

KÄÄMIKYTKINSÄÄTÄJIEN JA KONDENSAATTORISÄÄTÄJIEN ASETTELUT KANTAVERKOSSA

Jussi Perttu

Opinnäytetyö
Marraskuu 2014
Sähkötekniikan
koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

PERTTU, JUSSI:

Käämikytkinsäätäjien ja kondensaattorisäätäjien asettelut kantaverkossa

Opinnäytetyö 53 sivua, joista liitteitä 3 sivua
Marraskuu 2014

Opinnäytetyössä tutkittiin muuntoasemien käämikytkin- ja kondensaattorisäätäjien asetusarvojen vaikutusta 110 kV:n kantaverkossa jännitteensäädön näkökulmasta. Systemaattisen asetusarvojen läpikäynnin ja verkon simuloinnin tarkoituksena oli luoda yhtenäinen kuva kantaverkon 110 kV:n jännitetason jännitteensäädön tilasta ja määrittää jännitteensäätäjien ja loistehonsäätäjien asetusarvojen oikeellisuus.

Teoriaosuudessa tarkasteltiin kantaverkon rakennetta yleisellä tasolla 110 kV:n jännitteensäädön näkökulmasta. Yleinen siirto- ja kulutustilanne vaihtelee kantaverkossa jatkuvasti. 110 kV:n jännitetason jännitteen pitäminen lähellä teoreettista maksimiarvoaan vähentää virtalämpöhäviöitä 110 kV:n jännitetasossa. Yksi 110 kV:n jännitteensäädön tavoitteista on jännitestabiiliuden säilyttäminen. Jännitestabiilius kuvaa voimajärjestelmän kykyä ylläpitää jännitteet hyväksyttävissä rajoissa kaikissa käyttötilanteissa. 110 kV:n jännitteensäätöön osallistuvat laitteet toimivat niille asetettujen asetusarvojen mukaisesti. Asetusarvojen tarkistamisen ja siihen liittyvän laskennan avulla pyritään varmentamaan 110 kV:n jännitteensäätöön osallistuvien laitteiden haluttu toiminta.

Jännitteensäätäjien ja loistehonsäätäjien asetusarvojen korjauksella pystytään välttämään käämikytkimien tarpeeton askeltaminen, kondensaattorien oikea-aikainen kytkeytyminen verkkoon ja varmistamaan näin ollen paremmin 110 kV:n jännitteen oikea taso. Vaikka pääasiallinen jännitteensäätö tapahtuu 400 kV:n jännitetasossa ja automatiikka vastaa 110 kV:n jännitteensäädöstä, on 110 kV:n jännitetasossa tavoitteena jännitteen standardien mukaisen laadun ylläpitäminen. Käyttövarmuuden riittävän tason ylläpitäminen ja sähkön laadulliset kriteerit täyttyvät, kun voimajärjestelmän tila ja käyttäytyminen tunnetaan niin normaali- kuin suurhäiriötilassakin.

Asiasanat: voimansiirtoverkot, jännite, säätö

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

PERTTU, JUSSI:

Setting Values of On Load Tap Changer and Capacitor Controllers in Transmission Network

Bachelor's thesis 53 pages, appendices 3 pages
November 2014

The purpose was to study on load tap changer controllers and capacitor controllers setting value parameters on the 110 kV grid. A systematic setting value revision is needed to generate an integrated view of the state of 110 kV voltage regulation in Finnish transmission network.

The theoretical part will first introduce the general grid structure and the basics of the 110 kV voltage regulation. The network components, the effects of voltage regulation and the basics overall are described in the second chapter. The third chapter concentrates on voltage control objectives and the different voltage control methods. The setting value revision is introduced in the fourth chapter.

Voltage control is more precise when the setting values are correct and unnecessary correction operations of on load tap changers and the capacitors can be avoided to ensure the better state of the right 110 kV voltage level. Even if the main voltage control is executed in 400 kV voltage level and the automation system plays the main role in voltage regulation of 110 kV voltage level, the main objectives are to follow the standards. The maximization of system stability and voltage quality criteria are fulfilled when the state and the behavior of the power system is known both in normal and major disturbance situations.

Key words: transmission network, voltage, setting value

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	6
2	JÄNNITTEENSÄÄDÖN TEORIA	7
2.1	Perussuureet	7
2.1.1	Jännite	7
2.1.2	Loisteho.....	9
2.2	Kantaverkon rakenne	10
2.2.1	Siirtojohdot.....	14
2.2.2	Tehomuuntajat ja käämikytkimet.....	16
2.2.3	Rinnakkaiskondensaattorit	19
2.2.4	Rinnakkaisreaktorit	20
2.2.5	Sarjakondensaattorit.....	21
3	JÄNNITTEENSÄÄDÖN TAVOITTEET 110 kV JÄNNITETASOSSA	23
3.1	Jännitteensäätö yleisesti	23
3.2	Laatuvaatimukset	24
3.3	Jännitestabiilius.....	25
3.4	Käämikytkimen paikallissäätö	27
3.5	Rinnakkaiskondensaattorin paikallissäätö	28
3.6	Käämikytkimien ja kondensaattorien aluesäätö.....	29
4	ASETTELUARVOJEN TARKISTUS.....	33
4.1	Laskennan perustilanteet.....	33
4.2	Virheen määrittely	34
4.3	Käämikytkimien jännitteensäätöikkunoiden tarkistaminen.....	37
4.4	Jännitteensäätäjien asetteluarvojen tarkistaminen	42
4.5	Kondensaattorisäätäjien asettelujen tarkistaminen	43
4.6	Asemakohtainen tarkastelu	45
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	47
	LÄHTEET	49
	LIITTEET	51
	Liite 1. Tammi-PSS®E laskenta	51
	Liite 2. Kevät-kesä-PSS®E laskenta.....	52
	Liite 3. Muuntoasemien lyhenteet ja kondensaattorit	53

LYHENTEET JA TERMIT

j	imaginaariyksikkö
b	suskeptanssi, S
c	kapasitanssi, F
E	sähkökenttä, J
g	konduktanssi, S
I	kuormitusvirta, A
l	induktanssi, Ω
N_1	muuntajan ensiöpuolen käämityksen kierrosten lukumäärä
N_2	muuntajan toisiopuolen käämityksen kierrosten lukumäärä
P	pätöteho, W
Q	loisteho, VAR
r	resistanssi, Ω
s	johtopituus, km
S	näennäisteho, VA
t	aika, s
u	jännite 110 kV jännitetasossa, kV
U	pääjännite, V
V	potentiaali, V
Y	admittanssi, S
Z	voimajohdon impedanssi, Ω
φ	vaihekulma
ω	kulmataajuus
KVJ	käytönvalvontajärjestelmä
p.u.	per unit
PI	OSI Softin prosessitietojen hallinta ja keruu järjestelmä
PSS®E	Power System Simulator for Engineering
RTU	Remote Terminal Unit
SVC	Static Var Compensator

1 JOHDANTO

Jännitteen stabiilisuutta on alettu tutkia tarkemmin 1970-luvun lopulla ja 1980-luvulla. Tarkempiin ja laajempiin tutkimuksiin sekä selvityksiin aiheesta ovat johtaneet suuret sähkökatkot maailmalla. Kasvaneen sähkönkulutuksen seurauksena voimajärjestelmää tulee päivittää jatkuvasti sen käyttövarmuuden riittävän tason ylläpitämiseksi. Nykyisten toimintamallien mukaisesti pyritään yhä joustavampaan toimintaan häiriöiden ehkäisemiseksi. Osana voimajärjestelmän tehokasta käyttöä on tuntea käytetty laitteisto ja sen ominaisuudet. Keskeytyksistä aiheutuneita haittoja voidaan minimoida varmistamalla järjestelmän toimivuus myös asetusarvojen osalta.

Tämän päättötyön tarkoituksena on ollut kartoittaa Fingrid Oyj:n omistuksessa olevien 110 kV jännitteensäätöön käytettävien muuntajien käämikytkimien jännitteensäätäjien sekä rinnakkaiskondensaattoriparistojen loistehon- ja jännitteensäätäjien asetusarvojen oikeellisuus. Työssä on myös esitelty ja tarkasteltu menetelmää, jonka avulla voidaan tarkastella muuntoasemien muuntajien käämikytkimien askelluksen vaikutuksia kantaverkossa.

Työ on tehty vertaamalla todellisia jännitteitä ja loistehoja simuloituihin arvoihin. Todelliset arvot perustuvat käytönvalvontajärjestelmästä saatuun jännitetietoon. Simuloidut arvot on saatu iteroinnin tuloksena järjestelmää poikkeuttamalla. Jännitteiden muutokset, joita kantaverkossa tapahtuu muuntajien käämikytkimien askeltaessa ja rinnakkaiskondensaattorien kytkeytyessä verkkoon ja irti verkosta, voidaan perustella säätäjien asetteluiden ja ominaisuuksien avulla. Jännitteensäädön teoriaan tukeutuen pystytään määrittämään säätöikkunoiden oikea koko ja jännitteen asetusarvojen toleranssirajat yleisten rajaehtojen, kriteerien ja standardien mukaisesti.

2 JÄNNITTEENSÄÄDÖN TEORIA

Jatkuva kuormitusvaihtelu asettaa vallitsevalle siirtotilanteelle kompensoinnin tarpeen. Tarkasteltaessa kantaverkon jännitteensäätöä 110 kV jännitetasossa on säätö pyrittävä toteuttamaan siten, että se yhdessä loistehon säädön kanssa pitää jännitteen muuntoasemalla niin ala- kuin yläjännitepuolellakin niille asetettujen raja-arvojen sisäpuolella. 110 kV jännitetason jännitteensäädön tekee haasteelliseksi siitä riippumattomat elementit. Yläjännitepuolella tällainen muuttuja on yleinen siirtotilanne ja 20 kV jännitetasossa puolestaan siellä olevien säätäjien toiminta ja sähkön siirrossa sekä kulutuksessa tapahtuvat muutokset (Itäpää 2014).

2.1 Perussuureet

Kantaverkon 110 kV jännitetason jännitteensäädön näkökulmasta tärkeimpiä käsitteitä ovat jännite ja loisteho. Perusperiaate on, että käämikytkimet askeltavat jännitteen ja rinnakkaiskondensaattorit kytkeytyvät joko jännitteen tai loistehon mukaisesti. Virta on käsitteenä harvinaisempi, kun puhutaan jännitteensäädöstä yleisellä tasolla. Virran avulla voidaan määrittää loisteho sekä tarkastella verkkoon kytkettyjen laitteiden vaikutuksia jännitteensäädön näkökulmasta.

Verkon loistehon muuttuminen vaikuttaa jännitteen itseisarvoon. Loistehon muutoksella on pienempi vaikutus tehokulmaan, jonka avulla voidaan kuvata sitä, miten johdolla siirrettävä teho riippuu jännitteiden välisestä kulmaerosta. "Käytännössä kahden solmupisteen välinen kulmaero on aina pieni, suurimmillaankin n. 10° . Kovin suureen kulmaeroon ei voida mennä erityisesti loistehorajoitusten vuoksi." (J. Elovaara & Y. Laiho 1988, 92.) Käytännön yläraja tehokulmaerolle on 28° -jännitteiden ylläpitämiseksi halutuissa arvoissa (Elovaara & Laiho 1988, 93).

2.1.1 Jännite

Yleisesti jännite käsitetään kahden eri pisteen välisenä sähköisenä potentiaalierona. Johdon päiden välisen sähköisen varauksen jakautuminen määräytyy kulutuksen ja tuotannon summana. Laskemalla pituusintegraali tunnetun sähkökentän yli saadaan

potentiaalierosta kahden eri pisteen välinen jännite kaavan 1 mukaisesti, missä U kuvaa potentiaaliero pisteen f ja g välillä, V potentiaalia ja E heterogeenistä sähkökenttää matkan l funktiona (Freedman & Young 2008, 763).

$$U_{fg} = V_f - V_g = \int_f^g E \cdot dl \quad (1)$$

Jännite on lokaali suure, joka pyrkii nousemaan loistehon kasvaessa. Eri jännitetasoille määritetyt standardien mukaiset rajat määrittävät jännitealueen, jonka sisällä jännite saa vaihdella. Laitteilla on rajallinen jännitekestoisuus ja jännitteen ollessa liian suuri kasvaa laitteiden rikkoutumisen mahdollisuus. On kuitenkin hyvä huomata, että liian suuret jännitteet eivät kaada järjestelmää samalla tavalla kuin esimerkiksi liian pienet jännitteet (Elovaara & Haarla 2011a, 216). Jännitteen vakaus eli jännitestabiilius on esitelty tarkemmin kohdassa 3.3.

Voimajohtojen reaktanssi on huomattavasti suurempi kuin niiden resistanssi, joten solmujännitteiden välille syntyy kulmaero, jolloin tehonsiirto johdossa on mahdollista. Reaktanssi ja kapasitanssi vaikuttavat loistehoon ja loisteho vaikuttaa jännitteeseen. Aliluonnollisella teholla olevat loistehoa tuottavat kantaverkon johdot ja loistehoa kuluttavat laitteet, kuten reaktorit, ovat oleellinen osa epälineaarista ja dynaamista sähköverkkojärjestelmää (Elovaara & Haarla 2011a, 217).

Luonnolliseksi tehoksi sanotaan tehoa, jolla voimajohdon kuluttama loisteho on yhtä suuri kuin sen tuottama loisteho. Säteilteisessä verkossa siirtomatkat voivat olla pidempiä kuin silmukoidussa verkossa, jolloin johtojen reaktanssien kasvaessa on otettava huomioon suuremman maakapasitanssin vaikutus johdolla syntyvään loistehoon. Jokaiselle johtotyypille on erikseen määritelty sen luonnollinen teho, loistehon tuotanto, sekä terminen kuormitettavuus (Elovaara & Haarla 2011a, 98).

Luonnollista tehoa pienemmällä teholla oleva johto on loistehon suhteen ylijäämäinen ja voidaan sanoa, että johto on aliluonnollisella teholla. Vastaavasti johdon luonnollista tehoa suuremmalla siirtoteholla oleva johto on loistehon suhteen alijäämäinen ja näin ollen verkko vaatii tältä osin loistehontuotantoa, jotta jännite ei laske alle alimman sallitun käyttöjännitteen.

Johdon luonnollinen teho voidaan arvioida kaavan 2 mukaisesti, kun oletetaan tehon kulma suhteellisen pieneksi (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen & Palva 2003, 366). Kaavassa 2 P_1 on johdon luonnollinen pätöteho, U pääjännite, X johdon reaktanssi ja B johdon susceptanssi.

$$P_1 = \frac{U^2}{\sqrt{\frac{X}{B}}} \quad (2)$$

Jännitetaso pyrkii vaihtelevaan voimakkaasti eri vuorokaudenaikoina. Jännitteensäädön tarve riippuu verkon siirtotilanteesta, kulutuksesta ja sähkön tuotannon määrästä. Vuorokauden-, viikon- ja vuodenaika määräävät yleisen siirtotilanteen ja verkon kuormitusasteen. Vaihtosähköverkkoon suunnitellut laitteet toimivat nimellisjännitteellään ja ottavat verkosta juuri sen suuruisen virran, jonka ne toimiakseen tarvitsevat. Verkkoon kytkettyjen laitteiden määrä vaikuttaa kuormitustilanteeseen. Sähköenergian kulutus luo tarpeen energian siirrolle. Suurentunut kuormitus verkossa laskee verkon jännitettä ja aiheuttaa näin ollen tarpeen säätää sitä kohti asetusarvoa (Tapcon 240. 2014, 66).

2.1.2 Loisteho

Loistehon ja jännitteen välinen yhteys ilmenee johtojen päiden välisestä jännite-erosta, kun loisteho pyrkii siirtymään pois päin suuremmasta jännitteestä. Verkon eri solmuissa eli verkon johtojen päissä olevan jännite-eron suuruus on kuitenkin rajallinen ja näin ollen rajoittava tekijä loistehon siirtoa ajatellen (Kundur 1994, 254). Johtojen tuottama loisteho siirron ja kulutuksen ollessa matalalla tasolla pyritään kompensoimaan jännitteensäädön keinoin, jotta 110 kV jännite ei nousisi liian suureksi. Loistehon, pätötehon ja näennäistehon yhteys ilmenee kaavasta 3, missä Q on loisteho, S näennäisteho ja P pätöteho (Freedman & Young 2008, 785).

$$Q^2 = S^2 - P^2 \quad (3)$$

On tärkeää ottaa huomioon, että loistehon siirto aiheuttaa häviöitä ja kuormittaa verkkoa, joten loistasapainon säilyttäminen on peruskäsite puhuttaessa 110 kV kantaverkon jännitteensäädöstä. Loistehoa tuottavia komponentteja ovat sarja- ja

rinnakkaiskondensaattorit, ylimagnetoidut generaattorit ja aliluonnollisella teholla olevat johdot. Loistehoa kuluttavia komponentteja ovat rinnakkaisreaktorit, yliluonnollisella teholla olevat johdot ja alimagnetoidut generaattorit. 110 kV jännitetasossa jännitteensäätö perustuu rinnakkaiskondensaattorien ja käämikytkimien toimintaan. Kolmivaihejärjestelmässä johdossa syntyvät virtalämpöhäviöt P_h lasketaan kuormitusvirran I , johdon resistanssin R , loistehon Q , johdon pätötehon P ja pääjännitteen U avulla kaavan 4 mukaisesti (Kundur 1994, Vihavainen 2007, 16 mukaan).

$$P_h = 3RI^2 = R \left(\frac{P^2 + Q^2}{U^2} \right) \quad (4)$$

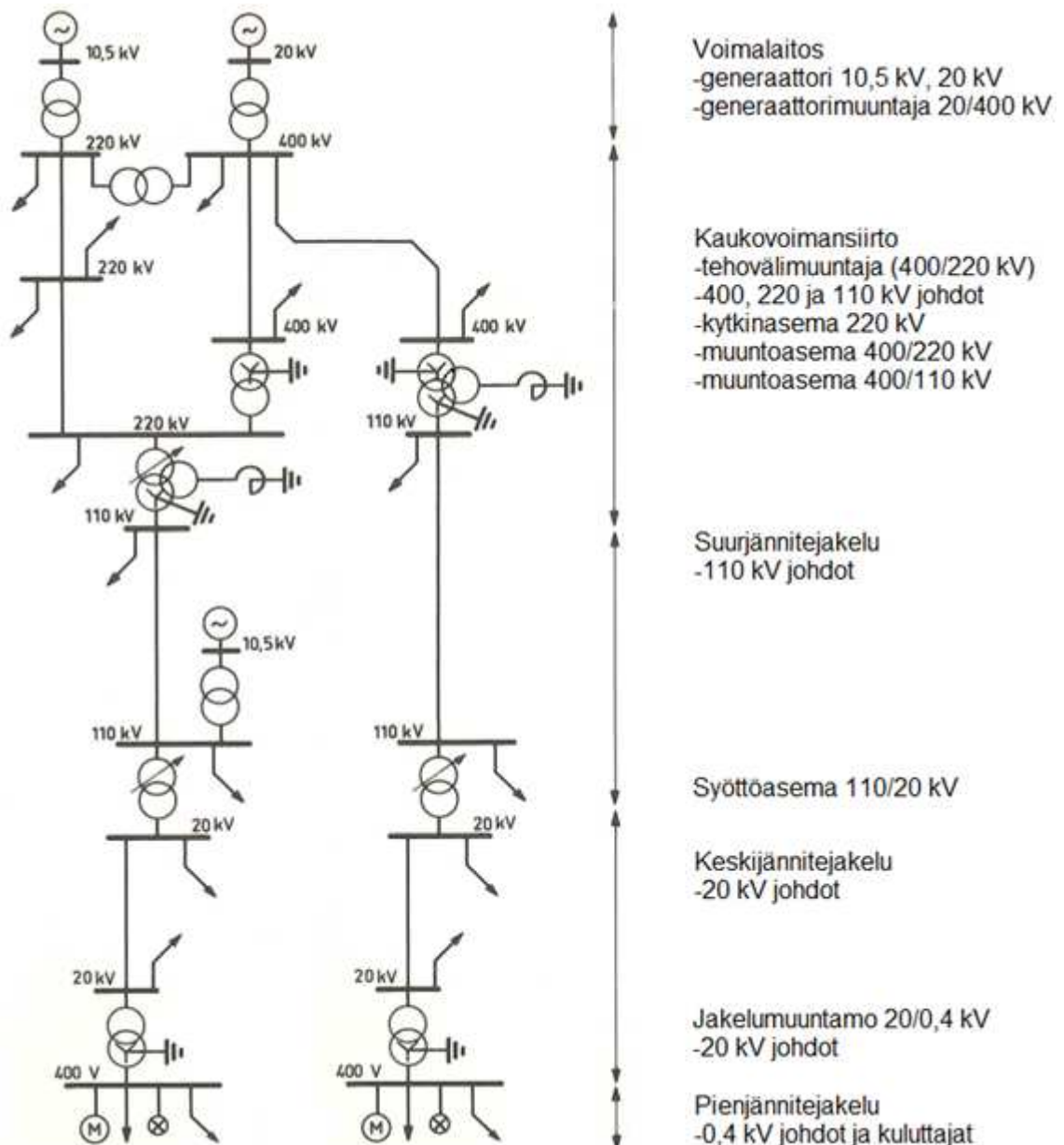
Suomen kantaverkon loistehotasetta tarkkailee kantaverkkokeskuksen tasehallinta. Loistehon kompensointia voidaan tehdä esimerkiksi Viroon menevän Estlinkin kautta ja Viipurin linkin kautta (Poikonen 2014). Kulutuksen ollessa pieni voidaan joutua ottamaan pois käytöstä kokonaisia johtoja niiden aiheuttaman loistehon kasvun ja jännitteenousun takia. Esimerkkinä on välin Petäjävesi-Nuojua 220 kV johto, joka voidaan ajoittain joutua poistamaan käytöstä vähäisen siirron takia (Nordin 2014).

Fingrid Oyj velvoittaa paikalliset verkkoyhtiöt huolehtimaan loistasapainosta. Määritellyltä toiminta-alueelta poikkeaminen ei aikaisemmin ole aiheuttanut kuluttajalle välttämättä mitään kustannuksia, mutta yleisesti ollaan kuitenkin siirtymässä siihen, että kompensointitarve tuo mukanaan loistehotariffin. Loisteho on kaupankäynnillisesti pikemminkin sähkötekniinen suure ja tariffin osuus kuluttajalle suuntautuvasta sähkön hinnasta lasketaan yleensä pätötehon tietyn aikavälin keskilukulutuksista tai huippukulutuksista (Loistehon kompensointi 2008, 2).

2.2 Kantaverkon rakenne

Valtaosa Suomen kantaverkosta ja sen komponenteista on 1970- ja 1980-luvuilta. Kesällä 2014 on ollut toiminnassa yhteensä 48 muuntoasemaa, joista 11:lla on myös rinnakkaiskondensaattorit. 16 muuntoasemalla on useampi kuin yksi muuntaja ja yleisin muuntoasematyyppi on 400/110 kV muuntoasema. Kantaverkko on pääosin silmukoitu, lukuun ottamatta pohjoisinta Lappia. Voimalaitosten generaattorit ovat liittyneinä joko 220 kV tai 400 kV generaattorimuuntajan kautta kantaverkkoon. Kaukovoimansiirto

tapahtuu pääasiassa 400 kV ja 220 kV jännitetasossa ja suurjännitejakelu 110 kV jännitetasossa. 220 kV voimansiirtoverkosta ollaan osittain luopumassa ja pääasialliset voimansiirroissa käytetyt jännitetasot tulevat olemaan 110 kV ja 400 kV. Jakeluverkkoyhtiöt vastaavat pääasiallisesti 110/20 kV jakelumuuntajista ja 20 kV johdoista. Tarkasteltaessa kuvaa 1 ylhäältä alaspäin saadaan yksinkertaistettu kuva Suomen kantaverkon rakenteesta (Elovaara & Laiho 1988, 29-31).



KUVA 1. Siirto- ja jakeluverkon periaatekaavio (Elovaara & Laiho 1988, 30, muokattu)

Tyypillisin muuntoasema on yhden tai kahden rinnan kytketyn 400/110 kV muuntajan asema. Muuntajien tertiäärikäämitykseen on voitu kytkeä yksi tai kaksi reaktoria. Reaktorit on mahdollista kytkeä yksitellen verkkoon tai verkosta irti. Muuntoasemilla

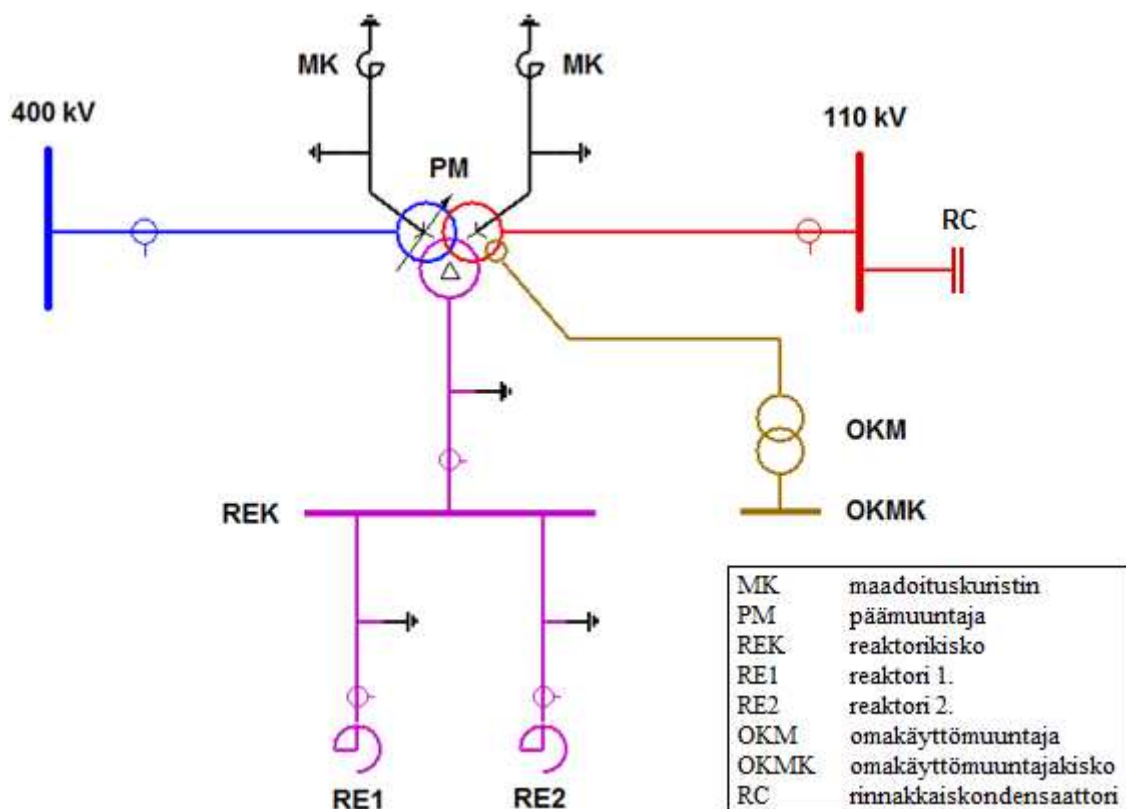
on aina omakäyttömuuntaja. Omakäyttömuuntajalla on oma käämitys, jolla se on liittyneenä muuntajaan. Kahden muuntajan muuntoasemilla omakäyttömuuntaja on tyypillisesti vain toisella muuntajalla. Toisaalta Rauma on kolmen muuntajan muuntoasema ja siellä on omakäyttömuuntaja kahdella muuntajalla. Fingrid Oyj:n omistuksessa oleva voimansiirtoverkko on esitettyä tarkemmin kuvassa 2.



KUVA 1. Fingrid 2014, pohjakartta © Karttakeskus Oy, Helsinki

Valtakunnallisella kantaverkkoyhtiöllä Fingrid Oyj:llä on järjestelmävastuu ja se vastaa Suomen sähköjärjestelmän teknisestä toimivuudesta kokonaisuudessaan. Kuvassa 2 esitetty Suomen sähköjärjestelmä on mitoitettu siten, että se vastaa ns. N-1 periaatteeseen. Tällä tarkoitetaan sitä, että sähköjärjestelmä kykenee kestäämään yksittäisen vian niin, ettei sen vaikutusalue leviä ja johda suurihäiriöön (Sähkömarkkinoiden varmuus 2000, 24).

Kuvassa 3 on kuvattu Fingrid Oyj:llä yleisesti käytetty 400/110 kV kolmikäämimuuntaja, sen tertiääriin liitetyt reaktorit sekä omakäyttömuuntaja. 400 kV, 110 kV sekä omakäytön kiskot on esitetty kuvassa paksuilla viivoilla. Kuvan 3 400/110 kV muuntoasemaesimerkkiin on piirretty myös rinnakkaiskondensaattori, joka on liitettyneenä rinnan 110 kV kiskoon. Pienet silmukat johtojen päällä kuvaavat virran mittausta.



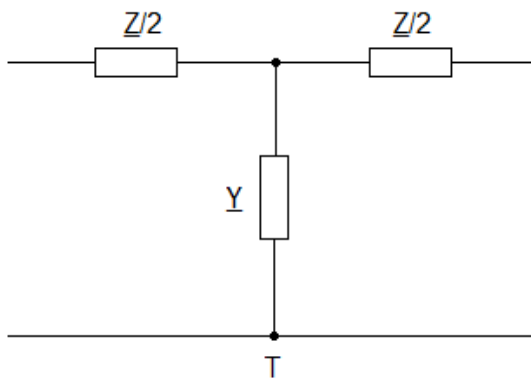
KUVA 2. 400/110 kV muuntaja, omakäyttömuuntaja, kondensaattori ja kaksi reaktoria

Voimansiirtoverkko koostuu voimajohdoista, tehomuuntajista ja niiden käämikytkimistä, sarjakondensaattoreista, rinnakkaiskondensaattoreista, rinnakkaisreaktoreista sekä generaattoreista. 110 kV jännitetasossa jännitteensäädön kannalta tarkasteltuna tärkeimpiä ovat muuntajien käämikytkimet ja

rinnakkaiskondensaattorit. Kantaverkon komponentteihin voidaan lukea myös erottimet, katkaisijat, virtamuuntajat ja jännitemuuntajat sekä erityyppiset omakäyttömuuntajat. 110 kV jännitetason jännitteensäädön näkökulmasta tarkasteltuna näiden pienempien komponenttien mallintaminen verkostolaskentaan ei ole kovinkaan merkityksellistä, koska niiden vaikutus eri jänniteportaiden jännitteisiin on suhteellisen pieni (Baldwin 2014).

2.2.1 Siirtojohdot

Voimansiirtoverkko koostuu johdoista, jotka sisältävät resistanssia, konduktanssia ja induktanssia, joiden käsitetään jakautuvan tasaisesti koko johtopituudelle. Yleisimmät johtomateriaalit ovat alumiini ja kupari. Kuvan 4 mukaisella T-sijaiskytkennällä voidaan laskea alle 200 km pitkille voimansiirtojohdoille impedanssi \underline{Z} kaavan 5 ja admittanssi \underline{Y} kaavan 6 mukaisesti (Elovaara & Laiho 1988, 48). Kaavoissa 5 ja 6 r kuvaa resistanssia, g konduktanssia, l induktanssia, c kapasitanssia, s johtopituutta ja ω kulmataajuutta.



KUVA 4. Voimansiirtojohdon T-sijaiskytkentä (Elovaara & Laiho 1988, 48)

$$\underline{Z} = (r + j\omega l) \cdot s \quad (5)$$

$$\underline{Y} = (g + j\omega c) \cdot s \quad (6)$$

Heikon verkon alueella jännitteen vaihtelut voivat olla suurempia ja kuormitustilanteen aiheuttamat muutokset havaitaan selvemmin. Verkon siirtokapasiteettia pystytään kasvattamaan keskittämällä sähkövoimansiirron resursseja ja vahvistamalla siirtoteitä

(Transmission-Capacity 2014, 1). Esimerkiksi Tammiston muuntoasemalla on hyvin keskeinen asema pääkaupunkiseudun sähköjakelussa. Tammistossa tapahtuvat muutokset näkyvät miltei kymmenellä lähimmällä asemalla. Käämikytkimen askeltaessa Tammistossa alaspäin yhden askeleen laskee 400 kV jännite noin 0,5 kV. Muutos on verrattain pieni ja 400 kV jännitetasoon nähden suhteellisen merkityksetön, mutta vaikutus ympäröiviin asemiin sekä niiden muuntajien ala- ja yläjännitteisiin on suhteessa samaa suuruusluokkaa.

Siirtojohdoille on määritelty ominaisarvoja, joiden perusteella voidaan määrittää johdon tuottama loisteho, siirtohäviöt sekä arvioida käytössä olevan johdon vaikutuksia ympäristöönsä. Taulukossa 1 on tyypillisiä suurjännitejohtojen ominaisarvoja, missä U_R on johdon nimellisjännite, r resistanssi, x reaktanssi, g konduktanssi ja b admittanssi. Taulukosta 1 voidaan havaita 110 kV johtojen reaktanssin olevan noin nelinkertainen verrattuna niiden resistanssiin.

TAULUKKO 1. Suurjännitejohtojen ominaisarvoja (Elovaara & Haarla 2011a, 98)

U_R/kV	Johtimen nimitys	$r/\Omega/\text{km}$	$x/\Omega/\text{km}$	$g/\mu\text{S}/\text{km}$	$b/\mu\text{S}/\text{km}$
110	Suursavo	0,268	0,412	0	2,810
110	Ostrich	0,188	0,410	0	2,840
110	Duck	0,096	0,409	0	2,808
110	2-Duck	0,048	0,300	0	3,788
110	2xDuck	0,096	0,383	0	2,994
110	2x2-Duck	0,048	0,274	0	4,132
400	2-Finch	0,026	0,330	0,023	3,570
400	3-Finch	0,017	0,291	0,020	4,040

Taulukosta 1 voidaan havaita, että 110 kV ja 400 kV johdot eroavat toisistaan resistanssien osalta. 400 kV johdoilla on taulukon 1 mukaan pienempi resistanssi kuin 110 kV johdoilla. Merkintä 2-Duck tarkoittaa nippujohdinta, joka koostuu kahdesta Duck-osajohtimesta. 2xDuck -merkintä tarkoittaa kaksoisjohtoa. Duplex-johtimilla on kaksi osajohdinta vaihetta kohden ja Triplex-johtimilla kolme osajohdinta vaihetta kohden. Duplex-johdinratkaisulla voidaan resistanssi pudottaa noin puoleen ja Triplex-ratkaisulla kolmannekseen (Elovaara & Haarla 2011a, 99). Johtojen luonnolliset tehot on esitetty taulukossa 2.

TAULUKKO 2 Johtojen tyypillisimmät luonnolliset tehot (Elovaara & Haarla 2011a, 95)

Nimellis-jännite/kV	Avojohto, 3-vaiheinen/MW
110	32
110 (2 osajohdinta)	43
220	130
400	390
400 (2 osajohdinta)	475
401 (3 osajohdinta)	540

Taulukosta 2 voidaan havaita, että useamman osajohtimen käyttö vaihetta kohden nostaa johdon luonnollista tehoa. Voimajohdon suurempi luonnollinen teho mahdollistaa suuremman tehon siirron. Johdon ollessa aliluonnollisella teholla tämä tarkoittaa suurempaa kompensoinnin tarvetta. Tyypillisesti voimalinjat on toteutettu käyttäen useampaa osajohdinta.

2.2.2 Tehomuuntajat ja käämikytkimet

Muuntajat ovat yleensä kolmikäämimuuntajia, joihin on asennettu käämikytkin ja omakäyttömuuntaja. Käämikytkimen tehtävä on muuttaa muuntajan muuntosuhdetta ja sitä kautta vaikuttaa alajännitteeseen joko nostavasti tai laskevasti riippuen askellussuunnasta. Käämikytkimen askeltaessa ylöspäin muuttuu muuntajan yläjännitepuolen käämitys siten, että alajännite pyrkii nousemaan. Käämikytkimen askeltaessa alaspäin alajännite puolestaan laskee. Askelluksen suuruus ja vaikutus alajännitepuolella on itseisarvoltaan vajaan kilovoltin luokkaa. Muuntajan muuntosuhteen muutos vaikuttaa myös yläjännitteeseen ja loistehon siirtymiseen. Omakäyttömuuntajalta otetaan muuntoaseman releiden ja suojalaitteiston tarvitsema omakäytösähkö. Muuntajan toisiojännite lasketaan kaavan 7 mukaisesti, missä U_1 on ensiöpuolen jännite, U_2 toisiopuolen jännite, N_1 ensiöpuolen käämin kierrosluku ja N_2 toisiopuolen käämin kierrosluku.

$$U_2 = \frac{U_1 \cdot N_2}{N_1} \quad (7)$$

Muuntoasemilla käämikytkimen askellukset tapahtuvat yleensä ilta- ja yöaikaan sekä aamuisin (Nordin 2014). Muuntajien käämikytkinratkaisuilla on tärkeä rooli nykyaikaisen sähköjärjestelmän jännitteensäädössä. Käämikytkimen askelluksella voidaan haluttua jännitetasoa ylläpitää laskennallisesti määritettyjen rajojen sisällä kuormituksesta riippumatta (P. Wallin 1991, 114). Käämikytkin on mekaaninen laite, joka pystyy askeltamaan ja toimimaan muuntajan ollessa kuormitettuna. Tyypillisesti käämikytkin on asennettu muuntajan kanteen ja sillä on yhteinen jäähdytysjärjestelmä muuntajan kanssa. Käämikytkimeen on sisäänrakennettu kosketinrajapintoja ja apukuormia, joiden avulla askeltaminen on mahdollista järjestelmän ollessa jännitteinen ja kuormitettu.

Käämikytkimen toimintaperiaate on ollut sama vuosikymmenet. Uusia tutkimuksia on julkaistu koskien käämikytkimien parannusehdotuksia piirikaavioiden ja toimintaperiaatteiden osalta (Gao, Jishou & Qingchun 2002, 1). Kuvassa 5 on ABB:n 1960-luvulla käyttämä käämikytkintyyppi, jota käytetään vielä tänäkin päivänä. Muuntajan ja sen laitteiden keskimääräinen käyttöikä on noin 50-60 vuotta.



KUVA 5. ABB:n muuntajan kanteen asennettava käämikytkin (ABB 2014)

Jokaisella muuntajalla on oma käämikytkin ja käämikytkimellä oma jännitteensäätäjä. Jännitteensäätäjään on asetettu 60 sekunnin toimintaviive, jotta käämikytkin vastaisi mahdollisimman hyvin hitaisiin 110 kV jännitteen vaihteluihin. Fingrid Oyj:n omistuksessa olevien tehomuuntajien käämikytkimien yhden askeleen suuruus on tyypillisesti 1,33 % ja yleisin askelmäärä on 13. Yhden muuntajan asemia ja itsenäisellä säädöllä olevia muuntajia on yhteensä 32. Rinnan kytkettyjä muuntajia on yhteensä 16, joista kahdeksalla muuntajaparilla on käämikytkimillä sama askelluku. Kahdeksalla muuntoasemalla askellusparit ovat erisuuruiset.

Useamman muuntajan asemilla muuntajien ensiöpuolen nimellisjännitteet ensiökäämeissä voivat erota, joten nimellisesti saman tehoisilla muuntajilla käämikytkimien askelparit voivat poiketa toisistaan. Tämä tarkoittaa sitä, että esimerkiksi kahden muuntajan muuntoasemalla muuntajien käämikytkimet eivät ole samalla askelluvulla (Itäpää 2014).

Joissain erikoistapauksissa rinnan kytketyillä muuntajilla voi esiintyä ongelmia loistehotasapainossa. Esimerkiksi lähekkäin olevilla Tammiston ja Länsisalmen muuntoasemilla muuntajaparin ominaisuuksista johtuen on mahdollista, että loisteho alkaa kiertyä päämuuntajasta numero yksi päämuuntajaan numero kaksi ja toisinpäin (Tirri 2014). Tällainen ilmiö ei varsinaisesti vahingoita järjestelmää, mutta aiheuttaa kuitenkin tarpeettomia ja ei-toivottuja häviöitä ja lieveilmiöitä verkossa (Nordin 2014).

Käämikytkimien mekaaninen kestoisuus on tyypillisesti moninkertainen verrattuna niiden kontaktikestoisuuteen. Käämikytkimen mekaaninen kestävyys voi olla 800 000 askelluksen luokkaa kontaktikestoisuuden jäädessä noin 300 000 askellukseen (Reinhausen 2014, 20). Käämikytkimen jännitteensäätäjän asetelut pyritään määrittämään siten, että käämikytkin askeltaisi mahdollisimman harvaan (Tapcon 240. 2014, 68).

Käämikytkimen jännitteensäädöllinen toiminta on tarkoitettu hitaiden jännitevaihteluiden kompensoimiseksi. Tämän vuoksi käämikytkimen askellukselle on olemassa erilaisia lukitustiloja, jotta välttyttäisiin laitteistojen rikkoutumiselta. Yläjännitteillä ja alajännitteillä on molemmilla puolilla yleensä alijännitereleet, jotka huolehtivat siitä, että käämikytkimen logiikka menee lukitustilaan, jos jännite laskee alle jännitteensäätäjälle asetettujen jänniterajojen. Muuntajan alajännitteen noustessa liian korkeaksi voi jännitteensäätäjä tehdä nopeutetun käämikytkimen askelluksen alaspäin muutamassa sekunnin kymmenyksessä nopeutetulle käämikytkimen askellukselle asetetun askellusrajoituksen jälkeen (Tapcon 240. 2014, 10-25). Nopeutetun askelluksen askellusrajoitus on tyypillisesti kolme sekuntia ja jänniteraja 123,2 kV. Tämän tyyppinen nopeutettu askellus on esimerkiksi Uusnivalassa, Hikiällä ja Alajärven päämuuntajalla numero kolme.

2.2.3 Rinnakkaiskondensaattorit

Verkkoon rinnan kytkettyä kondensaattoriparistoa kutsutaan rinnakkaiskondensaattoriksi. Rinnakkaiskondensaattori voidaan kytkeä ja erottaa verkosta katkaisijan avulla. Jännitteensäädön kannalta kondensaattorin tarkoituksena on tuottaa loistehoa ja nostaa verkon jännitettä. Rinnakkaiskondensaattoreita löytyy Fingrid Oyj:n siirtoverkosta yhteensä 17, joista 12 sijaitsee muuntoasemilla ja loput kytkinasemilla. Kondensaattorit on asennettu 110 kV kytkin- ja muuntoasemille ja niiden jännitettä nostava vaikutus on noin yhden kilovoltin luokkaa 110 kV tasossa.

Kolmivaiheinen rinnakkaiskondensaattoriparisto koostuu useammasta yksivaiheisesta kondensaattoriyksiköstä. Kondensaattoriparistolta vaadittu teho määräytyy rinnan kytkettyjen kondensaattoriyksiköiden lukumäärän mukaisesti. Yksiköiden lukumäärä määräytyy 110 kV verkon nimellisjännitteen mukaisesti. Kondensaattoripariston suojaamiseksi jokaisella kondensaattoriyksiköllä on yleensä yksikkökohtaiset suojaukset ja koko paristolla myös epäbalanssivirtojen eroarvomittaukseen perustuva epäbalanssirelesuojaus (Elovaara & Haarla 2011b, 227-230). Kuvassa 6 on Kangasalan kaksoistähteen kytketty rinnakkaiskondensaattoriparisto.



KUVA 6. Kangasalan kondensaattoriparisto

Fingrid Oyj:n käyttämien rinnakkaiskondensaattoriparistojen kokoluokka on 7,5–65 MVar. Verkostolaskennan kannalta on hyvä huomata eri laitteiden nimellisjännitteiden eroavaisuudet. PSS®E mallintaa kondensaattoriparistot verkostolaskentaan soveltuviksi

malleiksi ja näin ollen ohjelman sisällä joidenkin asemien laskennallinen MVAR-arvo voi poiketa nimellisestä. Esimerkiksi Liedon muuntoasemalla sijaitseva Suomen suurimman kondensaattoripariston nimellinen 65 MVAR -paristo on mallinnettu PSS®E-ohjelmistossa 54,50 MVAR -arvoon ilmoitetun nimellisjännitteen ollessa 120 kV.

Pariston verkkoon kytkemisen vaikutus kasvaa sitä mukaa, mitä heikommasta verkosta on kyse. Loistehosäätäjä mittaa 110 kV puolen muuntajien summaloistehoa ja kondensaattorien verkkoon kytkeytymisen hoitaa automatiikka tai mahdollisesti valvomo-operaattori käsikäytöllä (Nordin 2014). Rinnakkaiskondensaattorien loistehosäätäjän säätöikkuna poikkeaa käämikytkimen jänniteensäätäjän säätöikkunasta loistehon siirtymisominaisuuksien takia.

Jännite voi laskea 110 kV tasossa ja suuremmasta jännitetasosta voi siirtyä suhteessa enemmän loistehoa kohti pienempää jännitetasoa ennen kuin kondensaattoriparisto kytkeytyy verkkoon. Toisaalta siirtotilanteen ollessa pieni, jännite nousee 110 kV tasossa ja pienikin loistehon siirto kohti suurempaa jännitetasoa aiheuttaa kondensaattoripariston irtikytkeytymisen. Kondensaattoreita käytetään enenevässä määrin 400 kV jännitetaso ja keskeytystilanteiden tukemiseen (Itäpää 2014). Esimerkkinä 400 kV jännitetaso tukemisesta on Liedon muuntoasema, jolta löytyy myös kaksi reaktoria kokoluokiltaan 60 MVAR ja 63 MVAR.

Kondensaattoreille on asetettu 300 sekunnin pumppauksen esto pariston liian nopean kytkeytymisen varalta. Pumppauksen estolla tarkoitetaan kondensaattorien kytkeytymisen aikarajoitusta, jonka tarkoituksena on mahdollistaa kondensaattorin riittävä purkautuminen. Loistehomittauksen lisäksi kondensaattoreilla on tyypillisesti ali- ja ylijännitereleet, jotka toimivat 105 kV ja 123 kV alueilla ja kytkevät tarvittaessa kondensaattorit verkkoon ja verkosta irti. Fingrid Oyj:llä on yhdeksän kondensaattoria, jotka kytkeytyvät verkkoon jänniteensäätäjän toimesta.

2.2.4 Rinnakkaisreaktorit

Rinnakkaisreaktoreiden tehtävä on kompensoida 400 kV ja 220 kV verkon ylijäämäloistehoa pienen siirron aikana, kun johdot tuottavat loistehoa ollessaan

luonnollista tehoa pienemmässä tilassa. Muuntajien tertiääriin kytketyt reaktorit toimivat joko 10 kV tai 20 kV käämityksessä. Fingrid Oyj:n tyypillisin reaktorikoko on nimellisarvoltaan 63 MVA_r 400 kV jännitetasossa ja 20 MVA_r 220 kV jännitetasossa.

Reaktoreita on rakenteellisesta näkökulmasta tarkasteltuna kahta eri päätyyppiä: ilmaeristeisiä ja öljyeristeisiä. Molempia reaktorityyppejä on Suomessa käytössä. Ilmaeristeiset reaktorit ovat käytännössä kolmioon aseteltuja keloja, jotka on aidattu voimakkaiden magneettikenttien aiheuttamien haittojen vuoksi. Kolmioon sijoittaminen minimoi syntyneen magneettikentän vaikutusta ympäristöönsä. Öljyeristeiset reaktorit muistuttavat rakenteellisesti enemmänkin muuntajia ja mahtuvat toimintaperiaatteensa ansiosta pienempään tilaan kuin ilmaeristeiset reaktorit. Haittapuolina öljyeristeisissä reaktoreissa on koteloinnin ja öljyn tuoma massa, sekä ympäristön suojauksessa esiin tulevat asiat (ABB 2014). Kaikki uudet reaktorit ovat tyypiltään ilmaeristeisiä (Elovaara & Haarla 2011b, 226-227).

2.2.5 Sarjakondensaattorit

Sarjakompensoidun voimajohdon käyttöaste on suurempi kuin kompensoimattoman voimajohdon. Sarjakondensaattori kasvattaa siirtokapasiteettia. Sarjakondensaattoreita ei suoranaisesti käytetä 110 kV jännitetason jännitteensäätöön, mutta laitteet on hyvä käsitellä yleisellä tasolla puhuttaessa jännitteensäädöstä. Sarjakompensointi ja sarjakondensaattorit eroavat rinnakkaiskondensaattoreista suojauksen, kytkentöjen ja yleisten toimintaperiaatteiden osalta. Sarjakompensoituna on tällä hetkellä RAC-leikkaus ja P1-leikkaus. Siirtoleikkauksella tarkoitetaan rinnakkaisia voimajohtoja, joiden yhteistä siirtokykyä tarkastellaan. P1-leikkaus yhdistää Pohjois- ja Keski-Suomen kolme 400 kV ja kaksi 220 kV voimajohtoa. RAC-leikkaus yhdistää Pohjois-Suomen ja Pohjois-Ruotsin kaksi 400 kV voimajohtoa. Fingrid Oyj:llä on yhteensä kuusi sarjakondensaattoriparistoa (Itäpää 2014).

Sarjakompensointia käytetään pitkien siirtoyhteyksien kompensointiin kompensoimalla siirtojohtojen reaktanssia. Siirtojohtojen kanssa sarjaan kytketty sarjakondensaattoriparisto stabilisoi jännitettä ja siirtojohtojen päiden välillä olevaa kulmaeroa. Kantaverkossa kompensoitujen johtojen kompensointiaste eli kompensointi suhteessa johdon reaktanssiin on noin 70%. Koska sarjakondensaattoripariston läpi

kulkee johdon läpi kulkema virta ja pariston tuottama loisteho on verrannollinen johdossa kulkevan virran neliöön, on pariston loistehontuotto käytännössä itsestään säätyvä. Myös sarjakondensaattoriparistoille on toteutettu epäbalanssisuojaus rinnakkaiskondensaattorien tapaan. Muutoin sarjakondensaattorien suojaus on rinnakkaiskondensaattoreiden suojaukseen verrattuna hieman monimutkaisempaa johtuen poikkeavasta kytkentätavasta (Elovaara & Haarla 2011b, 232-236).

3 JÄNNITTEENSÄÄDÖN TAVOITTEET 110 kV JÄNNITETASOSSA

Toimivan sähkövoimajärjestelmän edellytyksenä on, että jännite, loisteho ja taajuus pysyvät lähellä niille asetettuja nimellisarvoja. Verkon luotettava toiminta perustuu käyttövarmuuden riittävän tason ylläpitämiseen ja mahdollisten häiriöiden ennakkointiin ja ehkäisemiseen. Verkon häviöiden optimointi puolestaan nostaa sähkönsiirron kannattavuutta ja taloudellisuutta.

3.1 Jännitteensäätö yleisesti

Yleinen siirto- ja kulutustilanne vaihtelee kantaverkossa vuodenajan mukaan. Talvella sähköä tuotetaan enemmän lähempänä kulutuspisteitä ja yleinen siirtotilanne voi olla suhteellisen matala. Kesällä verkon kuormitus voi olla vähäistä, mutta yleinen siirtotilanne suhteellisen korkea, koska sähkön tuotanto on vähäisempää. Kyseiset seikat vaikuttavat suoraan myös sähkön päivä- ja tuntikohtaiseen markkinahintaan.

Reaktorien loistehon kompensointikyky ja sarjakondensaattorien siirtokapasiteettia kasvattava vaikutus korostuvat yleisen siirto- ja kulutustilanteen muuttuessa. Mitä kauempana kulutusta tuotanto on, sitä haasteellisempää on tarkastella jännitteensäätöä, jännitestabiiliutta ja käyttövarmuutta. Säteittäisen verkon ongelmat ovat periaatteessa yksinkertaisempia ratkaista kuin silmukoidun verkon. Yksittäisen johdon laskennalliset kompensointimahdollisuudet ovat rajallisemmat ja yksittäisten kompensointitoimenpiteiden vaikutusten arviointi on suoraviivaisempaa.

Kantaverkossa 110 kV verkon jännitteensäädön tarve on voimakkainta aamuisin ja myöhään iltaisin. Myös kondensaattorit kytkeytyvät näihin aikoihin verkkoon ja verkosta pois, jos loistehonsäätäjä tai jännitteensäätäjä havaitsee kompensoinnin tarpeen. Käämikytkimien askelluksesta ei tule erikseen mitään ilmoitusta kantaverkkokeskukseen, vaan jännitteensäätäjä säätää itsenäisesti käämikytkimen oikealle portaalle. Kondensaattoreilla on omat säätäjät, jotka toimivat irrallisena yksikkönä erillään käämikytkimistä.

Kangasalan muuntoasema on keskeinen paikka jännitteensäädön kannalta. Siellä tapahtuvat muutokset vaikuttavat käytännössä koko Suomen jännitetasoihin.

Kangasalalla tapahtuvien muutosten vaikutusta muuhun verkkoon on haasteellista arvioida ja mallintaa juuri vaikutusten laajuuden takia. Isoja jännitteen heilahteluja varten on Kangasalaan rakennettu *Static Var Compensator* eli SVC-säätäjä, joka muuntaa säätötapaansa sen mukaan, onko P1-siirto etelään vai pohjoiseen (Lehtimäki 2014). SVC-säätäjä on niin sanottu varmistustasaaja, jonka kapasiteetti on 240 MVar molempiin suuntiin. Käytännössä tämä vastaa viidestä kuuteen normaalikokoista kondensaattoria ja reaktoria (Nordin 2014).

3.2 Laatuvaatimukset

Fingrid Oyj:n yleisissä liittymisehdoissa (YLE2013) määritellään nimellisjännitteeltään 110 kV verkon jännitteen normaaliksi vaihteluväliksi 105–123 kV. Kyseinen vaihteluväli toimii myös yleisesti hälytysrajoina useille eri laitteille ja releille 110 kV puolella. Häiriö- ja poikkeustilanteissa jännitteen vaihteluväliksi hyväksytään 100–123 kV. Liittymisehdoissa määritellään myös, että liittyjän sähkölaitteiston ja siihen suoraan tai välillisesti liittyvien sähkölaitteistojen on toimittava niille tarkoitetuilla jännite- ja taajuusalueilla siten, että laitteisto täyttää sähköjärjestelmän asettamat vaatimukset. Sähkölaitteisto on suojattava siten, että se ei vaurioidu suuremmistakaan jännite- tai taajuusmuutoksista (YLE2013). Jännitteen pitäminen lähellä sille asetetun vaihteluvälin ylärajaa on virtalämpöhäviöiden pienentymisen ja sähkön siirron taloudellisuutta silmällä pitäen paras vaihtoehto.

Mitä suurempi on 110 kV verkon jännite, sitä pienemmät ovat häviöt 110 kV verkon siirto johdoissa. Yleisesti ottaen 110 kV jännitteen nostaminen tarkoittaa sitä, että myös nimellisarvoltaan 400 kV verkon jännitteiden on tuettava 110 kV verkkoa. Luonnollisesti myös 400 kV verkon jännitteiden pitäminen lähellä vaihteluvälin ylärajaa minimoi siirtohäviöitä. Sähkölaitteiden suhteellisen pitkän käyttöiän takia Suomessa on vielä sellaisia järjestelmiä, jotka eivät välttämättä kestä nimellisjänniterajan yläpäässä olevaa jännitetasoa. Tämä pakottaa osaltaan ohjaamaan 110 kV verkkoon matalampaa jännitettä, vaikka suurempi jännite olisi sähkön siirron kannalta edullisempi vaihtoehto. Toisaalta esimerkiksi Itä-Suomessa verkon rakenne on sellainen, ettei 110 kV verkon jännitteen nostaminen välttämättä ole mahdollista ja jännitteensäätöön tarkoitettu säätökapasiteetti on kokonaisuudessaan käytetty (Nordin 2014). Tällainen käyttötilanne ei ole suotava, sillä häiriötilanteessa käyttövarmuuden ylläpitäminen häiriintyy ja

verkkoa korjaavat toimenpiteet vaikeutuvat huomattavasti. Suomen kantaverkossa yläjännitepuolen asetusarvot ovat 400–418 kV ja 230–243,5 kV. Alajännitepuolen asetusarvo on välillä 110–120 kV. Asetusarvot ovat määritetty siten, että kantaverkon jännitteet pysyisivät Fingrid Oyj:n yleisten liittymisehtojen (YLE2013) mukaisten jännitteiden normaalien vaihteluvälien sisäpuolella.

3.3 Jännitestabiilius

Stabiiliudella yleisesti kuvataan jonkin toiminnan tai periaatteen pysyvyyttä ja vakautta. Sähkövoimatekniikassa stabiilius jaetaan yleensä kolmeen eri osa-alueeseen, jotka ovat jännite-, kulma- ja taajuusstabiilius. Erilaisilla kansainvälisillä standardeilla on pyritty vakauttamaan ja yhtenäistämään myös voimajärjestelmien stabiiliuden määritelmiä (Elovaara & Haarla 2011a, 216).

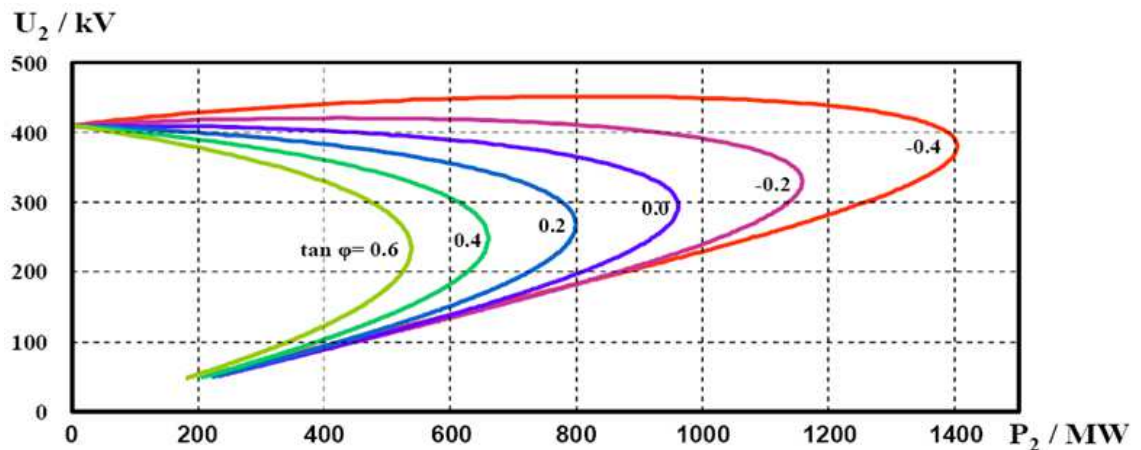
Kuluttajille jännitteen vaihtelu voi näkyä esimerkiksi valojen välkkymisenä ja herkempien laitteiden toiminnan häiriintymisenä ja epävakauteena. Jännitetason vakaus häiriintyy yleensä erilaisissa vikatilanteissa ja jyrkästi nousseen sähkön kulutuksen aiheuttaman jännitteenaleneman seurauksena. Jännitestabiilius tarkoittaa järjestelmän kykyä ylläpitää jännitteet hyväksyttävissä rajoissa sekä normaaleissa käyttötilanteissa että eri vakavuusasteisten häiriöiden jälkeen (Vihavainen 2007, 11).

Jännitestabiilius liittyy, jännitteensäädön näkökulmasta tarkasteltuna, erilaisiin kuormitus- ja siirtotilanteisiin ja sitä kautta loistehotuotantoon niin sähkön kulutuspisteissä kuin voimajohdoissakin. Jännitteensäädön ja loistehonsäädön yhteys jännitestabiiliuteen ilmenee 110 kV jännitetasossa pääasiassa automatiikan tekeminä korjausliikkeinä ja laskentana sekä järjestelmän tavoitteena ylläpitää asetusarvojen mukainen jännite.

Jäykän verkon kyky ylläpitää jännitettä mahdollisimman lähellä sille vaadittua arvoa on luonnollisesti parempi kuin heikon verkon suhteen. Voimajärjestelmän mallintamisella ja sen systemaattisen tarkastelun sekä laskennan avulla voidaan kullekin muutostilanteelle hakea raja-arvot ja etsiä mahdolliset epäkohdat verkon ja järjestelmän toiminnassa.

Loistehon ja pätötehon suhteen avulla voidaan määrittää kaavan 8 (Christensen 1986 Löf 1991, 52 mukaan) mukainen tangentti φ , jonka nollaa suurempi arvo kertoo kuvion 2 mukaisesti 400 kV jännitetason nopeasta tippumisesta säteittäisessä 400 kV johdossa. Tangentti φ :n nollaa pienemmillä arvoilla, ylikompensoidussa verkossa, 400 kV jännite pysyy hyvinkin lähellä sille asetettuja YLE2013:n mukaisia 395–420 kV rajoja.

$$\tan \varphi = \frac{Q_2}{P_2} \quad (8)$$

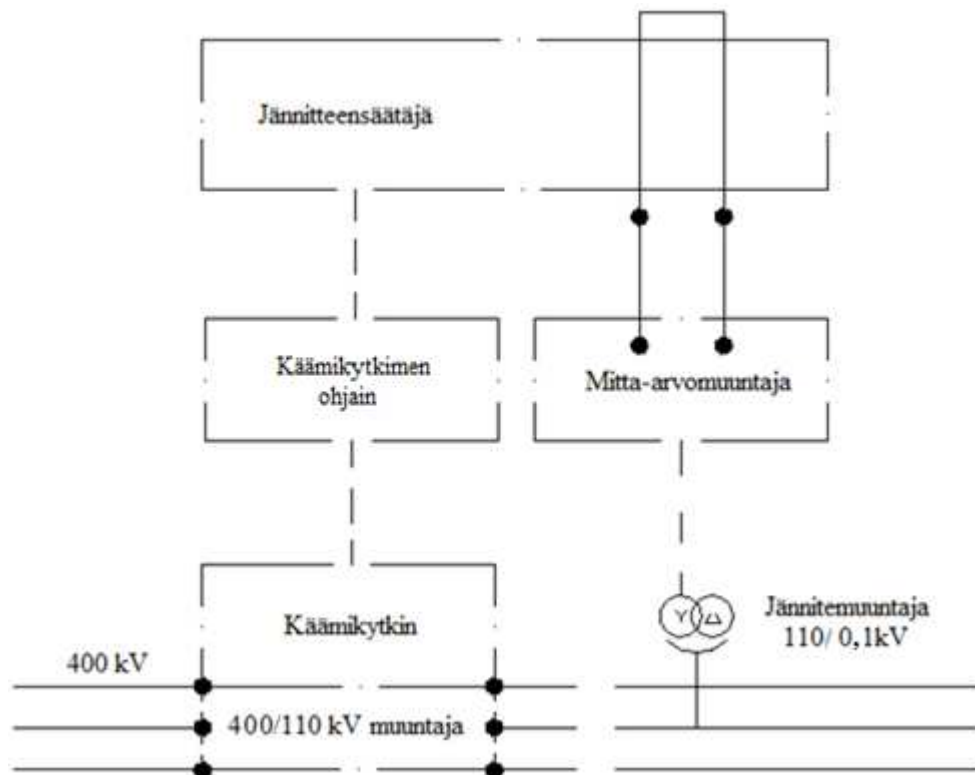


KUVIO 2. Johdon loppupään jännite pätötehojohdossa 400 kV:n säteittäiselle johdolle (Vihavainen 2007, 12)

Yksi esimerkki muutostilanteiden raja-arvojen määritystarpeelle on yhden muuntoaseman käämikytkimen jännitteensäätäjän jänniteikkunan raja-arvon ylitys ja sen seurauksena tapahtuva käämikytkimen askeltaminen. Kasvavan tehontarpeen aiheuttama loistehosuhteen muutos voimansiirto johdossa ja tätä kautta jännitteen yleinen aleneminen aiheuttaa tarpeen jännitteensäädölle. Tällöin on aiheellista määrittää yhden ylöspäin suuntautuvan askeleen vaikutus myös tarkasteltavaa ongelma-aluetta ympäröivään verkkoon. Yli puolen kilovoltin jännitteenousu lähistöllä olevilla muuntoasemilla muuntajan käämikytkimen askeltaessa ei ole vielä kriittinen, mutta antaa myös aihetta harkita käämikytkimen jännitteensäätäjän jänniteikkunan kaventamisen tarpeellisuutta.

3.4 Käämikytkimen paikallissäätö

Käämikytkimen paikallissäätöä voisi periaatteeltaan pitää osaksi myös kaskadisäätönä, kun jänniteensäätöön liittyvien mittasilmutkoiden määrä on enemmän kuin yksi. Esimerkiksi kaikki lukitukset eivät kulje samassa mittasilmutkassa. Yksinkertaistettuna muuntajan käämikytkimen jänniteensäätäjä toimii normaalin takaisinkytkennän kautta, kuten kuviossa 3 on esitetty.



KUVIO 3. Käämikytkimen jänniteensäätäjälle tulevan 110 kV jännitemittauksen periaatekuva

Jännitemuuntaja mittaa kuvion 3 mukaisesti 110 kV kiskojännitettä tähti-avokolmio-kytkennän kautta ja 100 V suuruusluokkaa oleva jänniteviesti rekisteröityy mitta-arvomuntajaan, joka muuntaa sen mA-viestiksi. Esimerkiksi Tapcon 240 jänniteensäätäjälle menee tyypillisesti vain ensimmäisen ja kolmannen vaiheen mA-viesti (Tapcon 240. 2014, 103). Jänniteensäätäjältä lähtee askelluksen indikointiin ja kaukokäyttöön liittyvät viestisignaalit sekä käämikytkimen askellukseen tarvittava tieto. Jänniteensäätäjälle tulevat kaukokäytön viestit sekä lukitustiloihin liittyvät signaalit. Käämikytkimen ohjain jätetään tyypillisesti huomioimatta mittausta tarkasteltaessa ja mielletään osaksi käämikytkintä ja sen toimintaa.

Käämikytkimen toiminnalle asetetaan erilaisia lukitustiloja, joilla pyritään suojaamaan laitteistoa ja verkkoa eriasteisissa vikatilanteissa. Lukitustiloja määrääviä lukituskaavioiden sisääntuloja ovat alajännitepuolen yli- ja alijännitteet, yläjännitepuolen yli- ja alijännitteet, sekä muuntajan läpi kulkevan ylivirran ja sitä kautta myös tehon tuomat rajoitukset. Käämikytkimen ei sallita askeltaa muuntajan ollessa 1,5 -kertaisella teholla nimellisestä tehosta rikkoutumisvaaran vuoksi. Yli- ja alijännitteille asetetut hälytysrajat ja lukitusrajat ehkäisevät liian voimakkaita vaikutuksia muuhun verkkoon, sillä joissakin tapauksissa jännitettä korjaava toimenpide, vaikka olisikin periaatteeltaan oikea, voi vain pahentaa verkon yleistä tilannetta. Käämikytkimen jännitteensäätäjän asetteluiden määrittämisestä on käsitelty tarkemmin kohdissa 4.3 ja 4.4.

3.5 Rinnakkaiskondensaattorin paikallissäätö

Rinnakkaiskondensaattoreita ohjataan pääsääntöisesti neljällä eri tavalla: 110 kV kiskojännitteen, muuntajien läpi kulkevan loistehon, käsinohjauksen tai automaattisesti kellon mukaan. Rinnakkaiskondensaattoreista puolet on paikallissäädössä ja loistehon mukaan säätyviä, yhdeksän jännitteensäätäjän mukaan säätyviä. Rinnakkaiskondensaattoreista kaksi on kokonaan käsikäyttöisiä ja kaksi on asetettu säätyväksi kellon mukaan.

Rinnakkaiskondensaattorien paikallissäätö toimii samankaltaisen takaisinkytketyn säädön kautta kuin käämikytkimienkin paikallissäätö. Poikkeuksena loistehosäätäjän ja jännitteensäätäjän välillä on eri mittaukseen perustuva säätö. Molemmat säätäjät saavat mittauksen 110 kV kiskolta, mutta jännitteensäätäjä käyttää ainoastaan jännitemittausta. Loistehonsäätäjälle ei ole olemassa suoraa muuntajien läpi kulkevan summaloistehon mittausta, vaan säätäjän toiminta perustuu muuntajan läpi kulkevan virran perusteella laskettuun loistehon arvoon.

Loistehon mukaan säätyvät rinnakkaiskondensaattorit kytkeytyvät tyypillisesti verkkoon muuntajan läpi kulkevan loistehon ollessa alle 30 MVar ja pois verkosta loistehon ollessa yli 5 MVar. 110 kV kiskojännitteen laskiessa alle 105 kV, ohittaa alijänniterele loistehonsäädön kytkien rinnakkaiskondensaattorin verkkoon kompensoimaan jännitteenlaskua. 110 kV kiskojännitteen noustessa yli 123 kV

kytkeytyy rinnakkaiskondensaattori irti verkosta ylijännitereleen antaessa signaalin säätäjälle. Loistehonsäätäjiä käytetään uusimmilla ja jokin aikaa sitten saneeratuilla 400/110 kV ja 220/110 kV asemilla. Loistehonsäätäjän ikkunan leveyttä määritettäessä tulee ottaa huomioon kondensaattoripariston nimellinen koko ja sen verkkoon kytkemisen vaikutukset loistehon ja 110 kV verkon jännitteen osalta. Kondensaattorin nimellinen loisteho kertoo suuntaa antavan loistehoikkunan leveyden.

Jännitteen mukaan säätyvät rinnakkaiskondensaattorit kytkeytyvät tavallisimmin verkkoon 110 kV kiskojännitteen laskiessa alle 115 kV:n ja verkosta pois jännitteen noustessa yli 119 kV:n. Pelkän jännitteen mukaan säätyvät rinnakkaiskondensaattorit eivät välttämättä säädy yhtä tarkasti kuin loistehon mukaan säätyvät rinnakkaiskondensaattorit kohdassa 2.2.3 kuvatun kondensaattorien säätöikkunan periaatteellisen, loistehon siirtymisominaisuuksista johtuvan epäsymmetrian takia. Kaikkia kondensaattoreita on mahdollista ohjata myös käsin. Ajastuksen mukaan säätyvät rinnakkaiskondensaattorit kytkeytyvät verkkoon yleensä aamulla ja verkosta irti illalla.

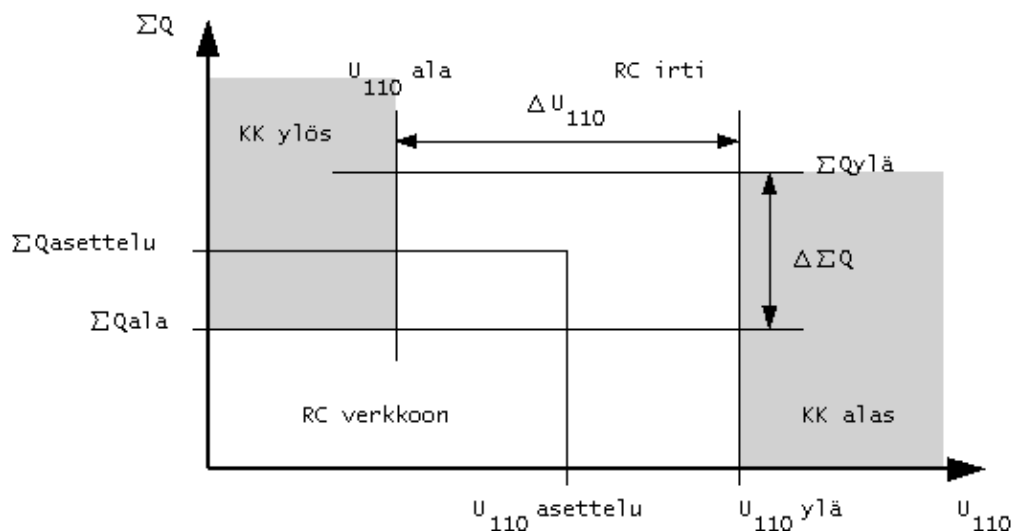
Rinnakkaiskondensaattorin koko ja sen jännitettä nostava vaikutus 110 kV verkkoon kytkettäessä määräävät jänniteensäätäjän verkkoon kytkemisen alarajan suurimman arvon. Alaraja ei voi olla asetettuna sellaiselle tasolle, missä rinnakkaiskondensaattorin verkkoon kytkeytyessä jännite nousisi heti lähelle 120 kV:a eli 110 kV verkolle asetettua toiminnallista ylärajaa. Verkosta irti kytkeytymiselle asetetun jänniteikkunan ylärajan määrittäminen on suoraviivaisempaa. Rinnakkaiskondensaattori on kytkettävä irti verkosta, kun 110 kV verkon jännite nousee lähelle 120 kV:a.

3.6 Käämikytkimien ja kondensaattorien aluesäätö

Aluesäätö ottaa huomioon useamman tekijän ennen kuin esimerkiksi käämikytkimen jänniteensäätäjä käskee käämikytkimen askeltaa. Kaikki samat tekijät, jotka vaikuttavat kondensaattorien ja käämikytkimien paikallissäätöön, vaikuttavat myös aluesäädössä. Aluekohtaisesti on voitu tehdä painotuksia ja poikkeuksia eri säätöarvoille, joiden mukaan säätö toimii. Säädön toiminta on ohjelmoitu sekvenssiksi kutsuttuun ohjelmaan, joka tarkkailee sille asetettujen säätökriteerien mukaisesti määritetylle alueelle osoitettua säätöä. Aluesäädön säätösuureita voi muuttaa käytönvalvonnassa.

Aluesäätö ei ole kovinkaan yleinen säätötapa Fingrid Oyj:n muuntoasemilla. Käämikytkimien ja kondensaattorien alueellista jännitteensäätöä käytetään Fingridin Oyj:n verkossa tällä hetkellä vain Jämsän ja Toivilan muuntoasemilla. Jämsän asemalle on toteutettu alueellinen jännitteensäätö käytönvalvontaan siten, että säädön ollessa asetettuna kaukoasentoon ohjelma ohjaa tehoja sille asetettujen raja-arvojen mukaisesti. Säätö on toteutettu niin, että sekvenssi huomioi Toivilan ja Jämsän käämikytkimien askelluksen muutokset, rinnakkaiskondensaattorien kytkeytymisen verkkoon ja verkosta pois sekä rinnakkaisreaktoreiden kytkeytymisen verkkoon ja verkosta pois (Tirri 2014). Liedossa on aikaisemmin ollut aluesäätö, mutta se ei ole ollut käytössä vuoden 2010 jälkeen.

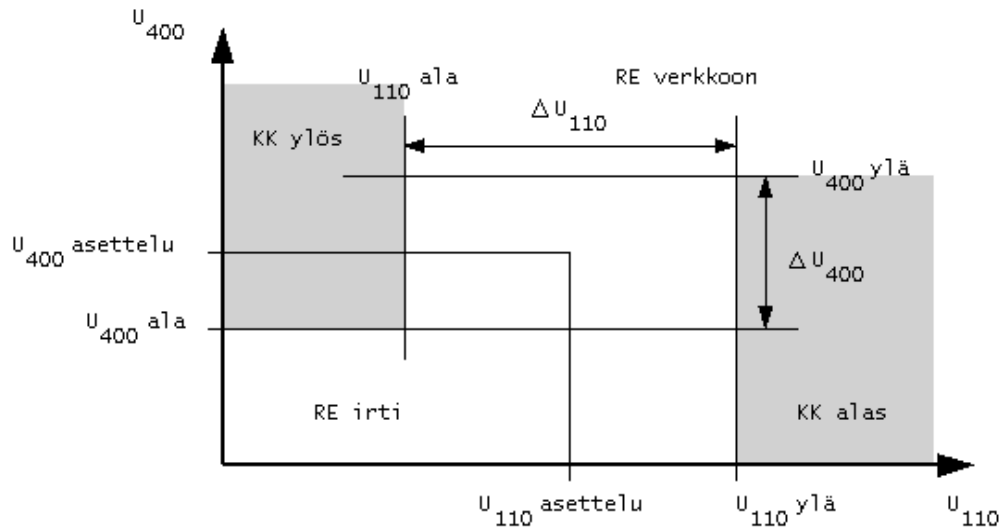
Käämikytkimen ja kondensaattorin sekä käämikytkimen ja reaktorin yhteistoiminnalle on olemassa yleiset säätöehdot. Molemmissa tapauksissa säätäjien asetellut rajaavat säätöikkunan, jonka mukaan rajaehdot määräytyvät. Kuviossa 4 on esitetty käämikytkimen ja kondensaattorin säätöehdot ja kuviossa 5 käämikytkimen ja reaktorin säätöehdot. Kuvioissa 4 ja 5 lyhenne KK tarkoittaa käämikytkintä, RC rinnakkaiskondensaattoria ja RE reaktoria. Jännitteiden alaindekseihin on merkitty säätöön vaikuttava jännitetaso. Summa merkintä kuviossa 4 tarkoittaa muuntajien läpi mitatun loistehon summaa.



KUVIO 4. Kondensaattorin ja käämikytkimen säätöehdot

Kuvion 4 mukaiset säätöehdot pätevät käämikytkinsäätäjälle ja loistehon mukaan säätävälle kondensaattorisäätäjälle. Vaaka-akselille merkittyjen $U_{110\text{ala}}$ ja $U_{110\text{ylä}}$ rajaama alue muodostaa käämikytkimen jännitteensäätöikkunan ΔU_{110} . Käämikytkimen

jännitteensäätöikkuna yhdessä pystyakselille merkittyjen kondensaattorin asetteluiden ΣQ_{ala} ja $\Sigma Q_{\text{ylä}}$ kanssa, muodostavat kuvion keskelle suorakaiteen mukaisen alueen. Määritetyn alueen sisällä 110 kV jännite $U_{110\text{asettelu}}$ ja muuntajien toisiopuolelta mitattujen loistehojen summa $\Sigma Q_{\text{asettelu}}$ ovat niille asetettujen arvojen sisällä. $\Delta \Sigma Q$ kuvaa summaloistehon sallittua vaihteluväliä.



KUVIO 5. Reaktorin ja käämikytkimen säätöehdot

Kuviossa 5 voidaan havaita analogia kuvioon 4 säätöehtojen määräytymisessä. Käämikytkimen jännitteensäätöikkuna määräytyy samalla tavalla kuin kuviossa 4. Reaktorin kytkeytymisen verkkoon ja irti verkosta määrää sen säätäjälle asetetut $U_{400\text{ala}}$ ja $U_{400\text{ylä}}$. Vaaka-akselin 110 kV ja pystyakselin 400 kV jännitearvot rajaavat kuvion keskelle suorakulmion, jonka sisällä $U_{110\text{asettelu}}$ ja $U_{400\text{asettelu}}$ ovat. ΔU_{110} on käämikytkimen säätöikkuna ja ΔU_{400} on reaktorin säätöikkuna.

Kondensaattorien loistehomittaus ja käämikytkimien jännitemittaus suoritetaan 110 kV jännitteen puolelta reaktorien 400 kV jänniteohjeen määrätessä reaktorien kytkeytymisen verkkoon ja verkosta irti. Useimmiten aluesäädön sekvenssiä määritettäessä tulee ottaa huomioon myös lähiasemilla tapahtuvat muutokset ja minimoida tarpeettomien automatiikan suorittamien säätötoimenpiteiden toimeenpaneminen. Ongelmalliseksi voi osoittautua esimerkiksi kahden eri säätötoimenpiteen toisiaan haittaava vaikutus. Vaikka säätörajat olisivat järkevät tarkasteltaessa säätöä yksittäinen kompensointilaite kerrallaan, ei yhteistoiminta välttämättä ole ollenkaan suunnitellun mukaista. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että

kuvioiden 4 ja 5 mukainen laatikkomainen säätöikkuna ei välttämättä päde ja korjaavia toimenpiteitä voidaan joutua tekemään.

4 ASETTELUARVOJEN TARKISTUS

Verkostolaskennan perustana käytetään toteutuneesta kulutuksesta ja tuotannosta saatavia arvoja. Mitatuista ja toteutuneista arvoista luodaan niin kutsuttu perustilannemalli, jonka perusteella verkostolaskenta voidaan suorittaa. Fingrid Oyj käyttää verkoston simulointiin ja verkostolaskentaan nykyisin Siemensin omistuksessa olevan PSS®E-ohjelman versiota 33. Versiot 30 ja 32 ovat vielä osittain käytössä, mutta niiden käyttö on vähenemässä. Yhteensopivuus aiempien versioiden tiedostoista uusimpaan versioon on varmistettu niiden tiedostojen osalta kuin se on ollut tarpeellista.

PSS®E:lta saadut laskennan arvot taulukoidaan ja lasketaan muuntajien alajännitteiden erotukset, yläjännitteiden erotukset sekä useamman muuntajan tapauksessa alajännitepuolen summaloistehot eri käämikytkimien asennoilla. Muutoksen itseisarvon suuruuden perusteella voidaan arvioida tapauskohtaisesti, ovatko kyseisen jänniteensäätäjän asetteluarvot oikeat ja toimiiko kyseinen säätäjä niin kuin pitäisi.

Käämikytkimien asetteluarvojen tarkastelussa tulee ottaa huomioon muuntajien käyttötapa, kondensaattorien kytkentä ja mahdolliset reaktorien kytkentöjen vaikutukset muuntajan ylä- ja alajännitteisiin. Useamman muuntajan sähköasemalla yleisin kytkentätapa on, että muuntajat ovat alajännitepuolelta kytketty yhteen. Poikkeuksena tästä on Korian asema, joka on kytketty rinnan yläjännitepuolelta. Muuntajilla on tyypillisesti kiskokohtainen säätö, jossa käämikytkimen ohjaus tapahtuu alemman jännitetaso kiskojännitettä tarkkailevan jännitesäätäjän toimesta. Rinnan kytketyillä muuntajilla numerojärjestyksessä ensimmäisen pääkiskon jännitesäätäjä toimii varsinaisena säätäjänä ja ohjaa muiden muuntajien käämikytkimien jänniteensäätäjiä ja sitä kautta käämikytкимиä.

4.1 Laskennan perustilanteet

PSS®E-tilanteiden määrittely tapahtuu seuraavasti: tammikuun 2014 tilanne pohjautuu vuoden 2013 tammikuun tietyn päivän kulutuksen ja tuotannon huippulukemiin. Kevään ja kesän osalta tilanteet katsotaan tapauskohtaisesti ja yleensä päädytään jonkin arkipäivän aamutunnin kulutuksen ja tuotannon sen hetkisiin lukemiin (Seppänen 2014). Tärkeää onkin huomata, että luodun perustilanteen solmujännitteet eivät

välttämättä vastaa ollenkaan todellisuutta. Tuotannon lukemissa loisteholle lasketaan 16 %:n osuus päätötehosta niissä tapauksissa, joissa vain päätöteholukemat ovat saatavilla (Koho 2014).

Kulutus- ja tehomittauksista saadut tulokset haetaan verkostolaskennasta eli Verlasta. Tietojen perusteella simuloidaan PSS®E:lla tilanne, josta saadaan jännitteet kaikille solmuille. PSS®E-tilanteen tekijä tarkistaa solmujännitteet pääasiassa 400 kV jännitetasossa ja vastaa saatujen tulosten järjestyksestä. 110 kV jännitetasossa suoritetaan kevyempi tarkistus ja tarkistetaan jännitteet siten, että laskennan tulokset sivuavat todellisia arvoja, eikä liian suuria ylityksiä verrattuna asetettuihin jännitetasoihin löydy.

Excel-apuohjelma PI-DataLinkillä (myöhemmin PI) on mahdollista hakea tuntikohtaiset tiedot Excel-tiedostoon. Tietoa voidaan hakea esimerkiksi halutun kiskojännitteen PI-osoitenumeron perusteella. Kiskojännitteen PI-osoitenumeron saa käytönvalvontajärjestelmästä eli KVJ:stä. Aikaleimatun tiedon pystyy järjestämään yksinkertaisella Excel-käskyllä ja piirtämään esimerkiksi juuri edellä mainitun kiskojännitteen pysyvyyskäyrän ja tarkkailemaan jännitteen vakautta.

Muuntajan simuloidun alajännitteen ja jännitteensäätäjälle asetetun asetusarvon erotus ei ole niinkään keskeisessä roolissa tarkasteltaessa käämikytkimen askelluksesta aiheutuvaa muuntajan ala- ja yläjännitteiden muutosta. PSS®E:lla laskettaessa käytettävissä olevan tilanteen tiedon perusteella tehty laskenta antaa sen hetkisen tilanteen oloarvon, jonka perusteella voidaan suorittaa käämikytkimen toiminnasta aiheutuvan jännitteen muutoksen laskenta. Tärkeämpää onkin kyseisestä laskennasta saatu jännite-ero muuntajan alajännitepuolelta katsottuna. Tyypillinen simuloitu jännitteen muutos on noin yhden kilovoltin luokkaa ja vaihtelee sen molemmin puolin välillä 0,2–1,7 kV (Liite 1. ja Liite 2.).

4.2 Virheen määrittely

Tarkasteltaessa käämikytkimen jännitteensäätäjien asetteluiden toiminnan ja laskennan virhettä tulee ottaa huomioon neljä eri tekijää: 110 kV kiskojännitteen mittaukseen käytettävän jännitemuuntajan virhe, mitta-arvomuuntimen tai kenttäyksikön virhe,








analogiakortin virhe sekä KVJ/PI:n tiedonkeruun määrittelyt ja rajat. Kaikki nämä neljä tekijää ovat osaltaan myös vaikuttamassa kohdassa 4.1 esiteltyyn PSS®E-perustilanteiden määrittämiseen ja näin ollen vaikuttamassa simuloitun käämikytkimen askeltamisen aiheuttaman jännitteen muutoksen suuruuteen. Simuloitun jännitepoikkeaman virhettä ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista tarkastella samalla tasolla kuin KVJ-mittauksesta saatavan 110 kV jännitekiskon jännitteen virhettä. Simuloitua jännitettä tarkastellaan suhteutettuna eri PSS®E-tilanteisiin osana koko Suomen kantaverkkoa ja sen reagoitua muutostilanteeseen.

Mittaustuloksen virheen laskennassa voidaan soveltaa neliöllisen virheen kaavaa, eli niin kutsuttua keskivirheen laskenta menetelmää. Vaikka yksittäisiltä laitteilta ei ole mahdollista saada mittaustulosta, tarkastellaan vain yhtä arvoa ja sen suhteellista virhettä. Kaavan 9 (Liu & Spiegel 1999, 211) mukaisesti voidaan määrittää esimerkiksi yksittäiselle KVJ-mittaukselle suhteellinen virhe $\Delta U/U$. Keskivirhe ΔU on tyyppillisesti luokkaa 0,2–0,4 %, joka 110 kV jännitteellä tarkoittaa 0,2–0,5 kV kokonaisvirhettä.

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{\sqrt{((\Delta \text{jännitemuuntaja})^2 + (\Delta \text{mitta-arvomuunnin})^2 + (\Delta \text{analogiakortti})^2 + (\Delta \text{KVJ/PI})^2)}}{U} \quad (9)$$

Vertailtaessa aseteluiden toimivuutta lähempänä käytännön mallia, on sitä parempi mitä tarkempi jännitemittauksesta saatava jännitetieto on. Jännitteen mittaaminen kiskosta suoritetaan jännitemuuntajan avulla. Jännitemuuntajille on olemassa valmistajakohtaiset virherajat, jotka ovat esimerkiksi RITZ Otef -jännitemuuntajalle taulukon 3 mukaisesti luokkaa 0,1 % (Ritz 2014, 6). Taulukossa 3 on esitetty KVJ-mittauksessa ja PI:sta saadun jännitetiedon virheen tekijät ja kaavan 9 keskivirheen tekijät.

TAULUKKO 3. KVJ-mittauksen virheen muodostuminen 110 kV jännitteelle

Laite/asettelu	Jännitemuuntaja	Mitta-arvomuunnin	Analogiakortti	KVJ/PI
Tyyppi	 1	  2	  3	  4
	Valmistaja -kohtainen	Valmistaja -kohtainen	Valmistaja -kohtainen	Käyttäjän määrittelemä
Suhteellinen virhe	0,1 %	0,2 %	<0,1 %	<0,1 %
Vaikutus muuntajan alajännitteeseen	<0,1 kV	<0,1 kV	<0,1 kV	<0,1 kV

Mitta-arvomuunnin muuntaa jännitemuuntajalta tulevan jännitteen analogiakortille sopivaksi mA-viestiksi (Aro, Elovaara, Karttunen, Nousiainen, & Palva 2003, 456-460). Käämikytkimen jännitesignaaliin mA-viestin tuloväli on 4–20 mA. Analogiakortilla on oma, valmistajasta riippuva suodin. Analogiakortin suotimen tarkoituksena on pitää kortille tulevan tiedon määrä sellaisten rajojen sisällä, että sen toiminta olisi mahdollisimman tarkkaa. Dead band -arvo määritellään siten, että itse laite ei lähetä arvonmuutosta, ellei vaihtelu ylitä määritellyn alueen raja-arvoja. Esimerkiksi kiskojännitteitä mitattaessa kortti saa jännitteen signaalin, mutta muutos rekisteröityy ainoastaan jännitemuutoksen ylittäessä sille asetetun resoluution. Analogiakortille tulevassa viestisignaaliin on myös virhe, mutta hyvin stabiloidussa tulossa ei synny merkittävää ja laskennassa huomioon otettavaa virhettä (Valkeajärvi 2014).

PI:n tietokannassa oleva tieto on kerätty käyttäjän määrittämän lukusyklin ja näytteenottotaajuuden perusteella. Käämikytkimen jännitteensäätäjä ei ole analogiakortin, KVJ/PI-järjestelmien ja siirtoprotokollien takana, vaan se saa mA-viestin suoraan mitta-arvomuuntimelta. Ulkopuolelta tarkasteltuna tämä tarkoittaa sitä, että jännitteensäätäjän toiminta on käytännössä paljon tarkempaa ja toiminta perustuu tarkempaan jännitetietoon, kuin tarkasteltaessa jännitteitä KVJ-mittauksen perusteella.

Verrattaessa toteutuneita arvoja simuloituihin on tarpeellista asettaa käytönvalvontajärjestelmän kautta raakalukujen suodatus siten, että rekisteröity jännite olisi mahdollisimman tarkka. Käytännössä tämä tarkoittaa sallitun prosentuaalisen virhetekijäosuuden pienentämistä alle 0,1 %:iin mitattavasta alueesta. Jännitteitä tarkasteltaessa puhutaan siis 0,1 kV jännitepoikkeamasta. Tarkemman otannan ja mittausherkkyyden säätämiseksi on hyvä selvittää myös kaukokäytön ala-aseman suodatuksen taso ja se, onko sitä tarpeellista säätää tai tarkentaa.

Uusimmilla noin kaksi vuotta vanhoilla asemilla on mitta-arvomuuntimen tilalla mittausta suorittava kenttäyksikkö. Kenttäyksikkö kytkeytyy suoraan välilyhteydellä kaukokäytön ala-asemaan, eli mitta-arvomuuntimen vaatimaa analogiakorttia ei tarvita. Suomen muuntoasemien tekniikka on enimmäkseen 1970- ja 1980-luvuilta, joten mitta-arvomuunnin on käytössä yli 90 %:lla asemista (Valkeajärvi 2014).

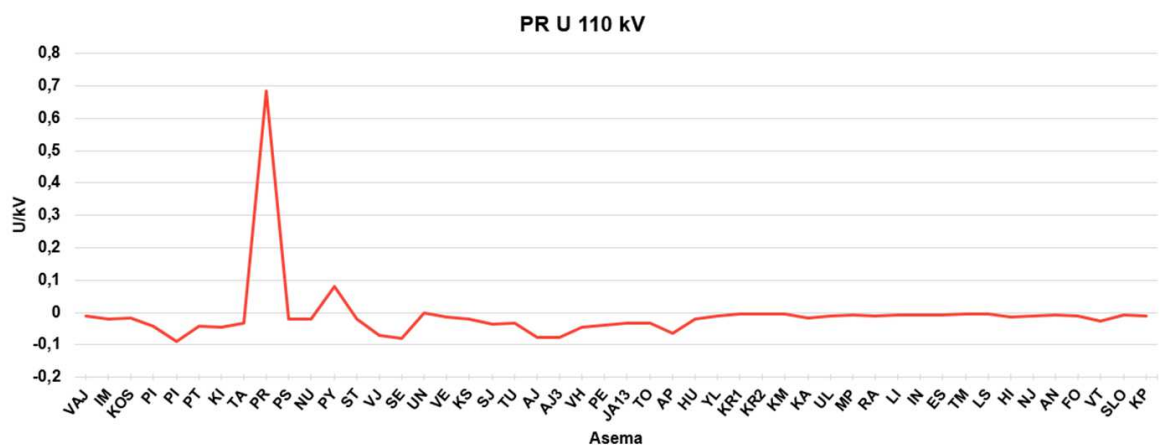
Tarkka asema- ja laitekohtainen virheen määrittely on edellä kuvatus mukaisesti täysin mahdollista, mutta jännitteensäädön näkökulmasta tarkasteltuna tarpeetonta.

Tärkeämpää onkin määrittää yleinen virheraja, joka kattaa ja pitää sisällään sellaiset virhetekijät, jotka ovat merkittävämpänä osana mittauksen ja laskennan virhettä. Huomionarvoisempaa voidaan pitää tapaa, jolla tarkastelussa käytetty tieto on kerätty. Systemaattinen tiedon selvitys ja arkistointi takaa osaltaan käsiteltävän tiedon luotettavuuden.

4.3 Käämikytkimien jännitteensäätöikkunoiden tarkistaminen

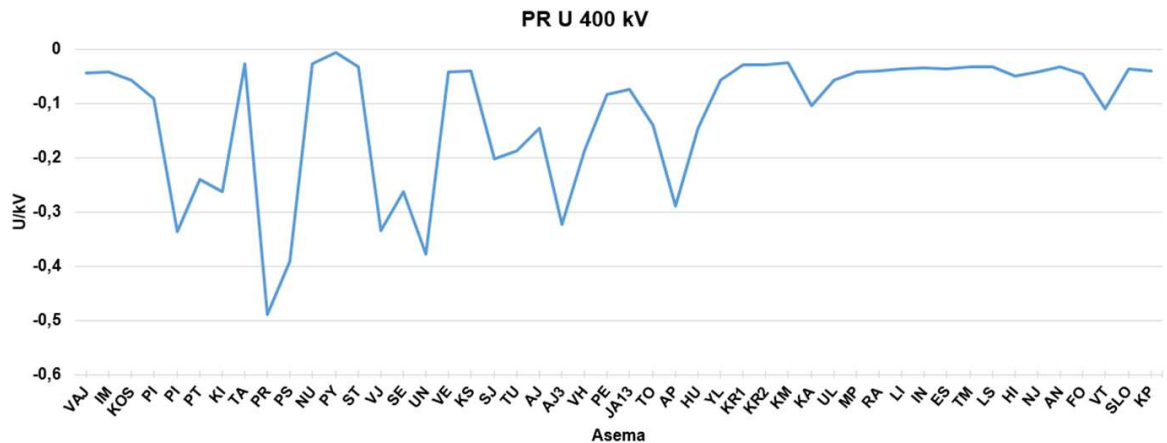
Käämikytkimen pääasiallisena tehtävänä on ylläpitää 110 kV jännitettä mahdollisimman lähellä jännitteensäätäjälle asetettua asetusarvoa niissä rajoissa kuin yleiset standardit, määräykset ja verkon rakenne sen sallivat. Virtalämpöhäviöiden minimoimiseksi 110 kV jännitteen pitäminen lähellä 110 kV jännitetasolle määritettyä 123 kV ylärajaa on optimaalisinta. Muuntoasemien lyhenteet on selitetty liitteessä 3.

Muuntajan käämikytkimen yhden askeleen suhteellinen koko on vakio, jolloin yleinen siirtotilanne määrää kulloinkin sen jännite- ja loistehomuutoksen, jonka yksi askel aiheuttaa. Jännitteensäätäjä antaa käämikytkimen ohjaimelle pulssin askeltaa käämikytkintä 60 sekunnin toimintaviiveen jälkeen. Simuloidut askelluksen vaikutukset muuntajien ala- ja yläjännitteeseen sekä loistehoon on havainnollistettuna kuvioissa 6, 7 ja 8, joissa tarkasteltava asema on Pikkaralan muuntoasema. Pikkarala on kahden muuntajan muuntoasema, missä muuntajat ovat kytketty rinnan ylä- ja alajännitepuolelta.



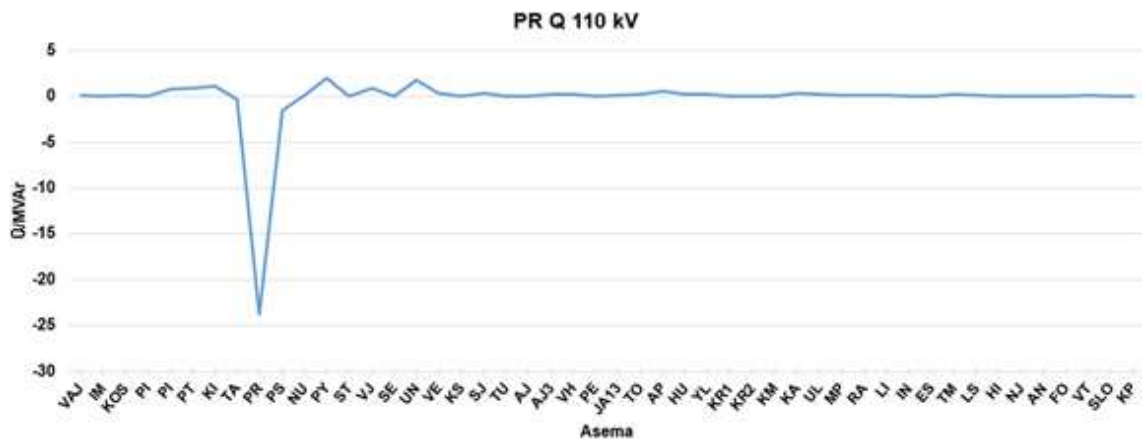
KUVIO 6. Pikkaralan käämikytkinten yhden askeleen vaikutus kantaverkon muuntajien alajännitteisiin

Kuviosta 6 voidaan havaita selkeä muutos Pikkaralan 110 kV jännitteessä aseman muuntajien käämikytkinten askeltaessa ylöspäin. Simuloitu jännitteen nousu on noin 0,7 kV. 110 kV jännitteen muutokset Pikkaralaa ympäröivillä asemilla ovat tasaisia. Alle 0,1 kV jännitevaihteluita ei voida pitää merkityksellisinä jännitteensäätöä silmälläpitäen. Jännitteen ominaisuus paikallisena suurena havainnoituu hyvin kuviosta 6.



KUVIO 7. Pikkaralan käämikytkinten yhden askeleen vaikutus kantaverkon muuntajien yläjännitteisiin

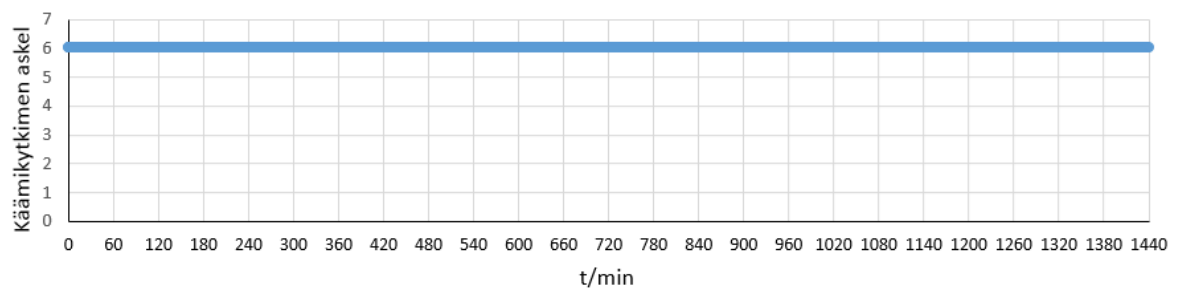
Yläjännitepuolelta tarkasteltuna kuviosta 7 voidaan havaita verkon jäykkyys. 400 kV jännitekäyrän muoto on melko tasainen ja vaikutukset 400 kV verkossa suhteellisen pieniä. 400 kV jännitetasossa alle 0,4 kV:n jännitemuutokset ovat merkityksettömiä jännitteensäädön näkökulmasta tarkasteltuna. Pikkaralan muuntoasemalla tapahtuvat muutokset käämikytkinten asennoissa näkyvät kahdeksalla lähimmällä muuntoasemalla noin 0,3 kV jännitteen alenemana.



KUVIO 8. Pikkaralan käämikytkinten yhden askeleen vaikutus kantaverkon muuntajien summaloistehoihin

Kuviosta 8 havaitaan samankaltainen loistehon käyttäytyminen Pikkaralan muuntoasemalla kuin kuviossa 6 esitetyn muuntajan alajännitteen käyttäytyminen. Yleisesti asemakohtaisesti piirretyt kuvaajat noudattavat samaa muotoa kuin kuvioissa 6 ja 8 on esitetty muuntajien alajännitteiden ja summaloistehojen osalta. Kuvion 7 mukaiset muuntajien yläjännitekuvaajat ovat asemakohtaisempia.

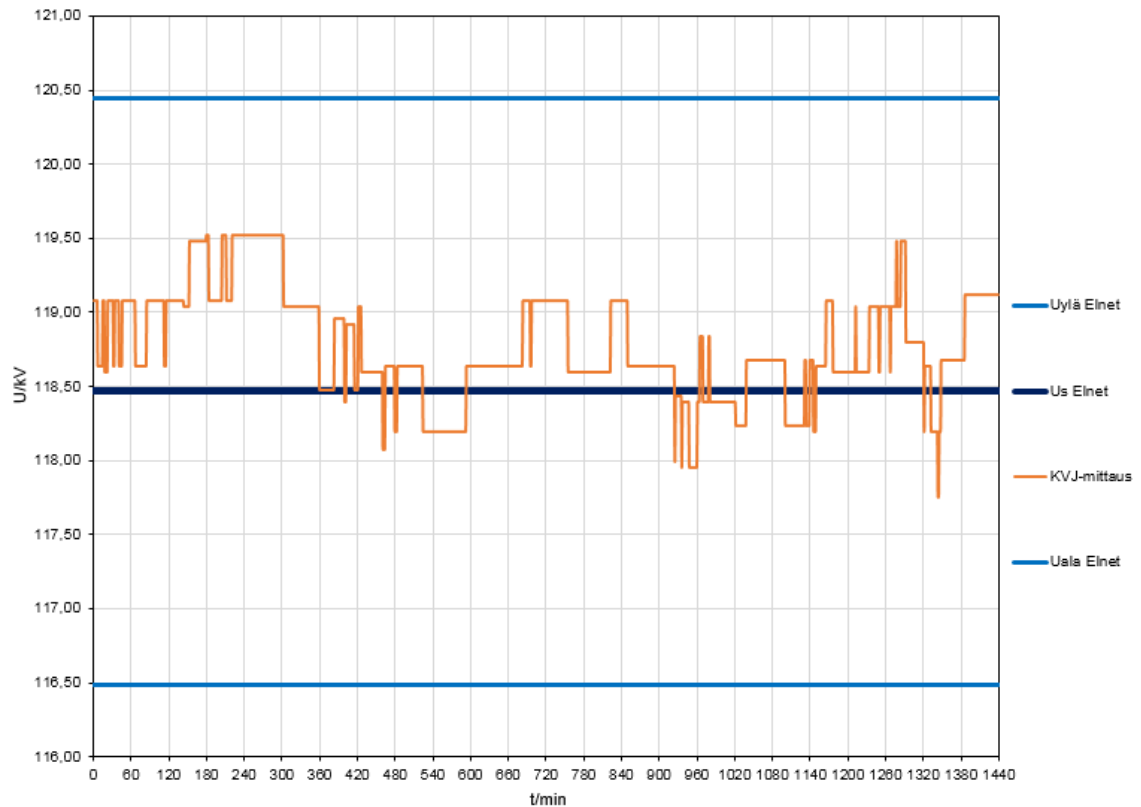
Kaikilla käämikytkimillä on toiminta-alue ja maksimi askelmäärä, jonka ne pystyvät askeltamaan. Askelpositio kuvaa sitä millä askeleella käämikytkin on. PSS®E:llä lasketut askelpositiot eivät ole luotettavia, koska ohjelman käyttämät 110 kV jännitteet ja muuntajien loistehot ovat laskennallisia arvoja, eivätkä välttämättä vastaa todellisuutta. Kuviossa 9 on esitetty Pikkaralan käämikytkimen todellinen positio 7.-8.1.2014. Vaaka-akseli kuvaa minuuttimäärää ja pystyakseli askeleen suhteellista askelnumeroa askeleiden määrän vaihteluvälin ollessa 1–13.



KUVIO 9. Pikkaralan käämikytkimen askeltaminen 7.-8.1.2014

Kuviosta 9 voidaan havaita, että Pikkaralan käämikytkin ei askella tarkasteltavan vuorokauden aikana. Jännitteen vaihdellessa kulutuksen ja tuotannon mukaan seuraa käämikytkimen askelkuvaaja osaltaan 110 kV jännitteen muutosta hieman samanmallisen käyrän mukaisesti, kuin KVV-mittauksesta saatu jännite. KVV-jännitteen mitattaus on yleensä ensimmäisessä pääkiskossa.

Käämikytkimen jännitteensäätäjän jännitteensäätöikkuna on symmetrinen asetusarvoon nähden. Jännite-erot asetusarvon ja ikkunan ylä- ja alarajan kanssa ovat itseisarvoltaan yhtä suuret. Kuviossa 10 on esitettyä Pikkaralan muuntoaseman PI:n kautta haettu KVV-jännite ja ensimmäisen muuntajan käämikytkimen jännitteensäätäjän asetellut Restistä eli reletietokannasta.



KUVIO 10. Pikkaralan 110 kV PK1 KVJ-jännite 7.-8.1.2014 ja jännitteensäätäjän asetellut Elnetistä

Kuviosta 10 voidaan havaita, että Pikkaralan muuntoaseman käämikytkin ei askella ollenkaan, koska jännitteensäätäjälle asetettu jännitteensäätöikkunan leveys on liian suuri. Ikkunan leveys on Uylä Elnet- ja Uala Elnet-jännitteiden välinen alue. Us Elnet on jännitteensäätäjän asetusarvo ja KVJ-mittaus PI:n avulla piirretty 110 kV-jännite. Pikkaralan muuntoasemalla KVJ-jännitekäyrä noudattaa pääasiassa samaa muotoa koko vuoden.

Liian kapea jänniteikkuna voi aiheuttaa käämikytkimen tarpeetonta askeltamista. Käämikytkimen ajaminen ääriasentoonsa ei ole tarkoituksenmukaista säätövaran loppumisen takia. Toisaalta kapeampi jänniteikkuna pakottaa käämikytkimen askeltamaan tiheämmin ja näin ollen myös jännite pystyy lähempänä käämikytkimen jännitteensäätäjälle asetettua asetusarvoa. Taulukossa 4 on esitetty jännite- ja loistehomuutoksien sekä käämikytkimien jännitteensäätäjien asetelluiden keskiarvot ja mediaanit tammikuu 2014 sekä kevät ja kesä 2014 PSS®E-tilanteilla laskettuna.

TAULUKKO 4. Kantaverkon käämikytkimien askellusten vaikutuksien ja asetteluiden keskiarvot

Talvi	$\Delta U_{\text{ala-1}}/\text{kV}$	Q_{-1}/MVA	$\Delta U_{\text{ala+1}}/\text{kV}$	Q_{+1}/MVA	U_s/kV	$U_{\text{ylä}}/\text{kV}$	U_{ala}/kV	$2dU/\text{kV}$
Keskiarvo	0,6	11,0	0,6	11,9	118,0	119,6	116,3	3,4
Mediaani	0,6	12,8	0,6	13,2	118,0	119,6	116,5	3,0
Kesä								
Keskiarvo	0,5	9,3	0,6	13,4	117,9	119,7	116,3	3,4
Mediaani	0,6	11,9	0,7	13,2	118,0	119,7	116,5	3,0

Taulukossa 4 $\Delta U_{\text{a-1}}$ ja $\Delta U_{\text{a+1}}$ ovat PSS@E:llä laskettujen käämikytkimien askellusten aiheuttamien alajännitteenmuutosten laskennallisten arvojen keskiarvot ja mediaanit. Vastaavasti Q_{-1} ja Q_{+1} ovat PSS@E:llä laskettujen käämikytkimien askellusten aiheuttamien summaloistehomuutosten laskennallisten arvojen keskiarvoja. U_s , $U_{\text{ylä}}$ ja U_{ala} ovat Elnet-tietokannasta haettujen käämikytkimien jännitteensäätäjien asetteluiden keskiarvot. Taulukon 4 viimeinen sarake $2dU$ on $U_{\text{ylä}}$ - ja U_{ala} -asetteluiden keskiarvojen erotus, eli käytännössä käämikytkimien jännitteensäätäjille asetettujen ikkunoiden leveyden keskiarvo.

Taulukossa 4 ilmoitetut keskiarvot ja mediaanit pätevät kaikille sellaisille Suomen muuntoasemille, joissa alajännite on 110 kV. Esimerkkinä Suomessa 110 kV jännitteelle U_s eli käämikytkimien jännitteensäätäjien asetusarvo on keskimääräisesti 118,0 kV mediaanin ollessa vastaavasti 118,0 kV. Suurin asetusarvo on 118,8 kV, joka löytyy Alajärveltä ja pienin asetusarvo 115,5 kV Liedosta sekä Salosta. Käämikytkimien jännitteensäätäjien yleisin jänniteikkunan leveys on 3,0 kV keskiarvon ollessa 3,4 kV.

Taulukon 4 tuloksia vertaamalla voidaan havaita, että yleisellä tasolla, koko Suomen mittakaavassa tarkasteltuna, muuntoasemilla muuntajien käämikytkinten askeltaessa jännitemuutos on samaa koko luokkaa riippumatta siitä millä PSS@E tilanteella arvot onlaskettu. Selkeämmät erot on havaittavissa käämikytkimen yhden askeleen aiheuttamassa loistehon muutoksessa. PSS@E:llä kevään ja kesän 2014 tilanteella laskettuna loistehomuutos on keskiarvollisesti hieman isompi pyrittäessä laskemaan 110 kV jännitettä. Yleisesti tarkasteltuna molemmissa tilanteissa käämikytkimen toiminta ja askeltaminen vaikuttaa suhteessa yhtä paljon. Asetusarvoihin pienen eron tekee käytössä olevien muuntoasemien lukumäärä. Tammikuun 2014 tilanteessa muuntoasemien lukumäärä on 50 ja kevät ja kesä 2014 tilanteessa 48.

4.4 Jännitteensäätäjien asetteluarvojen tarkistaminen

Käämikytkimen jännitteensäätäjän asetteluarvo määrää sen tavoitteellisen jännitetason, joka pyritään ylläpitämään käämikytkimen askelluksella. Käämikytkin askeltaa, kun jännitteensäätäjälle asetettu jännitteensäätöikkunan raja-arvo ylittyy ja on ylittyneenä 60 sekunnin viiveajan. Jännitteensäätäjälle on joissain tapauksissa mahdollista asettaa myös sekundäärinen viiveaika, joka asettuu kun jännitteensäätöikkunan raja-arvo pysyy ylittyneenä korjaavan askelluksenkin jälkeen. Asetteluarvo on määritetty jännitteensäätöikkunan puoleen väliin. Jännitteensäätöikkunan yleisin leveys on kolme kilovolttia. Käämikytkimen yhden askeleen vaikutus muuntajan alajännitteeseen on samansuuruinen riippumatta siitä, laskeeko vai nostaako käämikytkin muuntajan yläpuolen käämityksen kierrosten lukumäärää. Asetteluiden muuttaminen käytönvalvontajärjestelmän kautta onnistuu vain muutamalla asemalla.

Käämikytkimien säätöön ei yleensä ole asetettu kuin yksi käytettävä asetusarvo ja jänniteikkunan leveys toisin kuin esimerkiksi reaktorikäytössä, missä jännitetasoille on määritetty ylä-, keski- ja alatasot. Yleisesti talvella, sähkön kulutuksen ollessa suurempi kuin kesällä, ovat 110 kV jännitteet myös hieman alempana kesään verrattuna. Haettaessa tuntikohtaisia tietoja PI-datalinkillä esimerkiksi vuoden muuntajan alajännitekeskiarvon laskemiseksi, on hyvä tarkistaa, ettei PI-serveri ole päivittynyt ja käytönvalvontajärjestelmä ole ollut alhaalla. Puuttuva tai vääristynyt data aiheuttaa poikkeaman laskentaan.

Asetteluiden tarkistuksessa voi käyttää apuna käämikytkimien jännitteensäätäjien koestuspöytäkirjoja. Koestuspöytäkirjaan on merkitty 100 V jännitteellä tehdyt koestukset niillä asetteluilla, mitkä ovat normaalistikin käytössä. Koestukset suoritetaan kolmen vuoden välein ja mahdolliset muutokset asetteluissa on kirjattu reletietokantaan (Lindblad 2014).

Pelkästään käämikytkimen jännitteensäätäjän asetusarvoa nostamalla ei pystytä 110 kV yleistä tasoa nostamaan. Jännitteensäätöikkunan leveys määrittää omalta osaltaan sen, koska käämikytkin askeltaa. Vaikka jännitteensäätäjän asetusarvoa muutettaisiin esimerkiksi yhdellä kilovoltilla ylöspäin, voi jännitteensäätöikkuna olla liian leveä kyseiselle säätäjälle, jolloin käämikytkin pysyy edelleen samalla askeleella jännitteiden

pysyessä näin ollen ennallaan. Jänniteikkunan koko tulisikin valita niin, että säätäjän toiminta olisi mahdollisimman optimoitua.

Käämikytkimen yhden askeleen kokoa voidaan verrata simuloidun ja KVJ-mittauksesta saadun arvon kesken. Tarkasteltavien arvojen välille eroa tekee 110 kV kiskojännitettä tarkastelevan jännitemuuntajan virhe, käämikytkimen jännitteensäätäjän virhe, käämikytkimen virhe sekä KVJ-mittauksesta tuleva virhe. Kaikille laitteille on määritetty standardeissa tarkkuusrajat, jotka koestuksen perusteella todennetaan ja sertifioidaan. Suurimman epätarkkuuden tuloksiin tuo jännitemittauksesta saatavan analogisen viestisignaalin muuttaminen digitaaliseen muotoon. Viesti ei sisällä pelkästään viivettä, vaan myös puhtaasti epätarkkuutta.

Käytönvalvontajärjestelmä laskee 110 kV:lle optimijännitealueen pyrkien minimoimaan virtalämpöhäviöt (Pelvo 2014). Optimijännitealue on neljän kilovoltin levyinen jänniteikkuna, joka voi laskennan tuloksena määräytyä myös yleisten 110 kV jännitteen hälytysrajoiden ulkopuolelle. Normaalitilanteessa 110 kV jännite pysyy 115–120 kV välillä. Yleisesti KVJ-jännitteen virhe mittamuuntajilla jännitteen ja virran osalta on 0,2 % ja teholle 0,5 %. Laitteistojen koestuksesta saadun tiedon perustella jännitteen virhe jää yhteen ja kahteen desimaaliin suurimman virheen ollessa 0,5 kV kokoluokkaa (Valkeajärvi 2014). Jännitemuuntajien virhe on samaa kokoluokkaa kuin mittamuuntajilla.

4.5 Kondensaattorisäätäjien asettelujen tarkistaminen

Kondensaattorisäätäjien asetteluiden tarkistaminen noudattaa samaa kaavaa kuin käämikytkimien asetteluidenkin tarkistaminen. PSS®E:llä suoritettava laskenta on identtistä ja ainoan eron asettelujen tarkasteluun tuo tarkempi loistehojen aiheuttamien vaikutusten tarkastelu. Verkon ja asemien rakenteesta johtuen rinnakkaiskondensaattorien asettelut ovat hyvinkin yksilöllisiä ja asemakohtaisia. Asemien välillä erikokoisille kondensaattoriparistoille on määritettävä kondensaattorin kokoon ja verkkoon kytkettynä, verkon vaikutukset huomioon ottaen, säätäjäkohtaiset asettelut. Rinnakkaiskondensaattorien ominaisuuksista on kerrottu kohdassa 2.2.3. Suomen kantaverkossa on yhteensä yhdeksän jännitteensäätäjän ja kolmetoista loistehonsäätäjän mukaan säätävää rinnakkaiskondensaattoria. Kaksi

rinnakkaiskondensaattoria on ajastettu toimimaan kellon mukaan ja kaksi on kokonaan käsikäytöllä.

Loistehon mukaan säätyvien kondensaattorien loistehonsäätäjien käyttämä loistehotieto ei ole suoraan mitattua loistehoa, vaan se on osaksi muuntajien läpi kulkevan virran mittaukseen perustuva laskennallinen arvo. Kondensaattorien mittaamisen ongelmallisuus on kondensaattorien irtikytketyisessä, koska tyypillisesti irtikytketyiselle asetettu viiden MVAR:n loisteho on mittausravona liian pieni. Joissakin tapauksissa on kondensaattorisäätäjän tarkkailemien muuntajien summaloistehoon voitu ottaa mukaan myös kondensaattorilla näkyvä loisteho, jolloin säätäjän toiminta on varmempaa (Itäpää 2014). Jännitteen mukaan säätyvien kondensaattorien asetteluiden määrittäminen vastaa hyvinkin paljon käämikytkimien jänniteensäätäjän asetteluiden määrittämistä. Periaatteellisen eron käämikytkimiin tuo suurempi loistehon ja muuntajan alajännitteen muutos kytkentätilanteessa.

Rinnakkaiskondensaattorien loistehonsäätäjä kytkeytyy myös 110 kV:n verkon jännitteen laskiessa tai noustessa yli jännitereleille asetettujen rajojen. Jännitereleiden asettaman suhteellisen leveän jänniteikkunan sisällä loistehonsäätäjän ominaisuudet korostuvat. Vaikka loisteho onkin jännitteestä riippuvainen suure, ei muuntajien läpi kulkevan summaloistehon kuvaajan muoto aina seuraa tarkasti 110 kV kiskojännitteen kuvaajan muotoa. Tämä on havaittavissa kuviossa 11 esitetyissä jännite- ja loistehokuvaajissa.



KUVIO 11. Tammiston 110 kV jännitekuvaaja ja summaloistehon kuvaaja.

Kuviossa 11 U_s on kämikykimen jännitteensäätäjän asetusarvo, Q_{RC} -kondensaattorin loistehosäätäjän asettelut, U_{elnet} -kämikytkimen jännitteensäätäjän asettelut, U_{AEW1} 110 kV -kiskojännite ja Q_{summa} -muuntajien läpi kulkeva summaloisteho. Aikaväli 0–1440 min kuvaa yhtä vuorokautta kello 00.00–24.00. Tammiston rinnakkaiskondensaattorin simuloitu loistehon muutos kytkeytyessä on alle 10 MVAR. Loistehon kuvaajasta voidaan havaita, että 10 MVAR -kokoluokan loistehomuutoksia ei rinnakkaiskondensaattorin loistehoikkunan rajojen ylityskohtien jälkeen ole tapahtunut. PSS®E:n mallintama kondensaattoripariston koko poikkeaa kondensaattorin valmistajan ilmoittamasta nimellisestä arvosta. Asemalla tapahtuva simuloitu loistehon muutos jää yleensä alle puoleen kondensaattorin nimellisestä arvosta. Kuvioista 11 voidaan selvästi havaita loistehon kasvaminen yöaikaan, kun yleinen kuormitustilanne laskee.

4.6 Asemakohtainen tarkastelu

Tarkasteltavat muuntoasemat koostuvat yhdestä tai kahdesta muuntajasta, jotka on kytketty yleensä ensiön puolelta rinnan. Päämuuntajat ovat tyypillisesti joko Siemensin, ABB:n tai STR:n valmistamia 400 MVA joko maadoituskuristettuja tai jäykästi maadoitettuja, kytkentäryhmältään YNyn0d11-muuntajia. Kämikytkimet ja niiden

ohjaimet ovat Reinhausin, STR:n ja ABB:n valmistamia. Vaikka päämuuntajat ovat nimellisarvoltaan 400 MVA-muuntajia, voi niiden välillä olla kuitenkin eroavaisuuksia, joiden takia niiden käämikytkimien askelparit voivat poiketa toisistaan. Esimerkiksi Pikkaralan asemalla kahdelta eri valmistajalta tulevien päämuuntajien ikäero on 32 vuotta ja niiden ensiöjännitteiden nimellisarvot poikkeavat toisistaan.

PSS®E:llä on laskettu asemakohtaiset käämikytkimien askelluksesta ja rinnakkaiskondensaattorien kytkeytymisestä aiheutuvat yläjännite, alajännite sekä muuntajien läpi kulkevan summaloistehon muutokset. Asemakohtaiset tiedot on koottu liitteisiin 1 ja 2. Yhdellä asemalla tapahtuvien muutosten vaikutuksia arvioitaessa on tarpeellista tarkastella kyseisen aseman tarkempia PSS®E-laskennan tuloksia. Varsinkin loistehojen osalta on vaikutuksia helpompi arvioida. Asemakohtaisessa tarkastelussa tulee ottaa huomioon myös lähellä oleva tuotanto.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Nimensä mukaisesti tässä työssä on laskettu ja tarkistettu kantaverkon käämikytkin- ja kondensaattorisäätäjien asettelut. Itse työ on siis ollut asetteluiden tarkistamista eri lähteistä ja tietokannoista. Lisäksi kantaverkon muuntajien käämikytkimien ja rinnakkaiskondensaattorien toimintaa on simuloitu kantaverkossa ja selvitetty niiden vaikutuksia verkon jännitetasoihin. Kaukokäytön ala-asemien suodatuksien tarkistaminen ja käytönvalvontajärjestelmän jännitetietoja rekisteröivän tietokannan raakalukusuodatuksien säätäminen edesauttoi työn suorittamista. Etäluettavana saatavan jännitetiedon virhe saatiin pienennettyä 0,5 %:sta noin 0,1 %:in. Käytännössä tämä tarkoittaa pienempien jännitepiikkien näkymistä järjestelmässä selvemmin, mikä on mahdollistanut asetteluiden tarkemman tutkimisen. Muuntajien ja niihin liittyvien säätäjien asetteluiden oikeellisuutta on tarkasteltu myös koestuspöytäkirjojen avulla niiltä osin, kuin siihen on katsottu olevan tarvetta.

Käytäessä läpi listaa Suomen muuntoasemista 110 kV jännitteensäädön näkökulmasta, voidaan selvästi havaita, että niiden asemien kohdalla, joilta löytyvät viimeisimmät koestuspöytäkirjat, asetusrvojen tutkiminen ja arviointi on ollut tarkempaa. Säätäjien asettelut on päivitetty reletietokantaan sitä mukaa, kuin koestuspöytäkirjoja on laadittu muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Koestuksen perusteella on saatu mitattua ja kirjattua säätäjien todelliset arvot. 110 kV jännitteensäätöön liittyvien asetteluiden oikeellisuus eri tietokannoissa helpottaa asetteluiden tutkimista ja varmentaa osaltaan sen, että jännitteensäätö toimii sille asetetulla ja tarkoitetulla tavalla. Käämikytkinten jännitteensäätäjien asetteluiden korjaamista tulisi harkita Pikkaralan, Ulvilan ja Huutokosken asemilla.

Tässä työssä on koottu monesta eri tietokannasta ja lähteestä jännitteensäätöön liittyvien laitteiden asetteluihin ja toimintaan liittyviä tietoja. Yleisin huomio on ollut, että tieto on erittäin hajautunutta ja täyttää varmuutta asetteluiden paikkansapitävyyteen on kohtalaisen hankalaa saada. Tärkeää olisikin asetteluiden eri tietokannoissa olevien tietojen paikkansapitävyyden systemaattinen läpikäynti. Käytännössä tämä olisi mahdollista koestuksen yhteydessä suoritettavien mittausten ja erilaisten pöytäkirjojen laatimisen yhteydessä. Se, että voidaan olla täysin varmoja jonkin asettelun oikeellisuudesta, luo pohjan sille, että asiaa voidaan tutkia systemaattisesti.

Etänä suoritettava asetusarvojen tarkastelu on vaatinut muuntoasemakohtaisten alajännitekiskojen jännitemittaukseen liittyvien tietokantaan tallentuvien tietojen suodattimien uudelleen asettelua siten, että mittauksen virhe on saatu minimoitua. Käytönvalvontajärjestelmään tulevaa tietoa säätäjien tilasta eli siitä, ovatko ne käsikäytöllä vai itse säätäjällä, ei ole PI-data-keräystä. Näin ollen tältä osin on ollut haasteellista arvioida sellaista käämikytken toimintaa, mikä ei selity jännitteensäätöikkunan ylittämällä tai alittamisella. Säätäjien käsikäytön takia olisi jännitteensäädön näkökulmasta tarkasteltuna tärkeää saada mahdollisimman tarkkaa tietoa siitä, koska ja miksi jotain on tapahtunut. Yksinkertaisinta on toteuttaa mahdollisimman kattava tiedonkeruu riittävällä tarkkuudella: koska säätäjät toimivat, miksi ja minkä perusteella. Tarkemman jännitetiedon kerääminen on ollut tarpeellista tämän työn kannalta, mutta se kuormittaa palvelimia, eikä ole pidemmällä aikavälillä kannattavaa.

Tietokantojen ja ohjelmistojen kehittyessä ja järjestelmien tietojen päivittyessä tulee uudet työkalut valjastaa myös jännitteensäädön käyttöön eri rajapintojen tarkastelun kautta. Selvitettäessä kantaverkon käämikytken- ja kondensaattorisäätäjien asetteluiden oikeellisuutta on ollut tärkeää huomata, miten moni eri asianhaara vaikuttaa yksittäisen säätäjän toimintaan. Alueelliset rajoitukset ja jännitteensäätömahdollisuuksien rajallisuus 110/20 kV muuntajilla asettavat 110 kV jännitteelle teoreettisen ylärajan. Tarkempi 110 kV jännitteensäätö pienentäisi 110 kV verkon virtalämpöhäviöitä ja näin ollen kasvattaisi siirron taloudellisuutta.

LÄHTEET

- ABB 2014. Käämikytkimet. Luettu 1.7.2014.
<http://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/on-load-tap-changers-vacuum-type/in-tank-resistance/on-load-tap-changers-type-vucg>
- Aro, M. Elovaara, J. Karttunen, M. Nousiainen, K. & Palva, V. 2003. Suurjänniteteeniikka. Jyväskylä: Otatiето
- Baldwin, L. Senior Manager. 2014. Haastateltu 28.5.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Christensen, J. 1986, et. al. Planning Against Voltage Collapse. CIGRE
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011a. Sähköverkot I. Helsinki: Otatiето
- Elovaara, J. & Haarla, L. 2011b. Sähköverkot II. Helsinki: Otatiето
- Fingrid Oyj 2014. Luettu 1.6.2014.
<http://www.fingrid.fi/fi/yhtio/esittely/voimansiirtoverkko/Sivut/default.aspx>
- Gao, D. Qingchun, L. & Jishou, L. 2002. A new scheme for on-load tap-changer of transformers. IEEE
- Hugh D. Young. Roger A. Freedman. 2008. Sears and Zemansky's University Physics: with modern physics. -13th. ed.
- Itäpää, A. Vanhempi asiantuntija. 2014. Haastateltu 11.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Koho, J. Erikoisasiantuntija. 2014. Haastateltu 15.7.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Kundur Prabha, 1994. Power System Stability and Control. McGraw-Hill
- Kuosa, D. Erikoisasiantuntija. 2014. Haastateltu 11.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Lehtimäki, J. Erikoisasiantuntija. 2014. Haastateltu 27.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Liu, J. & Spiegel, M. 1999. Mathematical Handbook of Formulas and Tables, Second Edition. McGraw-Hill
- Loistehon kompensointi 2012. Tampereen sähkölaitos. Luettu 10.6.2014.
https://www.tampereensahkolaitos.fi/sahkoverkkopalvelut/sahkoverkkoonliittyminen/TSV-urakoitsijalle/Documents/Loistehon%20hinnoittelu-%20ja%20kompensointiohje%20TSV_01-12-2012_internet.pdf
- Löf, P. 1991. Study of Long Term Voltage Stability in Electric Power Systems. Sweden: Royal Institute of Technology

- Mertanen, J. Asiantuntija. 2014. Haastateltu 12.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Nordin, S. Asiantuntija. 2014. Haastateltu 11.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Nästi, J. Erikoisasiantuntija. 2014. Haastateltu 18.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Wallin, P. Sähkömittaustekniikan perusteet. Jyväskylä: Otatieto 1991
- Pelvo, J. Erikoisasiantuntija. 2014. Haastateltu 30.7.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Poikonen, S. Käyttöinsinööri. 2014. Haastateltu 11.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Reinhausen 2014. Käämikytöksen tekniset tiedot. Luettu 8.8.2014.
<http://www.reinhausen.com/de/XparoDownload.ashx?raid=58092>
- Ritz 2014. Jännitemuuntajan tekniset tiedot. Luettu 31.7.2014 <http://www.ritz-austria.at/www/en/content/Hochspannung.PDF>
- Seppänen, J. Asiantuntija. 2014. Haastateltu 13.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Tapcon 240 2014. Jännitteensäätäjän tekniset tiedot. Luettu 1.8.2014.
<http://www.reinhausen.com/XparoDownload.ashx?raid=82641>
- Tirri, J. Asiantuntija. 2014. Haastateltu 11.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Valkeajärvi, T. Vanhempi asiantuntija. 2014. Haastateltu 30.7.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- Vihavainen, P. 2007. Kantaverkon jännitteensäädön ohjausmenetelmien kehittäminen. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö
- Viita, V. Asiantuntija. 2014. Haastateltu 12.6.2014. Haastattelija Perttu, J. Helsinki
- YLE2013. Yleiset liittämisehdot Fingrid Oyj. Luettu 11.6.2014.
<http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittaminen/VAHVISTETTU%20-%20Fingrid%20Oyj%20yleiset%20liittämisehdot%20YLE2013.pdf>

LIITTEET

Liite 1. Tammi-PSS®E laskenta

Asema	Uyri/kv	Ualajakv	Q/Mvar	Tpos	Tmax	Tero	ΔUa-1	Ua-1	Ua-1-k	Q-1	Tero	ΔUa+1	Ua+1	Ua+1-k	Q+1	Us	Uyri	Uala	Satpoint
VAl	237,6	118,7	-16,3	8,0	13,0	-1,0	-0,8	119,3	119,6	-6,4	1,0	0,8	117,7	117,4	6,5	118,5	119,5	117,5	
M	235,6	115,5	5,8	6,0	17,0	-1,0	-1,6	119,6	120,4	0,3	1,0	1,6	116,4	115,5	-0,3	118,0	120,0	116,0	
KOS	239,1	116,7	-5,7	5,0	13,0	-1,0	-0,8	118,3	118,8	-5,1	1,0	0,9	116,6	116,2	5,3	117,5	119,0	116,0	*
Pl	238,3	119,3	3,2	9,0	17,0	-1,0	-0,7	118,2	118,5	-1,5	1,0	0,7	116,8	116,5	1,6	117,5	119,0	116,0	*
Pl	413,7	238,3	20,9	5,0	13,0	-1,0	-1,0	239,1	239,6	-13,6	1,0	1,1	237,0	236,5	14,0	238,0	243,0	233,1	
PT	413,2	241,3	-40,6	5,0	13,0	-1,0	1,0	116,5	116,1	15,8	1,0	-1,0	118,5	119,0	-16,3	117,5	119,0	116,0	*
KI	411,6	119,9	-45,8	8,0	19,0	-1,0	-0,7	119,2	119,6	-22,1	1,0	0,8	117,7	117,3	22,8	118,5	120,2	116,8	
TA	241,3	119,8	3,4	6,0	17,0	-1,0	0,5	117,3	117,1	13,9	1,0	-0,5	118,2	118,5	-14,3	118,5	119,5	116,5	
PR	411,5	117,9	-25,5	6,0	13,0	-1,0	-0,7	119,2	119,6	-22,0	1,0	0,7	117,7	117,4	22,7	118,5	120,5	116,5	
PS	412,0	235,3	-56,3	3,0	13,0	-1,0	-1,0	236,5	237,0	12,8	1,0	1,0	234,5	234,0	-13,5	235,5	238,0	233,0	
NU	240,6	118,4	-0,5	6,0	17,0	-1,0	-0,5	118,9	119,2	9,5	1,0	0,5	118,0	117,7	-9,9	118,5	120,0	117,0	
PY	235,8	118,4	-23,5	8,0	17,0	-1,0	-0,5	118,9	119,2	-17,0	1,0	0,5	118,0	117,7	17,3	118,5	120,0	117,0	
ST	241,6	118,7	-3,2	10,0	17,0	-1,0	0,5	117,0	116,8	7,1	1,0	-0,5	118,0	118,2	-7,3	117,5	119,5	115,5	
VJ	412,5	118,6	-24,3	7,0	14,0	-1,0	-0,9	119,4	119,8	-15,5	1,0	0,9	117,6	117,1	16,1	118,5	120,5	114,3	
SE	410,7	117,5	-32,4	7,0	13,0	-1,0	-1,6	119,0	119,8	0,0	1,0	1,7	115,7	114,8	0,0	117,4	120,5	114,3	
KJ	235,8	117,7	20,3	6,0	17,0	-1,0	-0,4	118,4	118,6	-7,0	1,0	0,4	117,6	117,4	7,1	118,0	119,5	116,5	
UN	411,9	118,9	-11,2	7,0	19,0	-1,0	-0,9	118,9	119,4	-8,4	1,0	0,9	117,1	116,6	8,7	118,0	120,0	116,0	
VE	232,8	118,9	-82,9	10,0	17,0	-1,0	-0,6	118,6	118,9	-13,2	1,0	0,6	117,4	117,1	13,3	118,0	119,5	116,5	
TU	239,1	118,1	24,8	5,0	17,0	-1,0	-0,2	118,2	118,3	-7,6	1,0	0,2	117,8	117,7	7,6	118,0	119,5	116,5	
KS	234,0	117,5	-11,3	8,0	17,0	-1,0	-1,2	119,2	119,4	-6,6	1,0	1,2	116,9	116,3	6,9	119,5	116,5	117,0	
SU	408,9	118,6	-35,1	9,0	19,0	-1,0	-0,6	119,1	119,4	-13,7	1,0	0,6	117,9	117,6	14,1	118,5	120,5	117,0	
TU	407,8	118,1	0,0	9,0	19,0	-1,0	-0,4	118,5	118,7	0,0	1,0	0,4	117,6	117,4	0,0	118,0	119,5	116,5	
AJ	239,6	119,1	-21,3	10,0	17,0	-1,0	-0,5	119,3	119,5	-10,1	1,0	0,5	118,3	118,1	10,4	118,8	120,6	117,1	
AJ3	410,4	119,1	6,2	6,0	13,0	-1,0	-0,8	119,6	120,1	-10,7	1,0	0,9	117,9	117,5	11,1	118,8	120,6	117,1	
VH	409,4	118,8	-16,6	5,0	9,0	-1,0	-0,6	118,9	119,2	-12,3	1,0	0,6	117,6	117,3	12,7	118,3	119,5	117,0	
PE	240,1	118,2	3,4	8,0	17,0	-1,0	-0,7	118,8	119,1	-12,2	1,0	0,7	117,3	116,9	12,5	118,0	120,0	116,0	
JA13	237,8	117,7	-28,6	9,0	17,0	-1,0	-0,2	117,7	117,8	-5,8	1,0	0,2	117,3	117,2	5,8	117,5	119,0	116,0	*
TO	409,4	117,7	34,0	3,0	13,0	-1,0	-0,8	118,4	118,8	-15,4	1,0	0,8	116,8	116,4	15,9	117,6	119,9	115,4	
AP	409,9	117,0	26,1	6,0	11,0	-1,0	-0,9	118,9	119,4	-12,6	1,0	1,0	117,0	116,6	13,0	118,0	120,0	116,0	
HU	409,0	117,9	38,5	5,0	11,0	-1,0	-0,1	118,1	118,2	-17,0	1,0	0,1	117,9	117,9	17,5	118,0	120,0	116,0	
YL	409,6	117,7	-26,8	7,0	14,0	-1,0	-0,7	118,7	119,1	-21,6	1,0	0,7	117,3	117,0	22,3	118,0	119,8	116,3	
KR1	407,8	119,2	5,5	7,0	13,0	-1,0	-0,4	118,9	119,1	-17,0	1,0	0,4	118,1	117,8	17,5	118,5	120,5	116,5	
KR2	407,8	117,9	-18,3	5,0	13,0	-1,0	-0,6	119,1	119,4	-14,2	1,0	0,6	117,9	117,2	14,6	118,5	120,5	116,5	
KM	408,1	118,3	-18,6	7,0	13,0	-1,0	-0,6	118,6	118,9	-14,9	1,0	0,6	117,4	117,2	15,4	118,0	119,5	116,5	
KA	410,2	118,9	-6,4	8,0	19,0	-1,0	-0,6	118,7	119,0	-23,1	1,0	0,7	117,4	117,1	23,8	118,1	119,3	116,8	
UL	408,8	118,3	-41,0	8,0	13,0	-1,0	-0,8	118,8	119,2	-22,2	1,0	0,8	117,2	116,8	23,1	118,0	120,5	115,5	
MP	408,8	118,1	12,0	4,0	13,0	-1,0	-1,1	118,6	119,1	-6,6	1,0	1,6	115,9	115,1	-0,7	117,5	119,0	116,0	*
RA	407,4	119,2	-57,3	9,0	12,0	-1,0	-1,0	119,0	119,5	-24,5	1,0	1,0	117,0	116,4	25,1	118,0	120,0	116,0	
LI	407,7	115,7	56,3	4,0	13,0	-1,0	-0,6	116,1	116,4	-19,3	1,0	0,6	114,9	114,5	19,9	115,5	117,0	114,0	
NI	409,9	116,1	66,5	2,0	13,0	-1,0	-0,6	118,6	118,8	-11,7	1,0	0,6	117,4	117,1	12,0	118,0	119,5	116,5	
ES	408,0	119,0	-20,1	6,0	10,0	-1,0	-0,5	118,5	118,7	-16,7	1,0	0,5	117,5	117,2	17,2	118,0	119,5	116,5	
TM	407,8	117,3	-89,6	9,0	12,0	-1,0	-0,2	118,2	118,3	-15,8	1,0	0,6	117,4	117,1	14,7	118,0	119,5	116,5	
LS	408,0	117,2	-7,7	4,0	14,0	-1,0	-0,2	117,9	118,0	-19,0	1,0	0,2	117,5	117,4	19,5	117,7	119,2	116,2	
HI	407,7	118,0	-12,9	7,0	13,0	-1,0	-0,4	118,6	118,8	-18,5	1,0	0,4	117,9	117,7	19,1	118,3	120,0	116,5	
NU	407,6	118,6	-27,4	8,0	13,0	-1,0	-0,5	118,5	118,7	-16,7	1,0	0,5	117,5	117,3	17,2	118,0	119,5	116,5	
AN	408,4	118,7	-3,7	5,0	14,0	-1,0	-0,4	118,5	118,7	-20,3	1,0	0,3	117,7	117,5	15,9	118,0	119,6	116,5	
FO	407,9	118,4	-28,3	8,0	13,0	-1,0	-0,7	118,7	119,0	-13,0	1,0	0,7	117,3	117,0	13,5	118,0	119,5	116,5	
VT	409,4	118,2	-21,4	7,0	13,0	-1,0	-0,7	119,2	119,6	-11,6	1,0	0,8	117,7	117,3	12,0	118,5	120,0	117,0	
SIO	408,0	118,2	-35,5	8,0	13,0	-1,0	-0,7	116,2	116,6	-12,3	1,0	0,8	114,7	114,4	12,8	118,5	117,0	114,0	
KP	407,4	119,0	-44,2	10,0	19,0	-1,0	-0,7	118,7	119,1	-13,3	1,0	0,7	117,3	116,9	13,8	118,0	119,5	116,5	

Cäsen lähtölaskenta

KK askeita alaspin -1

KK askeita ylössein +1

Asetetut Elnetist

Liite 2. Kevät-kesä-PSS®E laskenta

Asema	Uyhtäkv	Ulahtäkv	Q/Max	Tpos	Tmax	Tero	ΔUa-1	Ua-1	Ua-1+k	Q-1	Tero	ΔUa-1	Ua-1	Ua-1+k	Q-1	Us	Uyhtä	Uala	
VAl	239,9	118,7	-11,2	7,0	13,0	-1,0	-0,7	119,2	119,6	-6,2	1,0	0,7	117,8	117,4	6,4	118,5	119,5	117,5	
IM	237,9	117,0	0,5	6,0	17,0	-1,0	-1,6	119,6	120,4	0,2	1,0	1,6	116,4	115,5	-0,2	118,0	120,0	116,0	
KOS	240,7	116,6	12,8	4,0	13,0	-1,0	-1,0	118,5	119,0	-4,0	1,0	1,0	116,5	116,0	4,1	117,5	119,0	116,0	
PI	238,1	118,7	9,6	8,0	17,0	-1,0	-0,7	118,2	118,6	-0,3	1,0	0,7	116,8	116,4	0,3	117,5	119,0	116,0	
PI	412,4	238,1	46,5	4,0	13,0	-1,0	-1,2	239,3	239,9	-11,4	1,0	1,3	236,8	236,2	11,8	238,0	243,0	233,1	
PT	410,4	241,5	-28,2	5,0	13,0	-1,0	0,7	116,8	116,5	18,0	1,0	-0,7	118,2	118,5	-18,7	117,5	119,0	116,0	
KI	410,4	119,7	-37,1	8,0	19,0	-1,0	-0,8	119,3	119,6	-21,2	1,0	0,8	117,7	117,3	22,0	118,5	120,2	116,8	
TA	241,0	119,6	0,4	6,0	17,0	-1,0	0,5	117,3	117,0	14,2	1,0	-0,5	118,3	118,5	-14,7	117,8	120,0	115,5	
PR	410,1	118,0	-7,1	6,0	13,0	-1,0	-0,7	119,1	119,5	-23,1	1,0	0,7	117,8	117,4	23,8	118,5	120,5	116,5	
PS	410,5	235,2	-62,8	3,0	13,0	-1,0	-1,0	236,5	237,0	12,5	1,0	1,0	234,5	233,9	-13,1	235,5	238,0	233,0	
NU	240,1	118,5	-6,6	6,0	17,0	-1,0	-0,6	119,0	119,3	8,6	1,0	0,6	117,9	117,6	-9,0	118,5	120,0	117,0	
PY	235,6	118,5	-19,3	8,0	17,0	-1,0	-0,5	119,0	119,3	-16,2	1,0	0,5	117,9	117,7	16,5	118,5	120,0	117,0	
ST	241,0	118,5	-2,6	10,0	17,0	-1,0	0,5	117,0	116,7	6,9	1,0	-0,5	118,0	118,2	-7,2	117,5	119,5	115,5	
VJ	410,7	118,6	-4,3	7,0	14,0	-1,0	-0,9	119,4	119,8	-14,3	1,0	0,9	117,5	117,1	14,9	118,5	120,0	117,0	
SE	409,9	118,1	-23,6	7,0	13,0	-1,0	-1,6	119,0	119,8	0,0	1,0	1,7	115,7	114,9	0,0	117,4	120,5	114,3	
UN	410,2	118,9	-4,8	7,0	19,0	-1,0	-0,8	118,8	119,3	-9,3	1,0	0,9	117,1	116,7	9,4	118,0	120,0	116,0	
VE	226,1	116,7	-35,3	10,0	17,0	-1,0	-0,5	118,5	118,7	-9,2	1,0	0,5	117,5	117,3	9,2	118,0	119,5	116,5	
KS	220,2	117,2	-54,8	13,0	17,0	-1,0	-0,3	118,3	118,5	-12,8	1,0	0,3	117,8	117,6	12,9	118,0	119,5	116,5	
SJ	408,4	118,4	-10,6	8,0	19,0	-1,0	-0,6	119,1	119,3	-13,3	1,0	0,6	117,9	117,6	13,7	118,5	120,0	117,0	
TU	407,7	118,7	0,0	9,0	19,0	-1,0	-0,5	118,5	118,7	0,0	1,0	0,5	117,6	117,3	0,0	118,0	119,5	116,5	
AJ	234,2	118,0	-40,1	12,0	17,0	-1,0	-0,5	119,3	119,5	-10,3	1,0	0,5	118,3	118,1	10,7	118,8	120,6	117,1	
AA3	408,2	118,0	40,3	4,0	13,0	-1,0	-0,8	119,6	120,0	-9,8	1,0	0,8	118,0	117,6	10,2	118,8	120,6	117,1	
VH	410,6	118,5	-18,7	5,0	17,0	-1,0	-0,8	117,8	118,1	-10,8	1,0	0,8	116,2	115,8	11,2	118,0	119,5	117,5	
PE	237,4	117,3	11,9	8,0	17,0	-1,0	-0,8	118,9	119,3	-10,8	1,0	0,8	117,2	116,8	11,1	118,0	120,0	116,0	
JA13	234,9	118,1	-25,2	10,0	17,0	-1,0	-0,2	117,7	117,8	-5,8	1,0	0,2	117,3	117,2	5,7	117,5	119,0	116,0	
TO	410,2	118,2	9,0	4,0	13,0	-1,0	-0,8	118,4	118,8	-16,0	1,0	0,8	116,8	116,4	16,5	117,6	119,9	115,4	
AP	408,1	117,1	44,4	6,0	11,0	-1,0	-0,9	118,9	119,4	-12,3	1,0	0,9	117,1	116,6	12,8	118,0	120,0	116,0	
HU	409,1	117,8	37,5	5,0	11,0	-1,0	-0,1	118,1	118,2	-16,5	1,0	0,1	117,9	117,9	17,0	118,0	120,0	116,0	
YL	411,3	116,2	15,4	9,0	13,0	-1,0	0,0	118,0	118,0	0,5	1,0	1,7	116,3	115,5	42,8	118,0	119,8	116,3	
KR1	407,2	118,7	-12,3	7,0	13,0	-1,0	-0,4	118,9	119,1	-17,2	1,0	0,4	118,1	117,9	17,7	118,5	120,5	116,5	
KR2	407,2	118,4	-21,0	5,0	13,0	-1,0	-0,6	119,1	119,3	-14,2	1,0	0,6	117,9	117,6	14,7	118,5	120,5	116,5	
KM	408,8	118,2	-1,3	6,0	13,0	-1,0	-0,6	118,6	118,9	-14,6	1,0	0,6	117,5	117,2	15,1	118,0	119,5	116,5	
KA	409,8	117,6	-0,8	7,0	19,0	-1,0	-0,7	118,7	119,1	-21,0	1,0	0,7	117,4	117,0	21,6	118,1	119,3	116,8	
UL	405,5	119,7	-65,9	10,0	13,0	-1,0	0,0	118,0	118,0	0,5	1,0	1,2	116,8	116,2	58,1	118,0	120,5	115,5	
MP	406,4	117,4	13,3	4,0	13,0	-1,0	-0,7	118,2	118,6	-11,6	1,0	0,7	116,8	116,4	12,0	117,5	119,0	116,0	
RA	406,7	118,6	-11,7	8,0	12,0	-1,0	-1,0	119,0	119,5	-22,2	1,0	1,0	117,0	116,5	23,1	118,0	120,0	116,0	
LI	409,5	116,1	88,8	3,0	13,0	-1,0	-0,6	116,1	116,4	-19,1	1,0	0,6	114,9	114,6	19,6	115,5	117,0	114,0	
NN	409,7	115,8	71,1	1,0	13,0	0,0	0,0	118,0	118,0	0,0	1,0	0,5	117,5	117,2	11,5	118,0	119,5	116,5	
ES	409,2	117,7	-23,2	5,0	10,0	-1,0	-0,6	118,6	118,9	-14,5	1,0	0,6	117,4	117,1	15,0	118,0	119,5	116,5	
TM	409,1	118,4	-94,6	10,0	12,0	-1,0	0,0	118,0	118,0	0,0	1,0	1,0	117,0	116,5	61,0	118,0	119,5	116,5	
LS	409,6	118,0	-2,8	4,0	14,0	-1,0	-0,2	117,9	118,1	-18,9	1,0	0,2	117,5	117,3	19,3	117,7	119,2	116,2	
HL	409,9	118,7	-15,6	7,0	13,0	-1,0	-0,4	118,6	118,8	-18,8	1,0	0,4	117,9	117,7	19,4	118,3	120,0	116,5	
NU	410,3	118,2	-0,9	6,0	13,0	-1,0	-0,5	118,5	118,7	-15,9	1,0	0,5	117,5	117,3	16,4	118,0	119,5	116,5	
AN	410,6	117,8	18,2	3,0	14,0	-1,0	-0,4	118,4	118,6	-16,6	1,0	0,4	117,6	117,4	17,2	118,0	119,6	116,5	
FO	407,9	119,0	-25,7	8,0	13,0	-1,0	-0,7	118,7	119,0	-13,2	1,0	0,7	117,3	117,0	13,7	118,0	119,5	116,5	
VT	410,7	118,0	-7,9	6,0	13,0	-1,0	-0,7	119,2	119,6	-13,4	1,0	0,7	117,7	117,4	11,7	118,5	120,0	117,0	
S/O	409,0	118,7	-38,0	8,0	13,0	-1,0	-0,7	116,2	116,6	-12,4	1,0	0,8	114,7	114,4	12,9	115,5	117,0	114,0	
KP	409,2	118,7	-35,5	9,0	19,0	-1,0	-0,7	118,7	119,0	-13,0	1,0	0,7	117,3	116,9	13,4	118,0	119,5	116,5	
Cäsen läpplaskenta							KK asketta alaspäin -1					KK asketta ylöspäin +1					Asetellut Elinestät		

Liite 3. Muuntoasemien lyhenteet ja kondensaattorit

Lyhenne	Nimi	RC
AJ	ALAJÄRVI	
AJ3	ALAJÄRVI	
AN	ANTTILA	
AP	ALAPITKÄ	x
ES	ESPOO	x
FO	FORSSA	
HI	HIKÄ	x
HU	HUUTOKOSKI	
IM	ISONIEMI	
IN	INKOO	
JA13	JÄMSÄ	
KA	KANGASALA	x
KI	KEMINMAA	x
KJ	KALAJOKI	x
KM	KYMI	
KOS	KOKKOSNIVA	
KP	KOPUA	
KR1	KORIA1	x
KR2	KORIA2	
KS	KRISTIINA	
LI	LIETO	x
LS	LÄNSISALMI	
MP	MERI-PORI	
NJ	NURMIJÄRVI	x
NU	NUOJUA	
PE	PETÄJÄVESI	x
PI	PIRTTIKOSKI	
PR	PIKKARALA	
PS	PYHÄNSELKÄ	
PT	PETÄJÄSKOSKI	
PY	PYHÄKOSKI	
RA	RAUMA	
SE	SELLEE	
SJ	SEINÄJOKI	
SLO	SALO	
ST	SEITENOIKEA	
TA	TAIVALKOSKI	
TM	TAMMISTO	x
TO	TOIVILA	x
TU	TUOVILA	
UL	ULVILA	
UN	UUSNIVALA	
VAJ	VAJUKOSKI	
VE	VENTUSNEVA	
VH	VIHTAVUORI	
VJ	VUOLIJOKI	
VT	VISULAHTI	
YL	YLLIKKÄLÄ	