

Joni Järvinen

Loistehon kompensoinnin hallinta Kilpilahden alueella

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

2.2.2015

Tekijä Otsikko	Joni Järvinen Loistehon kompensoinnin hallinta Kilpilahden alueella
Sivumäärä Aika	56 sivua 2.2.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Kehityspäällikkö Risto Juusti Lehtori Eero Kupila
<p>Insinööriyön tarkoituksena oli kartoittaa Kilpilahden teollisuusalueen loistehotilannetta. Tavoitteena oli selvittää loistehon määrää, siirtoa ja sijoittumista eri muuntopiirien kesken.</p> <p>Tilanteen kartoitukseen käytettiin Hämeen Sähkön raportteja kompensoinnin kuntokartoitusmittauksista kesältä 2013. Raportit kertoivat toimivan kompensoinnin ja loistehon määrän mitatuissa keskuksissa. Verkkotietojärjestelmästä saatiin päämuuntajien ottamat päätö- ja loistehot.</p> <p>Päämuuntajien ottamien tehojen avulla laskettiin jokaisen muuntopiirin loistehokulma. Sitä verrattiin laskettuun Kilpilahden loissähköikkunaan ja arvioitiin muuntopiirien loistehotilanne. Muuntopiirien loistehokulmaa lähdettiin parantamaan kuntoraporttien avulla suosittelemalla korjauksia ja uusia kompensointilaitteita.</p> <p>Suosittelujen korjausten jälkeen alueen muuntopiirien loistehokulmat laskettiin uudelleen ja katsottiin niiden vaikutusta tilanteeseen. Lopputuloksena saatiin kartoitus Kilpilahden loistehotilanteesta muuntopiireittäin sekä ehdotus kompensoinnin sijoituspaikoista ja tehoista.</p>	
Avainsanat	loisteho, kompensointi

Author Title	Joni Järvinen Controlling the Compensation of Reactive Power in the Kilpilahti Industrial Area
Number of Pages Date	56 pages 2 February 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Risto Juusti, Development Manager Eero Kupila, Senior Lecturer
<p>The purpose of the thesis was investigate the reactive power in the electrical grid of Kilpilahti industrial area. The goal was to find out the level, transportation and location of reactive power between the distribution areas.</p> <p>Hämeen Sähkö's reports concerning the condition of compensation from summer 2013 were used in investigations. Reports showed the level of working compensation and the level of reactive power in measured switchgears. Scada system showed the active and reactive power used by main transformers.</p> <p>With the power readings of main transporters the angles of reactive powers were calculated on every distribution area. The angles of reactive powers were compared with Kilpilahti's reactive power window and reactive power situation of distribution areas was evaluated. The angles of reactive power on distribution areas were started to improve with help of condition reports, by making recommendations of reparations and new compensation devices.</p> <p>After recommended reparations, the angles of reactive power were recalculated and the effect on the situation was revised. The result is an analysis of the reactive power situation in Kilpilahti industrial area according to distribution areas, and recommendations of places and sizes of compensation devices.</p>	
Keywords	reactive power, compensation

Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Loistehon kompensointi	1
2.1	Päto- ja loisteho	1
2.2	Yliaallot	3
2.2.1	Yliaaltojen aiheuttajat	4
2.2.2	Yliaallot verkossa	5
2.2.3	Suuntaajat	5
2.2.4	Yliaaltojen aiheuttamat häiriöt	5
2.2.5	Yliaaltojen mittaaminen ja rajat	6
2.3	Kompensointilaitteet	7
2.3.1	Rinnakkaiskondensaattorit	8
2.3.2	Rinnakkaiskuristimet	9
2.3.3	Sarjakondensaattorit	10
2.3.4	Yliaaltosuodattimet	10
2.3.5	Estokelaparistot	11
2.3.6	Pyörivät koneet	12
2.3.7	Aktiivisuodattimet	13
2.3.8	Tyristorikytketyt kondensaattoriparistot ja kompensoittorit	13
2.3.9	Staattiset kompensoittorit SVC	14
2.3.10	Kytkin- ja suojalaitteet	14
2.4	Kompensoinnin vaikutus jakeluverkkoon	15
2.4.1	Resonanssi-ilmiö	15
2.4.2	Laitteiden kytkentä	15
2.4.3	Ohjaussignaalien vaimeneminen	16
2.4.4	Ylikompensointi	16
2.5	Loistehon kompensointi	17
2.5.1	Kompensoinnin taloudellinen sijoittelu	18
2.5.2	Kompensointi sähköasemalla	19
2.5.3	Kompensointi keskijännitejohdon varrella	19
2.5.4	Kompensointi muuntamalla	19
2.5.5	Kompensointi pienjänniteverkossa	20

2.5.6	Kojekohtainen kompensointi	20
2.5.7	Ryhmäkompensointi	20
2.5.8	Keskitetty kompensointi	20
2.5.9	Kompensointi yliaaltopitoisessa verkossa	21
2.6	Kompensoinnin mitoitus ja valinta	21
2.6.1	Kompensointilaitteiden mitoitukseen tarvittavat tiedot	21
2.6.2	Kompensointitavan valinta	22
3	Loistehon hallinta Kilpilahden alueella	23
3.1	Nykyinen kompensointi	23
3.1.1	Loistehon kompensointi kondensaattoreilla	24
3.1.2	Voimalaitos	25
3.1.3	Loissähköikkuna	26
3.1.4	Kaapeleiden ja muuntajien loisteho	29
3.2	Muuntopiirien loisteho	33
3.2.1	Muuntamo M001 muuntaja PM1	34
3.2.2	Muuntamo M001 muuntaja PM2	37
3.2.3	Muuntamo M001 muuntajat PM3 ja PM4	39
3.2.4	Muuntamo M037 muuntaja PM1	42
3.2.5	Muuntamo M130 PM1	45
3.2.6	Muuntamo M120 PM1 ja PM2	47
4	Kompensoinnin kehitysehdotukset	49
5	Loppupäätelmät	54
	Lähteet	56

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä kartoitetaan loistehon kompensointia Neste Oilin Porvoon jalostamon alueella. Työn lähtökohtana on vanhan kompensointilaitteiston ikääntyminen ja siitä seuraava vikaantumisesta johtuva kompensoinnin väheneminen. Lisäksi lisäkompensoinnin tarvetta aiheuttaa tahtigeneraattoreiden käytöstä poisto ja jalostamon kompensaatiotarpeen kasvu uusien projektien myötä. Työn alussa käydään läpi yleistä teoriaa lois- ja pätötehosta sekä loistehon kompensoinnista ja siihen käytettävistä laitteistoista. Tämän jälkeen työssä siirrytään jalostamon kompensoinnin nykytilanteeseen ja sen ongelmakohtiin. Nykytilanteen kartoittamisen jälkeen esitetään kehitysehdotuksia loistehotilanteen parantamiseksi ja muodostetaan hinta-arvioita ehdotetuille ratkaisuille. Työssä käytettävät tiedot on kerätty Hämeen Sähkön kompensoinnin kuntokartoituksista ja Neste Oilin tietojärjestelmistä. Lopuksi analysoidaan tuloksia ja pohditaan tulevaisuuden tilannetta.

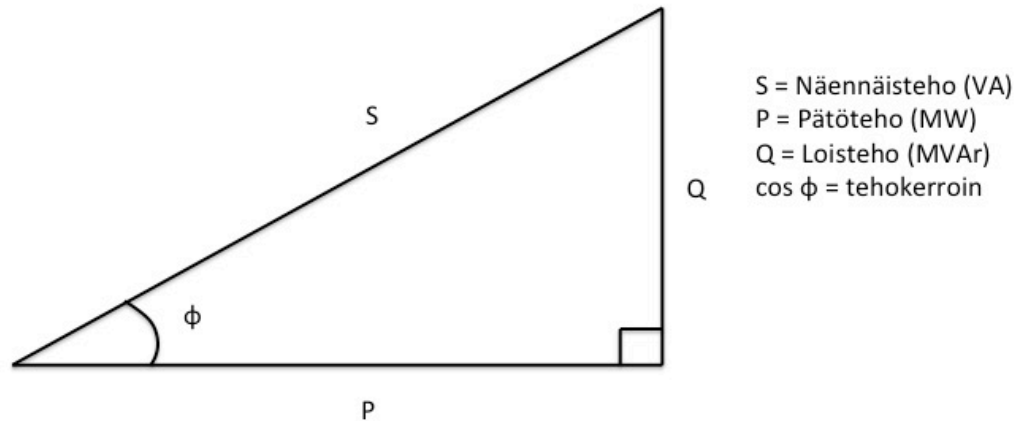
2 Loistehon kompensointi

Monet laitteet tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi myös loistehoa. Tästä hyvänä esimerkkinä induktiomootorit, jotka käyttävät pätötehoa moottorin mekaaniseen työhön ja loistehoa pyörimisliikkeen aikaansaavan magneettikentän ylläpitoon. Induktio-moottori kuluttaa loistehoa, joten se on myös tuotettava jossain kuten pätötehokin. (Loistehon tuottamiseen liittyvät ratkaisut ks. 2,4 Kompensointilaitteet) [1, s. 7.]

2.1 Pätö- ja loisteho

Tehosta puhuttaessa tarkoitetaan tavallisesti juuri pätötehoa, joka voidaan ajatella kuluvaksi laitteen tekemään resistiiviseen työhön. Pätöteho on siis tehon resistanssissa kuluva komponentti. Vaihtosähköstä puhuttaessa teholla on kuitenkin myös toinen komponentti loisteho. Loisteho voi olla induktiivista tai kapasitiivista riippuen siitä, tuotetaan vai kulutetaan sitä. Induktiivinen loisteho tarkoittaa kuluttajan näkökulmasta sitä, että loistehoa kulutetaan verkosta ja kapasitiivinen vastaavasti loistehon tuottamista verkkoon. Kapasitiivinen ja induktiivinen loisteho ovat toisiinsa nähden vastakkaisuuntaiset eli, jos ne ovat täysin tasapainossa, niiden summa on 0,

ja tällöin vaihtosähkön teho on pelkästään resistiivistä. Loistehoa syntyy kun virran ja jännitteen välissä on vaihesiirtoa. Tällöin ne eivät kuljekaakaan sinikäyrineen tasatahtia vaan joko jännite on virtaa edellä tai päinvastoin. Vaihesiirron yksikkönä käytetään φ . Pätötehon suhdetta näennäistehoon taas ilmaistaan $\cos \varphi$. Vaihtosähkön kokonaisteho (näennäisteho) on siis pättötehon ja loistehon geometrinen summa. Tätä havainnollistetaan tehokolmiolla (kuva 1).



Kuva 1. Tehokolmio

Vaihtosähkön tehoa laskettaessa ei yleensä haluta tietää hetkellistä tehoa, vaan keskimääräinen teho. Vaihtosähkön virta ja jännite vaihtelevat sinimuotoisesti, joten tehoakin vaihtelee sinimuotoisesti.

Keskimääräistä pättötehoa P voidaan laskea yhtälöllä (1)

$$P = UI \cos \varphi, \quad (1)$$

jossa

U on jännitteen tehollisarvo

I on virran tehollisarvo

φ on virran ja jännitteen välinen vaihesiirtokulma

Keskimääräisen pättötehon yksikkö on

$$[P] = 1W = 1watti$$

Näennäistehoa S voidaan laskea kaavalla (2)

$$S = UI \quad (2)$$

Näennäistehon yksikkö on

$$[S] = 1VA = 1\text{volttiampeeri}$$

Loistehoa Q voidaan laskea kaavalla (3)

$$Q = UI \sin \varphi \quad (3)$$

Loistehon yksikkö on

$$[Q] = 1VAr = 1\text{vari} = 1\text{volttiampeeri reaktiivista [1, s. 12 - 15.]}$$

2.2 Yliaallot

Sähköverkko on suunniteltu toimimaan 50 Hz:n vakiotaajuisella sinimuotoisella jännitteellä ja virralla. Taajuuden poikkeamat johtuvat tuotannon ja kulutuksen välisestä epätasapainosta. Käyrämuodon vääristymät sekä jännitteen ja virran säröytyminen taas tarkoittavat, että sähköverkossa esiintyy suurempi taajuisia yliaaltoja. Verkkojännitettä säröyttävät lähinnä epälineaaristen kuormitusten verkosta ottamat ja sinne syöttämät virrat. Jännite säröytyy, kun korkeampi taajuisien yliaaltojen virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Jännitteen säröytyminen taas aiheuttaa sinimuodosta poikkeavia virtoja lineaarisillakin kuormilla.

Resonanssi-ilmiö voi suurentaa verkossa esiintyviä yliaaltoja huomattavasti. Jännitteen ja virran säröytymisestä huolimatta niitä voidaan yleensä käsitellä jaksollisesti vaihtelevina suureina ja esittää syntyneen useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta komponentista. Yhtälössä 4 havainnollistetaan tätä jännitteellä ja esitetään se perustaajuisen komponentin ja harmonisten yliaaltojen summana muodossa, jossa taajuuskomponentit on määritelty amplitudinsa ja nollavaihekulmansa avulla.

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [\sqrt{2}U_n \sin(n2f_1t + a_n)], \quad (4)$$

jossa

U_0 = jännitteen tasakomponentti

U_n = jännitekomponentin tehollisarvo

n = kokonaisluku

f_1 = perustaajuus

a_n = taajuuskomponentin nollavaihekulma

Verkossa esiintyy sekä harmonisia että epäharmonisia yliaaltoja. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kokonaislukumonikertoja ja ne voidaan tunnistaa järjestyslukunsa n perusteella. Se saadaan jakamalla yliaallon taajuus f_n perustaajuudella f_1 . Epäharmonisten yliaaltojen taajuus taas ei ole perustaajuuden monikerta. [1, s. 7; 2, s. 26, 27.]

2.2.1 Yliaaltojen aiheuttajat

Jakelujärjestelmä sisältää paljon laitteita, joiden toimintaan liittyy epälineaarisia ilmiöitä. Tunnetuimpana on raudan magneettinen kyllästyminen. Vaiheiden välinen epäsymmetria tai verkossa esiintyvä tasakomponentti voi aiheuttaa ongelmia lineaarisuudessa ja tästä seurauksena magnetointi virtaan syntyy yliaaltoja. Toinen yliaaltojen lähde on erilaiset verkossa syntyvät purkausilmiöt, jotka synnyttävät yliaaltoja verkon laitteissa. Merkittävimmät yliaallot aiheutuvat kuitenkin nykyään virran ja jännitteen suhteen epälineaarisista kuormituksista kuten suurista suuntaaja käytöistä ja valokaariuuneista. Lisäksi erityisesti huoltamattomat UPS-laitteistot aiheuttavat paljon yliaaltoja. [1, s. 22; 2, s. 30.]

2.2.2 Yliaallot verkossa

Yliaaltovirtojen aiheuttama häiriö verkon laitteissa riippuu jännitteen käyrämuodon säilyttämisestä, joka taas riippuu yliaaltojen kohtaamasta impedanssista verkon eri pisteissä. Yliaaltovirrat jakautuvat verkon eri haaroissa impedanssien suhteessa, joten on erittäin vaikeaa ennustaa, miten ne jakautuvat koko verkossa. Ennustamisen vaikeus johtuu siitä, että verkon impedanssia yliaaltotaajuuksilla ei yleensä tunneta. Verkon impedanssit saattavat muuttua kytkentä tilanteiden mukaan ja eri vaiheiden impedanssit voivat erota toisistaan. Yliaaltojen virtoihin verkon eri kohdissa vaikuttavat lisäksi yliaaltojen summautuminen, jakautuminen, resonanssit, vaimentuminen ja suodatus. [1, s. 22, 24, 25.]

2.2.3 Suuntaajat

Kuten edellä on mainittu, merkittävimpinä yliaaltojen aiheuttajina ovat usein suuntaajat. Suuntaajat voidaan jakaa karkeasti tasasuuntaajiin, vaihtosuuntaajiin, vaihtojännitteen asettelu kytkentöihin ja taajuusmuuttajiin. Suuntaajat ottavat verkosta 50 Hz virtaa ja 50 Hz jännitettä siirtäen tehoa toimilaitteelle. Verkkoon nähden suuntaaja taas toimii yliaaltovirtalähteenä. Se työntää verkkoon eritaajuisia virtoja, ja niiden virtapiirit sulkeutuvat verkon osien, johtojen, muuntajien, tahti- ja epätahtikoneiden kautta aiheuttaen niissä häviöitä ja ylimääräistä lämpenemistä. [1, s. 37, 39.]

2.2.4 Yliaaltojen aiheuttamat häiriöt

Yliaalloista on haittaa verkolle ja siinä oleville laitteille. Ne aiheuttavat mm. lisähäviöitä jakeluverkostossa, resonansseista johtuvia ylijännitteitä, suojausjärjestelmien vikatoimintoja, häiriöitä verkkokäskyohjauslaitteissa ja virheitä energian mittauksessa. Pieni-taajuiset yliaallot aiheuttavat pääasiassa sähköverkon laitteiden ja komponenttien lämpenemistä, kun taas suuritaajuiset aiheuttavat ääni- ja radiotaajuisia häiriöjännitteitä. (Yliaaltojen aiheuttaminen häiriöiden torjuntaan ja yliaaltojen suodattamiseen palataan loistehon kompensointi laitteita käsittelevässä, ks. 2.3 Kompensointilaitteet.) [1, s. 32, 40; 2, s. 30 - 36.]

2.2.5 Yliaaltojen mittaaminen ja rajat

Yliaaltojen mittaaminen suoritetaan usein yliaaltoanalysointilaitteilla. Se kertoo tavallisesti perustaajuisen aallon tehollisarvon ja muiden harmonisten taajuuksien tehollisarvot suhteessa perusaaltoon. Näistä voidaan laskea perusaaltosisältö u_{f1} yhtälöllä 5. [2, s. 29.]

$$u_{f1} = \frac{U_1}{U}, \quad (5)$$

jossa

U_1 = perustaajuisen jännitteen tehollisarvo

U = jännitteen tehollisarvo

Jännitteen harmonisella kokonaissäröllä THD kuvataan harmonisten yliaaltojen määrää suhteessa perustaajuiseen komponenttiin THD-F tai jännitteen tehollisarvoon THD-R. Yhtälöissä 6 ja 7 esitetään niiden laskeminen. Samat yhtälöt soveltuvat myös yliaaltovirtojen laskemiseen. [2, s. 29.]

$$THD - F = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (6)$$

$$THD - R = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots}^{\infty} U_h^2}}{U}, \quad (7)$$

jossa

U = koko jännitteen tehollisarvo

U_h = yliaaltojännitteen tehollisarvo

Sähkön laatuun liittyvä standardi SFS-EN 50160 määrittelee raja-arvoja muun muassa yliaaltojännitteelle ja jännitteen kokonaissärölle liittymäkohdassa. Standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon aikana 95 %:n jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen tehollisarvon 10 minuutin keskiarvoista tulee olla pienempi tai yhtä

suuri, kuin taulukon 1 annettu arvo. Jakelujännitteen kokonaissärön THD täytyy kaikki harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 saakka, mukaan lukien, olla enintään 8 %. [2, s. 29, 44.]

Taulukko 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden arvot liittymiskohdassa suhteessa perustajaiseen jännitteeseen. [SFS-EN 50160]

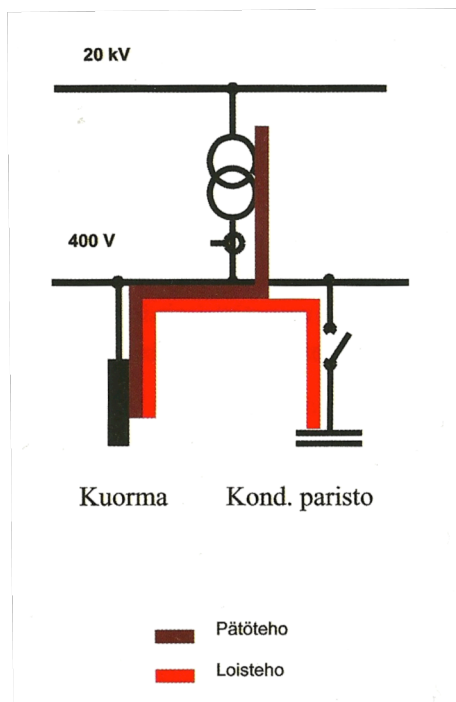
Parittomat yliaallot, kolmella jaottomat		Parittomat yliaallot, kolmella jaolliset		Parilliset yliaallot	
Järjestysluku h	Yliaaltojännite %	Järjestysluku h	Yliaaltojännite %	Järjestysluku h	Yliaaltojännite %
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				
Kokonaissärö THD 8 %					

2.3 Kompensointilaitteet

Kompensointiin käytetään useita erilaisia ratkaisuja riippuen siitä, mitä kompensoidaan. Jakeluverkossa käytetään tavallisesti rinnakkaiskondensaattori- tai estokelaparistoja ja ne kytketään mahdollisimman lähelle loistehon kulutuspiistettä. Voimansiirtoverkossa taas tarvitaan kondensaattorien lisäksi rinnakkaiskuristimia kuluttamaan pienen kuormituksen aikana johtojen aiheuttama ylimääräinen loisteho. Pitkillä voimansiirtojohtoilla johdon siirtokapasiteettia voidaan kasvattaa sarjakondensaattorilla, joka kompensoi johdon reaktanssia. Myös verkon yliaaltopitoisuus vaikuttaa valittavaan kompensointi ratkaisuun. [3, s. 225, 226.]

2.3.1 Rinnakkaiskondensaattorit

Rinnakkaiskondensaattoriparisto muodostuu useammasta rinnan ja sarjaan kytketystä kondensaattoriyksiköstä, sekä näiden kytkin- ja suojalaitteista. Kuorman ja kondensaattoripariston rinnankytkentää havainnollistetaan kuvassa 2. Kondensaattoriparistoja voi olla kiinteitä tai automaattisesti säätyviä. Näiden ero on siinä, että kiinteä on rakennettu tietyn suuruiselle loisteholle ja automaattinen taas asetettu säätimen perään, joka kytkee kondensaattoriyksiköitä verkkoon portaittain päälle ja pois tarpeen mukaan.



Kuva 2. Rinnakkaiskondensaattorin toimintaperiaate [2, s. 50]

Säätimelle on asetettu havahtumisrajat induktiiviselle ja kapasitiiviselle puolelle. Ohjaus tapahtuu tavallisesti mittaamalla syötöstä virtamuuntajan avulla kuormituksen loistehon tarvetta. Portaattain voidaan olla erisuuruisia ja säädön tarkkuuden määrää pienimmän portaan koko. Eri valmistajilla on erilaisia standardikokoja portaisiin. Automaattikaparistoja käytetään tavallisesti keskitettyyn kompensointiin pää- ja ryhmäkeskuksissa. Rinnakkaiskondensaattori on hyvä ratkaisu kohteisiin, joissa ei esiinny merkittävästi yliaalloja. [2, s. 49 - 52; 3, s. 227 - 230; 4, s. 56 - 58.]

Rinnakkaiskondensaattorin tuottama loistehon määrä saadaan yhtälöstä

$$Q = \omega C U^2 = \left(\frac{U}{U_R}\right)^2 Q_R, \quad (8)$$

jossa

ω = verkon kulmataajuus

C = kondensaattorin kapasitanssi

U = verkon jännite

U_R = kondensaattorin mitoitusjännite

Q_R = kondensaattorin mitoitusteho

2.3.2 Rinnakkaiskuristimet

Rinnakkaiskuristimet eli reaktorit eivät tuota loistehoa, vaan kuluttavat sitä. Reaktorit kytketään muuntajan teriärikäämeihin ja niitä käytetään suurjänniteverkossa kuluttamaan pienen kuormituksen aikana johtojen tuottama ylimääräinen loisteho. Yleisesti Suomessa käytetään ilmasydämissä, ilmajäähdytteisiä ja kiinteää eristettä käyttäviä laitteita. Näiden lisäksi on käytössä myös muutamia öljyeristeisiä reaktoreita, joiden etuna on pieni tilantarve, mutta ne ovat kalliimpia ja painavampia. [3, s. 226, 227.]

Reaktorin kuluttama loisteho saadaan yhtälöstä

$$Q = \left(\frac{U}{U_R}\right)^2 Q_R, \quad (9)$$

jossa

U = verkon jännite

U_R = reaktorin mitoitusjännite

Q_R = reaktorin mitoitusteho

2.3.3 Sarjakondensaattorit

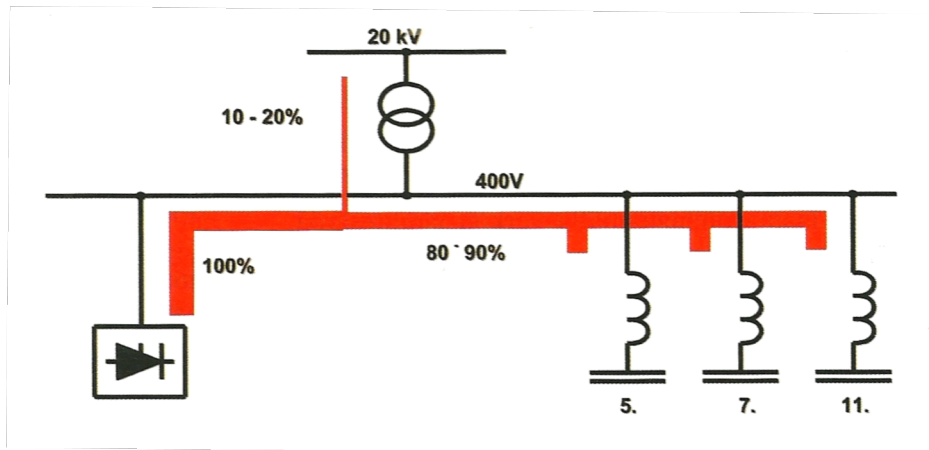
Sarjakondensaattori on laite, joka kytketään johdon kanssa sarjaan, jolloin se pienentää johdon päiden välistä induktiivista reaktanssia. Sen vaikutuksesta johdon päiden välinen kulmaero ja johdon kuormittuessaan verkosta ottama loisteho pienenevät. Sarjakondensaattorin tuottama loisteho on suoraan verrannollinen johdossa kulkevan kuormitusvirran suuruuteen yhtälön 10 mukaisesti.

$$Q_{SC} = 3 * X_{SC} I^2 \quad (10)$$

Sarjakondensaattoria käytetään pääasiassa pitkillä siirtojohtoilla, eikä sitä ole niinkään tarkoitettu loistehon kompensointiin, vaan johdon siirtokyvyn lisäämiseen. [2, s. 52; 4, s. 58; 3, s. 232 - 236]

2.3.4 Yliaaltosuodattimet

Yliaaltosuodatin muodostuu kondensaattorin kanssa sarjaan kytketystä kuristimesta. Yliaaltosuodatin voidaan kytkeä yliaalto lähteen läheisyyteen tai suurjännitekiskoon, jossa se suodattaa keskitetyksi useamman yliaaltolähteen yliaallot. Yliaaltosuodattimet ovat imupiirejä, joihin syntyvät yliaallot ohjataan. Imupiireissä yliaallot tuhoutuvat, eikä niitä pääse muualle verkkoon. Kuristimen induktanssi valitaan kondensaattorin ja kuristimen sarjankytkennässä halutuille suodatettaville yliaalloille mahdollisimman pieneksi, jotta yliaallot ohjautuisivat imupiiriin. Kuvassa 3 havainnollistetaan yliaaltosuodattimen toimintaa. Tyypillisesti yliaaltosuodatin koostuu kolmesta sarjaresonanssipiiristä, jotka on viritetty yleisimmille yliaaltotaajuuksille, 5., 7. ja 11. harmoniselle yliaallolle. Jokaisessa suodattimessa on kontaktori, terminen ylivirtarele, kuristin ja kondensaattori.

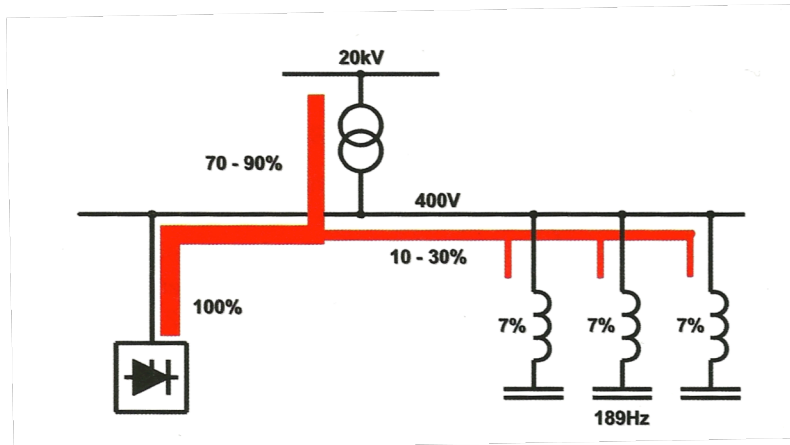


Kuva 3. Yliaaltosuodattimen toimintaperiaate [2, s. 56]

Yliaaltosuodattimia käytetään verkoissa, joissa yliaaltopitoisuus on suuri. Se tuottaa tarvittavan loistehon ja yliaaltoja tuhoamalla nostaa sähkön laatua ja pienentää verkon jännitesäröä. [1, s. 84 - 87; 2, s. 56, 57; 4 s. 61.]

2.3.5 Estokelaparistot

Estokelaparistoja käytetään verkoissa, joissa jännitteen laatu on yliaalloista huolimatta kohtuullinen. Sillä vältetään rinnakkaisresonanssin syntyminen kondensaattorin ja syöttävän verkon induktanssin välille. Estokelapariston jokainen porraskondensaattori muodostuu loistehoportaana olevan kondensaattorin ja kuristimen sarjaan kytkennästä. Kondensaattorin kapasitanssi ja kuristimen induktanssi täytyy valita siten, että niiden muodostama induktanssi ei ole samalla taajuudella harmonisten yliaaltojen kanssa ja muodosta rinnakkaisresonanssipiiriä. Viritystaajuutensa alapuolella paristo on kapasitiivinen, eli tuottaa loistehoa ja yläpuolella taas induktiivinen, jolloin se ei vahvista yliaaltoja tyypillisillä yliaaltotaajuuksilla. Estokelapariston toimintaa havainnollistetaan kuvassa 4.



Kuva 4. Estokelapariston toimintaperiaate [2, s. 54]

Estokelapariston yliaaltoja suodattava vaikutus on tavallisesti 10 - 30 % viidennen yliaaltovirran määrästä, kun käytössä on 189 Hz:n viritystaajuus. Pariston viritystaajuus valitaan verkossa esiintyvien merkittävimpien yliaaltojen mukaan. Sen yliaaltoja suodattava vaikutus riippuu kompensoinnin tehosta ja viritystaajuudesta. Suodatusvaikutus heikkenee, jos viritystaajuus poikkeaa enemmän esiintyvistä yliaaltotaajuuksista. Estokelaparistoja voidaan käyttää sekä keskitettyyn kompensointiin, että kiinteänä yksikkönä laitekohtaiseen kompensointiin ja se kytketään yleensä kompensoitavan laitteen tai laiteryhmän rinnalle. [2, s. 52 - 54; 4, s. 59, 60.]

2.3.6 Pyörivät koneet

Loistehon kehittäminen pyörivillä koneilla, kuten generaattoreilla, on ollut aikaisemmin yleistä. Nykyään tästä ollaan kuitenkin pyritty siirtymään kondensaattoreihin ja muihin ratkaisuihin, koska pyörivillä koneilla kehitetty loisteho joudutaan siirtämään verkossa päätötehon mukana kuluttavalle laiteelle. Ylimääräisen loistehon siirtäminen taas aiheuttaa lisäkustannuksia verkon rakentamisessa ja siirtohäviöissä.

Pyörivillä koneilla kehitetään loistehoa käyttämällä niitä ilman kuormaa ja ylimagnetointuna ne syöttävät loistehoa verkkoon. Tämä lisää koneen tuottamia häviöitä ja pienentää päätötehon tuotantoa. Magnetointia säädetään useimmiten tyristoreilla, joilla magnetointijännite saadaan säädetyksi hyvin nopeasti. Säätonopeutta rajoittava tekijä

on tällöin kompensattorin magnetointikäänin suuri induktanssi. Lisäksi pyörivällä kompensattorilla voidaan kompensoida vain symmetriset loistehon muutokset. Kompensointi tahtimoottorilla voi olla perusteltua silloin, kun moottoria voidaan hyödyntää itse prosessissa. [1, s. 50, 51; 2, s. 63, 64.]

2.3.7 Aktiivisuodattimet

Aktiivisuodatin on puolijohdetekniikalla toteutettu suodatin, joka mittaa virran yliaalto-komponentit ja tuottaa kuorman yliaallolle vastakkaissuuntaisen yliaaltovirran, jolloin yliaaltovirrat kumoavat toisensa. Etuna passiivisesti toimivaan suodattimeen verrattuna on, että aktiivisuodatin reagoi verkon yliaaltotilanteen muutokseen. Aktiivisuodatin sopii kohteisiin, joissa ei tarvitse tuottaa loistehoa ja suodatustarve muuttuu nopeasti. Sen suodattamat yliaallot voidaan valita tarpeen mukaan tai suodattaa kaikki yliaallot. Aktiivisuodatin ei voi ylikuormittua, vaan sen suodatuskapasiteetin ylittyessä se jatkaa toimintaansa jättäen kapasiteettinsa ylittävän osan yliaalloista suodattamatta.

Aktiivisuodattimien yleistymistä on hidastanut puolijohdekytkinten suorituskyky ja passiivisuodattimia korkeampi hinta. Sen etuna passiiviseen suodattimeen nähden on verkon yliaaltotilanteeseen reagoimisen lisäksi muun muassa rinnakkaisresonanssivaaran välttäminen ja pienempi tilantarve. Aktiivisuodatin pystyy myös kompensoimaan kolmella jaolliset parittomat yliaallot, kuten 3. harmonisen yliaallon. Suodatin voidaan kytkeä mihin tahansa verkon pisteeseen, ja se on riippumaton virran suunnasta, käyrämuodosta ja virtamuutoksen dynamiikasta. Aktiivisuodattimen toiminta perustuu energianlähteinä toimivien verkosta latautuviin tasajännitekondensaattoreihin ja inverttereihin, jotka tuottavat PWM-modulaatiolla halutun virran verkkoon. Inverttereissä käytetään useimmiten IGBT-transitoreita, mutta myös muita puolijohteita voidaan käyttää. Aktiivisuodattimia valmistetaan tavallisesti kokoluokassa 17 - 100 kVA ja suuremman tehon tarpeessa laitteita voidaan kytkeä useampi rinnan. [2, s. 62, 63; 4, s. 66, 67.]

2.3.8 Tyristorikytketyt kondensaattoriparistot ja kompensattorit

Tyristorikytkettyjä kondensaattoriparistoja käytetään verkoissa, joissa kuormitus muuttuu nopeasti, jolloin kompensointitehon ohjausta ei voida toteuttaa mekaanisilla kytkinlaitteilla. Tyristorikytkimen etuna on se, että se ei kulu mekaanisesti, toimii äänettömästi ja sillä on mahdollisuus saavuttaa lähes transienttivapaa kytkentä. Pienjännitteellä

käytetään tyristorikytkettyjä kondensaattoriparistoja TSC ja suurjännitteellä kompensoittoria TCR, joka tavallisesti koostuu yliaaltosuodattimista ja reaktorista. Reaktorin virtaa ohjaamalla saadaan verkon kompensointitehon portaaton säätö.

Kun paristolle tuodaan ohjaussignaali kompensoitavalta laitteelta, saadaan lähes viiveetön loistehon kompensointi. Pariston säätöyksikön ohjaamana pariston kaikki portaat saadaan kytkettyä verkkoon minimissään yhden verkkojakson aikana. (Paristot ovat estokelaparistoja ja toimivat kuten edellä mainittu, ks. 2.3.5). [2, s. 60; 4, s. 65, 66.]

2.3.9 Staattiset kompensoittorit SVC

Staattisia kompensoittoreita käytetään sähköverkoissa ja teollisuudessa olosuhteissa, joissa vaaditaan nopeaa muutosta kompensointiin tai jännitteeseen. Staattinen kompensoittori on erittäin nopea ja sen kokonaisvasteaika on maksimissaan 10 ms 50 Hz:n verkossa. Sen vasteaikaan vaikuttaa se, millä jakson hetkellä tyristorit kytkeytyvät.

Staattinen kompensoittori koostuu suodattimista sekä tyristoriohjatusta reaktorista, jonka virtaa ohjaamalla säädetään verkkoon syötettävää loistehoa. Staattinen kompensoittori tuottaa halutun loistehon, suodattaa halutut yliaallot, stabilisoi verkon jännitteen ja pystyy lisäksi poistamaan kolmivaihemootoreita haittaavan jännitteen epäsymmetri-an yksivaiheisen ohjauksensa ansiosta. Käyttökohteita ovat muun muassa terästehtaiden valokaariuunit, valssikäytöt, senkkauunit ja kaivoshissit. [2, s. 60, 61; 4, s. 66.]

2.3.10 Kytkin- ja suojalaitteet

Kytettäessä kompensointilaitteisto pienjänniteverkkoon olisi huollon kannalta suositeltavaa käyttää kytkinvaroketta tai kompaktikatkaisijaa, mutta minimissään varoketta. Keskijänniteverkossa kompensointilaitteen liitännä riippuu kondensaattoripariston tehosta ja kytkentä tarpeesta. Kytkentälaitteen kapasitiivinen virrankatkaisukyky tulee olla riittävä ja siihen käytetään joko erotinta, kuormanerotinta tai katkaisijaa.

Kondensaattoripariston kytkentään liittyy erilaisia kytkentäilmiöitä. Näitä voidaan vähentää muun muassa käyttämällä vaimennusvastusta tai -kelaa. Tällöin paristo

kytketään ensin vaimennuksen kautta verkkoon ja sen jälkeen vaimennus ohitetaan toisella katkaisijalla. Toinen vaihtoehto on käyttää 0-piste katkaisijaa, jolloin katkaisija pyrkii kytkemään kunkin vaiheen kiinni jännitteen nollakohdassa.

Pienjännitteellä ylivirta- ja oikosulkusuojauksessa käytetään tavallisesti sulaketta tai tarvittaessa ylivirtarelettä tai vastaavaa. Keski- ja suurjänniteverkoissa oikosulku- ja ylijännitesuojaus hoidetaan tavallisesti suojareleillä. Lisäksi laitteiden sisäiseen suojaukseen käytetään epäbalanssisuojauksia ja laitteet voidaan varustaa tarvittaessa erilaisilla lisäsuojalaitteilla. [2, s. 64; 4, s. 68.]

2.4 Kompensoinnin vaikutus jakeluverkkoon

Kompensoinnin valinnassa ja toteutuksessa tulee ottaa huomioon kompensointilaitteiden verkkoon aiheuttamat ongelmat.

2.4.1 Resonanssi-ilmiö

Kompensointilaitteiden verkkoon liittäminen aiheuttaa sarja- ja rinnakkaisresonanssi-ilmiöiden syntymistä. Resonanssi-ilmiöitä aiheuttaa esimerkiksi, kun kondensaattoriparisto liitetään verkkoon ilman kuristinta, jolloin syöttävän verkon induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi muodostavat alapuolelta katsottuna rinnakkaisresonanssi-ilmiön, jossa syntyvät yliaallot vahvistuvat. Vahvistuminen riippuu siitä, miten kaukana resonanssitaajuus on yliaallotaajuuksista sekä verkon resistanssi- ja reaktanssisuhteista. Verkon resistiiviset kuormitukset vaimentavat vahvistumista. Vahvistuskertoimet voivat olla pienjänniteverkossa 1 - 5-kertaiset ja keskijänniteverkossa 10 - 20-kertaiset. [2, s. 65 - 67.]

2.4.2 Laitteiden kytkentä

Kun kondensaattori kytketään verkkoon, se ottaa hetkellisen virtapiikin, jonka suuruus voi olla jopa 100-kertainen nimellisvirtaan verrattuna. Tästä seuraa jännitteen nopea lasku sekä kondensaattorin varauduttua jännitepiikki, joka vaimenee kytkentäilmiön kautta. Jännitepiikin suuruus on yleensä 1,1 - 1,6 kertaa nimellisjännite, mutta verkossa esiintyvä resonanssi saattaa nostaa sitä entisestään. Kytkennän aikainen jännitepiikki voi laukaista suojaustoimintoja tai aiheuttaa laitteiden rikkoutumista.

Keskijänniteverkossa kytketyt kondensaattorit voivat aiheuttaa rinnakkaiskondensaattoreilla kompensoituun pienjänniteverkkoon jopa 2,5-kertaisen ylijännitepiikin.

Verkon jälleenkytkentä tilanteessa, kun muuntaja kytketään jännitteiseksi, syntyy muutamana jakson ajan pääasiassa toista ja kolmatta yliaaltoa. Verkon ja toisioon kytketyn kondensaattoripariston välisessä rinnakkaisresonanssipiirissä yliaallot saattavat vahvistua ja vaurioittaa kondensaattoreita. Keskijänniteverkkoon sijoitettuihin kondensaattoriparistoihin kannattaakin asentaa alijännitesuojaus, joka ohjaa katkaisijan auki, jos verkossa ilmenee keskeytys. Pienjänniteverkossa loistehonsäädin ohjaa kondensaattorin kontaktorin toimintaa ja avaa sen keskeytyksen sattuessa, sekä estää viiveen avulla purkautumattomien kondensaattoreiden kytkemisen verkkoon. Kondensaattoria ei saa kytkeä verkkoon, ennen kuin purkauslaite on purkanut sen jännitteen alle 10 % nimellisarvosta. Suurjänniteparistoilla tämä voidaan estää viivereleellä. [2, s. 76 - 79.]

2.4.3 Ohjaussignaalien vaimeneminen

Kondensaattoreiden kapasitanssit muodostavat taajuuteen kääntäen verrannollisen impedanssin, joka toimii pieniohmisena kulkureittinä suuritaajuisille ohjaussignaaleille ja saattaa vaimentaa niitä. Tämän välttämiseksi tulee estokela paristojen viritystaajuus valita siten, että se ei ole liian lähellä verkkokäskyohjaustaajuutta. Lisäksi ongelma voidaan välttää liittämällä kondensaattoreihin erilliset estopiirit. Joissakin tapauksissa signaalintason nosto saattaa myös auttaa asiaan. [2, s. 77.]

2.4.4 Ylikompensointi

Kun kompensointiin käytetään kiinteitä kondensaattoreita, automatiikkaparistojen säädin on vioittunut tai väärin viritetty, voi tyhjäkäynti tilanteessa aiheutua tilanne, jossa kompensointi tuottaa enemmän loistehoa kuin on tarve. Tällöin verkko on ylikompensoitu. Ylikompensointi aiheuttaa verkossa jännitteen nousua ja lisäksi kantaverkkoyhtiö laskuttaa yleensä korkeaa loistehomaksua liian korkeasta kapasitiivisesta loistehosta. Poikkeustapauksissa ylikompensointia voidaan käyttää kompensoimaan jännitteen alenemaa. [2, s. 77 - 78.]

2.5 Loistehon kompensointi

Loistehon kompensointiin on useampia syitä, mutta usein ne pohjautuvat kustannussäästöihin tai taloudelliseen kannattavuuteen. Kuluttajan ja verkkoyhtiön välisessä sopimuksessa on määritelty loistehon ilmaisosuus, joka on tavallisesti joku prosenttiosuus otetusta pätötehosta. Tämän osuuden ylittämisestä verkkoyhtiö laskuttaa kuluttajalta loistehomaksua. Lisäksi verkkoyhtiö laskuttaa kuluttajalta ylimääräisestä tuotetusta loistehosta. Loistehorajoilla jakeluverkkoyhtiö pyrkii ohjaamaan kuluttajaa omaan loistehon kompensointiin.

Kompensoinnin tarkasteluun voi johtaa myös se, että kuluttaja haluaa keventää verkon mitoitusta. Kompensoimalla voidaan lisätä verkon siirtokapasiteettia, koska pätötehon lisäksi ei tarvitse siirtää niin paljon loistehoa, jolloin kuorman ottama kokonaisvirta laskee. Tämän seurauksena voidaan käyttää pienempiä kaapeleiden poikkipintoja ja sulakkeita, sekä pienentää moottoreiden käynnistysvirtaa. Lisäksi saadaan myös pienennettyä verkon pätöteho häviöitä, jotka ovat riippuvaisia kokonaisvirrasta sekä jännitteen alenemaa, joka taas riippuu loisvirrasta. Jännitteen alenema on pienillä johdon poikkipinnoilla merkityksetön pienen reaktanssin takia, mutta suuremmilla poikkipinnoilla ja pitkillä siirtoetäisyyksillä sekä jakelumuuntajalla kompensoinnin vaikutus jännitteen aleneman pienentämisessä on merkittävä.

Loistehon kompensointiin kuuluu yleensä oleellisena osana myös yliaaltojen suodatus. Se parantaa jännitteen laatua ja pienentää jännitesäröä, jolloin laitteissa esiintyvien häiriöiden ja vaurioiden todennäköisyys pienenee, sekä häviöt eri verkkokomponenteissa vähenevät. Yliaaltosuodatuksen kannattavuus keskeytyskustannuksien pienemisen kautta on erittäin tapauskohtaista.

Loistehoa ei välttämättä tarvitse tuottaa sitä kuluttavan laitteen läheisyydessä. Loistehoa voidaan myös siirtää verkkoa pitkin kauempaa kuluttavalle laitteelle. Yleisesti kuitenkin pyritään siihen, että loisteho kompensoidaan siellä, missä se syntyy. Tämä voi kuitenkin olla taloudellisesti kallista. Parempi vaihtoehto voisi olla kompensoida keskiteysti useampaa loistehoa kuluttavaa laitetta. Jakeluverkkoyhtiö kompensoi yleensä oman sähkönsiirrosta aiheutuvan loistehon ja jättää kuluttajalle tämän loistehotarpeesta aiheutuvan osuuden. Kuluttaja asettaa kompensointia pääkeskukseen, nousukeskukseen, ryhmäkeskukseen tai laitekohtaisesti oman teknillisen ja taloudellisen

tarpeensa mukaan. Kompensointia ei yleensä suoriteta yhdellä tavalla, vaan useampi menetelmä toimii rinnakkain. [1, s. 49 - 52; 2, s. 81 - 86.]

2.5.1 Kompensoinnin taloudellinen sijoittelu

Kompensoinnin sijoittelu on tavoitteena toteuttaa teknillisesti ja taloudellisesti mahdollisimman järkevästi. Kompensointia voidaan sijoittaa jakeluverkossa keski- ja pienjännite verkkoon sekä käyttäjän oman verkon eri osiin. Sen jakautumista kantaverkon, jakeluverkon ja kuluttajan välillä ohjaavat loistehomaksut, ja se pyritään toteuttamaan aiheutamisperiaatteen mukaan. Loistehon vaihteluiden takia kompensoinnilla täytyy olla riittävästi säätömahdollisuutta. Taloudellista optimointia laskettaessa jakeluverkkoyhtiöt huomioivat muun muassa seuraavia tekijöitä:

- kompensointilaitteiden sekä ohjausjärjestelmien pääoma- ja huoltokustannukset
- sähköasemakompensoinnissa kalustetun keskijännitekennon pääoma- ja huoltokustannukset
- laskentakorko ja teknillistaloudellinen pitoaika
- kantaverkkoyhtiön loistehon hinnoittelu
- kompensointilaitteiden häviökustannukset
- loistehon siirrosta aiheutuvat teho- ja energiahäviökustannukset
- loistehon siirron aiheuttamat verkostoinvestointien rajakustannukset (normaali- ja varasyöttötilanne).

Jakeluverkkoyhtiön kannalta edullisinta toteuttaa kompensointi, on hyödyntää kantaverkkoyhtiön loistehon ilmaisosuus. Sen jälkeen kannattaa ohjata kuluttajia omaan kompensointiin hinnoittelulla, neuvonnalla, teknillisillä suosituksilla ja määräyksillä. Seuraavaksi kannattavinta on kompensoida omilla sähköasemilla, keskijännitejohtojen varrella ja muuntamoissa. Toiseksi viimeisenä ratkaisuna taloudellisuuden kannalta on tuottaa loisteho omilla generaattoreilla ja tahtikoneilla. Viimeinen vaihtoehto on ostaminen kantaverkkoyhtiöltä, joka on useimmiten kaikkein kallein vaihtoehto. [2, s. 86, 87.]

2.5.2 Kompensointi sähköasemalla

Kompensoitaessa sähköaseman alajännitepuolella säästytään loistehon ostolta kantaverkosta ja vähennetään näin samalla päämuuntajalla syntyviä häviöitä. Etuna on myös kompensoinnin säädettävyys kaukokäytöllä ja hyödyntäminen varasyöttötilanteessa, kun päämuuntaja tai sen syöttökaapeli on huollettavana. Kompensointiteho on syytä valita siten, että resonanssitaajuus on yli 380 Hz, eikä lähellä ole merkittäviä yliaaltotaajuuksia. Lisäksi tulee ottaa huomioon pariston kytkennästä aiheutuva jänniteheilahdus sekä kytkentätiheys. Tarvittaessa paristo voidaan jakaa osiin. [4, s. 53.]

2.5.3 Kompensointi keskijännitejohdon varrella

Kondensaattorin sijoittaminen keskijännitejohdon varrelle on kannattavaa silloin, kun sen loistehon tarve on vähintään 900 kVAR, koska pienin taloudellisesti kannattava kondensaattori yksikön valmistus 20 kV:n verkkoon on kapasiteetiltaan noin 600 kVAR. Keskijännitejohdon kompensoinnista saatavat hyödyt ovat pienempi loistehon oston ja muun kompensoinnin tarve, johtojen siirtokyvyn parantaminen, jännitteen aleneman pieneneminen ja pienemmät häviöt edeltävissä keskijänniteverkoissa. Kauko-ohjatun erotusaseman yhteyteen sijoitettaessa kompensointipariston ohjausmahdollisuus on suhteellisen edullista järjestää. Lisäksi joskus kompensoinnilla voidaan lykätä kalliita verkkoinvestointeja. [4, s. 53, 54.]

2.5.4 Kompensointi muuntamolla

Muuntamot sopivat parhaiten kompensoinnin toteuttamiseen pienjännite puolella. Tässä tulee kuitenkin ottaa huomioon, että esimerkiksi pylväsmuuntamoihin ei kannata kondensaattoriparistoa asentaa rakenteellisten ja taloudellisten ongelmien takia ja puisto-
tomuuntamoihin asennettaessa täytyy varmistaa komponenttien kylmä- ja lämpökestoisuus. Pienjännitepuolella toteutetun kompensoinnin etuna keskijännitekompensointiin nähden on muuntajan häviöiden pieneneminen.

Ylikompensoinnin välttämiseksi muuntajien häviöiden kompensoimiseksi käytettyjen kondensaattoreiden koko voi olla maksimissaan 10 - 15 % muuntajien tehosta. Kuormien kompensointiin käytettävien rinnakkaisparistojen teho voi olla enintään 30 %, mutta estokelaparistoja voi olla muuntajan tehon verran. Suurin kerralla kytkettävä

kondensaattoriporras voi kuitenkin olla vain 20 % muuntajatehosta. [2, s. 87 - 88; 4, s. 54.]

2.5.5 Kompensointi pienjänniteverkossa

Pienjänniteverkossa kompensointi tehdään yleensä keskitetysti, koje-, tai ryhmäkohtaisesti ja voidaan toteuttaa rinnakkais-, estokela-, suodatinparistoilla tai aktiivisuodattimilla. Kompensoinnissa pienjänniteverkossa voidaan saavuttaa säästöjä verkon mitoituksessa. [2, s. 88.]

2.5.6 Kojekohtainen kompensointi

Kojekohtaisen kompensoinnin ideana on tuottaa loisteho mahdollisimman lähellä kulu- tuspistettä eli jokaiselle loistehoa tarvitsevalle laitteelle erikseen. Tällöin loistehon siir- ron vaikutus verkon mitoitukseseen ja häviöihin on vähäinen, koska sitä ei tarvitse siirtää kauempaa laitteelle. [1, s. 66.]

2.5.7 Ryhmäkompensointi

Ryhmäkompensoinnissa esimerkiksi moottoriryhmällä on yhteinen kompensointi. Täl- löin kompensointi toteutetaan ryhmäkeskuksen läheisyydessä tai keskuksessa. Ryh- mäkompensoinnissa etuna on, että jokaiselle moottorille ei tarvitse hankkia omaa kom- pensointia, vaan varsinainen moottori ja varamoottori voivat vuorokäytössä käyttää samaa kondensaattoria. Lisäksi on usein halvempaa mitoittaa ryhmäkeskuksen ja moottoreiden väliset johdot loistehon siirtoon kuin johto pääkeskukselta asti. [1, s. 72; 2, s. 90, 91.]

2.5.8 Keskitetty kompensointi

Keskitetty kompensointi toteutetaan teollisuuslaitoksen pää- tai ryhmäkeskuksessa. Tähän on hyvä käyttää automatiikkaparistoa ja loistehon säädintä, joka ohjaa konden- saattorin portaita päälle ja pois loistehon tarpeen mukaan. Rinnakkaisparisto ja verkko voivat muodostaa resonanssin, joten jos verkossa esiintyy yliaaltoja käytetään estoke- laparistoa, joka on nousemassa rinnakkaisparistoa yleisemmäksi. Keskitettyä kompen- sointia käytetään yleensä kojekohtaisen ja ryhmäkompensoinnin lisäksi säätämään

kuormituksen vaihtelusta aiheutuvaa loistehoa. Keskitetyn kompensoinnin suuruus on yleensä noin puolet pätötehohuipusta. [1, s. 76, 77; 5, s. 280.]

2.5.9 Kompensointi yliaaltopitoisessa verkossa

Kompensointiratkaisuja yliaaltopitoisen verkossa voidaan tehdä pelkkien verkkotietojen tai verkkotietojen ja mittausten perusteella. Tarvittavia tietoja ovat:

- jännitteen suuruus ja taajuus sekä jännitesärö
- tarvittava perustaajuinen loisteho
- esiintyvien yliaaltojen suuruus ja taajuus tai tiedot yliaaltoja tuottavasta kuormasta
- syöttävän muuntajan nimellisteho ja oikosulkuimpedanssi
- suodatusvaatimukset, vapaat lähdöt, IP-luokka, tilat, kaapelointisuunta. [2, s. 92, 93.]

2.6 Kompensoinnin mitoitus ja valinta

Kompensointilaitteita mitoitettaessa kannattaa tehdä yhteistyötä verkkoyhtiön kanssa. Verkkoyhtiöllä on tarvittavat tiedot loistehoja ja tarvittavan kompensoinnin määrää koskien, sillä se seuraa ja laskee verkon tilaa jatkuvasti. Verkstolaskennan avulla on helppo tutkia kondensaattoripariston koko- ja sijoitusvaihtoehtojen vaikutuksia jännitteisiin, virtoihin ja tehonjakoon erilaisissa kuormitustilanteissa. Taloudellisen päätöksen tueksi laskennasta saadaan erot häviö- ja investointikustannuksissa kompensoimattoman ja kompensoidun vaihtoehdon välillä. Yliaaltopitoisuutta varten verkkotietojärjestelmillä voidaan laskea haluttaessa myös muilla kuin 50 Hz:n taajuudella. [2, s. 93, 94.]

2.6.1 Kompensointilaitteiden mitoitukseen tarvittavat tiedot

Kompensointilaitteita mitoitettaessa tarvitaan erilaisia tietoja sähköverkosta eri jännite-tasoilla. Suurimman osan tarvittavista tiedoista antaa verkkoyhtiö. Tarvittavia tietoja ovat:

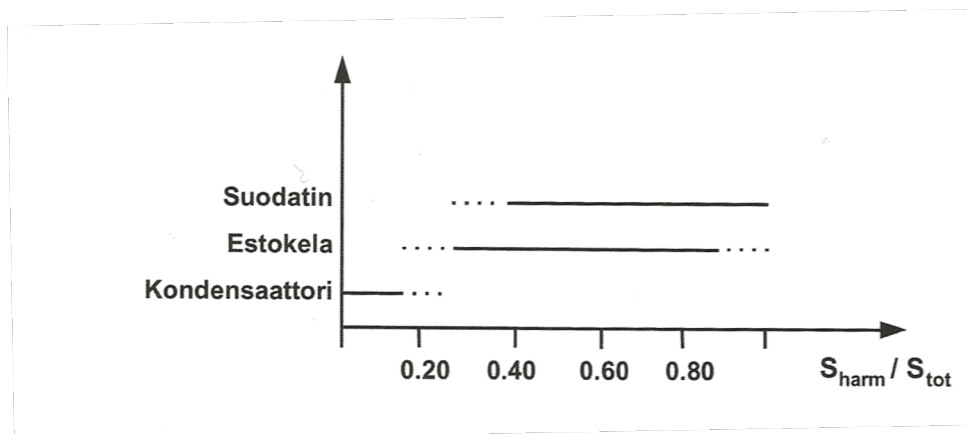
- verkkotiedot
- verkon nimellis- ja käyttöjännite
- tarvittava perustaajuinen loisteho
- ympäristöolosuhteet
- asennustila
- olemassa oleva kompensointilaittekanta
- verkon haltijan ohjeet, suositukset ja tariffit
- tieto verkonhaltijan mahdollisesta verkkokäskyohjauslaitteistosta
- yliaaltotilanne mahdollisen estokelapariston tai yliaaltosuodattimen mitoitusta varten
- ylemmän tason jännitesäro

Kompensointilaitteiden hankintaa varten täytyy ottaa huomioon myös mm. suurin sallittu yksikkökoko ja suurin sallittu kytkentäporras. Säädetarkkuuden määrää pienimmän portaan koko ja niitä täytyy olla vähintään kaksi, jotta se ainoa ei kuluisi liian nopeasti. Riittävä säädetarkkuus on tärkeä, että pysytään verkkoyhtiön asettamissa rajoissa, eikä käyttäjälle aiheudu loistehomaksuja. Yleinen raja-arvo induktiiviselle loisteholle on 16 % otetusta pätötehosta. [2, s.94, 95.]

2.6.2 Kompensointitavan valinta

Kompensointitavan valinta riippuu verkon yliaaltotilanteesta. Mikäli verkossa ei esiinny merkittäviä yliaaltoja, voidaan käyttää säädettäviä tai kiinteitä rinnakkaiskondensaattoriparistoja hajautetusti tai keskitetysti. Verkon yliaaltopitoisuuden noustessa hyvän rajalle, joka on 3 %, tulevat kyseeseen estokela- ja suodatinparistot. Näiden suurimman sallitun yliaaltotason ylittyessä joudutaan yliaallot suodattamaan käyttäen yliaaltosuodattimia ja aktiivisuodattimia. Aktiivisuodattimia käytettäessä perustaajuinen

loisteho voidaan edelleen tuottaa rinnakkaiskondensaattori- estokela- tai suodatinparistolla. Kuva 5 havainnollistaa yliaaltopitoisuuden vaikutusta kompensointilaitteen valinnassa. Paras tapa kompensointilaitteiston valintaan ja verkon yliaaltojen selvittämiseen on tehdä verkolle tietokonepohjainen simuloitu yliaaltoanalyysi. [2, s. 97, 98.]



Kuva 5. Yliaaltopitoisuuden vaikutus kompensointilaitteen valinnassa [2, s. 98.]

3 Loistehon hallinta Kilpilahden alueella

3.1 Nykyinen kompensointi

Neste Oil käyttää loistehon hankintaan nykyään pääasiassa kolmea erilaista keinoa. Merkittävin osa loistehosta tuotetaan kondensaattoriparistoilla, joista tuotannon kannalta suurimmat yksiköt on sijoitettu keskijänniteverkkoon. Kondensaattoriparistojen käytön etuna on se, että ne voidaan sijoittaa lähelle kulutusta, jolloin loistehoa ei tarvitse siirtää verkossa. Seuraavaksi eniten tuotetaan omilla generaattoreilla ja siirretään verkon sisällä loistehoa kuluttavien laitteiden luo. Tämän huonona puolena on kaapeleiden ylimääräinen kuormittuminen ja siirtohäviöt. Kolmantena keinona hyödynnetään jakeluverkkoyhtiön tarjoama ilmaisosuus. Tämä on kaikkein edullisin tapa, mutta ilmaisosuus on niin pieni, että sen lisäksi joudutaan käyttämään edellä mainittuja loistehon tuotantotapoja.

3.1.1 Loistehon kompensointi kondensaattoreilla

Neste Oil käyttää loistehon tuotantoon 107 kondensaattoriyksikköä. Näiden yksiköiden koko ja kunto vaihtelevat rajusti, ja osa yksiköistä on täysin käyttökelvottomia. Kompensointi myös sijaitsee osittain keskuksissa, joissa kompensoinnin tarvetta ei ole, jolloin säädin ei laita edes portaita päälle. Kun kompensointi on väärin mitoitettu tai väärässä paikassa, siitä ei ole hyötyä verkon tilannetta ajatellen. Todellisuudessa siis kondensaattoreiden avulla toteutettu kompensointi on pienempää, kuin taulukossa esitetty toimivan kompensoinnin määrä.

Keskijänniteverkon kondensaattorit on keskitetty kolmelle muuntamolle, 10 kV:n jännitteellä toimivia kondensaattoreita on muuntamoilla M120, M1 ja M37. Näiden yksikkökoot ovat 6 - 2,4 MVAR. Lisäksi M37:lla on 3 kV:ssa kaksi 750 kVAR:n kondensaattoria, joista toisessa on kaksi viallista porrasta.

Pienjännite kondensaattorit on sijoitettu 400 - 1 000 V:n jännitetasoon ja niiden koot vaihtelevat 30 - 800 kVAR. Kondensaattorit sijaitsevat eri keskuksissa ympäri aluetta ja ne on aikanaan mitoitettu juurikin niiden keskuksen loistehon kulutuksen mukaan. Myöhemmin keskuksista osa on muuttanut käyttötarkoitustaan tai kompensointi on muuten jäänyt tarpeettomaksi. Iso osa erityisesti pienjännitekompensoinnista on rikkoutunut ja vaatii investointeja, mikäli kompensointi päätetään vielä toteuttaa kulutuspiisteissä. Taulukossa 2 (ks. seur. s.) havainnollistetaan kompensoinnin nykykuntoa ja tehoa.

Taulukko 2. Kondensaattoriparistojen kunto

Jännitetaso	Suunnitellut kondensaattorit	Toimivat kondensaattorit	Toimiva osuus
Keskijännite	36,3 MVar	35,55 MVar	97,9 %
Pienjännite	28,734 MVar	12,804 MVar	44,6 %
Yhteensä	65,034 MVar	48,35 MVar	74,3 %

Taulukon tiedot on kerätty Hämeen Sähkön kesän 2013 aikana Nesteelle tekemästä kattavasta kondensaattoreiden kuntokartoituksesta. Kartoituksessa käytiin läpi kaikki verkossa olevat kondensaattorit, mitattiin niiden kunto ja verkon yliaalto- sekä loistehotilanne. Kuten taulukosta 2 käy ilmi, pienjännite kompensoinnista kunnossa on alle puolet alunperin rakennetusta tehosta. Verkon jännitteen laatu on suoritettujen mittausten mukaan hyvä ja jännitesärö oli kaikissa mitatuissa verkon osissa alle 3 %.

3.1.2 Voimalaitos

Neste Oililla on käytössään oma voimalaitos, jonka kuudella generaattorilla voidaan kehittää tehoa verkkoon. Generaattoreita ei kuitenkaan käytetä tehon tuottamista varten, vaan generaattoreiden käyttö on sidoksissa prosessiin. Tehoa syntyy siis sivutuotteena, kun voimalaitos kehittää höyryä prosessin tarpeisiin. Haluttaessa generaattoreilla pystyttäisiin tuottamaan enemmänkin tehoa. Neste Oil kartoittaa mahdollisuutta luopua kokonaan voimalaitoksen sähköntuotannosta.

Nykyisellään kompensoinnin ohjaus on voimalaitoksen vastuulla. Käytännössä kondensaattoreista kaikki toimivat keskijännite yksiköt ovat aina kiinni verkossa ja pienjännitepuolella omien keskustensa tarpeen mukaan, mikäli säädin toimii. Voimalaitos

ohjaa generaattoreiden loistehon tuotantoa tarpeen mukaan, jotta pysytään verkkoyhtiön asettamissa sopimusrajoissa. Varsinaista ohjetta ei kuitenkaan ole vaan generaattoreiden tehokulman säätö perustuu vuorossa olevan operaattorin omaan arvioon.

3.1.3 Loissähköikkuna

Kantaverkkoyhtiö Fingrid tekee asiakkaan kanssa sopimuksen, jossa määritellään liittymän otto- ja antorajat. Kilpilahdessa Porvoon Alueverkko on tehnyt sopimuksen Kilpilahden Sähkönsiirron kanssa, joka hoitaa jakelun alueen yrityksille. Porvoon Alueverkon ja Kilpilahden Sähkönsiirron sopimus noudattaa Fingridin loistehorajoja. Loisteho mitataan Kilpilahden Sähkönsiirron liittymispisteistä ja sillä on omat sopimuksensa yritysten kanssa. Liittymispisteen loissähkön ottoraja Q_S lasketaan kahdella eri kaavalla, 11 ja 12, joista ottorajaksi valitaan laskennan perusteella suurempi arvo. Liittymispisteen loissähkön antoraja Q_{S1} taas lasketaan kaavalla 13. Edellä mainittujen kaavojen 11, 12 ja 13 avulla saadaan määritettyä liittymän loissähköikkuna. Loissähköikkuna määrittää liittymispistekohtaisesti kantaverkosta ilman erillistä korvausta toimitetun ja vastaanotetun loissähkön määrän.

$$Q_S = W_{Otto} * \frac{0,16}{t_k} + 0,025 * \frac{W_{Tuot}}{5000}, \quad (11)$$

$$Q_S = W_{Otto} * \frac{0,16}{t_k} + 0,1 * S_N, \quad (12)$$

$$Q_{S1} = -0,25 * Q_S, \quad (13)$$

jossa

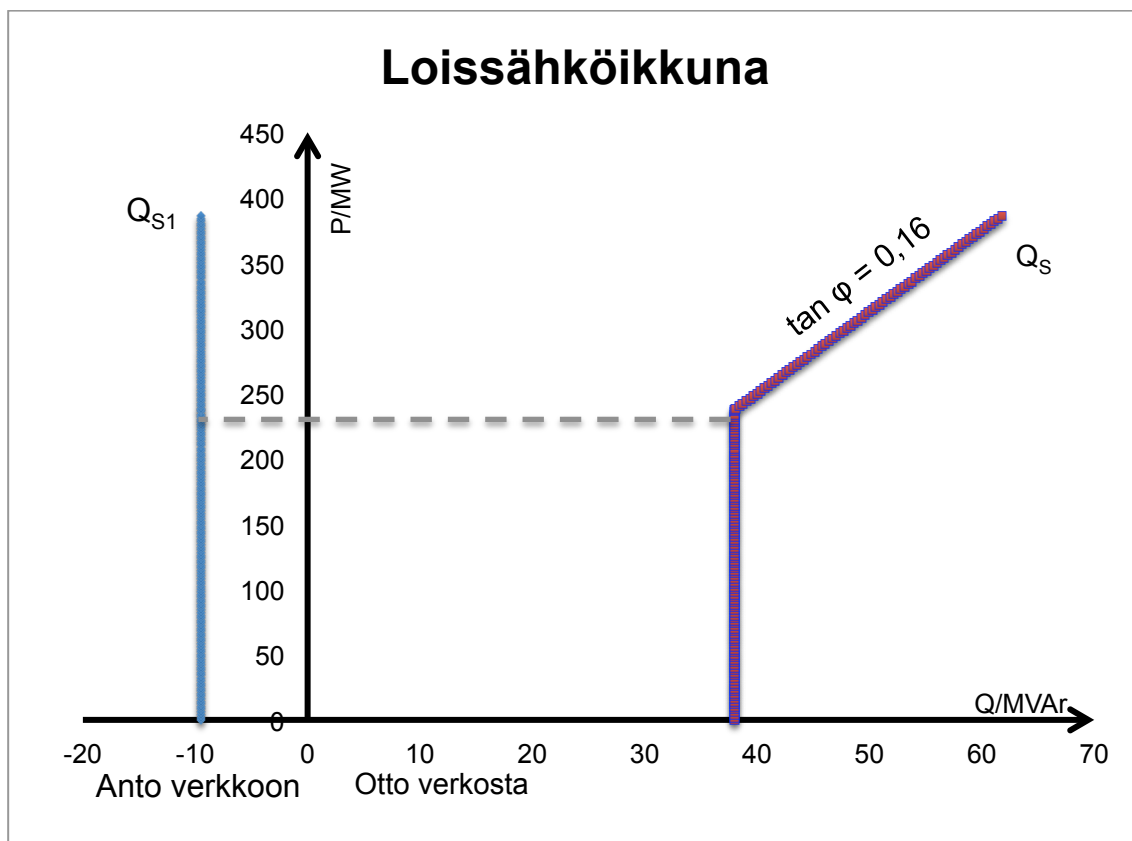
W_{Otto} = liittymispisteen ottoenergia (MWh)

W_{Tuot} = voimalaitoksen nettotuotanto (MWh) liittymispisteessä (jos enintään 10 MVA generaattori niin $W_{Tuot} = 0$)

t_k = huipun käyttöaika (prosessiteollisuus 7000h)

S_N = liittymispisteen suurin generaattori (MVA)

Määritettävä loissähköikkuna on Kilpilahden Sähkösiirron liityntäpisteistä, joten se ei koske pelkästään Neste Oilia, vaan se on laskettu koko alueen kantaverkosta ottamasta tehosta. Kuvaan 6 on laskettu Kilpilahden loistehoikkuna tämän hetken tilanteessa. Kaavalla 12 saadaan suurempi arvo, joten käytetään sitä loistehoikkunan muodostamiseen.

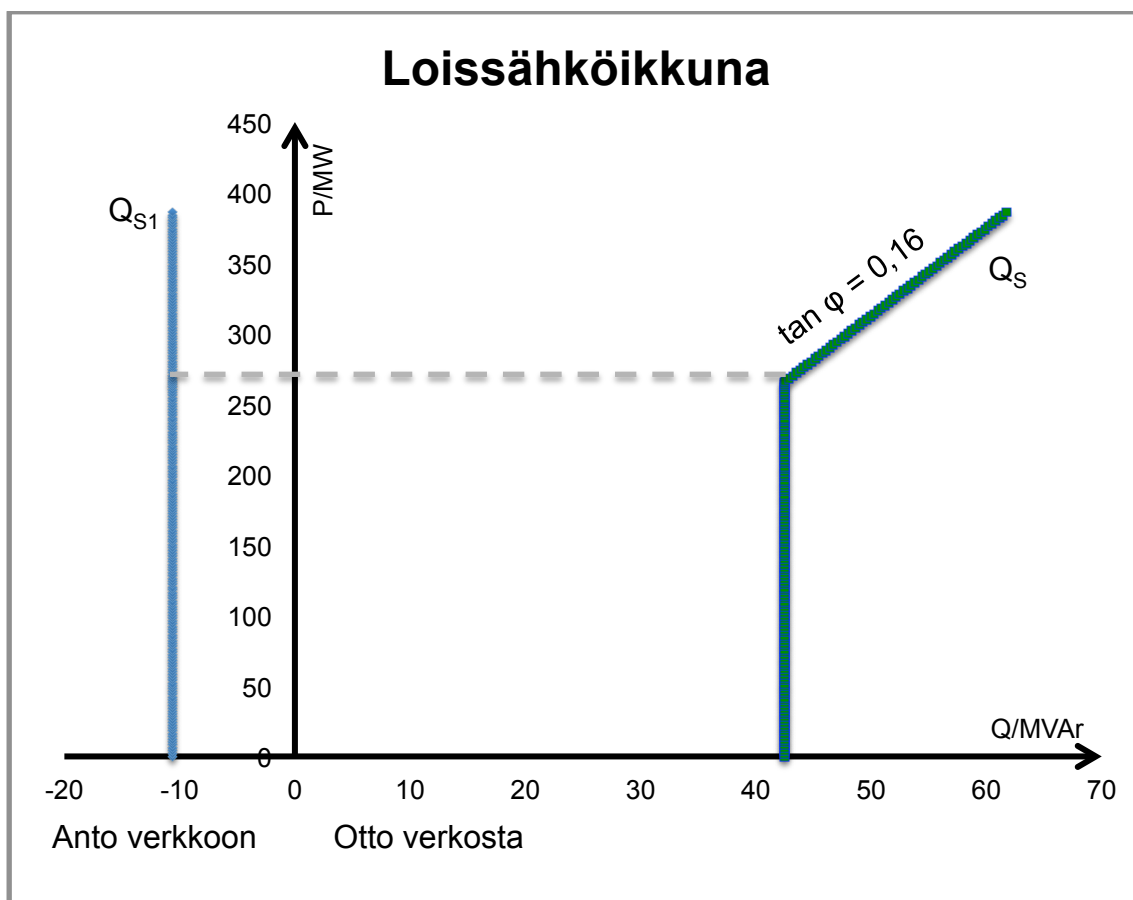


Kuva 6. Kilpilahden loissähköikkuna nykytilanteessa

Nykytilanteessa liittymispisteen ottoenergia W_{otto} on 1270 GWh, omilla generaattoreilla tuotettu energia W_{tuot} 588 GWh ja liittymispisteen suurin generaattori on 89,4 MVA. Loissähköikkunasta saadaan tällöin ottorajaksi Q_S 38 MVAr ja antorajaksi Q_{S1} -9,5 MVAr.

Neste Oililla on suunnitelmassa luopua sähköntuotannosta omilla generaattoreilla, joten määritetään loistehoikkuna ilman generaattoreiden tuotantoa. Tällöin on merkityksetöntä käytetäänkö kaavaa 11 vai 12. Ottoteho lasketaan siten, että generaattoreiden tämän hetken pätötehon tuotanto lisätään kantaverkosta otettuun pätötehoon. Pätötehojen summan voidaan ajatella olevan tulevaisuudessa kantaverkosta otettava pätöteho,

mikäli tehontarve alueella pysyy samana. Kuvassa 7 on esitetty liittymän loistehoikkuna, käyttäen yhtälöitä 11 ja 13.



Kuva 7. Kilpilahden loissähköikkuna ilman omaa tuotantoa

Edellä esitetty Kilpilahden loissähköikkuna vastaa tilannetta, jossa kaikki teho otetaan kantaverkosta. Tällöin liittymispisteen ottoenergia $W_{\text{Ott}}o$ on noin 1858 GWh. Generaattoreita ei käytetä ollenkaan. Kilpilahden loistehon ottorajaksi saadaan Q_S 42 MVAr ja antorajaksi Q_{S1} -10,6 MVAr.

Loissähkön toimituksen katsotaan pysyvän loissähköikkunan puitteissa silloin, kun otto kantaverkosta ja syöttö kantaverkkoon tapahtuu ikkunoissa määritettyjen arvojen rajoissa tai loissähkön otto on enintään 16 % otetusta pätötehosta. Mikäli rajoja ylitetään pysyväluonteisesti, voi kantaverkkoyhtiö periä asiakkaalta loissähkömaksua. Loissähkömaksu loistehon otosta on $(Q - Q_S) \cdot 3000 \text{ €} / \text{MVAr}$, joka lasketaan kuukauden suurimman ylityksen mukaan ja loisenergiamaksu $10 \text{ €} / \text{MVArh}$ loissähköikkunan ylittävällä alueella laskutuskauden aikana vastaanotetusta loisenergiasta. Loissähkön annosta

loistehomaksu on $(|Q| - |Q_{S1}|) * 3000 \text{ €} / \text{MVAr}$ ja loisenergiamaksu $10 \text{ €} / \text{MVArh}$. [6]

3.1.4 Kaapeleiden ja muuntajien loisteho

Verkossa käytettävät kaapelit, ilmajohdot ja muuntajat vaikuttavat osaltaan loistehoon verkossa. Kaapeleiden tuottama tai kuluttama loisteho voidaan laskea yhtälön 14 avulla. Yhtälöstä voidaan päätellä, että loistehotase vaihtelee kuormituksen mukaan. Kaapelin tuottama loisteho riippuu jännitteen suuruudesta ja sen kuluttama loisteho kuormitusvirrasta.

$$Q_{lt} = Q_t - Q_k = \omega CU^2 - 3XI^2 = \omega CU^2 - 3\omega LI^2, \quad (14)$$

jossa

Q_{lt} = kaapelin loistehotase [VAr]

Q_t = loistehon tuotanto [VAr]

Q_k = loistehon kulutus [VAr]

ω = verkon kulmataajuus

C = käyttökapasitanssi [F]

X = pitkittäisreaktanssi [Ω]

L = induktanssi [Ω]

I = kuormitusvirta [A]

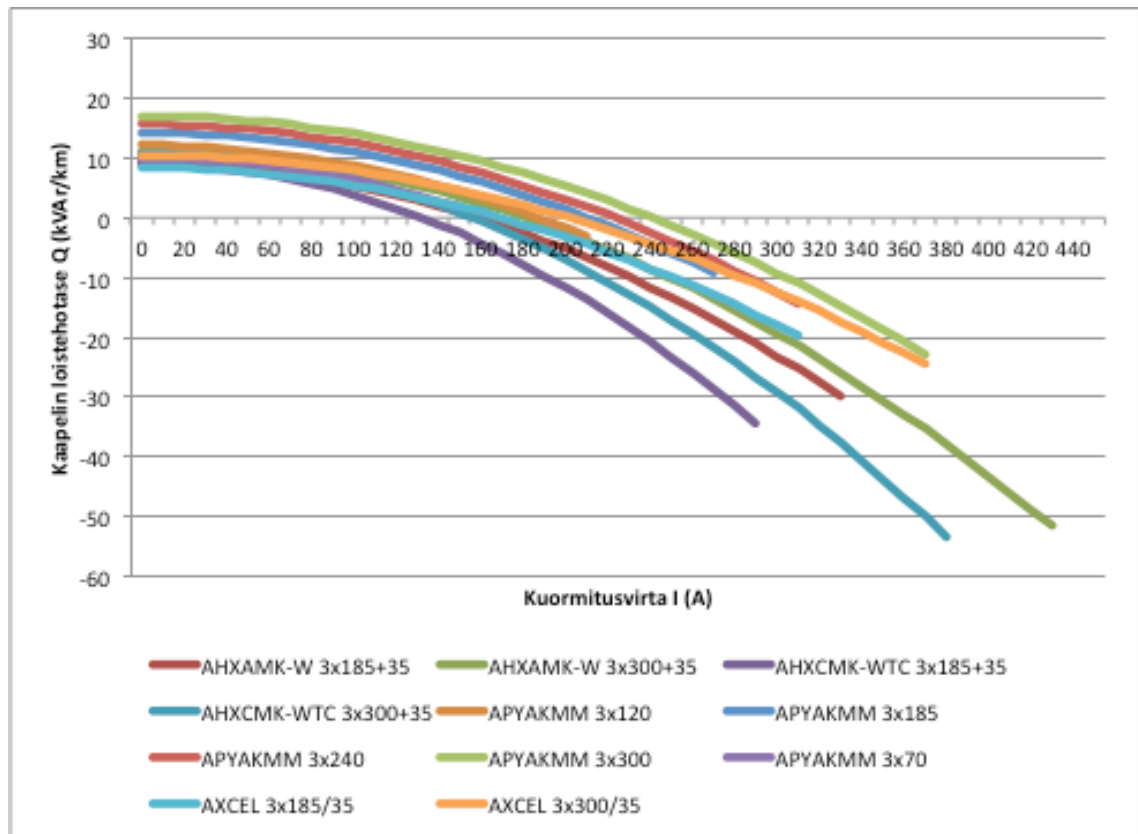
Kohdeverkon loistehotasetta tarkasteltiin edellisen yhtälön avulla yleisimmillä kaapeleilla sekä keski- ja suurjännite verkossa. Sähkötekniset tiedot saatiin Neste Oilin tietojärjestelmästä. Laskenta suoritettiin vakiojännitteellä, jännitteen alenema huomiotta jättäen. Laskennassa käytettiin keskijänniteverkossa 10,5 kV:n ja suurjänniteverkossa 117kV:n jännitetasoa, jotka ovat tavallisimmat jännitetasot alueella. Laskennassa

huomioidut keskijännitekaapelit kattavat noin 90 % verkon keskijännitekaapeleista. Pienjännite kaapeleiden vaikutus loistehotaseeseen on vähäinen ja ilmajohtoja ei prosessialueella ole, joten niitä ei tarvitse laskea. Taulukossa 3 on keskijänniteverkon laskennassa käytettyjen kaapeleiden sähköiset arvot.

Taulukko 3. Keskijännite kaapeleiden sähköiset arvot

Kaapeli tyyppi	Pituus (m)	Suurin kuormitusvirta (A)	Käyttökapasitanssi ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Reaktanssi (Ω/km)
AHXAMK-W 3x185+35	8085	330	0,26	0,119
AHXAMK-W 3x300+35	10880	435	0,32	0,113
AHXCMK-WTC 3x185+35	26322	290	0,26	0,172
AHXCMK-WTC 3x300+35	33488	380	0,31	0,148
APYAKMM 3x120	2128	210	0,35	0,115
APYAKMM 3x185	14273	270	0,41	0,107
APYAKMM 3x240	3460	315	0,45	0,104
APYAKMM 3x300	17655	370	0,49	0,097
APYAKMM 3x70	1740	155	0,29	0,124
AXCEL 3x185/35	2234	310	0,24	0,097
AXCEL 3x300/35	8820	370	0,3	0,085

Kaapeleiden sähköisten arvojen avulla tutkitaan, miten kaapelin loisteho käyttäytyy virran muuttuessa tyhjäkäynnistä maksimi kuormitusvirtaansa. Tätä on havainnollistettu kuvassa 8.



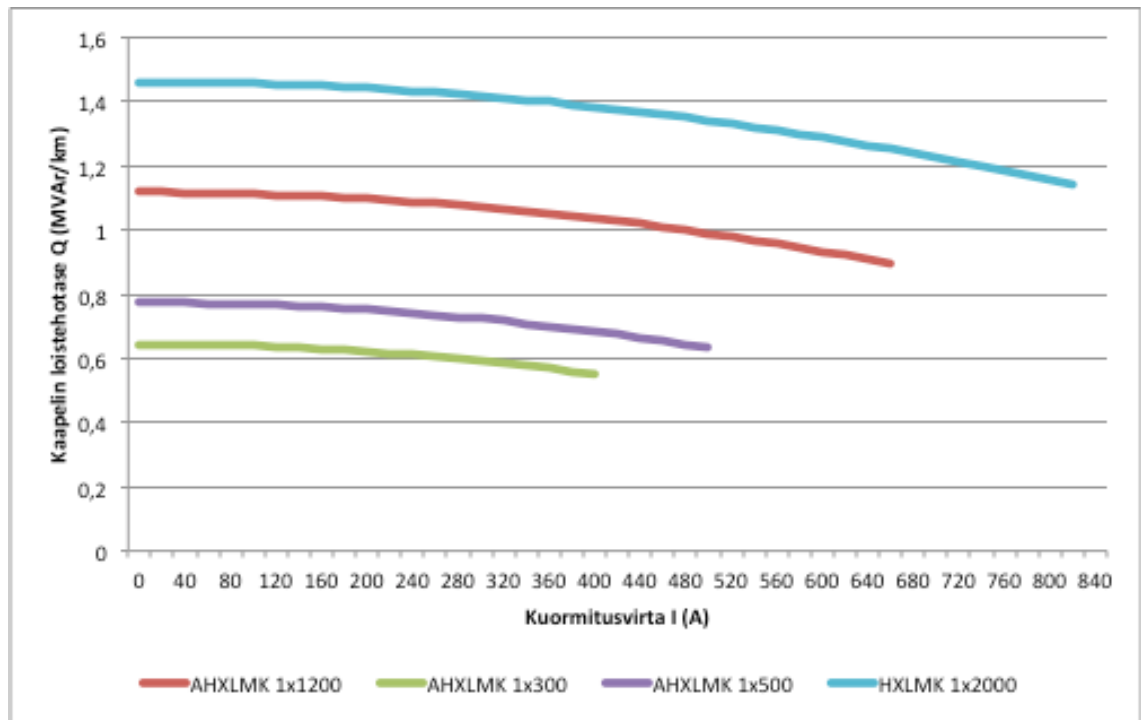
Kuva 8. Keskijännitekaapeleiden loistehotase kuormitusvirran funktiona

Kuvassa 8 kaapelin positiivinen loistehotase tarkoittaa, että kaapeli tuottaa loistehoa ja negatiivinen loistehon kulutusta. Kaapeleiden voidaan todeta olevan kapasitiivisiä pienellä kuormitusvirralla ja muuttuvan induktiivisemmiksi kuormitusvirran kasvaessa. Keskijännite kaapeleiden loistehotase vaihtelee -50 - 18 kVA r:in kaapelista riippuen, mutta merkitys kompensoinnin kannalta on pieni. Taulukkoon 4 kerätään suurjännitekaapeleiden sähköiset arvot. Taulukon kaapelit kattavat noin 79 % alueen suurjännitekaapeleista.

Taulukko 4. Suurjännite kaapeleiden sähköiset arvot

Kaapeli tyyppi	Pituus (m)	Suurin kuormitusvirta (A)	Käyttökapasitanssi ($\mu\text{F}/\text{km}$)	Reaktanssi (Ω/km)
AHXLMK 1x1200	3930	670	0,26	0,17
AHXLMK 1x300	3960	400	0,15	0,195
AHXLMK 1x500	5400	500	0,18	0,188
HXLMK 1x2000	3000	820	0,34	0,16

Kuvaan 9 havainnollistetaan loistehotaseen käyttäytyminen virran muuttuessa tyhjäkäynnistä maksimi kuormitukseen.



Kuva 9. Suurjännitekaapeleiden loistehotase kuormitusvirran funktiona

Kuvasta 9 huomataan jännitteen vaikuttavan merkittävästi kaapelin kapasitiivisuuteen. Suurjännitekaapelit tuottavat huomattavasti enemmän loistehoa kuin keskijännitekaapelit ja ovat koko kuormitusalueellaan kapasitiivisia. Kaapeleiden vaikutuksesta verkon loistehotaseeseen esitetään yhteenveto taulukossa 5. Kaapeleiden kuormitukseksi arvioidaan 35 % kunkin kaapelin maksimi kuormitusvirrasta. Arvio perustuu siihen, että kaapelit on mitoitettu kestämään varasyöttötilanteessa toisenkin päämuuntajan kuormat. Tämä tarkoittaa, että normaalissa kuormitus tilanteessa kaapeleiden kuormitusasteen täytyy olla alle 50 %.

Taulukko 5. Kaapeleiden vaikutus loistehotaseeseen 35 % kuormitusvirralla

Kaapelin tyyppi	Pituus (m)	Laskennallinen kuormitusvirta (A)	Loistehotase (kVAr/km)	Loistehotase yhteensä (kVAr)
AHXAMK-W 3x185+35	8085	115,5	4,2	34,3
AHXAMK-W 3x300+35	10880	152,25	3,2	35,0
AHXCMK-WTC 3x185+35	26322	101,5	3,7	97,0
AHXCMK-WTC 3x300+35	33488	133	2,9	96,4
APYAKMM 3x120	2128	73,5	10,3	21,8
APYAKMM 3x185	14273	94,5	11,3	161,7
APYAKMM 3x240	3460	110,25	11,8	40,8
APYAKMM 3x300	17655	129,5	12,1	213,3
APYAKMM 3x70	1740	54,25	8,9	15,6
AXCEL 3x185/35	2234	108,5	4,9	10,9
AXCEL 3x300/35	8820	129,5	6,1	53,9
AHXLMK 1x1200	3930	234,5	1089,5	4281,8
AHXLMK 1x300	3960	140	633,3	2507,8
AHXLMK 1x500	5400	175	756,4	4084,7
HXLMK 1x2000	3000	287	1421,9	4265,7
Yhteensä	145375			15920,7

Kaapelit vaikuttavat loistehotaseeseen merkittävästi. Taulukosta 5 nähdään, että kaapelit tuottavat 35 % kuormitusvirralla noin 16 MVar loistehoa. Keski- ja pienjännite kaapeleiden vaikutus on melko mitätön, mutta suurjännite kaapeli tuottaa paljon loistehoa. Tästä johtuen pitkien siirtojohtojen yhteyteen kytketään usein sarjakondensaattori kuluttamaan ylimääräinen loisteho matalan kuormituksen aikana. Kaapeleiden vaikutus loistehotaseeseen tehtiin havainnollistamaan, mutta sitä ei varsinaisesti hyödynnetä. Tämä johtuu siitä, että suurin vaikutus oli nimenomaan suurjännite kaapeleilla, jotka sijaitsevat muuntopiirien yläpuolella.

Loistehotaseeseen vaikuttavat myös muuntajat, joissa loistehoa tarvitaan magneettikentän ylläpitoon. Muuntajien vaikutus on kuitenkin niin vähäinen, että sitä ei lähdetä laskemaan.

3.2 Muuntopiirien loisteho

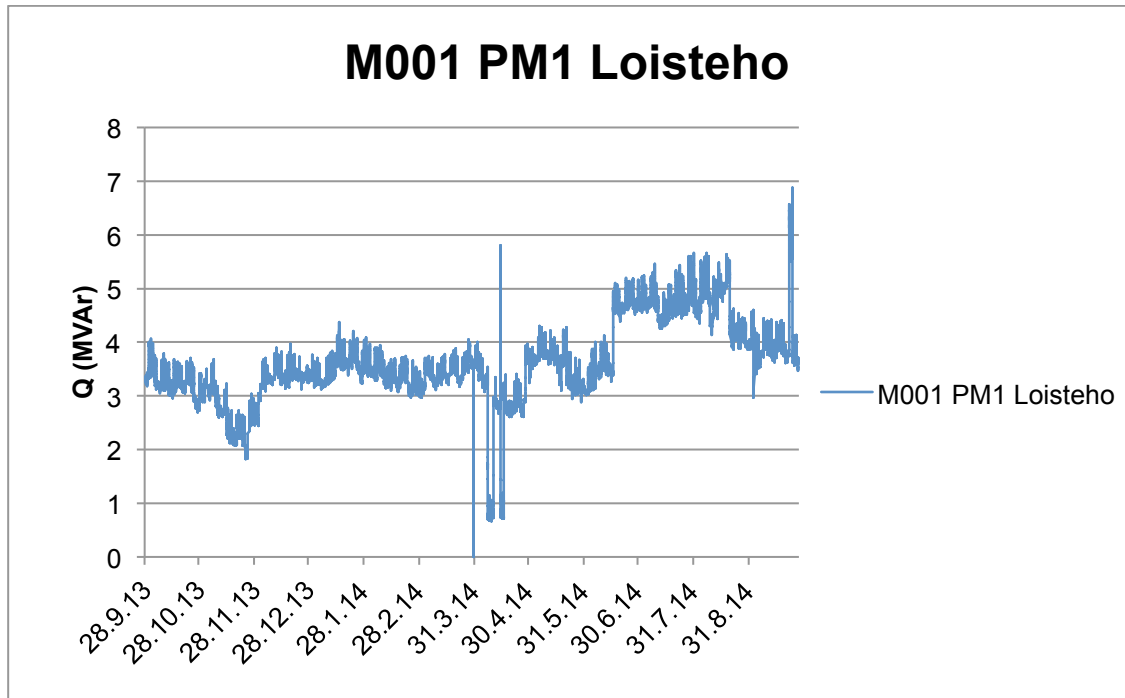
Neste Oililla on kahdeksan päämuuntajaa, jotka syöttävät kukin omaa muuntopiiriään. Muuntajat liittyvät renkaaseen 110kV:n jännitetasolla. Renkaaseen tulee kolme liityntää kantaverkosta sekä voimalaitoksen liityntä. Tarkastellaan loistehotasetta kunkin muuntajan syöttämässä muuntopiirissä. Lähteinä käytetään Neste Oilin järjestelmästä saattavia tietoja muuntajien verkosta ottamista loistehomääristä sekä Hämeen Sähkön tekemiä kompensoinnin kuntomittauksia. Mittaukset on tehty ainoastaan keskuksissa, joihin

on asennettu kompensointi. Loistehoa kuluttavia laitteita löytyy muualtakin muuntopiireistä, mutta näiden keskusten loistehotilanteesta ei ole mittaustietoa.

Borealiksen päämuuntajat saavat syöttönsä samasta 110 kV:n renkaasta kuin Neste Oilin, joten ne vaikuttavat osaltaan loistehotilanteeseen. Borealiksen muuntopiirejä ei kuitenkaan käsitellä tässä. Kuten edellä on todettu (ks. 3.1.3) Kilpilahden Sähkönsiirto omistaa Kilpilahden sähköverkon ja kaikki yritykset saavat päämuuntajiensa syötön sen kautta. Kilpilahdella on siis yhteinen loissähköikkuna. Loissähköikkunan mukaan kantaverkosta otetun loissähkön raja on 42 MVAr 265 MW:n pätötehoon asti ja sen jälkeen 16 % pätötehosta. Rajat laskettiin ilman generaattoreiden käyttöä eli kun kaikki tarvittava teho otetaan verkosta. Tämä ei vastaa nykytilannetta vaan mahdollista tulevaisuuden suuntausta. Muuntopiirien loisteho pyritään saamaan sellaiseksi, että se on enintään 16 % pätötehosta. Tämä tarkoittaa arvoa $\tan \varphi = 0,16$, joka vastaa $\cos \varphi = 0,987$. Kaikissa kuvissa positiivinen arvo tarkoittaa loistehon ottoa verkosta ja negatiivinen loistehon syöttämistä verkkoon.

3.2.1 Muuntamo M001 muuntaja PM1

M001 PM1:n verkosta ottama loisteho on mitattu vuoden ajalta ja arvoista on piirretty kuva 5 (ks. seur. s.). Kuvasta nähdään, että muuntajan ottama loisteho vaihtelee suurimmaksi osaksi 3 - 4 MVAr:n välillä lukuun ottamatta kesän piikkiä. Olettaen, että taulukossa 6 esitettävien kompensointien loistehon säätimet toimivat oikein, päämuuntajan ottama loisteho pitää paikkansa. Tällöin toimivat kondensaattorit ovat jo kompensoineet loistehot omilta keskuksiltaan. Tämän muuntopiirin $\tan \varphi = 3,63 \text{ MVAr} / 9,53 \text{ MW} = 0,38$ laskettuna vuoden keskiarvo pätö- ja loistehoista.



Kuva 10. M001 PM1 loisteho

Katsotaan tarkemmin muuntajan alapuolella sijaitsevaa kompensointia ja mietitään mihin uudet kompensointi paristot kannattaisi sijoittaa. Tähän käytetään Hämeen Sähkön raporteista kerättyjä tietoja loistehosta eri muuntamoilla sekä olemassa olevista kompensoinneista. Taulukossa 6 esitetään kaikki muuntopiirissä olevat kondensaattoriparistot ja loistehotilanne keskuksissa, joissa ne sijaitsevat sekä yli jäävä kompensoimaton loisteho. Kompensoimaton loisteho siirtyy piirissä ylöspäin ja selittää M001 PM1:n verkosta ottamaa loistehoa. Taulukosta 6 (ks. seur. s.) nähdään, että vaikka toimivaa kompensointitehoa olisi riittävästi, se ei auta verkon tilannetta. Tämä johtuu siitä, että mikäli säädin toimii oikein, se pyytää päälle vain keskuksen tarvitseman loistehon ja loput sinne sijoitetusta kondensaattoritehosta jää käyttämättä. Mitatut loistehot ovat hetkellisarvoja, joten ne eivät välttämättä vastaa normaalia kuormitusilannetta.

Taulukko 6. M001 PM1:n mitattujen keskusten loistehotilanne

Keskus	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)	Suosittelut toimenpiteet
M007 - 100F	0	0	0	0	Kompensointi purettu
M008 - 100F	150	0	113,28	113,28	Mikäli tarvetta estokelaparisto
M30 - 100F	200	0	-0,06	0	Ei mitattu tuotannon turvaamisen vuoksi
M045 - 100F	120	0	195,3	195,3	Estokelaparisto
M045 - 100F	480	480	183,87	0	Kompensointi kunnossa
M046 - 100F	480	280	196,2	0	Säädin + estokelaparisto uusittaessa
M079 - 100F	300	100	14,04	0	Porrasvälin muuttaminen 50kVAr:iin. Mittaushetkellä kuormat pienet
M102 - 100F	200	0	205,2	205,2	Estokelaparisto
M109 - 100F	370	100	51,66	0	Säädin + mikäli tarvetta estokelaparisto
M111 - 100F	300	300	77,4	0	Mikäli suurempaa tarvetta niin estokelaparisto
M002 - 300F .C5.1+C5.2	385	0	0	0	Virranmittaus väärässä kennossa. Estokelaparisto + säädin
M004 - 100 F.C11	300	300	822,84	522,84	Orjaparisto
M004 - 3000F .C31	300	300	0	0	Voidaan käyttää muiden varaosina
M004 - 4000F .C42+C41	500	150	288	138	Estokelaparisto + säädin
Yhteensä		2010,00	2147,73	1174,62	

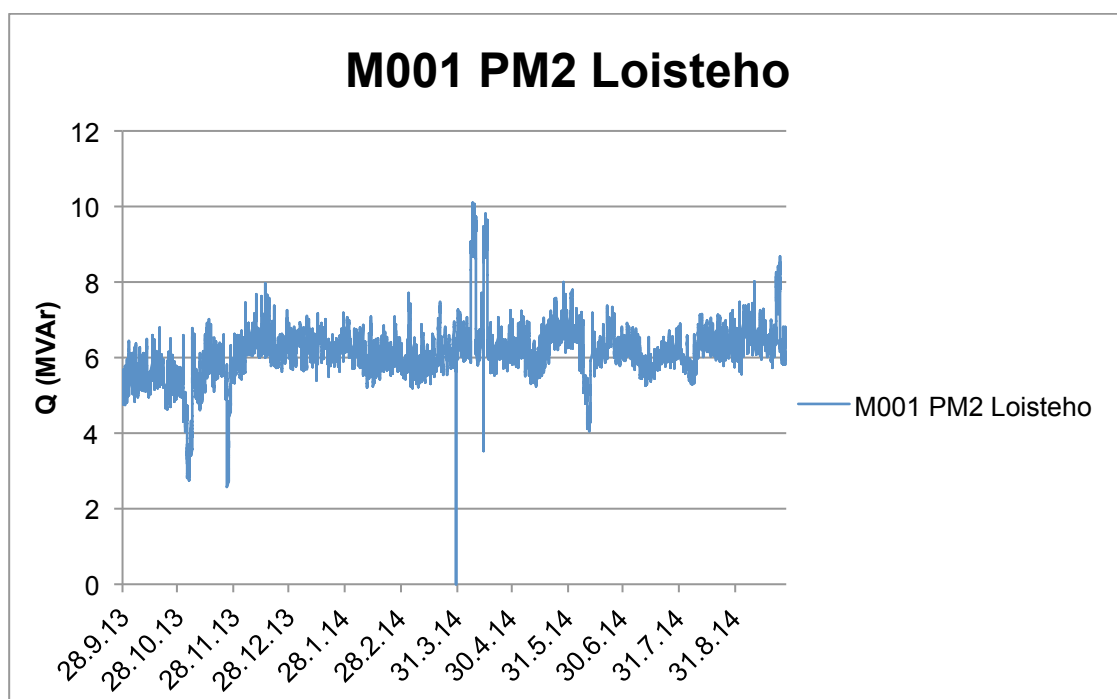
Taulukosta 6 nähdään, että kompensoimalla loistehot mitatuilla keskuksilla, voidaan M001 PM1 ottamasta loistehosta vähentää noin 1,2 MVA. Kompensoimalla lähempänä kulutusta, vähennetään turhaa loistehon siirtoa ja kompensoinnin tarvetta 110 kV:n puolella. Taulukkoon on myös koottu suositeltuja toimenpiteitä muuntopiirin keskusten osalta.

Yhteenvedona M001 PM1 muuntopiiristä voidaan todeta, että vanhoilla kunnossa olevilla kondensaattoriparistoilla kannattaa mennä niin pitkälle kuin mahdollista. Kun uuden vaihtaminen tulee kysymykseen, kannattaa suosia estokelaparistoa. Tärkeimmät uusimisen kohteet ovat keskuksat M045 - 100F, M102 - 100F, M004 - 4000F.C42 + C41, M002 - 300F.C5.1 + C5.2 sekä M004 - 100F.C11. Neljään ensimmäiseen uuden estokelapariston ja viimeiseen orjapariston mitoittamalla säästyttäisiin käytettyjen mittaus-ten mukaan noin 1 MVA:n loistehon otolta päämuuntajalla. Edellä mainittujen lisäksi kannattaa seurata keskuksen M008 - 100F normaalia kuormitustilannetta. Mikäli kuormitus on usein suurempi kuin mitattu, suositellaan niihinkin estokelaparistoa, muussa tapauksessa tämän 200 kVAr voi siirtää kompensoitavaksi ylempänä verkossa. Lisäksi taulukossa mainittuihin kolmeen keskukseseen täytyy vaihtaa säädin, mikäli niitä aiotaan tulevaisuudessa käyttää. Kun estokelaparistojen ja säätimien uusiminen suoritetaan, pitäisi loistehokulman parantua arvoon $\tan \phi = (3,63 - 1) \text{ MVA} / 9,53 \text{ MW} = 0,28$. Tämäkin jää vielä 16 % tavoite arvosta, mutta loppua loistehon kulutuksesta on haastava löytää, koska kaikkia keskuksia ei ole mitattu.

Mitattujen keskusten loistehon pitäisi olla korjausten jälkeen lähellä nollaa, joten loput loistehon kulutuksesta täytyy tulla muualta M001 PM1:n muuntopiiristä sekä keskuksista, joita ei pystytty mittaamaan esimerkiksi tuotannollisista syistä. Jäljelle jäävää kompensoimatonta loistehoa kannattaa etsiä esim. muuntamoista M005, M012, M044 sekä M002-100F. Näistä muuntamoista ei ole raporttien mukaan mitattu kompensointia tai verkkoa. Kuitenkin niissä tiedetään olevan moottorikojeistoja. Lisäksi kiskossa M001 kiskossa 100C on isotehoinen moottori.

3.2.2 Muuntamo M001 muuntaja PM2

M001 PM2:n vuoden aikana käyttämän loistehon kuvasta 11 huomataan, että loistehon otto verkosta pysyy melko vakiona koko vuoden ajan. Muutamia piikkejä lukuun ottamatta loistehon tarvetta on noin 6 MVAR. Muuntopiirin loistehokulma $\tan \varphi = 6,15 \text{ MVAR} / 12,91 \text{ MW} = 0,48$. Tämä on kaukana tavoitellusta 16 % loisteho pätöteho suhteesta.



Kuva 11. M001 PM2 loisteho

Tarkastellaan muuntajan alapuolista muuntopiiriä ja suunnitellaan kondensaattoriparistojen sijoituspaikkoja. Taulukkoon 7 kerätään tietoja Hämeen Sähkön tekemistä mittauksista. Mittaukset on tehty niihin keskuksiin, joissa on kondensaattoriparisto. Niistä

oleellisimmat ovat toimivan kompensoinnin määrä ja loistehotilanne keskuksella. Lisäksi käydään yksitellen läpi jokainen mitattu keskus ja ehdotetaan toimenpidettä.

Taulukko 7. M001 PM2 mitattujen keskusten loistehotilanne

Keskus	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)	Suosittelut toimenpiteet
IA002 - NK3	250	250	33,12	0	Säädin
M006 - 100F kisko 1	100	0	0	0	Mikäli suurempaa tarvetta niin estokelaparisto
M006 - 100F kisko 2	75	0	0	0	Puretaan
M007 - 200F	0	0	0	0	Kompensointi purettu
M043 - 100E	200	0	507,6	507,6	Estokelaparisto
M043 - 200E	200	0	507,6	507,6	Ei tarvitse kompensoida erikseen
M044 - 100F	100	0	10,41	10,41	Purkaminen. Mittaushetkellä kuormat pienet
M044 - 200F	300	250	100,26	0	Vanhan kompensoinnin pitäminen
M078 - 100F	300	300	5,76	0	Mittaushetkellä kuormat pienet
M079 - 200F	300	100	75,24	0	Porrasvälin muuttaminen 50kVAr:iin. Mittaushetkellä kuormat pienet
M104 - 100F	200	0	64,8	64,8	Mikäli tarvetta estokelaparisto
M111 - 200F	300	300	41,4	0	Kompensointi kunnossa
M206 - 200F	150	150	38,52	0	Poistettu käytöstä taajuusmuuttaja ongelmalmien takia
M002 - 300F .C6.1+C6.2	385	0	334,8	334,8	Estokelaparisto + säädin
M004 - 300F .C31+C32+200F.C21	800	300	444,6	144,6	Estokelapariston pitäminen + orjaparisto
Yhteensä		1650	2164,11	1569,81	

Taulukosta 7 nähdään, että isossa osassa keskuksista kompensointi on kunnossa ja loistehon tarve koostuu muutamasta yksittäisestä isommasta tarpeesta. Sarakkeessa, jossa on kompensoimaton loisteho keskuksissa, huomataan, että keskusten M043 100E ja 200E arvo on sama. Tämä johtuu siitä, että ne ovat todennäköisesti yhteydessä toisiinsa. Tällöin alimmalla rivillä sijaitsevasta summasta voidaan vähentää toinen näistä eli noin 500 kVAr. Loput keskuksat kompensoimalla säästetään muuntajalta 1 MVar loistehoa.

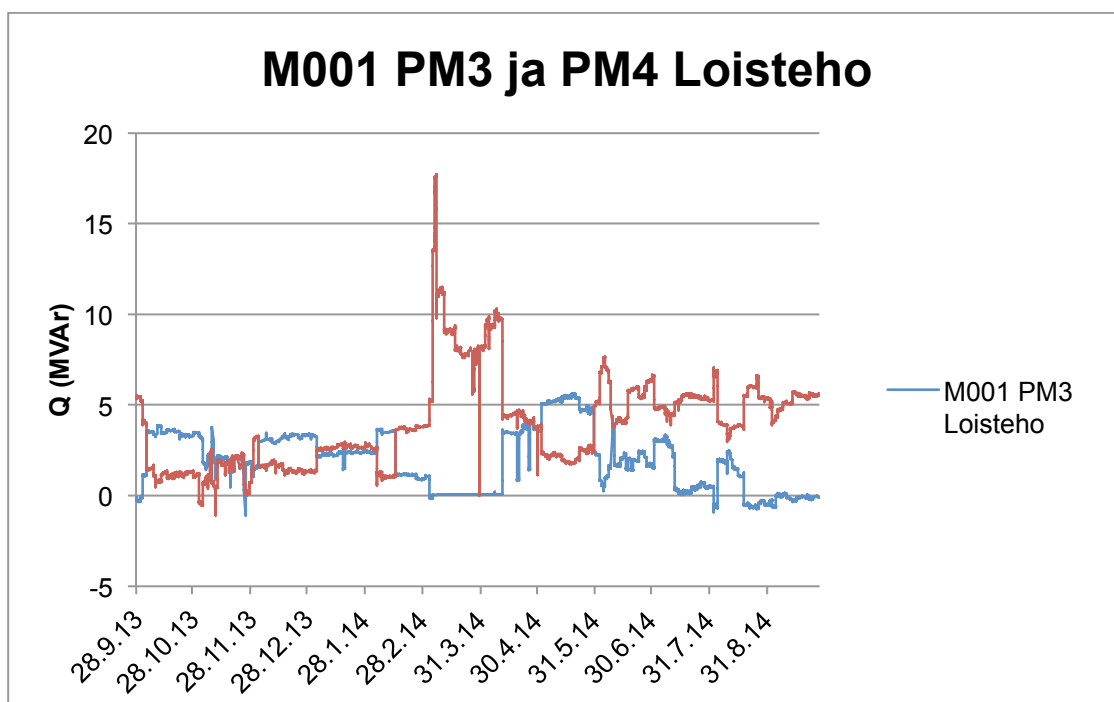
Muuntopiirin mitatuista keskuksista voidaan sanoa, että kannattaa pitää vanhat toimivat kompensoinnit niin kauan, kuin ne kestävät ja sen jälkeen vaihtaa estokelaparistoihin. Poikkeuksena taulukossa 7 viimeisenä näkyvä M004 - 300F, jossa on estokelaparisto, automatiikkaparisto ja kiinteä paristo. Estokelaparisto yhdessä automaattisen ja kiinteän pariston kanssa voi aiheuttaa resonanssipiirin ja vahvistaa verkon häiriöitä. Estokelaparisto on kunnossa, joten sille voidaan asentaa orjaparisto, jolloin ne yhdessä kattavat keskuksen kompensointi tarpeen. Kun keskuksille M043 - 100E ja M002 - 300F.C31 + C32 + 200F.C21 asennetaan estokelaparisto ja mainitut säätimet uusitaan, saadaan suurin osa näiden keskusten loistehosta kompensoitua. Mikäli muiden

mitattujen keskusten kuormat ovat normaalissa kuormitustilanteessa lähellä mitattuja, voidaan niiden loistehon antaa siirtyä ylemmäs muuntopiirissä.

Loistehokulma muuttuu arvoon $\tan \varphi = (6,15 - 1) \text{ MVar} / 12,91 \text{ MW} = 0,40$. Tämäkin on vielä kaukana tavoitteesta. Loput loistehon kulutuksesta tässä muuntopiirissä täytyy löytyä mittaamattomista keskuksista, mutta niiden tilannetta on vaikea arvioida.

3.2.3 Muuntamo M001 muuntajat PM3 ja PM4

M001 PM3 ja PM4 on hyvä käsitellä yhdessä, koska ne jossain määrin korvaavat toisiaan. Kuten niiden vuoden aikana käyttämän loistehon piirretystä kuvasta 12 huomataan. Toisen muuntajista ollessa pois käytöstä tai matalalla kuormituksella, toisen muuntajan kuorma kasvaa. Esimerkiksi keväällä 2014 PM3 on ollut poissa käytöstä, jolloin PM4:n ottama loisteho on ollut noin n. tuplasti korkeampi kuin normaalisti. Normaalissa kuormitus tilanteessa yhteenlaskettu loistehon otto vaihtelee n. 5 - 7 MVar:n. Muuntopiirin M001 PM3 loistehokulma $\tan \varphi = 1,96 \text{ MVar} / 14,82 \text{ MW} = 0,13$ ja M001 PM4 $\tan \varphi = 3,93 \text{ MVar} / 21,39 \text{ MW} = 0,18$. Muuntopiirien loistehotilanne on hyvä, M001 PM3 menee loistehorajan sisään ja M001 PM4 on lähellä rajaa.



Kuva 12. M001 PM3 ja PM4 loisteho

Hämeen Sähkön raporteista kerätyistä tiedoista muodostetaan taulukot 8 ja 9, joissa tarkastellaan muuntopiirien PM3 ja PM4 loistehotilannetta. Taulukoista huomataan heti, että mitatuissa keskuksissa on paljon kompensoitavaa. Kompensoinnin tarve ei koostu yksittäisistä pienistä kuormista, vaan jokainen mitatuista keskuksista kannattaa kompensoida paikan päällä, eikä siirtää loistehoa ylemmäs muuntopiirissä. Molemmissa taulukoissa on mukana myös kaksi keskijännite kompensointia, mutta niiden kohdalla verkon loistehotilannetta ei ole mitattu. Kaikki neljä keskijännite kompensointia on kunnossa ja toimii oikein, mutta niitä ei ole huomioitu taulukon yhteenlasketuissa loistehotilanteissa. Niiden toiminta näkyy kuitenkin samalla tavalla kuvassa 12 kuin muidenkin toimivien kompensointien.

Taulukko 8. M001 PM3 mitattujen keskusten loistehotilanne

Keskus	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)	Suosittelut toimenpiteet
M001 - 400C.C-400	6000	6000			Kompensointi kunnossa
M001 - 800.C-800	2400	2400			Kompensointi kunnossa
M003 - 200F	300	150	619,2	469,2	Vialliset portaat korjataan + lisäkompensointia tarvittaessa
M028 - 100F kisko3	450	75	410,4	335,4	Keskukselle tulossa muutoksia
M028 - 200E	300	300	34,02	0	Kompensointi kunnossa
M028 - 400F	450	0	354,6	354,6	Vialliset portaat korjataan
M078 - 100E	400	100	698,4	598,4	Vialliset portaat korjataan + lisäkompensointia tarvittaessa
M080 - 100F	300	300	43,02	0	Kompensointi kunnossa
M101 - 100E	400	200	376,2	176,2	Estokelaparisto
M101 - 300E	300	0	0	0	Kompensointi purettu. Kuormat nollassa.
M106 - 003RF	400	400	138,18	0	Säädin
M019 - 200F.C32	300	150	286,2	136,2	Vialliset portaat korjataan + säädin
Yhteensä		1675,00	2960,22	2070	

Kompensoimalla taulukon 8 suositusten mukaiset keskuksat saadaan muuntajan PM3 ottamasta loistehosta pois n. 1,1 MVAR. PM3 muuntopiirissä estokelaparisto suositellaan vaihdettavaksi keskukseseen M101 - 100E. Näiden lisäksi neljässä keskuksessa on kondensaattoriparistoja, joiden portaat ovat viallisia. Näihin keskuksiin on järkevää korjata kompensointi, jos muut pariston yksiköt ovat hyvässä kunnossa. Paristojen kuntoa tarkasteltaessa kannattaa myös mitata verkon loistehotilanne pidemmältä ajalta, esimerkiksi keskuksissa M003-200F ja M078-100E jää näiden mittaustulosten mukaan vielä n. 300 kVAr molemmissa kompensoimatta, jos lisäkompensointia ei asenneta. Tämän kokoiset loistehot kannattaisi kompensoida niillä keskuksilla, eikä siirtää ylemmäs muuntopiirissä. M028-100F kisko 3:n kompensointi kannattaa arvioida vasta keskukselle tehtyjen muutosten jälkeen. Kahdessa keskuksessa on myös säädin vioittunut ja se täytyy uusua.

Taulukko 9. M001 PM4 mitattujen keskusten loistehotilanne

Keskus	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)	Suosittelut toimenpiteet
M001 - 300C.C-300	6000	6000			Kompensointi kunnossa
M001 - 700C.C-700	2400	2400			Kompensointi kunnossa
M003 - 100F	300	0	576	576	Vialliset portaat korjataan + lisäkompensointia tarvittaessa
M028 - 100E	300	300	241,2	0	Kompensointi kunnossa
M028 - 100F kisko 1	450	0	410,4	410,4	Estokelaparisto
M028 - 200F	450	75	502,2	427,2	Vialliset portaat korjataan + lisäkompensointia tarvittaessa
M028 - 600F	250	200	-0,72	0	Kuormat nollassa + Säädin tarkistettava
M078 - 200E	400	100	264,6	164,6	Vialliset portaat korjataan + säädin
M80 - 200F	300	300	32,4	0	Kompensointi kunnossa
M101 - 200E	400	200	783	583	Estokelaparisto
M101 - 400E	300	0	0	0	Kompensointi purettu. Mittaushetkellä kuormat pienet
M019 - 100F.C31	300	0	198	198	Vialliset portaat korjataan + säädin
Yhteensä		1175	3007,08	2359,2	

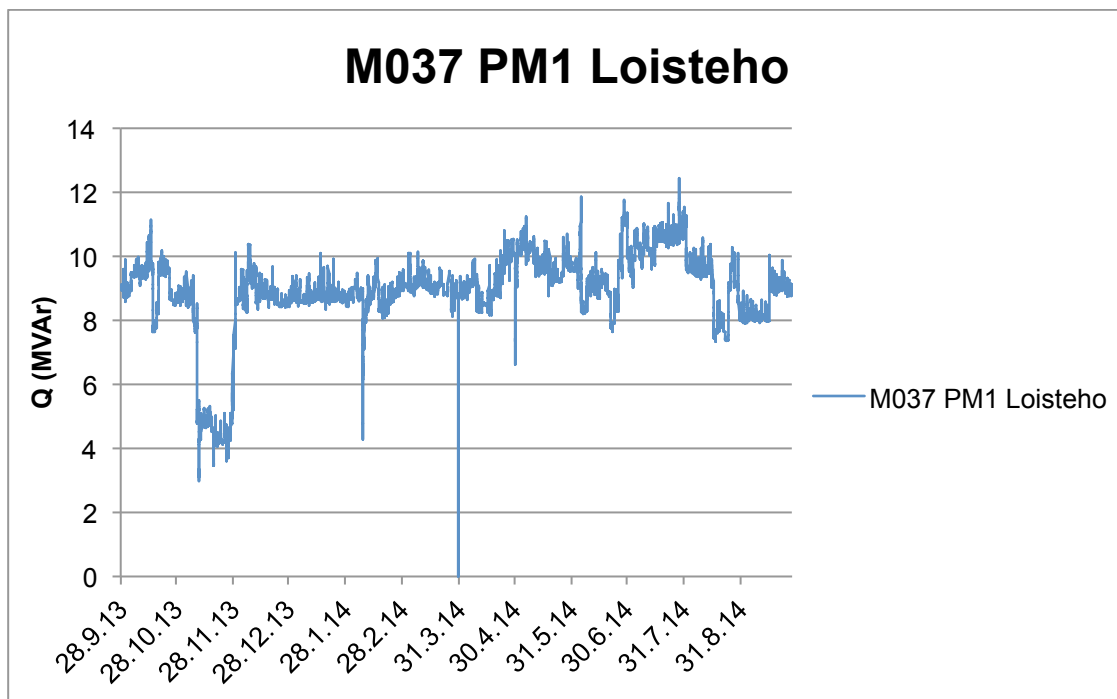
Muuntajan PM4 taulukossa 9 esitetyt keskuksat kompensoimalla saadaan päämuuntajan loistehoa n. 1,8 MVAR pienemmäksi. PM 4 muuntopiirissä kompensointien vialliset

portaat kannattaa korjata neljässä keskuksessa. Lisäkompensoinnin tarvetta on syytä arvioida keskuksissa M003-100F ja M028-200F, portaiden korjauksen yhteydessä. M028-200F:lle lisäkompensointia ei välttämättä tarvita, jos loistehotilanne on normaalisti sama kuin mittauksissa. Kahteen keskukseseen suositellaan vaihtamaan uusi estoke-laparisto. Kolmen keskuksen säätimet ovat viallisia ja ne täytyy vaihtaa.

Edellä mainittujen toimenpiteiden jälkeen muuntajien PM3 ja PM4 pitäisi ottaa verkosta noin 2,9 MVA_r vähemmän loistehoa. Tällöin loistehoa otettaisiin verkosta n. 3,1 - 5,1 MVA_r kuormitustilanteesta riippuen. Loput loistehoa kuluttavat laitteet täytyy löytyä muuntopiirien mittaamattomista keskuksista. Mikäli lisäkompensointia ei asenneta keskuksiin, vaan noudatetaan taulukoista 8 ja 9 löytyviä suosituksia, päästään loistehokulmissa arvoihin M001 PM3 $\tan \varphi = (1,96 - 1,1) \text{ MVA}_r / 14,82 \text{ MW} = 0,06$ ja M001 PM4 $\tan \varphi = (3,93 - 1,8) \text{ MVA}_r / 21,39 \text{ MW} = 0,10$. Muuntopiirien M001 PM3 ja PM4 tilanne on kompensointien korjausten toteuttamisen jälkeen erittäin hyvä.

3.2.4 Muuntamo M037 muuntaja PM1

M037 PM1 vuoden aikana käyttämän loistehon kuvasta 13 huomataan, että sen vuoden aikana ottama loisteho pysyy melko tasaisena muutamaa piikkiä lukuun ottamatta. Muuntaja syöttää kahta eri kiskoa 300C ja 400C, mutta niitä käsitellään yhdessä muuntopiirissä. M037 on kuitenkin tulossa toinen päämuuntaja, jolloin toista kiskoa tullaan syöttämään sillä. Kuvasta nähdään, että loistehon tarve muuntopiirissä on melko korkea n. 9 MVA_r. Loistehokulma $\tan \varphi = 8,92 \text{ MVA}_r / 26,26 \text{ MW} = 0,34$.



Kuva 13. M037 PM1 loisteho

Taulukkoon 10 (ks. seur. s.) muodostetaan Hämeen Sähkön mittaamien keskusten loistehotilanne. Taulukosta huomataan heti, että mitatuissa keskuksissa on paljon kompensoinnin varaa. Keskuksia M039 - 100F ja M106 - 005RF ei välttämättä kannata kompensoida ollenkaan mikäli kuormat ovat aina yhtä pienet. Muut kompensoimattomat loistehot ovat sen verran suuria, että niiden kompensointi kannattaa korjata, eikä niitä kannata jättää kompensoitavaksi ylempänä muuntopiirissä. Keskijännite kompensoinnin loistehotilannetta ei ole mitattu, mutta M037 - C31 kahta viallista porrasta lukuun ottamatta se on kunnossa.

Taulukko 10. M037 PM1 mitattujen keskusten loistehotilanne

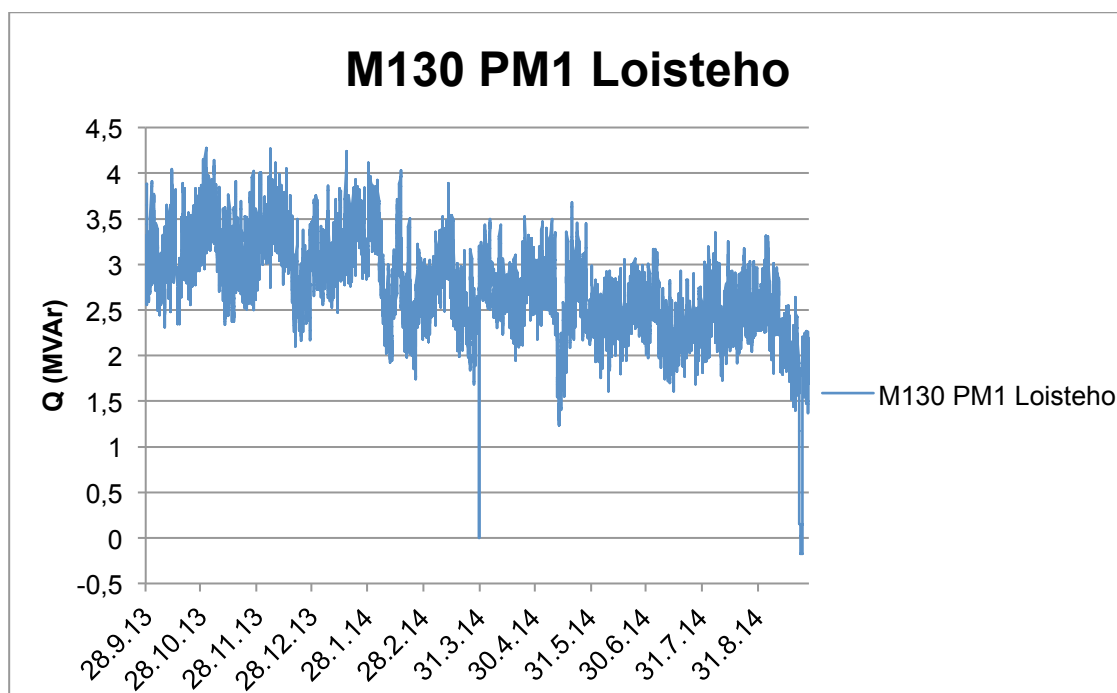
Keskus	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)	Suosittelut toimenpiteet
M37 - 121C.C-100	6000	6000			Kompensointi kunnossa
M37 - C2.1-C2.2	750	750			Kompensointi kunnossa
M37 - C31	750	600			Vialliset portaat korjataan
M037 - 100E	500	0	423	423	Estokelaparisto
M037 - 100F	250	125	100,8	0	Viallinen paristo poistetaan
M037 - 200E	500	0	554,4	554,4	Estokelaparisto
M037 - 200F	245	0	0	0	Mikäli tarvetta estokelaparisto. Verkkoa ei mitattu
M037 - 300E	500	0	714,6	714,6	Estokelaparisto
M039 - 100E	520	0	516,6	516,6	Estokelaparisto + säädin
M039 - 100F	75	0	54,72	54,72	Puretaan
M039 - 200E	520	0	649,8	649,8	Estokelaparisto + säädin
M089 - 100E	300	300	246,6	0	Kompensointi kunnossa
M089 - 200E	300	300	123,66	0	Kompensointi kunnossa
M106 - 005RF	30	0	14,85	14,85	Puretaan
Yhteensä		725,00	3399,03	2927,97	

Muuntopiirin mitatuissa keskuksissa on taulukon 10 mukaan n. 3 MVAR kompensoimattomaa loistehoa. Taulukosta nähdään myös, että merkittävä osa asennetuista kompensoinneista on täysin hajalla, joten kun kompensointeja lähdetään uusimaan, on viisasta laittaa näihin viiteen keskukseseen estokelaparisto. Keskuksien M037 - 100F ja M106 - 005RF kompensointi kannattaa purkaa kokonaan, koska niiden kuluttamat loistehot ovat niin pienet. M037 - C31 keskijännite kojeiston vialliset portaat korjataan. Näiden lisäksi kahteen keskukseseen on uusittava säädin.

Kun edellä mainitut toimenpiteet on suoritettu, pitäisi muuntopiirin loistehon oton vähentyä n. 2,7 MVAR eli sen pitäisi laskea n. 6MVAR:in. Tämä on vielä suhteellisen paljon ja se tarkoittaa, että muuntopiirissä täytyy olla vielä isoja kompensoimattomia kuormia. Näitä voi lähteä etsimään esimerkiksi muuntamolta M084, jossa ei ole ollenkaan kompensointia, mutta moottoreita löytyy. Tulevaisuudessa muuntamolalle M037 kuitenkin tulee toinen päämuuntaja ja nykyinen M037 kuorma jaetaan näille kahdelle muuntajalle, jolloin tulee yksi muuntopiiri lisää. Uudelle muuntopiirille tulee lisäksi 6 MVAR:n kompensointiparisto. Kokonaisuudessaan nykyisen muuntopiirin tilanne tulee siis paranemaan huomattavasti ja loistehotilanne saadaan hyvälle tasolle. Nykyisen muuntopiirin loistehokulma saadaan muutoksilla arvoon $\tan \phi = (8,92 - 2,7) \text{ MVAR} / 26,26 \text{ MW} = 0,24$. Kun myöhemmin kuorma tulee vielä kahteen eri muuntopiiriin ja uusi 6 MVAR:n kompensointiparisto asennetaan, molemmat muuntopiirit tulevat menemään helposti loissähkörajan sisään.

3.2.5 Muuntamo M130 PM1

M130 PM1:llä on kaksi eri kiskoa 100C ja 200C, mutta niitä käsitellään yhdessä muuntopiirissä. Muuntajan vuoden aikana ottaman loistehon kuvasta 9 nähdään, että loistehon otto verkosta on laskenut melko tasaisesti vuoden aikana. On kuitenkin vaikea sanoa jatkuuko tämä trendi, joten arvioidaan muuntopiirin loistehon kulutuksen olevan välillä 2 - 3,5 MVAR. Kuitenkin tämä on melko vähäinen kulutus verrattuna edellä esitettyihin muuntopiireihin. Muuntopiirin loissähkökulma $\tan \varphi = 2,72 \text{ MVAR} / 9,80 \text{ MW} = 0,28$.



Kuva 14. M130 PM1 loisteho

Taulukkoon 11 (ks. seur. s.) Hämeen Sähkön tekemistä raporteista kerättävistä tiedoista nähdään, että tämän muuntopiirin kompensoinnin tilanne on melko hyvä. Toimivaa kompensointitehoa on paljon, eikä kompensoimatonta loistehoa jää kuin muutamalle keskukselle. Isossa osassa keskuksia on kompensointia kuormitukseen nähden reilusti yli tarpeen ja niitä ei välttämättä tarvittaisi ollenkaan. Kompensoitonta loistehoa on yhteensä n. 1 MVAR.

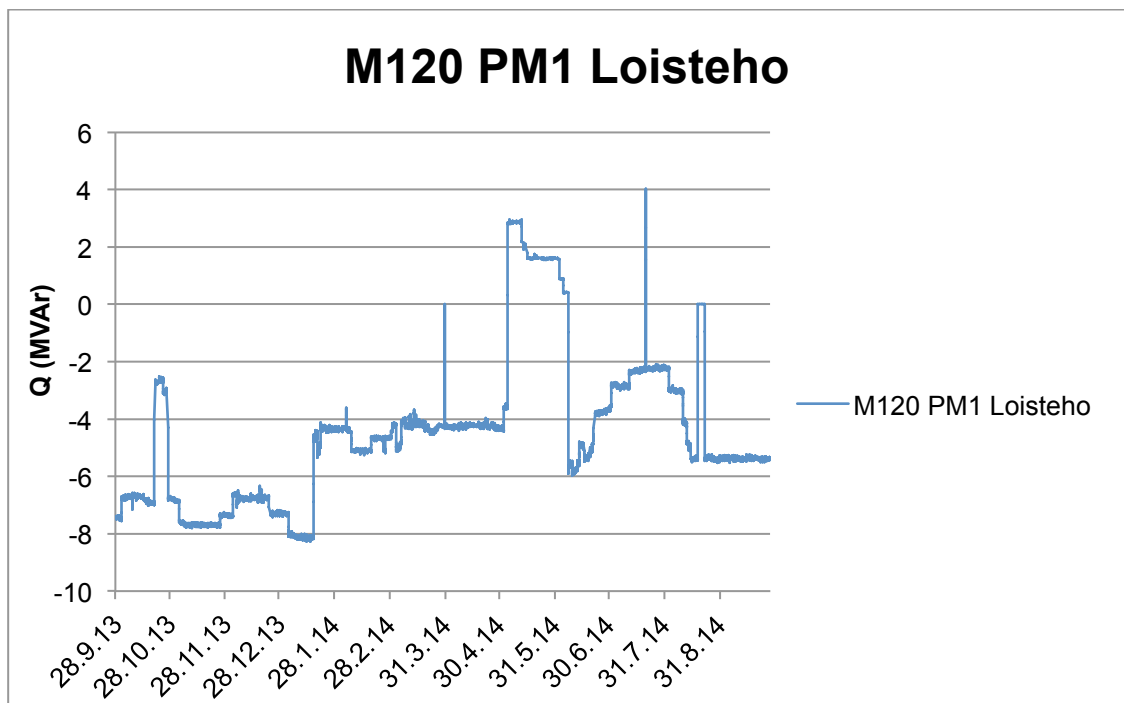
Taulukko 11. M130 PM1 mitattujen keskusten loistehotilanne

Keskus	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)	Suosittelut toimenpiteet
M013 - 100F	200	200	59,4	0	Kompensointi kunnossa
M022 - 100F	200	50	90,9	40,9	Vialliset portaat korjataan
M022 - 200E	200	0	64,2	64,2	Puretaan
M024 - 100E	200	200	-6,96	0	Kompensointi kunnossa
M025 - 100E	210	210	2,28	0	Mittaushetkellä kuormat pienet
M026 - 100F	400	0	2,16	2,16	Mittaushetkellä kuormat pienet
M026 - 200F	400	0	0,18	0,18	Mittaushetkellä virrat pienet.
M029 - 100F	360	360	19,5	19,5	Kunnossa. Ei käytössä
M031 - 100F	100	0	24,03	24,03	Puretaan
M034 - 100F	100	100	269,1	169,1	Kompensointi kunnossa + lisäkompensointia tarvittaessa
M040 - 100E	200	0	300	300	Estokelaparisto
M042 - 200F	300	50	36,39	0	Vialliset portaat korjataan
M066 - 100F	200	0	36,9	36,9	Puretaan
M068 - 100F	200	0	313,2	313,2	Estokelaparisto
M077 - 100F	300	150	19,98	0	Mittaushetkellä keskuksen kuormat pienet.
M077 - 200F	300	300	86,04	0	Kompensointi kunnossa.
M082 - 100F	320	80	127,8	47,8	Mikäli tarvetta estokelaparisto
M082 - 200F	320	80	12,6	0	Puretaan, mikäli tarve vähäinen
M085 - 100F	300	300	138,6	0	Kompensointi kunnossa
M085 - 200F	300	300	58,68	0	Kompensointi kunnossa
M088 - 100F	300	300	0,72	0	Mittaushetkellä kuormat pienet
M088 - 200F	300	300	-4,71	0	Kompensointi kunnossa. Mittaushetkellä kuormat pienet
M100 - 100F	200	200	46,44	0	Poistettu käytöstä, puretaan
M100 - 200F	200	200	23,94	0	Poistettu käytöstä, puretaan. Mittaushetkellä kuormat pienet
Yhteensä		3020,00	1721,37	1017,97	

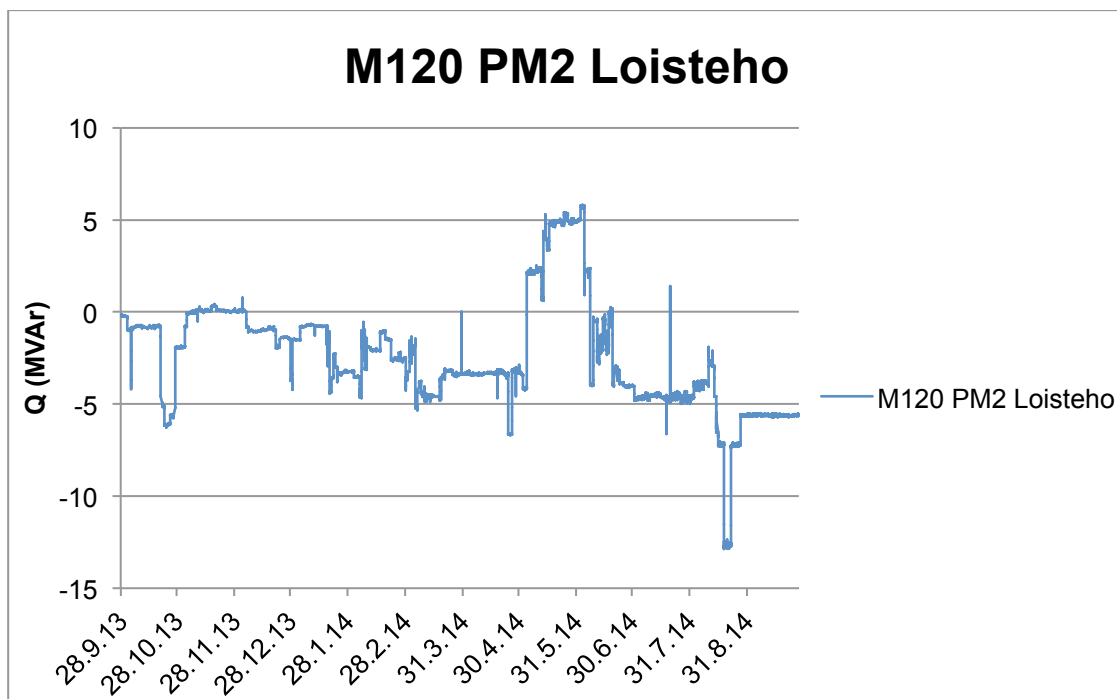
Taulukosta 11 käy ilmi, että kuormat ovat pääasiassa pieniä ja jakautuvat eri keskuksille. Kaikkein pienimpiä kuormia ei kannata kompensoida vaan kompensointi kannattaa keskittää suurimpiin kulutuspisteisiin. Muuntopiirissä kannattaa vaihtaa estokelaparisto keskuksiin M068 - 100F ja M040 - 100E. Lisäksi vialliset portaat korjataan keskuksissa M022 - 100F ja M042 - 200F. Näillä toimenpiteillä muuntopiiri ottaa n. 700 kVAr vähemmän loistehoa verkosta. Muuntopiirin keskuksen M034 - 100F loistehon kulutusta kannattaa tarkkailla ja asentaa tarvittaessa lisäkompensointia. Muiden keskusten loistehokuormat ovat niin pienet, että niiden kompensointi kannattaa pitää niin kauan kuin se toimii. Tämän jälkeen pienet kuormat kannattaa jättää kompensoitavaksi ylemmäs muuntopiirissä. Suositeltujen toimenpiteiden jälkeen uuden loistehokulman pitäisi olla $\tan \varphi = (2,72 - 0,7) \text{ MVar} / 9,8 \text{ MW} = 0,21$. Loistehon suhde on vieläkin vähän liian suuri päätötehoon nähden, mutta kuluttavia keskuksia on vaikea etsiä ilman mittaustietoja.

3.2.6 Muuntamo M120 PM1 ja PM2

M120 päämuuntajat PM1 ja PM2 ovat uusimmat Neste Oilin päämuuntajista ja se huomataan, kun katsotaan näiden muuntopiirien kompensointitilannetta. Näiden muuntopiirien vuoden loistehonotto näkyy kuvissa 10 ja 11. Vuoden ajalta mitatuista loistehoarvoista nähdään, että molemmat muuntopiirit syöttävät verkkoon loistehoa, joten niiden kompensointi on kunnossa. Muuntopiirien loistehokulmat ovat M120 PM1 $\tan \varphi = -4,49 \text{ MVar} / 8,49 \text{ MW} = -0,53$ ja M120 PM2 $\tan \varphi = -2,39 \text{ MVar} / 25,69 \text{ MW} = -0,09$. Nämä muuntopiirit kompensoivat muiden muuntopiirien loistehon kulutusta. Kun muiden muuntopiirien loistehokulma paranee niin M120 muuntopiirejä ei tarvitse enää ylikompensoida niin paljon.



Kuva 15. M120 PM1 loisteho



Kuva 16. M120 PM2 loisteho

Kerätään muuntopiirin mitattujen keskusten loistehotilanne Hämeen sähkön raporteista ja kootaan ne taulukkoon 12. Kaikkien muuntopiireihin asennettujen kompensointilaitteiden havaitaan toimivan ja kompensoimaton loisteho on vähäistä.

Taulukko 12. M120 PM1 ja PM2 muuntopiirien mitattujen keskusten loisteho

Keskus	Päämuuntaja	Nimellisteho (kVAr)	Toimiva (kVAr)	Loistehotilanne (kVAr)	Kompensoimaton (kVAr)
M120 - 300C.C31	M120 PM1	6000	6000		
M120 - 400C.C41	M120 PM2	6000	6000		
M120 - 100E.C101+C102+C103+C104	M120 PM1	612	612	485,28	0
M120 - 200E.C201 + C202 + C203 + C204	M120 PM2	612	612	561,6	0
M120 - 300E.C301	M120 PM1	300	300	428,4	128,4
M120 - 400E.C401	M120 PM2	300	300	383,4	83,4
M120 - 500E.C501	M120 PM1	300	300	179,64	0
M120 - 600E.C601	M120 PM2	300	300	-10,98	0
Yhteensä			2424,00	2027,34	211,8

6 MVAR:n kompensointeja ei ole huomioitu loistehotilanteen laskennassa, koska niiden kohdalta verkkoa ei ole mitattu. Kahdessa keskuksessa havaitaan, että kompensointiteho ei aina välttämättä riitä keskuksien tarpeisiin. Yli menevä kompensoinnintarve on

kuitenkin vähäinen ja muuntopiirien loistehotilanne on muuten hyvä, joten näihin keskuksiin ei ole tarvetta lisätä kompensointia. Näille muuntopiireille ei tarvita lisäkompensointia, niiden tilanne on erittäin hyvä.

4 Kompensoinnin kehitysehdotukset

Kuluttajan loistehon käyttöä ja kompensointia ohjataan loissähkösäksuilla. Kantaverkosta otettavan loistehon määrittelee Porvoon Alueverkon kanssa tehty sopimus. Sopimuksessa on laskettu loissähkösäksuna, jossa määritetään asiakkaan anto- ja ottotehorajat. Rajat on määritetty suhteessa pätötehoon (ks. 3.1.3). Kilpilahden tapauksessa sopimuksen on tehnyt alueella toimiva verkkoyhtiö Kilpilahden Sähkösäksu ja loissähkösäksuna on yhteinen koko Kilpilahden alueella. Kilpilahden alueen loistehotilanteesta tehdään yhteenveto taulukkoon 13. Siihen kerätään SÄHE-järjestelmästä muuntopiireittäin vuoden ajalta otetut keskiarvot.

Taulukko 13. Kilpilahden nykyinen loistehotilanne

Muuntopiiri	Pätöteho (MW)	Loisteho (MVar)	$\tan \varphi$	$\cos \varphi$
M001 PM1	9,53	3,63	0,38	0,93
M001 PM2	12,91	6,15	0,48	0,90
M001 PM3	14,82	1,96	0,13	0,99
M001 PM4	21,39	3,93	0,18	0,98
M120 PM1	8,49	-4,49	-0,53	0,88 cap
M120 PM2	25,69	-2,39	-0,09	1,00 cap
M037 PM1	26,26	8,92	0,34	0,95
M130 PM1	9,80	2,72	0,28	0,96
M070 T1M	17,54	0,84	0,05	1,00
M070 T2M	15,71	1,97	0,13	0,99
M200 BM1	10,39	3,40	0,33	0,95
M200 BM2	19,26	-2,74	-0,14	0,99 cap
M220 BM3	13,58	0,71	0,05	1,00
Yhteensä	205,37	24,62	0,12	0,99

Mittausten mukaan kokonaistilanne loistehon suhteen on hyvä. Loistehon suhde pätötehoon on 12 %, joka on loissähkösäksunan rajojen sisäpuolella. Tulevaisuuden näkymä on, että kaikki sähköteho otettaisiin verkosta, omilla generaattoreilla tuottamisen sijaan. Tästä tilanteesta määritellyn loissähkösäksunan mukaan (ks. 3.1.3) verkosta saataisiin ottaa 42 MVar loistehoa 262 MW asti ja tästä suuremmilla 16 % pätötehosta. Pyritään siis siihen, että muuntopiireissä päästäisiin lähelle tätä arvoa eli $\tan \varphi = 0,16$.

Kuten taulukosta 13 huomataan monen muuntopiirin tilanne loistehon kannalta on huonompi kuin määritelty $\tan \varphi = 0,16$. Hyvä kokonaistilanne johtuu siitä, että ne muuntopiirit, joissa on kompensointi kunnossa, korvaavat heikommin kompensoituja piirejä ylikompensoimalla. Tällöin aiheutuu turhaa loistehon siirtoa muuntopiireiltä toisille, joka puolestaan aiheuttaa verkon ylimääräistä kuormittumista ja pätötehon siirtokyvyn heikkenemistä. Mikäli mahdollista, kannattaa loisteho tuottaa muuntopiireissä eikä siirtää niiden välillä.

Muuntamot M001, M120, M37 ja M130 kuuluvat Neste Oilille, joten pyritään vaikuttamaan niiden muuntopiirien loistehotilanteeseen. Näiden muuntamoiden muuntopiireistä ainoastaan M120 PM1 ja PM2 ovat kompensoinniltaan kunnossa, eikä niiden kompensointiin tarvitse puuttua. Edellä on käyty läpi muuntopiirien tilanne (ks. 3.2) ja esitetty muutos ehdotuksia kuhunkin piiriin. Taulukkoon 14 kootaan yhteenveto suositelluista toimenpiteistä. Yhteenvetoon on huomioitu ainoastaan ne toimenpide-ehdotukset, jotka vaativat investointeja. Näiden lisäksi suositelluissa toimenpiteissä (ks. 3.2) oli paljon muitakin suosituksia, mutta yhteenvetoon on koottu ne tärkeimmät. Suositukset pohjautuvat vahvasti Hämeen Sähkön tekemiin kompensoinnin kuntokartoitusraportteihin.

Taulukko 14. Suositeltavat investoinnit yhteenveto

Päämuuntaja/Keskus	Suosittelvat investoinnit	Nimellisteho (kVAr)
M001 PM1		
M045 - 100F	Estokelaparisto	200
M109 - 100F	Säädin	
M046 - 100F	Säädin	
M004 - 100F.C11	Orjaparisto	300
M102 - 100F	Estokelaparisto	250
M004 - 4000F.C42 + C41	Estokelaparisto + orjaparisto + säädin	300 + 200
M002 - 300F.C5.1 + C5.2	Estokelaparisto + säädin	300
M001 PM2		
M043 - 100E	Estokelaparisto + orjaparisto	300 + 300
IA002 - NK3	Säädin	
M002 - 300F.C6.1 + C6.2	Estokelaparisto + säädin	300
M004 - 300F.C31 + C32 + 200F.C21	Orjaparisto	250
M001 PM3		

M028 - 400F	Vialliset portaat korjataan	
M019 - 200F.C32	Vialliset portaat korjataan + säädin	
M106 - 003RF	Säädin	
M078 - 100E	Vialliset portaat korjataan	
M003 - 200F	Vialliset portaat korjataan	
M101 - 100E	Estokelaparisto + orjaparisto	200 + 200
M001 PM4		
M028 - 100F kisko 1	Estokelaparisto + orjaparisto	300 + 200
M028 - 200F	Vialliset portaat korjataan	
M019 - 100F.C31	Vialliset portaat korjataan + säädin	
M078 - 200E	Vialliset portaat korjataan + säädin	
M028 - 600F	Säädin	
M003 - 100F	Vialliset portaat korjataan	
M101 - 200E	Estokelaparisto + orjaparisto	300 + 300
M037 PM1		
M037 - 100E	Estokelaparisto + orjaparisto	250 + 200
M37 - C31	Vialliset portaat korjataan	
M037 - 200E	Estokelaparisto + orjaparisto	300 + 250
M037 - 300E	Estokelaparisto + orjaparisto	300 + 300
M039 - 100E	Estokelaparisto + orjaparisto + säädin	300 + 200
M039 - 200E	Estokelaparisto + orjaparisto + säädin	300 + 300
M130 PM1		
M068-100F	Estokelaparisto	300
M042 - 200F	Vialliset portaat korjataan	
M022 - 100F	Vialliset portaat korjataan	
M040-100E	Estokelaparisto	300

Suosittelusta toimenpiteistä voidaan yleisesti sanoa, että vaihdettaessa kokonaan uutta kompensointiparistoa, kannattaa suosia estokelaparistoja. Hämeen Sähkön mittauksissa tehtiin myös yliaaltomittaukset keskuksiin ja yliaaltotilanne on jokaisessa mitatussa keskuksessa alle 3 %. Jännitteen laatu on kohtuullinen, joten tällaisessa verkossa on hyvä vaihtoehto käyttää estokelaparistoa. Sillä vältetään rinnakkaisresonanssin syntyminen kondensaattorin ja syöttävän verkon induktanssin välille. Tilanteissa, joissa

paristo ei ollut kokonaan hajalla, usein suositeltiin korjaamaan vialliset portaat. Tämä on todennäköisesti halvempi vaihtoehto kuin uuden estokelapariston hankkiminen. Paristojen uusimisen lisäksi on erittäin tärkeää, että vialliset säätimet korjataan. Jos säädin on viallinen eikä toimi oikein, on ehjä paristokin hyödytön.

Loistehotilanne pienjännite puolen mitatuissa keskuksissa on lähes kaikissa sellainen, että paristojen porraskoko kannattaa muuttaa enintään 50 kVAr:in. Tällöin loistehon muutosten ei tarvitse olla niin isoja, että säädin reagoi ja loistehotilanteeseen pystytään vastaamaan tarkemmin. Paristojen tehokerroin kannattaa myös muuttaa 1, koska vaa-
raa ylikompensoimisesta ei ole ja lähes kaikkien muuntopiirien kompensointi on heikom-
paa kuin määritetty $\tan \varphi = 0,16$.

Kootaan esitettyjen muutosten jälkeinen tilanne taulukkoon 15 ja arvioidaan niiden vaikutusta kokonaistilanteeseen. Jäljelle jäävät muuntamot M070, M200 ja M220 ovat muiden Kilpilahden yritysten muuntamoita, joten niiden muuntopiirien ratkaisuihin ei tässä työssä puututa. Niiden loisteho näyttäisi kuitenkin taulukon 13 mukaan mahtuvan suurimmilta osin määritettyjen rajojen sisälle.

Taulukko 15. Kilpilahden loistehotilanne ehdotettujen muutosten jälkeen

Muuntopiiri	Pätöteho (MW)	Loisteho (MVar)	$\tan \varphi$	$\cos \varphi$
M001 PM1	9,53	2,63	0,28	0,96
M001 PM2	12,91	5,15	0,40	0,93
M001 PM3	14,82	0,86	0,06	1,00
M001 PM4	21,39	2,13	0,10	1,00
M120 PM1	8,49	-4,49	-0,53	0,88 cap
M120 PM2	25,69	-2,39	-0,09	1,00 cap
M037 PM1	26,26	6,22	0,24	0,97
M130 PM1	9,80	2,02	0,21	0,98
M070 T1M	17,54	0,84	0,05	1,00
M070 T2M	15,71	1,97	0,13	0,99
M200 BM1	10,39	3,40	0,33	0,95
M200 BM2	19,26	-2,74	-0,14	0,99 cap
M220 BM3	13,58	0,71	0,05	1,00
Yhteensä	205,37	16,32	0,08	1,00

Muuntopiirien tilanteen pätötehon kulutuksen kannalta on ajateltu pysyvän muuttumattomana. Loistehon kulutuksen on ajateltu muuttuvan suositelluissa toimenpiteissä esitettyjen ratkaisujen (ks. 3.2) verran. Näistä arvoista on sitten laskettu uusi $\tan \varphi$ jokaiselle Neste Oilin muuntopiirille, paitsi M120 piireille. M120 kompensoinnit olivat kunnossa ja muut muuntamot eivät kuulu Neste Oilille. Kuten taulukosta 15 nähdään M001

PM1, M001 PM2 ja M130 PM1 muuntopiireissä on vielä parantamisen varaa ennen kuin $\tan \varphi = 0,16$. M037 PM1 tilanne tulee korjaantumaan toisen päämuuntajan ja 6 MVAR:n kompensointipariston myötä. Keskuksissa ja muissa verkon laitteissa on tehokulman mittaus tapahtuu yleensä $\cos \varphi$ kautta, joten taulukoihin 13 ja 15 on laitettu myös tälle arvot helpottamaan vertailua.

Tulevaisuutta ajatellen on hyvä arvioida myös kompensoinnin kustannuksia. Taulukossa 16 esitetään arvio hintoja kompensoinneille eri jännitetasoissa. Arviot on tehty Neste Oilin edustajan kanssa ja ne sisältävät suunnittelun, laitteen hinnan, lähdön kustannukset sekä rakennuskustannukset. Pienjännitelaitteiden oletetaan laitteen mahtuvan nykyisiin tiloihin.

Taulukko 16. Kondensaattoriparistojen hinta-arvioita

Jännitetaso	Teho	Hinta
10 kV	6 MVAR	240 000 €
3 kV	800 kVAR	140 000 €
690 V ja 400 V	300 kVAR	30 000 €

Iso paristo on suhteessa paljon halvempi kuin pieni, jos verrataan hintaa suoraan tehoihin. Pienjännite paristolla saa noin puolet 10 kV:n pariston tehoista samalla hinnalla. Siinä on kuitenkin etuna parempi säätötarkkuus ja se kompensoi ainoastaan tiettyä keskusta tarpeen mukaan. 10 kV:n paristo taas kompensoi keskitetysti koko muuntopiirin loistehoa. 3 kV:n pariston sijoituspaikkoja on Kilpilahdessa ainakin muuntamoissa M002, M028 ja M037. Näistä 3 kV:n keskuksista ei ole mittaustietoja ja paristot ovat suhteessa kaikkein kalleimpia. Kompensoinnin mitoitus tehdään tapauskohtaisesti mitaustiedon perusteella.

Pienjännitteen osalta kannattavat investoinnit listattiin jo aiemmin taulukkoon 14. Siihen kerättiin sellaiset keskuksat, joissa mitattu loisteho oli n. 200 kVAr tai enemmän. Keskuksia, joihin suositeltiin laittamaan uusi estokelaparisto oli yhteensä 18, joiden lisäksi 11 suositeltiin viallisten portaiden korjaamista. Lasketaan näiden investointien hinnat käyttäen kaikissa taulukosta 16 saatavaa 300 kVAr:n hintaa riippumatta siitä tarvitaanko niissä orjaparistoa lisäksi. Tämä johtuu siitä, että nämä paristot asennettaisiin vanhoille paikoille, joten lähdön tekeminen ja suunnittelukustannukset olisivat pienemmät. Investointien hinnaksi saadaan $16 * 30\,000 \text{ €} = 480\,000 \text{ €}$ ja viallisten portaiden korjaukseksi arvioidaan $10\,000 \text{ €} / \text{keskus}$ jolloin niiden hinnaksi tulee $11 * 10\,000 \text{ €} = 110\,000 \text{ €}$. Yhteensä pienjännite investoinnit tekevät siis $480\,000 + 110\,000 = 590\,000 \text{ €}$.

Laskettujen pienjännite investointien hinnalla olisi saanut kaksi 6 MVAR:n keskijänniteparistoa, mutta kun katsotaan muuntopiirien loistehon kulutusta, missään muualla kuin M001 PM2 ja M037 PM1 ei ole lähellekään niin paljon loistehon kulutusta. Lisäksi M037 PM1 on jo tulossa toisen päämuuntajan lisäksi 6MVAR:n paristo. Ainoa järkevä sijoituspaikka 6 MVAR:n paristolle olisi siis M001 PM2.

Neste Oilin alueelle on lähiaikoina tulossa muutoksia muuntopiireihin ja loistehon tarvetta kannattaa arvioida sen jälkeen uudelleen muuttuneissa muuntopiireissä. Loistehomittauksia kannattaa tehdä keskuksiin, joissa tiedetään olevan paljon moottorikuormaa ja sijoittaa niihin tarvittaessa pienjännite kompensointia. Muuntopiireissä on tällä hetkellä niin vähän loistehoa, ettei uusia keskijännite kondensaattoreita välttämättä kannata hankkia kun työssä esitettyjen laskelmien mukaan loistehoikkunassakin pysytään.

5 Loppupäätelmät

Kokonaisuudessaan Kilpilahden alueen loistehotilanne näyttää toimenpiteiden toteuttamisen jälkeen hyvältä ja loissähköikkunan rajoissa pysytään helposti. Loistehoikkunan laskenta on kuitenkin hieman epätarkka, koska vuosiotto on laskettu vuoden ajalta otetuista kantaverkon mittauspisteiden ja generaattoreiden yhteenlasketusta päiväkeskiarvosta. Normaalisti loissähköikkunan laskennassa käytetään edellisvuoden toteutunutta pätötehon ottoa. Vuosiotto laskettiin näin, koska haluttiin tutkia tilannetta, jossa omilla generaattoreilla ei tuoteta sähköä vaan kaikki otetaan kantaverkosta.

Epätarkkuutta tuloksiin tuo myös kompensointiparistojen säätimet. Hämeen Sähkön tekemissä mittauksissa esimerkiksi kompensointiparistoja on ajettu manuaalisesti kiinni kun säätimet ovat viallisia. Tämä tarkoittaa, että normaalisti paristo ei välttämättä kytkeydy verkkoon, vaikka loistehoa olisikin keskuksessa. Muuntopiirien loistehoista piirretyissä kuvaajissa ne keskuksat, joissa on viallinen säädin ottavat loistehoa ylempää, vaikka paristot olisivatkin kunnossa. Muuntopiirien loistehotilannetta kuvaavissa taulukoissa nämä samat keskuksat näyttävät kuitenkin kompensoivan loistehonsa. Taulukoissa keskusten kompensointi saattaa siis näyttää paremmalta kuin todellisuudessa on.

Insinööriyössä on perehdytty Kilpilahden loissähkötilanteeseen muuntopiireittäin ja verrattu niiden tilannetta loissähköikkunaan. Kaikki käytetyt tiedot saatiin Neste Oilin omista järjestelmistä sekä Hämeen Sähkön mittauksista, omia mittauksia työssä ei käytetty. Insinööriyö eteni hyvin ja tarvittavat tiedot saatiin helposti. Tulevaisuutta varten loistehotilanne on kartoitettu päämuuntajien tasolle. Siitä on helppo tarvittaessa jatkaa alemmas niihin muuntopiireihin, joissa loistehoa kuluu enemmän kuin loissähköikkunassa on määritetty.

Lopullisia investointipäätöksiä ei kannata ryhtyä tekemään pelkästään työssä esitettyjen mittausten ja analyysien perusteella. Mittaustieto keskusten loistehotilanteesta pohjautuu Hämeen Sähkön raportteihin ja mittaukset on suoritettu pelkästään keskuksissa, joissa on kompensointilaitteita. Mittausten ulkopuolelle jää paljon keskuksia, joissa loistehoa on, mutta kompensointi puuttuu. Investointi päätösten tueksi kannattaakin suorittaa mittaukset ainakin niissä keskuksissa, joissa tiedetään olevan paljon moottori kuormaa tai muita laitteita, jotka tarvitsevat loistehoa.

Lähteet

- 1 Jaatinen, J. 1991. Pienjänniteverkon kompensointi. Helsinki, Hakapaino Oy
- 2 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Yliaallot ja kompensointi. Tampere, Tammer-Paino Oy.
- 3 Elovaara, J. Haarla, L. 2011. Sähköverkot 2, Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki, Otatieto.
- 4 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2006. Sähköasennukset 2. Tampere, Tammer-Paino Oy.
- 5 ABB Oy. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos. Vaasa.
- 6 Fingrid Oy. 2011. Loissähkön käyttö ja loisreservin ylläpito. Verkkodokumentti. <<http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Kantaverkkopalvelut/Liite%204%20Loiss%C3%A4hk%C3%B6n%20sovellusohje.pdf>>. Luettu 10.1. 2015

