuse operatiivtöötajad kordagi ühtegi täiendavat 330kV ühendust pinge probleemide tõttu välja viima. Samuti ei kasutatud kordagi alalisvooluühenduse Estlink 1 reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimekust. Kuu alguses oli töökorras 15 reaktorit ning alates 14. aprillist 14 reaktorit. Maksimaalse reaktorite

koosseisuga töötati öistes režiimides 18 ööpäeval 30-st. Kõik reaktorit olid võrku ühendatud 18% ajast. [26]

Kuigi see kahe kuu kohta tehtud statistika annab mõningase ülevaate Eesti elektrisüsteemi pinge hoidmise väljakutsetest tänasel päeval, siis antud lihtne statistika ei pruugi hästi kirjeldada olukorda elektrisüsteemis paariteist aasta pärast. Töö eesmärgiks on vaadelda FACTS seadmete kasutamise võimalikkust ka tuleviku perspektiivis. Selleks, et saada adekvaatsemat pilti kasutatakse analüüsi tegemiseks põhivõrgu PSS/E operatiivmudelit, millele on sisse viidud mõningad perspektiivsed muudatused. Nimetatud muutuseid on lähemalt kirjeldatud peatükis 5.

4.2. Põhivõrgu nõuded püsitalitlusele

Reaktiivvõimsuse kompenseerimata jätmine võib endaga kaasa tuua lubamatuid pingetasemeid. Alapinge mis on enamasti seotud ülekandevõrgu tugeva koormatusega ja/või genereerimise puudujäägiga, võib põhjustada koormuste, eriti induktsioonmootorite, töö halvenemist. Tugevalt koormatud süsteemi alapinge võib olla märgiks, et lähenetakse staatilise stabiilsuse kriitilisele piirile. Ülepinge ohtlikkus seisneb lühiste tekkimise tõenäosuse suurenemises ning isolatsiooni rikkumises. Samuti võib see põhjustada transformatorite küllastumist ja sellega seonduvalt tugevaid harmoonikute rikkaid voole. Kolmandaks ohuks on piisava mahtuvuse korral süsteemis ferresonantsi ning harmoonikute resonantsi tekkimine. [10]

Pikikompenseerimist hetkel Eesti põhivõrgus ei kasutata. Pikikompenseerimise eesmärgiks on vähendada osa liini reaktantsist. Pikikondensaatori ülekandeliinil kasutamine suurendab maksimaalset ülekantavat võimsust, vähendab võimsusnurka ja suurendab näivkoormust. Pikikompenseerimise puhul saab ümber suunata paralleelsetel liinidel ülekantavat koormust [10]. Pikikompenseerimisele me antud töös rohkem tähelepanu ei pööra.

Põhivõrgu pingete hoidmisel tuleb lähtuda mitmetest nõuetest. Eristatakse normaaltalitlust ning häiringujärgset talitlust. Häiringujärgses olukorras võib pinget lühiajaliselt väljuda normaaltalitluse pingegraafikus etteantud talitluslikest- ning kestvalt lubatud pingepiiridest. Esiteks peab Elering tagama oma klientidele 110 kV võrgu jõutrafode alampinge poolel lepingus määratud suhteliselt kitsastes vahemikes asuva pingeniivo. Selle põhjuseks on asjaolu, et enamikel klientide 6-35 kV trafodel ei ole võimalust operatiivseks või automaatseks pinget reguleerimiseks. Teiseks ei tohi normaaltalitluses 110 kV nimipingega elementide pinget langeda alla 105 kV ning 330 kV nimipingega elementide pinget alla 330

kV, ülemine pingeniivo piir on vastavalt 123 kV ja 362 kV. Häiringu järgses olukorras ei tohi staatilise stabiilsuse tagamiseks 330 kV pinge langeda alajaamade (välja arvatud Tartu alajaam) lattidel alla 300 kV, elektriyaamade lattidel alla 330 kV ning Tartu alajaamas alla 310 kV. Neljandaks tuleb jälgida, et häiringu järgselt ei saavutaks pinged 110 kV võrgus koormuse vähendamise automaatika sätete lähedasi väärtusi. Samuti on lubatud häiringu tekkimise järgses olukorras Eleringi 110 kV ja 330 kV elektrivõrgus lubatud vastavalt 15 ning 20 minutine ajutine ülepinge. Maksimaalne ajutise ülepinge suurus on 110 kV võrgus 125 kV ja 330 kV võrgus 370 kV. [28]

Põhivõrgu seadmete töö juhtimisel ja planeerimisel peab silmas neile objektidele määratud talituslikke piiranguid. Nende piirangute mitte jälgimine võib põhjustada seadmetele püsivaid kahjustusi. Eleringile kuuluvate ülekandevõrgu objektide määratud talituslikud piirangud arvestavad kõigile objekti osadele lubatud koormusi, primaarseadmete nimiväärtusi ning releekaitse rakendumise sätteid. Ülekandeliinidele ja kaablitele on määratud välisõhu temperatuurist sõltuvad kestvalt lubatud ja avariiliselt lubatud lühiajalised koormused. Samuti on samalaadsed piirangud määratud transformaatoritele. [28]

Veel peab Elering lähtuma võrgueeskirjas sätestatust. Seal on määratud seaduse järgi süsteemihaldurile esitatavad talituslikud nõuded. Planeerimise faasis lähtutakse piirkondi ühendavate koormussõlmede tööst välja viimisel paragrahvis 6 lõikes 4 sätestatust: „Ühenduse aktiivvõimsuse järgi arvutatav staatilise stabiilsuse varutegur peab tavatalitluses olema vähemalt 20% ja avariijärgses talitluses vähemalt 8%.“ [29] Seega arvestatakse, et piirkonna jaoks olulise elemendi koormus ühe tõenäolise häiringu esinemisel ei ületaks häiringu järgselt 92% lubatud koormusest. Juhul kui viimase tingimuse vastu eksitakse, siis tehakse hooldustööde kavas vajalikud muudatused või koostatakse talitlust korrigeeriv tegevuskava. Staatiline stabiilsus on defineeritud kui elektrisüsteemi (või piirkonna) võime jätkata sünkroonset tööd pärast talitluse väikseid häiringuid. [4]

5. Problemaatilised seisundid

Analüüsi aluseks on võetud Siemens PTI PSS/E 33 [7] tarkvaras koostatud sõlmedel baseeruv off-line võrgu mudel, mida kasutatakse igapäevaselt operatiivsel planeerimisel, ja lisatud sinna suuremad Eleringi kinnitatud investeringu projektid, mis valmivad enne 2019. aasta algust.

Eleringi toimetises „Eesti Elektrisüsteemi Varustuskindluse Aruanne 2013“ [9] on kirjeldatud olulisemad investeringud Eesti põhivõrku. 2019. aastaks on plaanipäraselt valmis Tartu – Viljandi – Sindi 330 kV ülekandeliin. Samuti on ehitatud mandri ja Muhu vaheline 110 kV merekaabel, mis ühendab Võiküla ja Virtsu alajaamasid. Virtsu alajaama on lisaks veel paigaldatud 30 Mvar-ne reaktor. Ka Tusti Orissaare vahele on lisatud üks 110 kV kaabel. Parandatud on Tallinna töökindlust asendades vanu õhuliine maakaablitega. Vahetatud on Veskimetsa-Endla, Veskimetsa-Kadaka, Harku-Veskimetsa; Endla-Järve, Veskimetsa-Järve, Veskimetsa-Kopli ja Ida-Ranna alajaamade vahelised ühendused uute maakaablitega. [30]

Viimaste aastate statistika on näidanud, et üldine elektritarbimine näitab kasvutrendi, ent elektrisüsteemi tipukoormused viimasel seitsmel aastal püsinud sisuliselt muutumatult, jäädes 1500 ja 1600 MW vahele. 2013. aasta Eleringi varustuskindluse aruandes on prognoositud 2018. aasta tipukoormuseks 1595 MW. Miinimum koormuseks võtame 2013. aasta väikseima koormuse, mis esines 07. juuli varahommikul ja milleks oli 479 MW. [9]

Selleks, et uurida, kas ja kuidas oleks mõistlik kompenseerimisseadmeid elektrivõrgus rakendada koostame kaks ekstreemset elektrisüsteemi režiimi: ülepinge stsenaariumi ning alapinge stsenaariumi. Mõlemad režiimid on moodustatud võttes aluseks eeltoodud skeemi muudatusi.

5.1. Ülepinge stsenaarium

Ülepinge stsenaariumi aluseks võtame teadmise, et nõrgalt koormatud võrguelemendid toodavad elektrisüsteemi reaktiivvõimsust. Seega kasutame modelleerimisel Eesti elektrisüsteemi tarbimismiinimumi, milleks on 479 MW ja eeldame, et ükski vahelduvvooluvõrgu element hoolduses ei ole.

Lisaks vähendame reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimekusega seadmete arvu. Seega eeldame, et turutingimustes ei pääsenud ükski Narva elektrijaamade müügipakkumine turule ning modelleerimise tarvis eeldame, et muud kitsendused puuduvad ning Eesti ja Balti elektrijaamade tootmine on 0 MW. Samuti on tuuleparkide tootmine nullis ja ka nendega ei ole võimalik reaktiivvõimsust tarbida. Veel on Estlink 1 maksimaalses import režiimis ehk Soome Eesti suunaline ülekanne on 342 MW, mis tähendab, et tema kompenseerimise võimekus on maksimaalselt 10 Mvar-i. Kuna alalisvooluühendus Estlink 2-te koormatakse kadude vähendamise eesmärgil enne Estlink 1-te, siis selline režiim on võimalik vaid siis, kui ka Estlink 2 on maksimaalses import režiimis ehk 658 MW suunaga Soomest Eestisse. [30] Eesti ülejääk on tarbitud Lätis ja Leedus. Eesti elektrisüsteemi vahelduvvoolu saldo on sellises režiimis + 504 MW.

Selline režiim võib tekkida vaid Põhjamaade väga odavate elektrihindade juures ning seega võib eeldada, et ka Rootsi ja Leedu vaheline 700 MW suurune alalisvooluühendus NordBalt on täiskoormatud [9]. See omakorda põhjustab Baltimaades ülejääki. Eeldame, et see ülejääk eksporditakse Leedu-Poola vahelise alalisvooluühenduse LitPol kaudu Poola. Viimati nimetatud alalisvooluühendused meie mudelist puuduvad, ent nende jaoks ei ole ka suurt vajadust, sest põhiline mõju meie elektrisüsteemile tuleneb meid läbivatest elektrivoogudest, mis omakorda sõltuvad BRELLi ringis asuvate riikide saldodest, mille paika panemist meie mudel ka võimaldab.

5.1.1. Modelleerimine normaalskeemiga

Piiramaks pinget 330 kV võrgus, seame 330/110 kV transformaatoreid 110 kV nominaalpingeks 121 kV. Kuna me vaatleme ainult aeglaselt mööduvaid protsesse, siis lubame modelleerides programmil juhtida nii trafoastmeid, kui ka staatilisi kompenseerimiseadmeid. Esialgu eeldame, et kõik lisas 1 toodud 17 šuntreaktorit on meil töökorras ning lisaks neile on võrguga liidetud ka šuntreaktor Virtsusse. Nimetame selliselt modelleeritud skeemi, kus dispetšer ei ole ühtegi täiendavat tegevust pinge maha saamiseks teinud „Katse 1“. Tabelis 5.1. on toodud mõnede Eesti elektrisüsteemi kriitilisemate 330kV

alajaamade pinged. Esimeses režiimis on näha, et nii mõnegi sõlmpunkti pinge on üle lubatu. Järgnevalt modelleerime olukorra, kus dispetšer reageerib ja lülitab välja kõige rohkem reaktiivvõimsust genereeriva elektrisüsteemiharu ehk liini, mis ühendab Aruküla ja Balti alajaamu ning mille kogupikkuseks on 210 kilomeetrit. Viitame eelnevalt toodud olukorrale nimega „Katse 2“. Antud dispetšeri tegevusest oli küll mõnevõrra abi, ent enamikes meie jälgitavates alajaamades ületab pinge endiselt lubatud väärtusi. Viime läbi „Katse 3“, kus dispetšer lülitab välja uue 169 km pikkuse Sindit ja Tartut ühendava liini. Ka see ei ole piisav, et viia vaadeldud pinged alla kõrgeima püsivalt lubatava pinge, milleks on 362 kV.

Tabel 5.1. 330kV sõlmpunktide pinged

Katse nr.	Sõlmpunkt							
	Eesti EJ	Tartu AJ	Sindi AJ	Paide AJ	Harku AJ	Kiisa AJ	Aruküla AJ	Püssi AJ
Katse 1	364,5 kV	365,4 kV	365,1 kV	365,1 kV	364,5 kV	365,0 kV	363,0 kV	365,4 kV
Katse 2	362,5 kV	364,1 kV	363,6 kV	362,4 kV	357,9 kV	360,0 kV	356,5 kV	363,6 kV
Katse 3	361,3 kV	362,0 kV	359,4 kV	360,6 kV	356,2 kV	358,3 kV	354,2 kV	362,4 kV
Katse 4	360,6kV	361,6 kV	358,7 kV	359,9 kV	355,5 kV	357,6 kV	353,5 kV	361,3 kV

Viime läbi ka „Katse 4“, kus dispetšer tõstab kõrgema pingega alajaamas ehk Püssi alajaamas transformaatoreid astmeid ning seeläbi 110 kV pinget Püssis. See eemaldab meil süsteemis ülepinge ja lubatav režiim on saavutatud.

Tabelis 5.2. on toodud 110 kV ning 330 kV liinide toodetud ning tarbitud reaktiivvõimsus ja tarbijate ning reaktorite poolt tarbitud reaktiivvõimsus Mvarides. Samuti on toodud nimetatud tarbitud ning toodetud reaktiivvõimsuse koguste vahe. Lisaks tabelis märgitule toodavad võrku või tarbivad võrgust reaktiivvõimsust riikidevahelised liinid, elektrijaamad ning alalisvooluühendused. Seega ei anna tabel täielikku pilti vaid esitab erinevate võrguosade poolt toodetava või tarbitava reaktiivvõimsuse muutust.

Tabel 5.2. Reaktiivvõimsuse saldo katsete vältel

Katse nr.	Reaktiivvõimsuse tootmine		Reaktiivvõimsuse tarbimine			Vahe
	110kV liinid	330 kV liinid	Sisemaine võrk	Tarbijad	Reaktorid	
Katse 1	360	730	120	70	700	200
Katse 2	350	610	120	70	700	70
Katse 3	350	540	120	70	700	0
Katse 4	340	530	120	70	700	-20

Edaspidi modelleerime n-1 järgseid olukordi, kus üks element on hooldusesse viidud ning teine lülitub teadmata põhjusel välja. Kirjeldamiseks paremini püsitalitlust eeldame, et automaatsed pingeregulaatorid on töötanud ning juhtimiskeskuse operatiivjuht on

transformaatorite astmed viinud vastavusse olukordades kirjeldatud pingetega. Seega vaatame hetke umbes 5-10 minutit peale häiringut. Põhiliselt on meil antud töös hoolduses olevataks ning välja kukkuvateks elementideks staatilised reaktiivvõimsuse kompenseermise allikad nagu reaktorid või kondensaatorid.

5.1.2. Modelleerimine Tartu n-1 olukorras

Järgnevalt kujutame ette n-1 olukorda, kus Tartu 50 Mvar-ine reaktor R1 on hoolduses ning avariiliselt lülitub välja teine Tartu 50 Mvar-ine reaktor R2. Eeldame, et dispetšer kordab kõiki punktis 5.1.1. kirjeldatud tegevusi, kaasa arvatud Püssi alajaama 110 kV pinge tõstmine. Tabelis 5.3. on toodud erinevate Eesti sõlmpunktide pinged. Kutsume antud algrežiimi nimega „Tartu 1“. Modelleeritavas olukorras on Eesti-Läti ristlõikel võimsusvoog 206 MW suunaga Eestist Läti ning Valmiera alajaama pinge 361,2 kV. Kutsume „Tartu 2“ olukorda, kus oleme viinud kõik 330/110 kV transformaatorite sekundaarpoole pinged vahemikku 121-122,5 kV. Näha on, et kuigi see vähendab meie 330 kV sõlmpunktide pingeid, siis täielikult ta meie võrgu ülepinge ei eemalda. Valmiera alajaama pingeks sellisel juhul saab 360,5 kV.

Tabel 5.3. Sõlmpunktide pinged „Tartu“ olukorras

Katse nr.	Sõlmpunkt							
	Eesti EJ	Tartu AJ	Sindi AJ	Paide AJ	Harku AJ	Kiisa AJ	Aruküla AJ	Püssi AJ
Tartu 1	363,3 kV	369,5 kV	360,8 kV	362,2 kV	360,4 kV	361,4 kV	357,9 kV	364,1 kV
Tartu 2	361,2 kV	368,1 kV	357,5 kV	359,6 kV	358,9 kV	359,7 kV	356,7 kV	361,1 kV
Tartu 3	359,9 kV	367,7 kV	354,1 kV	355,8 kV	353,1 kV	354,2 kV	351,4 kV	359,5 kV

Täiendav 330 kV Tallinn-Narva suunaliste ühenduste välja viimine ei ole mõeldav, sest vastasel juhul katkeks n-1 olukorras 330 kV side Narva ja Tallinna vahel. Lisaks näitab modelleerimine, et antud skeemis töösse jäänud pikim ida-lääne suunaline liin ei oma ka piisavat efekti, et eemaldada kõigis vaadeldavates sõlmedes ülepinge. Põhja-lõuna suunaliste liinide väljaviimisega kaasnevad täiendavad piirangud ning nende väljavõtmine ilma BRELLi koostööpartneritelt luba saamata ei ole võimalik. Samuti on nende ühenduste võimsusvood suuresti sõltuvad Ühendsüsteemi tarbimistest ning genereerimistest ja seega Eesti elektrisüsteemi juhtimiskeskuse jaoks mõnevõrra ootamatud ning kontrolli alt väljas.

Päästva tegevusena võib operatiivtöötaja tekitada vaba ruumi Estlink 1-le, et oleks võimalik alalisvoolühendusel tarvitada maksimaalsel määral reaktiivvõimsust. Nimetame selle tegevuse järgset olukorda nimega „Tartu 3“. 125 Mvar-ine kompenseerimine on võimalik, kui Estlink 1-l on maksimaalselt 150 MW suurune Soome-Eesti suunaline koormus. Seega peab

tegema dispetšer Soomes allareguleerimist 192 MW ning Lätis ja Leedus summaarselt samas mahus ülesreguleerimist. Kogu see tegevus võib tähendada, aga märkimisväärset kulu, sest nagu varem kirjeldatud, võib antud režiim tekkida vaid suhteliselt odavate põhjamaade elektrienergia hindade juures. See omakorda tähendab, et allareguleerimisest saadav tulu ei saa olla kuigi suur. Samas suurte mahtude ostmine Läti ja Leedu turult, kus suure tõenäosusega käivitatakse nõutav võimsus soojuselektrijaamades, võib hind osutada üsnagi kõrgeks. Samuti on näha, et antud tegevus viis küll Põhja- ja Lääne-Eesti pinged lubatud piiridesse, siis väga suurt mõju ta Tartu pingele ei omanud, ka Valmiera alajaama pinge oluliselt ei muutunud, jäädes 360,4 kV.

Antud režiimis on reaktiivvõimsuse tarbimise allikad Eesti elektrisüsteemis ammendatud ning on näha, et antud režiimi korral pole võimalik ilma töökindlust ohverdamata tagada lubatud piiridesse jäävaid 330 kV pingeid. On näha, et Eesti elektrisüsteemis võiks kaaluda täiendavate reaktiivvõimsuse kompenseerimise allikate kasutusele võttu.

5.1.3. Täiendavad algseisud

Selleks, et vaadelda milliseid seadmeid ja kuhu võiks rakendada moodustame veel 4 algolukorda. Kõikide puhul eeldame, et 110 kV võrgu pinge on „Tartu 2“ režiimiga sarnaselt tõstetud vahemikku 121-122,5 kV ning välja on viidud Tartu ja Sindi alajaamade ning Balti ja Aruküla alajaamade vahelised liinid. Estlink 1-ga täiendavat reguleerimist ei ole tehtud ja seega on temaga võimalik süsteemist tarbida 10 Mvar-i reaktiivvõimsust. Esiteks vaatleme olukorda, kus erinevatel põhjustel on meil väljas kaks Püssi reaktorit. Viitame sellele režiimile nimega „Püssi“. Järgnevalt vaatleme skeemi, kus on väljas kaks Paide reaktorit. Seda olukorda nimetame „Paide“. Kolmandal režiimile viitame nimega „Aruküla“ ja eeldame, et seal on välja lülitatud kaks Aruküla alajaamaga liidetud reaktorit. Viimase vaadeldava olukorra nimeks saab „Kiisa-Paide“. Sellel režiimil eeldame, et nii Kiisa kui ka Paide alajaamast on välja lülitatud suuremad 50 Mvar-ised reaktorid.

Tabel 5.4. Sõlmpunktide pinged täiendavates talitlustes

Katse nr.	Sõlmpunkt							
	Eesti EJ	Tartu AJ	Sindi AJ	Paide AJ	Harku AJ	Kiisa AJ	Aruküla AJ	Püssi AJ
Püssi	361,1 kV	361,7 kV	355,8 kV	358 kV	357,3 kV	358,6 kV	356,5 kV	362,5 kV
Paide	360,8 kV	361,8 kV	359,2 kV	361,4 kV	358,8 kV	360,1 kV	358,0 kV	361,3 kV
Aruküla	360,9 kV	361,5 kV	359,1 kV	361,6 kV	364 kV	363,6 kV	365,1 kV	361,5 kV
Kiisa-Paide	361,6 kV	362,1 kV	360,4 kV	362,9 kV	362,5 kV	363,4 kV	361,2 kV	362,4 kV

Kirjeldatud talitluste modelleerimise tulemused on tabelis 5.4.. On näha, et mitmed n-1 olukorrad põhjustavad meil erinevates 330 kV võrgu sõlmpunktides ülepinget. Töö kuuendas osas proovime erinevate kompenseerimisseadmetega viia võrgupinge lubatud vahemikesse.

5.2. Alapinge stsenaariumi

Alapinge stsenaariumi saavutamiseks tekitame talitluse, kus elektrivõrgu elemendid on maksimaalselt koormatud. Kasutame modelleerimisel 2018. aastaks maksimaalset planeeritud koormust ehk 1595 MW. [9] Selline tarbimine saavutatakse tõenäoliselt vaid väga külmade ilmade puhul ning seega võib eeldada, et välisõhk jahutab seadmeid märkimisväärselt ning seadmete läbilaskevõimed on suuremad. Võtame eelduseks, et antud skeemil on välisõhu temperatuur -20°C . Sellisel talitlusel on vähetõenäoline, et mõni oluline 330kV liin on hooldusesse lubatud ning juhul kui on, siis kaasnevad sellega vastavad piirangud. Seega võtame aluseks, et meil on 330 kV võrgus normaalskeem.

5.2.1. Stsenaarium, kus alalisvooluühendused on maksimaalses ekspordis

Esmalt vaatame režiimi, kus Tallinn-Narva vaheliste liinide maksimaalseks koormamiseks eeldame, et mõlemad alalisvooluühendused Estlink I ja Estlink II müüakse päev ette turul maksimaalselt täis suunaga Eestist Soome. Koormused neil kaablitel on sellisel juhul vastavalt 358 MW ja 658 MW [30]. Estlink 1 sellisel koormamisel on tema maksimaalne reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimekus ± 10 Mvar-i. Võttes arvesse, et Eesti-Läti piiri maksimaalne ülekandevõimsus on 879 MW [31], peab Eesti elektrisüsteemi tootmine olema 2030 MW. Eleringi 2013. Aastal avaldatud „Eesti Elektrisüsteemi Tarbimishinnangu rahuldamiseks vajaliku tootmisvaru hinnang“ [8] järgi on sellise elektrienergia tootmine 2018. aastal ebatõenäoline. See tähendab, et elektritootjad ei plaani elektrivõrguga ühendada uusi püsivalt energiat tootvaid tootmisüksusi mahus, mis ületaks Narva elektriyaamade vanade blokkide piiramisega ja/või sulgemisega kaasnevat tootmisvõimsuse vähenemist. Selline tootmine pole siiski võimatu ning eeldame algolukorras, et just selline režiim meil tekkis.

Lisaks eeldame, et meil on hoolduses Eesti elektrisüsteemi suurim kondensaatorpatarei, mis võimaldab võrku anda 50 Mvar-i ning mis asub Kiisa alajaamas. Järgnevalt leiame PSS/E automaatse häiringute tagajärgede tuvastamise funktsionaalsuse ACCC abil kõige ohtlikumad häiringud. Nendeks on Aruküla ja Balti alajaamade vaheline liin ning Kiisa ja Harku alajaamade vaheline liin. Kuna Kiisa-Harku liini välja lülitumine põhjustas madalamaid pingeid, siis vaatleme edasi vaid seda, kui kõige hullemat juhtu.

Häiringu hullemaks tegemiseks eeldame, et operatiivtöötajad ei ole oma tööd ideaalselt teinud ning Veskimetsa alajaama kondensaatorpatarei on häiringu eelselt välja jäetud. Pinget on reguleeritud Harku alajaama 330/110 kV transformaatritega. Pinge häiringu eelselt on Harku alajaamas 338 kV, mis jääb normaaltalitusel lubatud pingevahemikku. Kiisa ja Harku alajaama vahelise liini välja kukkumisel langeb see pinge 309,8 kV-ni. Samas jääb seegi pinge häiringujärgses olukorras lubatud pingepiiridesse. Ka pinged 110 kV võrgus ei lähene antud häiringu järgselt oma kriitiliste väärtusteni. Seega isegi kahe kondensaatorpatarei väljas olemine ei põhjustanud antud talitusel kõrvalekaldeid lubatud piiridest. Lisaks eeldab antud häiring dispetšeri sekkumist ning süsteemi ettevalmistamist järgnevas n-1 olukorras. Estlink 1 mahakoormamine koos reaktiivvõimsuse kompenseerimise võimekuse kasutusele võtmisega ning Veskimetsa kondensaatorpatarei sisselülitamine eemaldab pinge probleemid. Oluline on ka märkida, et järgnevad n-1 olukorrad, mis tekitavad meil lubamatuid talitlusi, põhjustavad ka elektrivõrgu osade ülekoormumist.

5.2.2. Stsenaarium, kus Narva elektrijaamad turule ei pääse

Teine modelleeritav stsenaarium eeldab, et Narva elektrijaamad turule ei pääse ja seega pinge tuge Eesti elektrisüsteemile ei anna. Selleks, et see stsenaarium oleks võimalik, peab Eesti enamik tarbitavast elektrienergiast importima. 1595 MW tarbimise katmiseks on vaja kasutada mõlema alalisvooluühenduse impordivõimekust ning importida ka elektrienergiat ka Lätist. Selleks, et Estlink I kompenseerimise võimekus oleks minimaalne, siis eeldame, et mõlemad alalisvooluühendused on maksimaalset koormatud. See tähendab, et Estlinkide kaudu impordime me 1016 MW elektrienergiat. Eeldame, et Eesti oma genereerimine toimub väikestes koostootmisjaamades ja on summaarselt 80 MW. Seega ülejäänud 499 MW imporditakse Lätist.

PSS/E automaatse häiringute tagajärgede tuvastamise funktsionaalsus ACCC-d kasutades näeme, et läbi analüüsitud n-1 olukordades tekivad vaid lokaalsed pinge probleemid. Isegi n-1-1 olukorras, kus me lülitame välja Estlink 1 ning Aruküla ja Balti alajaamu ühendava liini L511, ei välju pinged lubatud piiridest. Selle talitluse puhul peab silmas pidama fakti, et Eesti elektrisüsteemi pinge suuresti naabersüsteemide pingest.

6. FACTS seadmete potentsiaalsed kasutuskohad

Eesti elektrisüsteemis

Peatükis 5 vaatlesime ekstreemse režiimiga n-1 olukorras tekkivaid talitlusi. Selles peatükis vaatleme, kus võiksid olla potentsiaalsed kohad, kus FACTS seadmeid rakendada. Eelmisest töö osast tuli välja, et ülepinge on Eesti elektrisüsteemis alapingest märksa kriitilisem ja seega vaatleme vaid punktis 5.1. kirjeldatud olukordi.

Kasutame olukordadele viitamiseks samasid nimesid. „Tartu“ viitab olukorrale, kus väljas on 2 reaktorit Tartu alajaamas. „Püssi“ olukorras on tööst välja viidud kaks Püssi alajaamas asuvat reaktorit. Nimega „Paide“ viitame olukorrale, kus korrast ära on kaks reaktorit Paides. „Aruküla“ režiimis on meil kasutuskõlbmatud mõlemad Aruküla alajaamas asuvad reaktorid. „Kiisa-Paide“ viitab olukorrale, kus meil on nii Kiisa kui ka Paide alajaamades tööst välja viidud suuremad 50 Mvar-ised reaktori

Töö eesmärgiks on vaadelda FACTS seadmete kasutamisevõimalusi aeglaselt muutuvate protsesside ehk statsionaarsete talitluste tasakaalustamiseks. Modelleerime pinge kompenseerimise seadet kui generaatorit, mille aktiivvõimsusväljund on 0 MW, ent reaktiivvõimsusväljund võib muutuda määratud vahemikus. Töö viiendas osas näitasime, et alapinge meil aeglaselt muutuvate protsesside puhul kuigi kriitiline pole, seega kasutame mudelis konfiguratsiooni maksumuse vähendamiseks vaid negatiivses reaktiivvõimsuse tootmise ulatuses muutuvat seadet.

Harku alajaama juba on ühendatud kõrgepinge alalisvoolulink Estlink 1, millel on FACTS seadmetega sarnane funktsionaalsus ning mille väljund reaktiivvõimsust on võimalik jätkuvalt juhtida. Seega vaadeldes modelleeritud talitlusi ning võttes arvesse „Tartu 3“ režiimi järeltule, et kompenseerimisseadet võiks kasutada Harku alajaamast küllalt eemal asuvates kriitilise pingega Paide, Püssi või Tartu alajaamades.

6.1. Kompenseerimisseade Paide alajaamas

Vaatleme esmalt olukorda, kus oleme 50 Mvar-ise jätkuvalt juhitava seadme paigutanud Paide alajaama. Seadme juhtimisvahemik on $-0... -50$ Mvar-i ning modelleerime teda kui generaatorit, millel puudub aktiivvõimsuse tootmise võimekus. Antud eesmärgil saab kasutada järgnevaid FACTS kontrollereid: SVCd, STATCOMi või UPFCd. UPFC on teistest mõnevõrra kallim ning omab antud eesmärgile ülearust funktsionaalsust. Seega reaalselt võiks ühendatav seade olla, kas STATCOM või SVC.

Tabelis 6.1. on modelleeritud eelnevalt kirjeldatud olukordi kompenseerimisseadmega Paide alajaamas. Tabelist on näha, et antud kompenseerimisseade aitab eemaldada enamikel defineeritud juhtumitel kõigist alajaamadest ülepinged. „Tartu“ stsenaariumi korral jääb ülepinge Tartu sõlmpunktis püsima. Kõigil modelleeritud talitlustel tarbib FACTS seade võrgust reaktiivvõimsust oma maksimaalses vääringus ehk 50 Mvar-i.

Tabel 6.1. Modelleeritud olukorrad kompenseerimisseadmega Paide alajaamas

Katse nr.	Sõlmpunkt							
	Eesti EJ	Tartu AJ	Sindi AJ	Paide AJ	Harku AJ	Kiisa AJ	Aruküla AJ	Püssi AJ
Tartu	358,6 kV	366,2 kV	351,1 kV	352,7 kV	353,6 kV	354,1 kV	351,9 kV	358,3 kV
Püssi	359,9 kV	361,5 kV	354,5 kV	355,3 kV	356,3 kV	356,9 kV	354,5 kV	360,9 kV
Paide	358,6 kV	360,8 kV	354,5 kV	356,3 kV	355,6 kV	356,2 kV	353,8 kV	358,5 kV
Aruküla	361,2 kV	360,4 kV	354,4 kV	356,6 kV	360,1 kV	359,7 kV	361,2 kV	359,5 kV
Kiisa-Paide	359,3 kV	361,1 kV	355,5 kV	357,4 kV	358,2 kV	358,6 kV	356,6 kV	359,5 kV

Seadme mõju Tartu alajaama pingele on tagasihoidlik. Isegi olukorras, kus tööst väljas on vaid üks Tartu alajaama reaktor jääb pinge 362,9 kV peale, mis on üle lubatud piiri. Ülejäänud võrgule omab seade piisavalt positiivset mõju, et modelleeritud olukorras ülepinge ära hoida.

6.2. Kompenseerimisseade Püssi alajaamas

Teisena vaatleme, millist mõju omab kompenseerimisseade Püssi alajaamas. Seadme parameetrid jätame samaks. Seega on meil tegu SVC või STATCOMiga, mille väljundreaktiivvõimsust on võimalik varieerida vahemikus -0...-50 Mvar-i.

Tabelis 6.2. on toodud peatüki alguses kirjeldatud olukordadega modelleerimise tulemused. Taaskord on näha, et problemaatiliseks osutub Tartu alajaam. Lisa modelleerimise tulemusena näeme, et juba ühe kompenseerimisseadme puudujääk põhjustab Tartu alajaamas ülepinget 362,1 kV.

Tabel 6.2. Modelleeritud olukorrad kompenseerimisseadmega Püssi alajaamas

Katse nr.	Sõlmpunkt							
	Eesti EJ	Tartu AJ	Sindi AJ	Paide AJ	Harku AJ	Kiisa AJ	Aruküla AJ	Püssi AJ
Tartu	357,7 kV	366,3 kV	352,5 kV	354,3 kV	353,9 kV	354,4 kV	352,1 kV	356,3 kV
Püssi	359,4 kV	360,8 kV	354,5 kV	356,5 kV	356,4 kV	357,0 kV	354,6 kV	360,0 kV
Paide	358,4 kV	360,6 kV	357,6 kV	359,6 kV	357,6 kV	358,2 kV	355,9 kV	357,7 kV
Aruküla	358,8 kV	360,6 kV	356,9 kV	359,0 kV	361,2 kV	360,8 kV	362,2 kV	358,5 kV
Kiisa-Paide	359,1 kV	360,8 kV	358,5 kV	360,6 kV	360,1 kV	360,6 kV	358,5 kV	358,7 kV

Oodatavalt on Püssi alajaama paigutatud kompenseerimisseadmel suurem mõju Ida-Eesti alajaamade pingetele ning väiksem Tallinna lähedal olevatele alajaamadele. Probleemseks osutub ka olukord, kus Aruküla alajaamas on kasutuskõlbmatud kaks reaktorit. Aruküla ülepinge maha saamiseks on võimalik kasutada Estlink 1-1 allareguleerimist. 10 MW-i suurune allareguleerimine tekitab alalisvooluühendusele võimekuse tarbida 20 Mvar-i reaktiivenergiat, millest piisab Aruküla alajaama ülepinge eemaldamiseks.

Ka Püssi alajaama ühendatud kompensatorseadme väljund oli püsivalt maksimaalne ehk -50 Mvar-i.

6.3. Kompenseerimisseade Tartu alajaamas

Kolmas sõlmpunkt, millega FACTS seadme liitmist kaalume on Tartu alajaam. Taaskord on liidetav seade STATCOM või SVC, mille reaktiivvõimsuse kompenseerimisvahemik on -0...-50 Mvar-i.

Tabelis 6.3. on toodud varem kirjeldatud olukordades tekkivad sõlmpunktide pinged, kui Tartu alajaama on ühendatud kompenseerimisseade. Ka selgi korral oli lisatava seadme väljund kõigis olukordades maksimaalne ehk -50 Mvar-i. Probleemseteks talitlusteks osutusid Aruküla reaktorite väljasolek, Tartu reaktoriteta režiim ning olukord, kus olid välja viidud Paide ning Kiisa alajaama suuremad ehk 50 Mvar-ised reaktorid.

Tabel 6.3. Modelleeritud olukorrad kompenseerimisseadmega Tartu alajaamas

Katse nr.	Sõlmpunkt							
	Eesti EJ	Tartu AJ	Sindi AJ	Paide AJ	Harku AJ	Kiisa AJ	Aruküla AJ	Püssi AJ
Tartu	359,1 kV	363,9 kV	354,3 kV	356,1 kV	355,8 kV	356,3 kV	354,4 kV	359,0 kV
Püssi	360,3 kV	358,4 kV	355,8 kV	357,9 kV	358,1 kV	358,7 kV	356,8 kV	361,8 kV
Paide	359,9 kV	358,3 kV	358,8 kV	361,0 kV	359,3 kV	359,8 kV	357,8 kV	360,4 kV
Aruküla	360,7 kV	358,6 kV	359,2 kV	361,4 kV	363,9 kV	363,5 kV	365,4 kV	361,7 kV
Kiisa-Paide	359,1 kV	358,8 kV	360,6 kV	362,9 kV	362,7 kV	363,1 kV	361,5 kV	361,8 kV

Aruküla kahe reaktori puudumisel, saab antud režiimis ülepinge maha kui teha alalisvooluühendus Estlink 1 kaudu Soomes 30 MW allareguleerimist ja viia ühenduse koormus 312 MW peale. Sellises režiimis on Estlink 1 võimeline tarbima 40 Mvar-i reaktiivvõimsust. „Kiisa-Paide“ stsenaariumi ülepinge saab maha, kui teha 10 MW alla reguleerimist ja seega võimaldada alalisvooluühenduse kaudu tarbida 20 Mvar-i reaktiivvõimsust.

7. Majandusliku tasuvuse analüüs

Seadmete tarvilikkuse hindamiseks tuleb võrrelda potentsiaalse püstitatava seadmega kaasnevaid kulutusi alternatiivsete probleemi lahendavate sammudega. Analüüs näitab, et Põhja-Eesti pingeid saab edukalt kompenseerida ka Estlink 1-ga. Punktis 7.4. vaatleme, millised on Estlink 1-ga kompenseerimise kulud võrreldes staatiliste seadmete lülitamisega Harku alajaas. Lisaks viime läbi analüüsi, mis võrdleb šuntreaktori ja samal eesmärgil püstitatava FACTS seadme kulusid.

Traditsiooniline šuntreaktor erineb türistorreguleerimisega reaktorist neid võrguga ühendava lülitamiseseadme poolest. Türistorreguleerimisega reaktor on lülitatav türistorventiilidega ning traditsiooniline šuntreaktor elegaas võimsuslülitiga. Peatükis 2.1. on ülevaade FACTS tehnoloogial põhinevast reaktorist, kus on juttu ka tema põhilisest eelisest, milleks on tema juhitavus. Peatükis 6 tuli välja, et meie antud kriitilistes talitlustes on lisatava seadme väljund meil püsivalt maksimaalne. Seega kontrollitavus antud režiimis meile eelist ei anna.

Ülepinge ei teki enamasti häiringu tulemusena vaid selle põhjuseks on võrguelementide madal koormatus, mille põhjuseks on võrgus hajusalt paiknevate tarbijate koormuse vähendamine. See protsess toimub aeglaselt ning selle kompenseerimist on väga edukalt võimalik juhtida ka juhtimiskeskuse operatiivtöötajate poolt.

7.1. Türistorventiilidega ning võimsuslülitiga juhitava reaktori võrdlus

Türistorventiilidega juhitava seadme eeliseks võib olla tema eluiga. Koormatud elegaas lülititega on võimalik teha keskmiselt 2000-5000 lülitamist. Jõupooljuhtidel põhinev lüliti on võimeline lülitama kiiremini ning tal ei ole tavaliselt sellist lülitamiste arvu limiiti. [32] 2013. aasta kolme kuu kohta tehtud statistika näitab, et üle 150 lülitamise tehti nende kuude jooksul kolme reaktori võimsuslülititega. Seega kui eeldada, et see lülitamiste arv iseloomustab aasta keskmist, siis see teeb aastas üle 600 lülitamise iga võimsuslülitiga. Eeldame seega, et Harku reaktor R1 lüliti lülitati 672 korda, Kiisa reaktor R3 lüliti 652 korda ning Harku reaktor R2 võimsuslülitit 608 korda. [26]

Reaktori traditsioonilise jaotusseadme maksumuseks võtame 55 000€. [33] Peatükis 3 vaatlesime Chester SVC jaama kulusid. Sealt oli näha, et türistorventiilid moodustasid rajatise maksumusest 16,39%. Kokku läks jaam maksma 60\$/kVA kohta. [22] Seega võib hinnata türistorventiilide maksumuseks 9,8\$/kVA kohta.

Oletades, et süsteemiga liidetav reaktor on 50 Mvar-i, leiame, et türistorventiilid on $9,8\$/kVA * 0,73\text{€}/\$ = 7,2\text{€}/kVA$ ühikmaksumusega ning antud eelduste puhul kogumaksumusega $7,2\text{€}/kVA * 50000kVA = 359\ 000\text{€}$. Euro dollari kurss $0,73\text{€}/\$$ kohta on võetud 20. mai 2014. aasta seisuga Yahoo! finantsportaalist [34]. Peatükis 3 nägime, et traditsioonilise šuntreaktori maksumus on $5,76\text{€}/kVA$ ning arvutades saame, et jaotusseade moodustab tema hinnast 19% ehk $1,1\text{€}/kVA$ kohta. Seega on näha, et türistorventiilid rohkem kui kahekordistavad seadme maksumuse. See läheb kokku ka materjalis [32] toodud hinnangutega.

Seega, et türistorreguleeritav lüliti ennast ära tasuks peab ta suutma vastupidada $7,2/1,1 = 6,6$ traditsioonilise võimsuslüliti eluiga. See teeb $2000 * 6,6 = 13200$ kuni $5000 * 6,6 = 33100$ lülitamist. Arvestades, et hetkel Eesti elektrisüsteemis tehakse aastas ühe reaktori võimsuslülitiga maksimaalselt orienteeruvalt 672 lülitamisoperatsiooni, siis on türistorventiilidega lüliti tasuvusaeg 20 kuni 49 aastat. Arvestades, et reaktori elueaks võib lugeda 30 aastat [22] ja elegaas võimsuslüliti eluea võib hooldustega pikendada kuni 20 000 lülitamisoperatsioonini [32], siis puhtalt lüliti eluea pikendamiseks lülite vahetamine ennast ära ei tasu.

7.2. Kompenseerimisseade Lääne-Eestise tuulikute kompenseerimiseks

Statistika näitab, et alates 7. jaanuarist 2014 kuni 20. maini 2014 kasutati Lääne-Eesti tuuleparkide reaktiivvõimsuse tarbimise võimekust 10 051 Mvarh ulatuses. [26] Eeldades, et see kogus iseloomustab aasta keskmist, leiame aastas tarbitud keskmise koguse korrutades selle arvu $365/133 = 2,74$ -ga. Saame, et aastas tarbitakse tuuleparkidega 27 584 Mvarh reaktiivenergiat. Ajal kui pinge hoidmise funktsioon on aktiveeritud, ostab ning müüb Elering elektrijaamadele reaktiivenergiat hinnaga $0,64\text{€}/\text{Mvarh}$ [27]. Seega läheb antud funktsioon Elering AS-le maksma $0,64\text{€}/\text{Mvarh} * 27\ 584\ \text{Mvarh} = 17\ 653\text{€}/\text{aastas}$.

PSS/E mudelis, millest oli pikemalt juttu peatükis 4, on juba lisatud perspektiivne investeering ehk šuntreaktor Virtsu alajaama. Modelleerimise tulemused näitavad, et n olukorras, praeguse tuulikute arvu juures, asendab antud reaktor ilusti pinge hoidmise funktsiooni tuulikutel. N-1 olukorras, kus Lääne-Eesti suurimal genereerimisüksusel 57 MWsel Aulepa tuulepargi ja Tallinna vaheline ühendus on katkenud või antud reaktor on hoolduses, võib leiduda režiime, kus on tarvis tuulepargiga reaktiivenergiat tarbida. Tundide arv, kus võib selline režiim tekkida on üsnagi väike ja antud piirkonda täiendavate kompenseerimisallikate paigutamine ei ole majanduslikult tasuv.

7.3. Kompenseerimisseade Tartu alajaama ülepinge eemaldamiseks

Peatükis 5 oli näha, et suurimad probleemid ilmnevad meil Tartu alajaamas. Eriti kriitiline on talitus, kus seal on tööst väljas kaks reaktorit. Pinged Eesti teistes alajaamades mõjutavad Tartu alajaama Tartu ja Sindi alajaamade vahelise ülekandeliini väljasoleku ajal vähem kui pinged Pihkva ning Valmiera alajaamades. Seega mõjutab Tartu pinget paljuski ka Loode-Venemaa ning Läti juhtimiskeskuste tegevust. Mudelis on meil Läti ja Venemaa elektrisüsteemid ekvivalentidena ning Tartu alajaama kõrge pinge võib tulla ka valedes naabersüsteemide parameetrite tõttu.

Juuli kohta tehtud statistika näitab, et Tartu reaktorid olid korruga võrguga ühendatud 58% ajast ja Tartu ning Tsirguliina alajaamade kõik reaktorid 42% ajast. Vähemalt kaks reaktorit kolmest olid võrguga ühendatud 74% ajast [26]. Seega on näha, et madala koormusega režiimides on Lõuna-Eesti kõik reaktiivvõimsuse tarbimise seadmed võrguga ühendatud ning n-1, n-1-1 või n-2 olukordades sõltub selle piirkonna alajaamade pinge naabersüsteemidest.

Seega võiks kaaluda lisa kompenseerimisseadme Tartu alajaama püstitamist, ent FACTS seadmete vähemalt kahe kordse hinna ja põhivõrgu pingenoüete küllalt laia lubatud vahemiku tõttu ei ole mõistlik aeglaselt möödivate protsesside kompenseerimiseks elektrivõrguga SVCd või STATCOMi liita. Pigem võib eelistada traditsioonilisemat lahendust, kus võrguga liidetakse šuntreaktor.

7.4. Tallinna piirkonna pingete kompenseerimine kasutades Estlink 1-te

Perioodil 31.03.2014. kuni 19.05.2014 oli Estlink 1 blokeeritud asendis 61% ajast. Alalisvooluühendustel oli sel perioodil 1 remont, kus Estlink 2 hooldustööd kestsid 14 tundi. Blokeerimata asendis on tavaolukorras Estlink 1 maksimaalne koormus enne Kiisa teise avarielektrijaama valmimist suunaga Soomest Eestisse 202 MW [35]. Sellise koormuse juures on Soome-Eesti suunaliste võimsusvoogudega võimalik alalisvooluühendusega võrku anda või sealt tarbida 110 Mvar-i [23]. Eesti-Soome suunalisi võimsusvooge Estlink 1-l vaadeldaval perioodil ei olnud. [26]

29% ajast oli Estlink 1 peal koormus turutulemuste järgi ning Eesti või Soome juhtimiskeskuse soovil oli ühendus deblokeerimata 10% ajast. Kokku on vaadeldavas perioodis olemas andmed 1173 tunni kohta ja see periood kestab 49 päeva. [26]

Kaad Estlink 1 peal on bilansipunkti 0 MW-se koormuse juures 4 MW. Kadudest tekkivad kulud katab süsteemihaldur, kelle soovil on alalisvooluühendus deblokeerimata. 2013. aastal

oli Eesti keskmine elektrienergia hind 43€/MWh [36]. Aastas on keskmiselt 8766 tundi. Juhul kui eeldame, et vaadeldud perioodi Estlink 1 turutulemuste järgne koormamine 29% iseloomustab tervet aastat, siis tekitab Estlink 1 sees hoidmine lisakulutusi süsteemihalduritele 71% aastast ehk 6224 tunnil. Elektrienergia, mis selle aja jooksul kadudeks läheb on 24896 MWh. Selle energia kogumaksumuseks on 1 070 528€.

Samas suudab Estlink 1 pinge hoidmise funktsioon asendada mõlema Harku reaktoriga tehtavad lülitamised, mida on orienteeruvalt kokku 1280 korral aastas. Isegi siis kui võtta jaotusseadme elueaks minimaalsed 2000 lülitamisoperatsiooni, siis ei tasu jaotusseadme hinna 55 000€ [33]juures selle funktsiooni sees hoidmine ennast mitte mingil juhul ära, sest oluliselt odavam on kasvõi iga aasta terve jaotusseade välja vahetada.

Peatükis 5 nägime, et aprillis ei pidanud juhtimiskeskuse töötajad kordagi vajalikuks kasutada Estlink 1-e pinge reguleerimise funktsiooni. Seega on Estlink 1 justkui täiendav meede, mida saab kriitilistes olukordades Põhja-Eesti pingete reguleerimiseks kasutada kuid mille püsivalt sees hoidmine pingete hoidmiseks ei ole majanduslikult mõttekas. Kriitilises režiimis nagu oli meil toodud peatükis 5.1. on Estlink 1-e pinge reguleerimise võimekus süsteemi töökindluse hoidmiseks hädavajalik. Sellise režiimi esinemise tõenäosus on väike ning sellega toimetulemise võimekus on Põhja-Eestis olemas, seega ei ole antud piirkonna lubatud pingeniivo tagamiseks mõistlik lisainvesteeringuid teha.

Lõputöö kokkuvõte

Magistri taseme lõputöö eesmärgiks oli uurida FACTS seadmete kasutamise võimalusi Eesti elektrisüsteemi talitluse planeerimisel ja juhtimisel. FACTS tehnoloogiliste lahenduste kasutamise mõistlikkuse hindamiseks põhivõrgus sisaldas töö mainitud seadmete ja nendega kompenseeritava põhiparameetri ehk reaktiivenergia mõningast kirjeldavat osa ning analüütilist osa nende seadmete võimalikust rakendamisest.

Eesti elektrivõrguga on ühendatud kaks kõrgepinge alalisvooluühendust (HVDC link) Estlink I ja Estlink II, kuid mitte ühtegi traditsioonilist paindliku vahelduvvoolu ülekandesüsteemi tehnoloogilist lahendust ehk FACTS seadet. FACTS seadmed on välja arenenud HVDC tehnoloogia eeskujul ning nende põhiline eesmärk on juhtida reaktiivvõimsusvoogusid.

Reaktiivvõimsus on võimsuse komponent, mis tekib elektromagnetilistes ja elektrostaatilistes võrgukomponentides energia salvestumise tõttu ning mida ei saa kasutada kasuliku töö tegemiseks. Reaktiivvõimsust on vaja tarbijates elektromagnetväljade tekitamiseks ning see mõjutab võrku läbivaid voole ning võrguosade vahelisi pingeid. Elektromagnetilistes seadmetes salvestatakse energiat nende magnetväljades ja neid loetakse reaktiivenergia tarbijateks. Elektrostaatilised seadmed seevastu salvestavad energiat elektriväljades ja neid nähakse kui reaktiivenergia tootjaid.

Elektrivõrgu erinevate primaarparameetrite juhtimiseks liidetakse elektrostaatilisi ning elektromagnetilisi seadmeid elektrivõrguga vastavalt vajadusele, millist parameetrit tahetakse juhtida. Pikikompenseerimisel lülitatakse kondensaator või reaktor vastavalt liini reaktantsi vähendamiseks või suurendamiseks jadamisi. Mahtuvusliku elemendi ühendamist kasutatakse võimsusvoo suurendamiseks ning induktiivse elemendi ühendamist võimsusvoo vähendamiseks läbi paralleelse ahela. Põikkompenseerimisel lülitatakse kompenseerimisseade tarbijaga paralleelselt ning seda kasutatakse reaktiivenergia tarbimiseks või tootmiseks ja see läbi liini läbiva voolu vastavalt suurendamiseks või vähendamiseks. Samuti ka pinge vähendamiseks või suurendamiseks.

FACTS seadmed põhinevad jõuelektroonikal ning need on võimelised pakkuma eeltoodud kompenseerimislahendusi paindlikumalt ning kiirema tagasisidega. Jõuelektroonika lubab kontrollida kompenseerivate elementide mõju ulatust elektrivõrgule. Seega on antud seadmete eesmärk nii kiirelt kui võimalik varustada elektrisüsteemi induktiivse või mahtuvusliku

reaktiivvõimsusega, mis on kohandatud täpsemate vajadustega parandamiseks süsteemi läbilaskevõimet ning ülekantava elektrienergia parameetreid.

Töös keskenduti antud seadmete võimalikule kasutusele võtmisele Eesti elektrisüsteemi pingete reguleerimiseks. Sellel eesmärgil sobivad FACTS lahendustest kõige paremini staatiline reaktiivvõimsuse kompensator ning staatiline sünkroonkompensator, mis lubavad võrku toita või võrgust tarbida muutuva suurusega reaktiivvõimsust.

Nende seadmete võimalike asukohtade ja võimsuste leidmiseks uuriti esmalt, milline seis on Eesti elektrisüsteemis tänapäeval ning milliseid nõudeid elektrienergia parameetritele põhivõrgus esitatakse. Oli näha, et elektrivõrgus on esinenud režiime, kus reaktiivvõimsuse kompenseerimisvahendid, mis ei nõua täiendavaid kulusid või mis ei ohusta töökindlust, on ammendatud.

Selleks, et uurida kas lähitulevikus võib esineda olukordi, kus ei ole tagatud pingestabiilsus, kasutati Siemensi tarkvara PSS/E 33 põhjal koostatud sõlmedel baseeruvat off-line võrgu mudelit, mis leiab igapäevast rakendamist Eleringi juhtimiskeskuses operatiivsel planeerimisel. Sellele lisati suuremad Eleringi kinnitatud investeeringu projektid, mis valmivad enne 2019. aasta algust.

Uurimise alla võeti stsenaarium, kus turutulemuste järgi tekkis eeldustele tuginevalt kõige suurem oht ülepingele, ning stsenaarium, kus loodi kõik eeldused alapinge tekkimiseks. Ülepinge tekitamiseks eeldati, et erinevatel põhjustel on kasutuskõlbmatud kaks üksteist mõnevõrra reserveerivat reaktiivvõimsuse kompenseerimisaset ning Eesti tarbimine oli viidud miinimumini. Ülepinge olukorras tekkis pingeprobleeme mitmes vaadeldavas sõlmpunktis. Töö osa andis ülevaate eeldatavast juhtimiskeskuse operatiivtöötaja tegevusest parameetrite normaliseerimiseks ning selle tegevuse tulemuslikkusest.

Viiendas peatükis ilmnas, et võrgu maksimaalsel koormamisel tekkiv alapinge ei ole vastupidiselt mitmetele lääne võrkudele tugevalt liidestatud Eesti elektrisüsteemi jaoks nii suur probleem kui seda on ülepinge. Samuti näitas modelleerimise tulemus, et eelpool toodud teooria läheb ideaalselt kokku arvutuste väljundiga ning seega leidis tõestust, et suurem osa eeldusi on õigesti valitud.

Järgnevas peatükis vaadeldi tekkivale ülepingele võimalikku lahendust FACTS seadmete rakendamise näol. Selleks, et leida FACTS seadmetele parim asukoht vaadeldi eelmises peatükis esile toodud probleemsemaid sõlmpunkte ja analüüsiti, kuidas antud sõlmpunktide ülepinge on võimalik eemaldada. Analüüsi vahendiks oli jätkuvalt PSS/E-s modelleeritav

skeem ning varem defineeritud algolukorrad. Ilmnes, et kõige problemaatilisem sõlmpunkt on Tartu alajaam, kus kahe reaktori tööst väljasolekul ei ole Eesti elektrisüsteemis alternatiivset pinget mõjutamise lahendust. Paljuski on Tartu alajaama kompenseerimisseadmete puudumisel sealne pinget sõltuv Valmiera ning Pihkva alajaama pingetest, mis aga teatavasti ei ole Elering ASi poolt kontrollitavad.

Põhja-Eesti alajaamade ülepington eemaldamine on mõnevõrra lihtsam, sest Harku alajaamaga ühendatud alalisvooluühenduse Estlink I kaudu on võimalik pakkuda sealsetele sõlmpunktidele märkimisväärset pingetuge. Modelleeritud talitlustest oli näha, et antud režiimides oli kompenseerimisseadmete väljundid püsivalt maksimaalsed ning seega otseselt selget põhjust, miks püsitalitlusel FACTS seadmeid traditsiooniliste põikreaktorite asemel eelistada välja ei tulnud.

Töö seitsmendas osas prooviti uurida nelja erineva lahenduse majanduslikku tasuvust. Esmalt püstitati hüpotees, et FACTS seadmete kategooriasse kuuluv türistorventiilidega reaktor võib rahalist võitu anda puhtalt oma vastupidavuse tõttu. Arvutused lükkasid, aga antud hüpoteesi ümber, sest enne tasuvuspiiri saabumist tuli ette reaktori enda eluea lõpp. Teisena uuriti FACTS seadme püstitamise mõttekust Lääne-Eesti tuuleparkide tasakaalustamiseks. Tuli välja, et rahalist võitu sellisel viisil ei saavutataks ja mõistlikum oleks kasutada staatilist reaktorit Virtsus alajaamas ning pingeprobleemide püsimisel kasutada tuuleparkide enda võimekust tarbida reaktiivenergiat.

Kolmandana prooviti vastata küsimusele, kas Tartu alajaama oleks mõistlik ühendada üks FACTS seade. Ilmnes, et puhtalt aeglase protsesside tasakaalustamiseks selline lahendus mõistlik ei oleks ning tuleks eelistada odavama traditsioonilise šuntreaktori võrku lisamist. Selle ettepaneku täiendavaks analüüsiks oleks tarvis modelleerida täpsemalt naabersüsteemide elektrivõrke koos nende kompenseerimisseadmetega. Peatükis 5 kirjeldatud ülepington režiimis on suure tõenäosusega ka Läti genereerimine siiski madal ja seeläbi võiks eeldada, et ka nende reaktiivvõimsuse tarbimine on piiratud. Probleemi võib tõsisemaks muuta ka Eesti BRELLi ühendsüsteemist eraldamine, sest sellisel juhul lõppeks ka pinget tugi Pihkva alajaamast.

Neljandana uuriti ka Põhja-Eesti reaktorite säästmiseks ja täpsema pingevahemiku hoidmiseks alalisvooluühendus Estlink I püsivat kasutamist pinget reguleerimiseks. Ka see hüpotees ei leidnud kinnitust, sest olukorras, kus Estlink I töös hoidmise algatanud osapool maksab kaabli kaod või isegi olukorras kus kaabli kadudest pool maksab Soome süsteemihaldur, ületab kadudele kuluv rahasumma mitmekordselt võimsuslülite hoolduse ning vahetamisega

kaasnevad kulud. Kaabli blokeerimata asendis reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks kasutamise lisakulusid ei kaasne ning seega võiks pinge hoidmise funktsiooni kasutamist kaaluda olukorras, kus kaabel on teistel põhjustel koormatud. Ohtlikes ülepinge olukordades pakub kaabel Põhja-Eesti pingete hoidmiseks hädavajalikku pinge tuge ning aitab ära hoida võimalikke häiringuid. Seega HVDC link aitab ära hoida täiendavate investeeringute tegemise Põhja-Eesti pingete hoidmiseks.

Kokkuvõtteks tuleb nentida, et kitsendusel kus vaadatakse vaid aeglaselt mööduvaid protsesse hetkel põhjust FACTS seadmete rakendamiseks Eesti elektrisüsteemi pingete hoidmiseks ei ole. Seadmed on kordades kallimad kui traditsioonilised lahendused ning Eesti elektrisüsteem on küllalt hästi liidestatud nii süsteemi enda siseselt kui ka naaber süsteemidega. Küll aga võib paindlike vahelduvvoolu ülekandesüsteemide lahenduste vajalikkust tõsta eraldumine BRELL ühendsüsteemist. Samuti nõuab eraldi analüüsi siirdeprotsesside tasakaalustamise eesmärgil rakendatavate FACTS seadmete kasutusele võtmiseks.

FACTS tehnoloogilised lahendused on maailmas juba leidnud mitmel pool kasutust. Eelkõige kasutatakse neid eraldatud ja halvasti liidestatud piirkondade pingete hoidmiseks ning uute ülekande liinide investeeringute edasilükkamiseks. Samuti on mitmed süsteemihaldurid aga, ka samale järeldusele jõudnud: FACTS seadmete eelistamine traditsioonilistele lahendustele ei ole püsiseisundi parameetrite hoidmiseks majanduslikult tasuv. [19]

Kirjandus

- [1] Y. H. Song ja A. T. Johns, Flexible ac transmission systems (FACTS), London: The Institution of Electrical Engineers, 1999.
- [2] E. Acha, C. R. Fuerte-Esquivel, H. Ambriz-Perez ja C. Angeles-Camacho, FACTS - Modelling and Simulation in Power Networks, Chichester: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [3] Task Force 3 of the IEEE's FACTS Working Group of the DC and FACTS Subcommittee, „Proposed terms and definitions for flexible AC transmission system (FACTS),“ *Power Delivery, IEEE Transactions on (Volume 12, Issue: 4)*, pp. 1848-1853, 1997.
- [4] M. Meldorf ja J. Kilter, Elektrisüsteemi stabiilsus, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2011.
- [5] Elering AS, „Elering AS kodulehekülj - Eesti elektrisüsteemi kaart,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://elering.ee/vorgu-kaart/>.
- [6] D. Povh, „Use of HVDC and FACTS,“ *Proceedings of the IEEE*, kd. 88, nr 2, pp. 235-245, 2000.
- [7] Siemens, „PSS/E - Power Transmission System Planning tarkvara kodulehekülj,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://w3.siemens.com/smartgrid/global/en/products-systems-solutions/software-solutions/planning-data-management-software/planning-simulation/pages/pss-e.aspx>.
- [8] Elering AS, „Eesti elektrisüsteemi tarbimishinnade rahuldamiseks vajaliku tootmisvaru hinnang,“ Elering AS, Tallinn, 2013.
- [9] Elering, „Eesti Elektrisüsteemi Varustuskindluse Aruanne 2013,“ 2013. [Võrgumaterjal]. Available: http://elering.ee/public/Infokeskus/Uuringud/Elering_VKA_2013_web.pdf.
- [10] T. J. E. Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, New York: John Wiley & Sons, 1982.
- [11] R. M. Mathur ja R. K. Varma, Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical

- Transmission Systems, New York: John Wiley & Sons, Inc, 2002.
- [12] B. M. Weedy ja B. Cory, *Electric Power Systems* fourth edition, Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [13] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, *Jaotusvõrgud*, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [14] M. H. Rashid, *Power Electronics Handbook Third Edition*, Oxford: Butterworth-Heinemann , 2011.
- [15] N. G. Hingorani, „FACTS Technology – State of the Art, Current Challenges and the Future Prospects,“ %1 *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE* , Tampa, 2007.
- [16] G. Hug-Glanzmann, *Coordinated Power Flow Control to Enhance Steady-State Security in Power Systems*, Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2008.
- [17] GE Power Systems Energy Consulting, „Guide for Economic Evaluation of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) in Open Access Environments,“ Schenectady, 1997.
- [18] L. F. W. d. Souza, E. H. Watanaber ja J. José Eduardo da Rocha Alves, „Thyristor and Gate-Controlled Series Capacitors: A Comparison of Components Rating,“ *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, kd. 23, nr 2, pp. 899-906, APRIL 2008.
- [19] CIGRE Joint Working Group 14/37/38/39.24, „FACTS Technology for Open Access,“ CIGRE, 2001.
- [20] CIGRE working group 14.19, „144: Static Synchronous Compensator,“ Cigre, 2000.
- [21] H.Chen, Y.Wang ja R.Zhou, „Transient and voltage stability enhancement via coordinated excitation and UPFC control,“ *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, kd. 148, nr 3, pp. 201-208, Mai 2001 .
- [22] EPRI, „The Next Generation of HVDC - Needed R&D, equipment cost, and cost comparisons,“ %1 *Proceedings of EPRI Conference on Future of Power Delivery*, Washington, 1996.
- [23] Elering AS, *Sisedokument reaktiivvõimsuse kompenseerimisallikad Eesti elektrisüsteemis.*

- [24] B. Kirby ja E. Hirst, „Ancillary Service Details: Voltage Control,“ Lockheed Martin Energy Research Corporation, Oak Ridge, 1997.
- [25] EDF - DER - Power System Department, „Methodology for Technical and Economical Evaluation of Facts Impact and Efficiency on EHV Transmission System,“ %1 *The Future of Power Delivery 1996 Conference*, Clamart, 1996.
- [26] Elering AS, *SCADA statistika*.
- [27] AS Elering, „Eleringi ametlik kodulehekülg,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://elering.ee/pinge-reguleerimine-2/>.
- [28] Elering AS, *Elering AS Talitluse planeerimise juhend*.
- [29] Vabariigi Valitsus, „Võrgueeskiri,“ [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/12831412?leiaKehtiv>.
- [30] Elering AS, „NordPoolSpot UMM system,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://umm.nordpoolspot.com/messages/21338>.
- [31] Nord Pool Spot, „Urgent Market Message system,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://umm.nordpoolspot.com/infra/connections/107>.
- [32] R. Baldick ja R. P. O'Neill, „Estimates of Comparative Costs for Upgrading Transmission Capacity,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 24, nr 2, pp. 961-969, 2009.
- [33] ABB AS, *ABB AS Hinnang*.
- [34] Yahoo! Finance, „USD/EUR konversioon,“ 20 Mai 2014. [Võrgumaterjal]. Available: <http://finance.yahoo.com/q?s=USDEUR=X>.
- [35] Elering AS, „NordPoolSpot UMM system,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://umm.nordpoolspot.com/messages/16139>. [Kasutatud 20 Mai 2014].
- [36] NordPoolSpot, „NordPoolSpoti kodulehekülg,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.nordpoolspot.com/Market-data1/Downloads/Historical-Data-Download1/Data-Download-Page/>.
- [37] N. G. Hingorani, „FACTS Technology – State of the Art, Current,“ *IEEE*, 2007.

Lisad

L.1. Staatilised reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed Eesti elektrivõrgus

L.2. Eesti 110kV-330kV elektrivõrgu kaartskeem

L.1. Staatilised reaktiivvõimsuse kompenseerimisseadmed

Nr	Alajaam	Tähis	Un (kV)	Võrku antav võimsus Q (Mvar)	Võrgust tarbitav võimsus Q (Mvar)
	<u>KONDENSAATORPATAREID</u>				
1	KIISA	KP26	110	30	-
		KP28	110	50	
2	PAIDE	KP	110	30	-
3	VESKIMETSA	KP9- 1/KP9-2	110	20+30	-
4	HARKU	KP1	110	30	-
5	PÜSSI	KP	110	20+30	-
6	VILJANDI	KP1	110	30	-
7	LIHULA	KP	110	15	-
	<u>SUNTREAKTORID</u>				
1	<u>ARUKÜLA</u>	R1	20	-	50
	-	R2	20	-	50
2	KIISA	R1	10	-	50
		R3	10	-	30
3	HARKU	R1	20	-	50
		R2	20		30
4	PAIDE	R1	10	-	50
		R2	10	-	30
5	PÜSSI	R3	10	-	30
		R5	10	-	50
6	TARTU	R1	20	-	50
		R2	20	-	50
7	TSIRGULIINA	R	10	-	30
8	BALTI	R1	10	-	50
		R2/R3	35	-	20+20
9	RAKVERE	R1	10		30
10	SINDI	R1	10	-	30
	KOKKU			285	600

