

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Talotekniikan koulutus

Henri Honkanen

LOISTEHON KOMPENSOINNIN TARVE SAIRAALASSA

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2021



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Huhtikuu 2021**  
**Talotekniikan koulutus**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
+358 13 260 600

Tekijä  
Henri Honkanen

Nimeke  
Loistehon kompensoinnin tarve sairaalassa

Toimeksiantaja  
Granlund Joensuu Oy

**Tiivistelmä**

Tämän opinnäytetyön aiheena oli tutkia Pohjois-Karjalan keskussairaalan E-talon ja J2-talon loistehon kompensoinnin tarvetta ja kompensointilaitteiden vaikutusta rakennusten sähkönlaatuun. Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Granlund Joensuu Oy ja työ toteutettiin yhteistyössä Pohjois-Karjalan keskussairaalan kanssa. Työn tavoitteena oli saada tietoa osapuolille kompensoinnin tarpeesta myös tulevaisuuden rakennushankkeita varten.

Työn kohderakennuksissa toteutettiin kahden vuorokauden kestoiset verkkoanalysointimittaukset yhteensä neljästä pääkeskuksesta. Saatuja mittaustuloksia verrattiin standardin SFS-EN 50160 antamiin arvoihin.

Mittausten mukaan molemmissa rakennuksissa on yliaalloja jonkin verran, eikä kompensointiparistoilla ole niihin merkittävää pienentävää vaikutusta. E-talossa on melko reilusti induktiivista loistehoa ja sen nykyiset kompensointiparistot ovat sinne tarpeelliset. J2-talon sähköverkko on sen sijaan selkeästi kapasitiivinen, jolloin kompensointiparistoilla ei ole juurikaan käyttöä.

Kieli  
suomi

Sivuja 42

Asiasanat  
loisteho, kompensointi, yliaallot, sähkön laatu



**THESIS**  
**April 2021**  
**Degree Programme in Building Services Engineering**

Tikkarinne 9  
80200 JOENSUU  
FINLAND  
+ 358 13 260 600

Author (s)  
Henri Honkanen

Title  
The Need for Reactive Power Compensation in a Hospital

Commissioned by  
Granlund Joensuu Oy

**Abstract**

The subject of this thesis was to examine the need for reactive power compensation and how the compensation equipment affects quality of supply in two buildings of North Karelia central hospital. The thesis was commissioned by Granlund Joensuu Oy and it was made in collaboration with North Karelia central hospital. The aim of the thesis was to get information for both Granlund Joensuu Oy and the central hospital about the need for compensation also for future building projects.

Energy analyzer measurements were made in the target buildings from a total of five main power centers. Each of the centers were measured for two days with compensations turned off in the middle of the measurement. Obtained results were then compared with the values given in the standard SFS-EN 50160.

According to the measurements, the number of harmonics in both buildings is quite significant, and the current compensation batteries do not really affect them. There is a lot of inductive reactive power in the E building and its current compensation batteries are essential. The electrical network of the J2 building is very capacitive, and the compensation batteries have very little use there.

Language  
Finnish

Pages 42

Keywords  
Reactive power, compensation, harmonics, quality of supply

## Sisältö

1	Johdanto .....	6
2	Pohjois-Karjalan keskussairaala .....	7
3	Sähkönlaatu ja sen hallinta .....	9
3.1	Loisteho .....	10
3.2	Loistehon kustannukset .....	12
3.3	Yliaallot .....	13
3.4	Jännite- ja virtasärö .....	15
3.5	Kapasiiviset kondensaattoriparistot.....	16
3.6	Induktiivinen kompensointiparisto .....	17
3.7	Yliaaltosuodattimet .....	17
3.8	Varavoimaverkon sähkönlaatu ja kompensointi.....	19
3.9	UPS-verkon sähkönlaatu ja kompensointi .....	20
4	Keskussairaalan kompensointilaitteistot .....	22
4.1	E-talo .....	22
4.2	J2-talo.....	24
5	Mittaustulokset ja tulosten analysointi.....	27
5.1	PKE1 .....	27
5.2	PKE2 .....	30
5.3	PKJ1 .....	33
5.4	PKJ2.....	36
6	Pohdinta.....	39
	Lähteet.....	41

## Lyhenteet

DPF = Displacement Power Factor, perustaajuinen tehokerroin

LED = Light-Emitting Diode, valaisintyyppi

PF = Power Factor, todellinen tehokerroin

THD I = Total Harmonic Distortion I, virran harmoninen kokonaissärö

THD U = Total Harmonic Distortion U, jännitteen harmoninen kokonaissärö

THF = Third Harmonic Filter, kolmannen yliaallon suodatin

UPS = Uninterruptible Power supply, keskeytymätön tehonsyöttöjärjestelmä

VA = Volttiampeeri, näennäistehon yksikkö

VAr = Reaktiivinen voltiampeeri, loistehon yksikkö

W = Watti, pätötehon yksikkö

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön aiheena oli selvittää, kuinka tarpeellista loistehon kompensointi on Pohjois-Karjalan keskussairaalassa. Koska kompensointilaitteet eivät ole vain kompensointia varten vaan niillä on monesti osansa myös yliaaltojen hallinnassa, työssä tutkitaan myös kompensointilaitteiston vaikutusta sähkönlaatuun. Työssä vertaillaan Pohjois-Karjalan keskussairaalan vanhimman laajennuksen, E-talon, ja uusimman laajennusosan, J2-talon, sähkönlaatua ja loistehon kulutusta. Näiden rakennusten käyttöönottovuosilla on väliä tasan 30 vuotta, joten ne ovat oivalliset kohteet tutkia eri aikakausien tekniikan vaikutuksia kompensoinnin tarpeeseen.

Opinnäytetyössä tutustutaan sähkön laatuun, loistehoon, yliaaltoihin ja niiden hallintaan. Työssä käydään lyhyesti läpi kompensoinnista myös varavoima- ja UPS-verkoissa. Työn kohderakennuksissa toteutetaan sähkönlaadun mittaukset ja tutkitaan, onko nykyisillä kompensointiparistoilla vaikutusta sähkön laatuun. Saatuja mittaustuloksia verrataan SFS 50160 -standardin antamiin arvoihin. Opinnäytetyö on toteutettu Granlund Joensuu Oy:n toimeksiannosta, yhteistyössä Siun soten ja Pohjois-Karjalan keskussairaalan kanssa.

Granlund Joensuu Oy on osa vuonna 1960 perustettua Granlund-konsernia. Konsernin kivijalka on taloteknisessä suunnittelussa ja se työllistää vuoden 2021 alussa jo yli 1000 eri alan asiantuntijaa, joista kirjoitushetkellä 50 sijoittuu Granlund Joensuu Oy:hyn. Joensuun toimistolla työskentelee LVI-, sähkö- ja rakennusautomaatiosuunnittelijoita sekä energialaskennan, konsultoinnin ja rakennuttamisen asiantuntijoita. Granlund on markkinajohtaja LVI- sairaala- ja konesalisuunnittelussa. [1.]

## 2 Pohjois-Karjalan keskussairaala

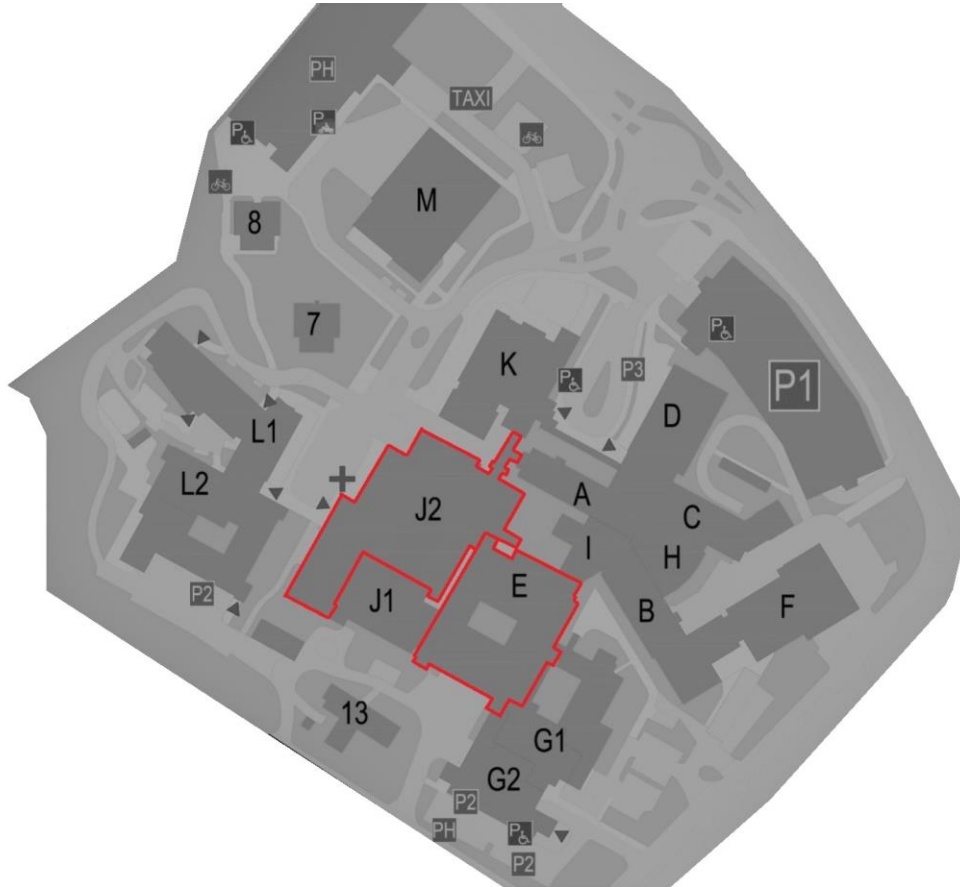
Joensuussa Tikkarinteellä Niinivaaran kaupunginosassa sijaitseva Pohjois-Karjalan keskussairaala on Suomen ensimmäinen keskussairaala. Sairaala on avattu vuonna 1953, jolloin se koostui neljän siiven muodostamasta kokonaisuudesta. Rakennuksen pääosa, 12 kerroksinen 1A, yhdistyi kolmeen muuhun siipeen: 1B, 1C ja 1D. [2, 48.]

Lähes seitsemän vuosikymmentä myöhemmin sairaalan ensimmäiset siipirakennukset ovat kaikki yhä käytössä. Aikojen saatossa keskussairaalaa on toki peruskorjattu ja laajennettu säännöllisesti usean rakennuksen verran, joista viimeisimpänä loppuvuodesta 2019 valmistunut J2-talo. Nykyään Pohjois-Karjalan keskussairaala on ollut pitkään Suomen tuottavimpien sairaaloiden joukossa, ja sieltä löytyykin kaikki tärkeimmät sairaanhoidon erikoisalut avosydän- ja neurokirurgiaa lukuun ottamatta [3]. Kuvassa 1 on keskussairaala kuvattuna ilmasta vuonna 2020.



Kuva 1. Pohjois-Karjalan keskussairaalan ilmakuva. Keskellä korkeimpana sairaalan päärakennus, A-talo (Kuva: Heikki Haapalainen / Yle).

Kuvassa 2 on sairaalan kartta, jossa näkyvät opinnäytetyön kohteena olevat rakennukset E- ja J2-talo. Ne ovat keskussairaalan ensimmäinen ja viimeisin laajennus. Rakennusten käyttöönottovuosilla on väliä tasan 30 vuotta. Niinpä niistä voidaan oivallisesti vertailla, vaikuttaako tekniikan ikä sähkön laatuun.



Kuva 2. Tikkamäen sairaala-alueen kartta, josta rajattu punaisella työn kohteena olevat J2- ja E-talot [3].

J2-talo on keskussairaalan uusin laajennusosa. Se valmistui loppuvuodesta 2019 ja otettiin kokonaisuudessaan käyttöön keväällä 2020. J2-talossa sijaitsee sairaalan yhteispäivystys. Muita J2-talossa olevia palveluita ovat ihotautien ja allergologian palvelut, lasten- ja nuortentautien palvelut, vatsakeskus sekä erilliset teho-osastot aikuisille ja vastasyntyneille. [3.]

E-siivessä on toiminnassa mm. anestesia- ja leikkaustoimintaa, lapsettomuuspoliklinikka, sekä ortopedia- ja röntgenpalvelut. Näiden lisäksi on erilaisia kirurgisia palveluita kuten käsi-, plastiikka-, rintaelin-, verisuoni- ja yleiskirurgia. [3.]



30 vuoden iässä E-talon sekä tilat että varsinkin talotekniset järjestelmät alkavat kuitenkin tulla teknisen käyttöikänsä päähän. Koska tilat on suunniteltu silloisten käytäntöjen mukaisesti, eivät ne enää täytä nykyaikaisen sairaalan tarpeita. E-siipi onkin tarkoitus peruskorjata kokonaan lähivuosina. Saneerauksen on määrä valmistua vuoteen 2026 mennessä, minkä jälkeen se muodostaa J-kokonaisuuden (J1 ja J2) kanssa niin sanotun kuumen sairaalan. Kuumaksi sairaalaksi kutsutaan sairaalan sellaista aluetta, jossa sijaitsevat sairaalan kaikki tärkeimmät toiminnot. Pohjois-Karjalan keskussairaalan tapauksessa tämä tarkoittaa ympärivuorokautista päivystystä, synnytysaleja, tehohoito- ja valvontaa, leikkaustoimintaa ja kuvantamistutkimuksia. [4.]

### **3 Sähkönlaatu ja sen hallinta**

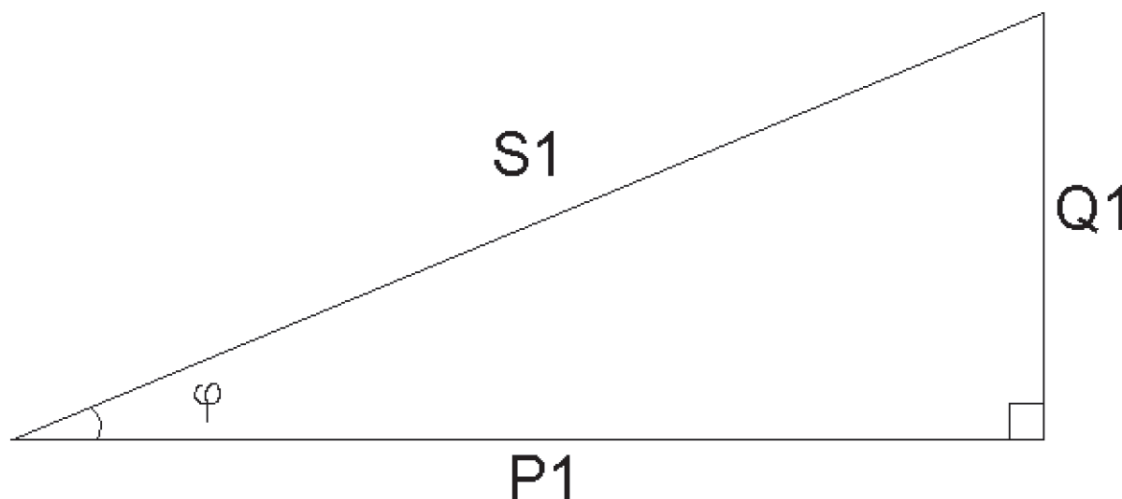
Sähkönlaadulla tarkoitetaan yleisesti sähkön jännitteen ja taajuuden ominaisuuksia. Sähkönlaatu määrittää mm. sen, toimivatko sähkölaitteet oikein ja kestävätkö ne suunnitellun käyttöikänsä päähän. Verkkoyhtiö on vastuussa jakelijännitteen laadusta käyttäjän liityntäpisteeseen asti standardin SFS-EN 50160 mukaisesti. Loistehon ja yliaaltojen hallinta liittymiskohdasta eteenpäin on käyttäjän vastuulla.

Viime vuosien jatkuvana trendinä on ollut yliaaltoja synnyttävien epälineaaristen kuormitusten käytön lisääntyminen. Epälineaarinen kuorma tarkoittaa laitetta, joka ottaa verkosta tai syöttää verkkoon perustaajuisesta ja sinimuotoisesta poikkeavia virtoja, jotka taas aiheuttavat perustaajuudesta poikkeavia jännitteitä, eli jännitesäröä. Yleisimpiä epälineaarisia kuormia ovat esimerkiksi tietokoneet, tasasuuntaajat, kodinelektroniikka, elektronisella liitäntälaitteella varustetut valaisimet, sähköautojen latauslaitteet, UPS-laitteet ja käytännössä kaikki elektroniikkaa sisältävät sähkölaitteet. On odotettavissa, että tulevaisuudessa niiden käyttö lisääntyy entisestään, jolloin sähköverkkojen ongelmat lisääntyvät. [5, 9.]

Loistehon ja yliaaltojen hallitsemiseksi on olemassa erilaisia ratkaisuja. Näitä ovat esimerkiksi erilaiset kondensaattoriparistot ja yliaaltosuodattimet. Kumpiakin näistä on useita erityyppisiä hieman erilaisiin käyttötarkoituksiin. Osa paristoista on tarkoitettu pelkästään loistehon kompensointiin, kun taas osalla niistä on myös yliaaltoja suodattava kyky. Samoin jotkut yliaaltosuodattimet on tarkoitettu pelkkien yliaaltojen hallintaan, ja toiset samalla myös kompensointiin.

### 3.1 Loisteho

Perustaajuisten sähkötehon suuret ovat pätöteho (tunnus  $P$ , yksikkö  $W$ ), loisteho ( $Q$ ,  $VAR$ ) ja näennäisteho ( $S$ ,  $VA$ ). Lisäksi pätöteho ja näennäisteho muodostavat kulman, jonka kosini on tehokerroin  $\cos \varphi$ . Tehojen välisiä suhteita havainnollistetaan helpoiten tehokolmiolla (kuva 3). Tunnuksen perässä oleva numero 1 tarkoittaa tehon perustaajuisuutta.



Kuva 3. Perustaajuinen tehokolmio [6].

Pätöteho on kuorman varsinaisen työn tekevä osa. Loisteho ei tee työtä, vaan se liikkuu sähköverkossa edestakaisin kuormittaen sähköverkkoa. Loisteholla on myös tarkoituksensa, koska jotkin laitteet tarvitsevat toimiakseen pätötehon lisäksi loistehoa. Tällaisia laitteita ovat mm. muuntajat, sähkömoottorit ja purkauslamput. Näissäkin laitteissa työn tekee edelleen pätöteho, mutta loistehoa tarvitaan magneettikentän ylläpitämiseen. [6.]

Sähköverkko mitoitetaan luonnollisesti aina näennäistehon mukaan, jolloin mitoitukseen saadaan mukaan todellinen kokonaisteho. Kuvasta 3 nähdään, että loistehon osuuden kasvaessa myös näennäisteho kasvaa, sekä pätö- ja näennäistehon välinen kulma suurenee. Se tarkoittaa tehokertoimen alenemista. Tämä johtaa virran kasvuun, minkä seurauksena johtimien kuormitettavuus kasvaa. Se taas tarkoittaa suurempia johtimien poikkipinta-aloja ja suuremmille virroille mitoitettuja komponentteja, mistä aiheutuu ylimääräisiä kustannuksia.

Loistehoa on olemassa kapasitiivista ja induktiivista. Ne ovat vastakkaisessa vaiheessa keskenään, eli samassa verkossa ollessaan ne kumoavat toisensa. Induktiivista loistehoa kutsutaan yleisesti loistehon kulutukseksi ja kapasitiivista loistehon tuottamiseksi. Loistehon kompensointi perustuu tähän vastakkaisen loistehon kumoavaan vaikutukseen. Kompensoidessa siis tuotetaan itse vastakkaisista loistehoa, kuin mitä verkossa on. [7.] Kompensoinnilla pyritään saamaan näennäistehon arvo lähemmäksi pätötehoa, eli parantamaan tehokerrointa. Tehokertoimen tavoitearvona on yleensä noin 0,99.

Tehokerroin on pätötehon ja näennäistehon suhde. Tehokerrointa käsiteltäessä on oltava tarkkana, tarkoitetaanko DPF:ää vai PF:ää. DPF on perustaajuinen tehokerroin, eli perustaajuinen pätötehon ja perustaajuinen näennäistehon suhde. DPF ei ota huomioon yliaaltojännitteitä tai -virtoja. Puhuttaessa ns. todellisesta tehokertoimesta PF, mukaan otetaan säröteho D. Eri lähteet määrittelevät särötehon hieman eri tavoin, mutta STUL [5, 17] määrittelee sen kaavalla 1:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (\text{kaava 1})$$

jossa

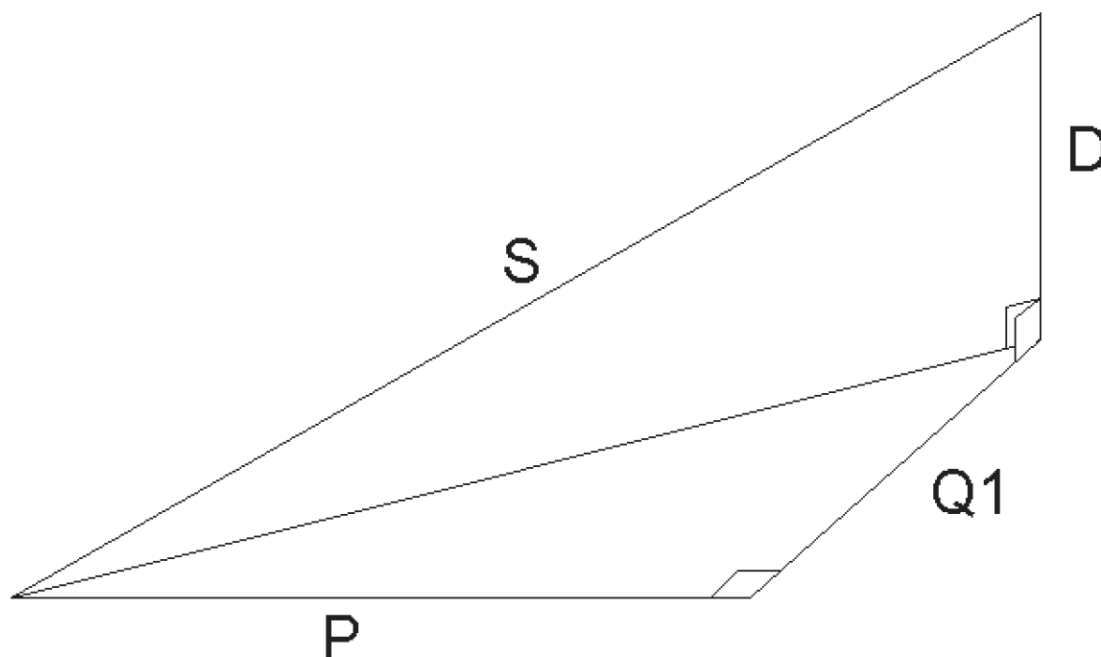
D=säröteho

S=kokonaisnäennäisteho

P=kokonaispätöteho

$Q_1$ =perustaajuinen loisteho

Tällöin säröteho  $D$  sisältää yliaaltotehoja ja eritaajuisten virtojen ja jännitteiden tuloja (loistehoa), mutta ei yliaaltopätötehoja. Kuvassa 4 on havainnollistettu tehojen summautumista. Särötehon osoitin on 90 asteen kulmassa perustaajuiseen tehokolmioon nähden. [5, 17.]



Kuva 4. Särötehon sisältävä tehokolmio [6].

### 3.2 Loistehon kustannukset

Suurin loistehon aiheuttama kustannuserä on loistehomaksut. Loistehomaksujen veloitusperiaatteet vaihtelevat paljon jakeluverkkoyhtiöittäin. Joensuu ja siten myös Pohjois-Karjalan keskussairaala kuuluu Caruna Espoo Oy:n jakeluverkon alueelle. Caruna Espoo Oy tarjoaa kahta erilaista keskijänniteverkon tuotetta: Tehosiirto 1, joka soveltuu kohteisiin, joissa on yli 600 kW:n tehontarve ja Tehosiirto 2, joka puolestaan on tarkoitettu kohteisiin, joissa tehontarve on yli 1000 kW ja vuosittainen kulutus on yli 5000 MWh. [8.]

Tehomaksun mittausjakso on yksi tunti. Periaatteena on, että maksut määräytyvät kuukausittaisen huipputehon mukaan. Tehomaksun veloitus on kuitenkin vähintään 200 kW:n huipputehoa vastaava arvo. Loistehomaksu koostuu kuukausittaisesta loistehohuipusta, josta on vähennetty ilmaisosuus. Ilmaisosuus on 20 % saman kuukauden pätötehuipusta. [8.] Huomion arvoista on, että loistehon

annosta ja otosta veloitetaan yhtä paljon. Tämä on hyvä muistaa ylikompensoinnin varalta. Tehosiirto 2 keskijänniteliittymän hinnasto on nähtävillä kuvassa 5.

Tehosiirto 2 KJ (20 kV toimitus)		
	alv 0 %	alv 24 %
Perusmaksu €/kk .....	1550,00	1922,00
Tehomaksu €/kW, kk .....	1,90	2,36
Loistehomaksu otto €/kVAr, kk .....	4,05	5,02
Loistehomaksu anto €/kVAr, kk .....	4,05	5,02
Päiväsiirto, talvi c/kWh * .....	1,05	1,30
Muun ajan siirto c/kWh .....	0,61	0,76

\*) Päiväsiirto, talvi: ma-la klo 7-22 ajalla 1.11.-31.3.

Kuva 5. Caruna Espoo Oy:n keskijänniteliittymän hinnasto [8].

Lasketaan esimerkki loistehomaksun määräytymisestä. Kuvitellussa tilanteessa, jossa kuukausittainen tehohuippu on 1500 kW ja loistehohuippu 500 kVAr, loistehomaksun suuruus olisi:

$$500 \text{ kVAr} - (0,2 * 1500 \text{ kW}) = 200 \text{ kVAr}$$

$$\Rightarrow 200 \text{ kVAr} * 4,05 \text{ €/kVAr} = 805 \text{ e, alv 0\%}$$

Kuten yllä olevasta esimerkistä nähdään kustannus on merkittävä, vaikka veloitus on ainoastaan 40 % todellisesta loistehohuipusta. Jos vastaavanlainen tilanne kuviteltaisiin vuoden jokaiselle kuukaudelle, olisi loistehomaksujen yhteissumma lähes 10 000 euroa.

### 3.3 Yliaallot

Loistehon lisäksi toinen sähköverkkoa kuormittava ongelma on yliaallot. Yliaallot luokitellaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoninen yliaalto on sähköverkon nimellistaajuus (Suomessa 50 Hz) kerrottuna kokonaisluvulla. Kyseinen kokonaisluku on samalla yliaallon järjestysnumero, esim. toinen yliaalto 100 Hz, kolmas yliaalto 150 Hz, yhdeksäs yliaalto 450 Hz ja niin edelleen.

Kaikki muut taajuudet ovat epäharmonisia yliaaltoja. Epäharmoniset yliaallot ovat selvästi harvinaisempia ja vähemmän haitallisia kuin harmoniset yliaallot. [5, 13.]

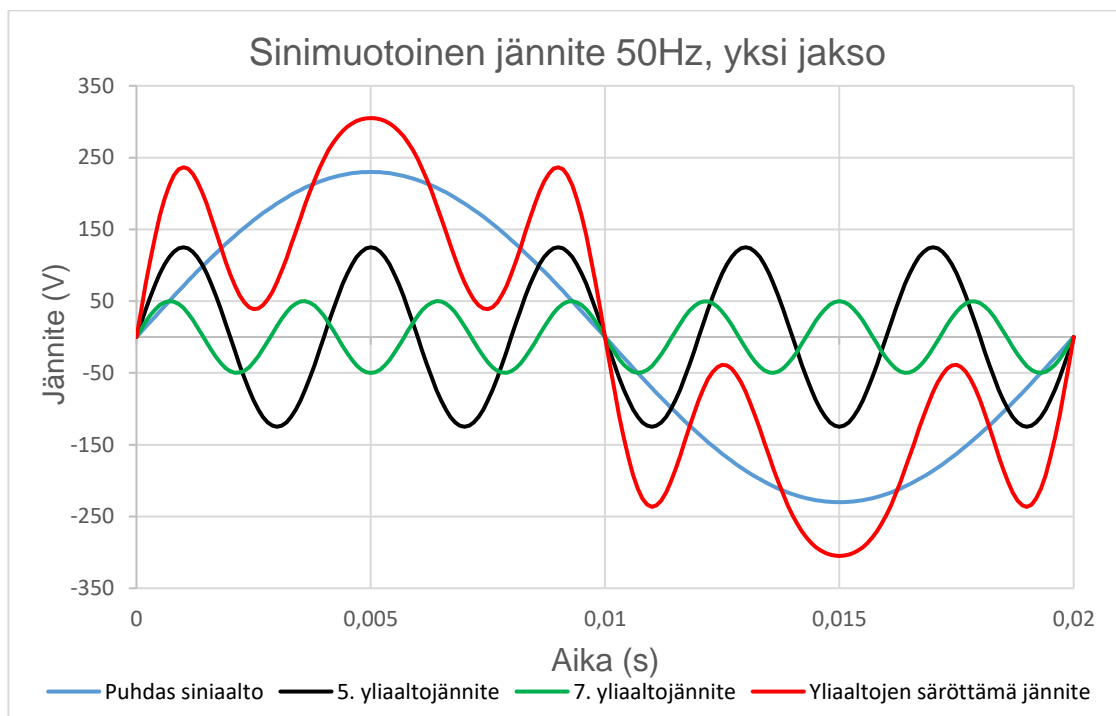
Yleisen määritelmän mukaan yksivaiheinen kuormitus synnyttää kolmatta yliaalltoa ja sen kerrannaisia, kun taas kolmivaiheinen kuormitus synnyttää kaikkia muita yliaaltoja. Sähköverkon yleisimmät yliaallot ovat kolmas, viides ja seitsemäs yliaalto. Tavallisesti yliaallot kumoutuvat verkon tähtipisteissä, mutta kolmas ja muut kolmella jaolliset parittomat yliaallot ovat tästä poikkeus. Ne summautuvat nollajohtimeen, mikä saattaa aiheuttaa nollajohtimen ylikuormittumisen. [5, 32-33.]

Pienjänniteverkossa nollajohdin ei perustaajuisella symmetrisellä kolmivaihekuormalla kuormitu lainkaan. Epäsymmetrisellä kuormallakaan se ei kuormitu kuin korkeintaan eniten kuormitetun vaihejohtimen verran. Kolmella jaolliset ja parittomat yliaallot summautuvat nollajohtimeen, jolloin nollajohtimen virran on mahdollista kasvaa vaihejohtimen virtaa suuremmaksi. Esimerkiksi toimistokiinteistöissä on suoritettu käyttötilanteiden mittauksia, joiden mukaan nollajohtimen virta voi olla jopa 2-3 kertaa vaihevirtaa suurempi. Nykyisten määräysten mukaan, kun vaihejohtimen poikkipinta on yli 16 Cu tai 25 Al, sallitaan nollajohtimen poikkipinnaksi tästä puolet. Koska nollajohdinta ei yleensä suojata ylivirtasuojalla, tällaisissa tilanteissa on pahimmillaan jopa tulipalon riski. [5, 32-33.]

Nollajohtimen mitoittaminen voikin uudiskohteissa osoittautua haasteelliseksi, koska vaiheiden kuormituksia ei tarkkaan tiedetä. Myös verkon yliaaltopitoisuutta on mahdotonta tietää etukäteen. Sen sijaan korjausrakentamiskohteissa voidaan sähköverkon mittausten avulla ottaa kantaa olemassa olevien nollajohtimien kokoon, ja ne voidaan myös tarvittaessa mitoittaa uudelleen. Standardin SFS 6000 "Pienjännitesähköasennukset", osassa 5-52: "Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät." on käsitelty nollajohtimen mitoitusperiaatteita. [9.]

### 3.4 Jännite- ja virtasärö

Yliaaltoja aiheuttavat epälineaariset kuormat aiheuttavat jännitteen säröytymistä. Jännite tai virta on säröytynyttä silloin, kun sen käyrämuoto ei ole täysin sinimuotoinen. Kuvassa 6 on esimerkki yliaaltojen summautumisesta puhtaaseen siniaaltoon.



Kuva 6. Yliaaltojännitteen summautuminen puhtaaseen siniaaltoon.

Yleensä säröllä tarkoitetaan harmonista kokonaissäröä, THD. Virran kokonaissäröstä käytetään lyhennettä THD I, ja jännitteen THD U. Harmoninen kokonaissärö on kaikkien yliaaltojen suhdearvo perustaajuuteen nähden. Se lasketaan yleisesti 40 ensimmäisen harmonisen yliaallon osalta. Tätä suurempien yliaaltojen osuus on yleensä mitättömän pieni ja niiden mittaus on epäluotettavaa, eikä niitä siksi ole järkevää tarkastella. [10.] Taulukossa 1 on esitetty harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot verkon liittämiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustaajuisesta jännitteestä. THD I:n arvoihin standardi SFS-EN 50160 ei ota kantaa.

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset		Järjestyslu- ku h	Suhteelli- nen jännite ( $U_h$ )
Järjestyslu- ku h	Suhteelli- nen jännite ( $U_h$ )	Järjestyslu- ku h	Suhteelli- nen jännite ( $U_h$ )		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi. Kokonaissärö THD 8 %.

Taulukko 1. Yliaaltojännitteiden sallitut arvot. 25 ensimmäistä harmonista yliaaltoa [10].

### 3.5 Kapasitiiviset kondensaattoriparistot

Kondensaattoriparistoja on olemassa erityyppisiä, hieman eri toimintaperiaattein. Yleisimpiä ovat perinteiset kondensaattoriyksiköt, rinnakkais- ja sarjakondensaattoriparistot ja estokelaparistot. Näitä on olemassa kiinteinä, sekä säädettävänä yksikköinä. Loistehonsäätäjällä varustettu keskitetty automaattikaparisto on yleensä varmin valinta. [5, 47-51.]

Jos sähköverkossa esiintyy yliaaltoja, kannattaa kompensointiin käyttää tavallisen pariston sijaan estokelaparistoa tai yliaaltosuodatinta. Tavallisen kompensointipariston kapasitanssi voi muodostaa verkon induktanssin kanssa rinnakkaisresonanssipiirin. Pahimmassa tapauksessa pariston viritystaajuus osuu jonkun yliaaltotaajuuden kohdalle ja yliaaltovirrat voivat kasvaa kovimmillaan jopa 20-kertaisiksi. Tämän takia perinteinen kondensaattoriparisto ei sovellu yliaaltopitoiseen verkkoon. [11.]

Estokelaparisto koostuu porraskohtaisista, sarjaan kytketyistä kondensaattoreista ja kuristimista. Pariston kondensaattorit mitoitetaan halutun kompensointi-



tehon mukaisesti. Kuristimien induktanssit mitoitetaan niin, että resonanssitaajuus muodostuu jollekin epäharmoniselle taajuudelle. Suomessa yleisin tähän käytetty viritystaajuus on 189 Hz. Estokelapariston tarkoitus ei ole toimia varsinaisena yliaaltosuodattimena, vaikka sillä onkin jännitesäröä pienentävä vaikutus. Estokelapariston etuna on myös merkittävästi pienemmät kytkentävirtapiikit, kuin ilman estokelaa varustetussa kondensaattoriparistossa. [11.]

### **3.6 Induktiivinen kompensointiparisto**

Induktiivisen kompensointipariston toimintaperiaate on sama kuin sen kapasitiivisen vastineen, joskin sen käyttö on huomattavasti harvinaisempaa. Perinteisen pariston kondensaattoreiden tilalla on tässä tapauksessa erikoisvalmisteisia keloja/kuristimia. Induktiivista kompensointiparistoa käytetään, jos kohteen verkko onkin kapasitiivinen. Kapasitiivista kuormaa aiheuttavat esimerkiksi LED-valaistus, suuret määrät tyhjäkäyviä kaapeleita, tai aurinkovoimalan laitteet pilvisellä säällä tai yöllä. Induktiivinen paristo koostuu sopivasta yhdistelmästä 5 kVARin, 10 kVARin tai 15 kVARin kompensointiportaita. Portaita ohjataan loistehonsäätimellä. [12.]

### **3.7 Yliaaltosuodattimet**

Yliaaltojen hallintaan on olemassa erityisiä yliaaltosuodattimia. Yliaaltosuodattimet jaetaan yleisesti passiivisiin ja aktiivisiin suodattimiin. Passiivista suodatinta kutsutaan myös imupiiriksi. Imupiiri on sarjaresonanssipiiri, joka muodostaa tietyille yliaaltovirralle pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Koska imupiiri on perustaajuudeltaan kapasitiivinen, se toimii samalla loistehon kompensoijana. [13.]

Jos suodatettavia yliaaltoja on vain yksi, yksinkertaisin ratkaisu on mahdollisimman lähelle kyseisen yliaallon taajuutta mitoitettu imupiiri. Tällaisia suodattimia on mahdollista kytkeä rinnan useamman yliaaltotaajuuden poistamiseksi, mutta se ei yleensä ole kovinkaan kustannustehokasta. Imupiiriin perustuva suodatin

on mahdollista virittää myös kahdelle, korkeintaan kolmelle eri yliaaltotaajuudelle. Jos suodatettavia yliaaltoja on enemmän kuin kolme, on ratkaisuna laajakaistainen suodatin. Laajakaistainen suodatin on ylipäästösuodatin, eli se vähentää kaikkia valittua taajuutta suurempia yliaaltotaajuuksia. [13.]

Koska kolmas yliaalto eroaa ominaisuuksiltaan muista yliaalloista, on sen suodattamiseksi olemassa omanlaisensa suodatin, THF. THF on kolmannen yliaallon torjumiseen erittäin tehokas laite, koska se poistaa ongelman lähes kokonaan. THF:n asennuspaikka eroaa muista suodattimista, ja se on riippuvainen käytetystä sähkönjakelujärjestelmästä. TN-S järjestelmässä, jossa on erilliset nolla- ja suojamaajohtimet, suodatin asennetaan nollajohtimeen. Jos käytössä on TN-C järjestelmä, jossa on yhdistetty nolla- ja suojamaajohdin, PEN-johdin, suodatin asennetaan muuntajan tähtipisteeseen. TN-C-S järjestelmässä, jossa osa verkosta on toteutettu nelijohtimisena ja osa viisijohtimisena, THF asennetaan joko muuntajan tähtipisteeseen tai TN-S osan nollajohtimeen. Asennettaessa nollajohtimiin tulee varmistua, että järjestelmä on puhtaasti TN-S. Myös vikavirtasuojaus on suositeltavaa. [14.]

Passiivisten suodattimien lisäksi vaihtoehtona on myös aktiivinen suodatin. Se on tehopuolijohteilla toteutettu säädettävä yliaaltovirtalähde, joka kykenee myös portaattomaan loistehon säätöön. Aktiivisuodattimen toiminta perustuu sen kykyyn tunnustella verkon yliaaltoja ja syöttää verkkoon vastakkaisessa vaiheessa olevia yliaaltoja, jolloin ne kumoavat toisensa. Aktiivisuodatin on passiivisuodattinta tehokkaampi ja yhdellä suodattimella voidaan suodattaa jopa 20 eri yliaaltotaajuutta, aina järjestysnumeroltaan 50:een asti. [13] Muita aktiivisuodattimen etuja ovat mm. rinnakkaisresonanssivaaran välttäminen ja pienempi tilantarve. Se kykenee myös kolmella jaollisten parittomien yliaaltojen suodattamiseen. Aktiivisuodatin on passiivista versiota merkittävästi kalliimpi ratkaisu, eikä sen takia läheskään niin yleinen. [5, 60.]

### 3.8 Varavoimaverkon sähkönlaatu ja kompensointi

Varavoimaverkko, eli varmennettu sähköverkko on yleensä dieselgeneraattorilla tuotettu sähköverkko. Varavoimalaitoksella tuotetulle sähkön laadulle on annettu vaatimukset eri kuormitusilanteille standardissa ISO 8528-5. Sen mukaan varavoimakoneikot jaetaan neljään suorituskykyluokkaan, G1-G4. Taulukossa 2 on eritelty luokkien olennaisimmat vaatimukset.

Ominaisuus	G1	G2	G3
taajuuden droop (alenema, kun teho 0 % $\Rightarrow$ 100 %)	8 %	5 %	3 %
taajuuden sallittu vaihteluväli vakiintuneessa syöttötilanteessa	$\pm 2,5$ %	$\pm 1,5$ %	$\pm 0,5$ %
taajuuden sallittu alenema äkillisessä kuorman lisäyksessä	-15 %	-10 %	-7 %
taajuuden asettumisaika	< 10 s	< 5 s	< 3 s
jännitteen sallittu vaihteluväli vakiintuneessa syöttötilanteessa	$\pm 5$ %	$\pm 2,5$ %	$\pm 1,0$ %
jännitteen sallittu alenema äkillisessä kuorman lisäyksessä	-25 %	-20 %	-15 %
jännitteen asettumisaika	< 10 s	< 6 s	< 4 s

Taulukko 2. Varavoimakoneen suorituskykyluokkien vaatimukset [15].

G1-luokka soveltuu yleisiin tarpeisiin, kuten valaistus. G2-luokan generaattorit soveltuvat lähes verkkosähkön vaatimusten mukaisiin käyttöihin, kuten valaistusjärjestelmät ja moottorit. G3-luokka on korkeatasoista taajuus- ja jännitetasoa vaativia laitteita varten, kuten telekommunikaatiolaitteet. Paras luokka G4 on suositeltu luokka tietokonekäyttöihin. Standardi ei määrittele G4-luokan vaatimuksia, vaan ne määritellään jokaisessa tapauksessa erikseen koneikon valmistajan ja asiakkaan välillä. Yleisimmin tullaan toimeen luokkien G2 ja G3 varavoimakoneilla. [15.]

Jos varavoimaverkon kuormitus on suurelta osin epälineaarista, kuten tehoelektroniikkaa, voi se aiheuttaa merkittäviä ongelmia verkon laitteille tai generaattorin jännitteensäätimelle. Tarkkaa rajaa epälineaarisen kuorman määrälle on mahdotonta antaa. Nyrkkisääntönä voidaan pitää häiriöiden olevan todennäköisiä, kun epälineaarista kuormaa alkaa olla puolet varavoimakoneikon kuormasta. Tästä syystä verkkoon voi olla tarpeellista lisätä yliaaltosuodattimia- tai vaimentimia. [15.]

Jos varavoimakone syöttää UPS-laitteita, jotka ovat varustettu aktiivisilla suodattimilla, tulee muistaa UPS:n staattisen ohituskytkimen vaikutus. Jos UPS-laitetta jostain syystä käytetään ohitusyötöllä varavoimakäytön aikana, muuttuu koko UPS-laitteen perässä oleva kuormitus suodatetusta suodattamattomaksi. Tämä voi ennestään lisätä varavoimaverkon ongelmia. Potentiaalisen ongelman estämiseksi kannattaa harkita lukitusta staattisen ohituksen estämiseksi varavoimakäytön aikana. [15.]

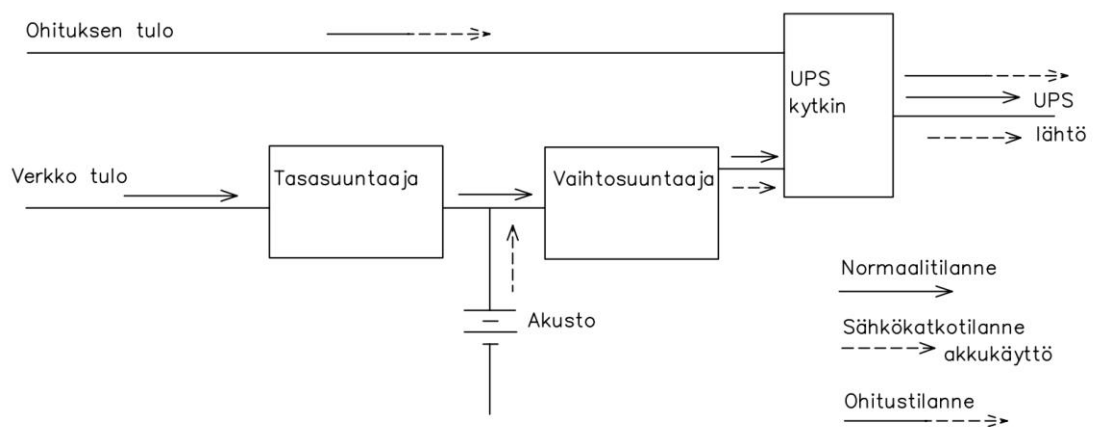
Varavoimakäytön aikaisen kompensoinnin kanssa tulee olla tarkkana. Jos varavoimakoneen kuormitus alkaa muuttua kapasitiiviseksi, joutuu sen jännitesäädin pienentämään koneen magnetointia oikean jännitetason säilyttämiseksi. Jos kapasitiivinen virta kasvaa liian suureksi ja magnetointi pienenee alle stabiilisuusrajan, varavoimakone pysähtyy. Tällainen tilanne voi aiheutua ylikompensoinnista. Jos kompensointilaitteiston säädin on vikaantunut, tai siinä on viivästetty portaiden vähennysohjaus, verkko voi ylikompensoitua reilustikin. [15.]

Toinen kompensoinnista johtuva mahdollinen ongelmatilanne on kompensointikondensaattoreiden ja generaattorin yhdessä muodostamat rinnakkaisresonanssipiirit. Ne vahvistavat resonanssitaajuisia yliaaltoja, mikä johtaa sähkön laadun heikkenemiseen. Varavoimakäytössä resonanssi esiintyy yleensä normaalia verkkoa alemmilla taajuuksilla, minkä takia varavoimakäyttöön siirryttäessä yliaaltojen vaikutukset voivat olla merkittävät. Näiden syiden takia keskitetty kompensointi on suositeltavaa liittää normaaliverkon pääkeskuksiin. Silloin kompensointi kytkeytyy pois käytöstä varavoimakonekäytön alkaessa. [15.]

### **3.9 UPS-verkon sähkönlaatu ja kompensointi**

UPS on keskeytymätön tehonsyöttöjärjestelmä. UPS on erillinen laite, joka syöttää häiriötöntä ja katkeamatonta vaihtosähköä sähköverkon kriittisille laitteille. UPS:n syöttämät laitteet saavat normaalitilanteessa sähkönsä UPS:ää syöttävästä verkosta, yleensä varavoimaverkosta. Häiriötilanteessa, jossa UPS:n sähkönsyöttö keskeytyy, UPS alkaa syöttää sähköä sen sisäisestä akkujärjestelmästä. [16.]

Sähkönlaadun ja toimintavarmuuden kannalta paras UPS-tyyppi on ns. kahden muunnoksen UPS. Tällainen UPS toimii itsessään eräänlaisena sähkönlaadun suodattimena. Sen toimintaperiaatteena on (kuva 6), että kuormaa syöttää aina vaihtosuuntaaja riippumatta UPS:n syötön tilasta. Koska akusto on kytketty tasasuuntaajan kanssa rinnan, ei akkukäyttöön siirtyminen näy lähtöpäässä millään tavalla. Kahden suuntaajan tekniikan ansiosta kuorma saa aina nimellisen jännitteen ja taajuuden riippumatta UPS:ää syöttävän verkon jännitteen ja taajuuden vaihteluista. [16.]



Kuva 7. Kahden muunnoksen UPS-laitteen toimintaperiaate [16].

UPS-varmennetut kuormitukset ovat yleensä epälineaarisia. Varmennettuja kuormia voivat olla esim. kaikki tasajännitekäyttöiset laitteet kuten tietokoneet, palvelimet, sähkölaitteiden tehonlähteet ja muu elektroniikka. Ne aiheuttavat syöttävään verkkoon yliaaltoja. UPS-laitteisiin on saatavilla lisäksi erityisiä yliaaltojen suodattimia, joilla UPS-laitteen syöttävään verkkoon aiheuttama särövirta jää alle 5 %. Joillakin UPS-laitteilla tämä toteutuu myös ilman lisäsuodattusta. [17.]

Nykyaikaiset UPS-laitteet pystyvät tuottamaan siihen kytketyn kuorman vaatiman loistehon käytännössä kokonaan itse, eikä niille tarvitse järjestää erillistä kompensointia. UPS-laitteen syötön tehokerroin on usein hyvin korkea, noin 0,97-0,99. [17.]

On hyvä muistaa, että UPS-laite suodattaa yliaaltoja vain, kun se on käytössä. Ohitustilanteessa häiriöt näkyvät syöttävässä verkossa suodattamattomina. Toinen huomioitava asia on, että UPS-laitteen huoltotilanteessa loisteho joudutaan ottamaan verkosta, jolloin loisvirran aiheuttama kokonaisvirran kasvu kannattaa huomioida ainakin johtojen mitoituksissa. [17.]

## **4 Keskussairaalan kompensointilaitteistot**

Pohjois-Karjalan keskussairaalassa varavoimaverkko saa normaalissa käyttötilanteessa sähkönsyöttönsä normaaliverkosta. Tällöin normaaliverkon pääkeskuksiin kytkettyinä kompensointiparistot vaikuttavat koko rakennuksen sähköverkkoon. Normaaliverkon katketessa ja siirryttäessä varavoimakäyttöön kompensointiparistot kytkeytyvät pois päältä.

### **4.1 E-talo**

E-taloa palvelee kaksi normaaliverkon pääkeskusta, PKE1 ja PKE2. Kumpaankin pääkeskukseen on kytketty samanlaiset Tampereen kondensaattoritehdas Oy:n valmistamat estokelaparistot, QE1 (kuva 8) ja QE2. Paristojen ainoa keskinäinen ero on niiden portaiden määrissä. PKE1 on nimellisvirraltaan 3150 A ja siihen kytketty estokelaparisto on kytketty 3x630 A lähtöihin. PKE2:n nimellisvirta on 1600 A ja paristo on kytketty 3x500 A lähtöihin.



Kuva 8. PKE1:een kytketty lattialla seisova estokelaparisto, QE1.



Kuva 9. QE1:n tyyppikilpi

Kuvassa 9 olevasta kondensaattoripariston tyyppikilvestä on nähtävillä sen perustiedot. QE1:n tapauksessa 300 kVarin maksimikompensointiteho on jaettu kuuteen portaaseen, joita ohjataan pariston ovesa olevalla loistehonsäätimellä (kuva 10). Kaksi ensimmäistä porrasta ovat 25 kVarin kokoisia ja loput neljä 50 kVaria. QE2 on muilta QE1:tä vastaava, mutta siinä on yksi 50 kVarin porrass vähemmän. Tämän takia myös niiden nimellisvirrat poikkeavat toisistaan hieman.



Kuva 10. Loistehonsäädin BLR-CX.

Loistehonsäädin ohjaa kompensointiportaita päälle ja pois sähkökeskuksessa olevan mittauksen perusteella. Säätimeistä nähdään kaikki senhetkiset perusmittaukset, kuten jännitteiden, virtojen, tehojen, tehokertoimen ja taajuuden arvot. Lisäksi säätimeistä löytyy käytössä olevat portaat, harmonisten yliaaltojen arvot sekä THD.

## 4.2 J2-talo

J2-talon kompensointi on toteutettu E-talon tapaan automaattisilla estokelapariistoilla. Kompensointipariistoja on sielläkin kaksi, Nokian Capacitors Oy:n valmistamat 200 kVARin tehoisista master- ja slave-osista koostuvat KOMPJ1 ja KOMPJ2 (kuva 11) ja ne ovat liitetty rakennuksen kahteen normaaliverkon pääkeskukseen, PKJ1 ja PKJ2. Molemmilla pääkeskuksilla päästään siis enintään 400 kVARin kompensointitehoon.





Kuva 11. PKJ2:n estokelaparisto KOMPJ2.

NOKIAN CAPACITORS		NOKIAN CAPACITORS	
PJ-ESTOKELAPARISTO		PJ-ESTOKELAPARISTO	
TYYPPI D200/4x50-400-50/189-0818E		TYYPPI D200/4x50-400-50/189-0818E	
MITOITUSTEHO	200 kvar	MITOITUSTEHO	200 kvar
NIMELLISJÄNNITE	400 V	NIMELLISJÄNNITE	400 V
NIMELLISTAAJUUS	50 Hz	NIMELLISTAAJUUS	50 Hz
MITOITUSVIRTA	338 A	MITOITUSVIRTA	338 A
MITOITUSKAPASITANSSI	$\mu\text{F}$	MITOITUSKAPASITANSSI	$\mu\text{F}$
MITOITUSINDUKTANSSI	mH	MITOITUSINDUKTANSSI	mH
VIRITYSTAAJUUS	189 / 7 Hz/%	VIRITYSTAAJUUS	189 / 7 Hz/%
OIKOSULKUVIRTA I <sub>cw</sub>	25 kA	OIKOSULKUVIRTA I <sub>cw</sub>	25 kA
PURKAUTUMISAIKA	75 V 180 s	PURKAUTUMISAIKA	75 V 180 s
JÄLLEENKYTKENTÄAIKA MINIMI	s	JÄLLEENKYTKENTÄAIKA MINIMI	s
LÄMPÖTILA-ALUE	0/+40 °C	LÄMPÖTILA-ALUE	0/+40 °C
IP-KOODI	IP20C	IP-KOODI	IP20C
STANDARDI	IEC/EN 61439-1&2	STANDARDI	IEC/EN 61439-1&2
SARJANRO	F1800094	SARJANRO	F1800094
 Valmistettu Suomessa 2018 Grid Solutions Oy (Ltd.) P.O. Box 4, Kaapelikatu 3 FI-3331 Tampere Finland		 Valmistettu Suomessa 2018 Grid Solutions Oy (Ltd.) P.O. Box 4, Kaapelikatu 3 FI-3331 Tampere Finland	

Kuva 12. Master- ja slave-osien tyypikilvet.

Kuvassa 12 olevista tyypikilvistä löytyvät kompensointiyksiköiden perustiedot. Master-yksikön portaat ovat suuruudeltaan 2x25 kVAr + 3x50 kVAr ja slave-yksikön 4x50 kVAr. Paristoja ohjataan 12-portaisella säätimellä NC-12 (kuva 13), jossa on automatiikan lisäksi myös käsikäyttömahdollisuus. Säätimestä on nähtävillä kaikki samat perusmittaukset kuin BLR-CX:stä. Lisäksi säädin tallentaa portaiden päällekytkemiskerrat ja päälläoloajan tunteina. (Kuva 14.)



Kuva 13. Loistehonsäädin NC-12, perusnäky (KOMPJ1).



Kuva 14. Paristojen portaiden käyttömäärät. KOMPJ1 ja KOMPJ2.

J2:n kohdekäynnillä huomion herätti erityisesti PKJ1:n kompensoinnin KOMPJ1:n säätimen näyttämät arvot. Kuvissa 13 ja 14 näkyy, että tehokertoimen arvona on kapasitiivinen 0,95 ja ettei portaita ole käytetty yhtä kertaa lukuun ottamatta ollenkaan. Myös PKJ2 oli säätimen mukaan lievästi kapasitiivinen, tehokertoimen ollessa 0,99. KOMPJ2:ssa portaiden käyttö on kuitenkin ollut selkeästi suurempaa, kahden ensimmäisen portaan ollessa kytkettyinä lähes 400 kertaa. Noin 300 tuntia kuulostaa kuitenkin melko vähäiselle, kun paristo on ollut käytössä jo toista vuotta.

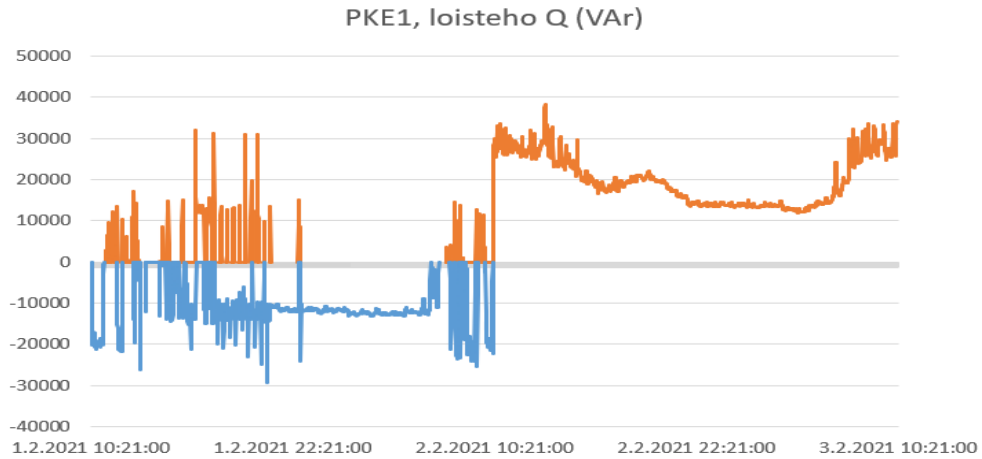
## 5 Mittaustulokset ja tulosten analysointi

Opinnäytetyössä tehtiin verkkoanalysointimittaukset kummankin rakennuksen kahteen pääkeskukseen. E-talon kolmas pääkeskus PKE3 rajattiin työstä pois, koska se ei palvele itse E-taltoa, vaan siitä on syötetty muita rakennusosia. Kaikkia pääkeskuksia mitattiin kaksi vuorokautta. Ensin mitattiin vuorokausi kompensointien ollessa päällä ja toinen vuorokausi ilman kompensointia. Kompensointeja ei haluttu laittaa viikon ajaksi pois päältä, eikä viikon kestoisen mittauskompensointien ollessa päällä toisi työlle juurikaan lisäarvoa. Työn päätarkoituksena oli selvittää kompensoinnin tarvetta, ei niinkään sen toimivuutta. Rakennusten sähkönkäytön oletettiin olevan päivien välillä hyvin lähellä toisiaan, jolloin kahden vuorokauden mittaus on tälle työlle riittävä. On kuitenkin hyvä muistaa, että mittaukset eivät ole standardin SFS-EN 50160 mukaisesti viikon kestoiset, joten tulee tuloksia pitää viitteellisinä.

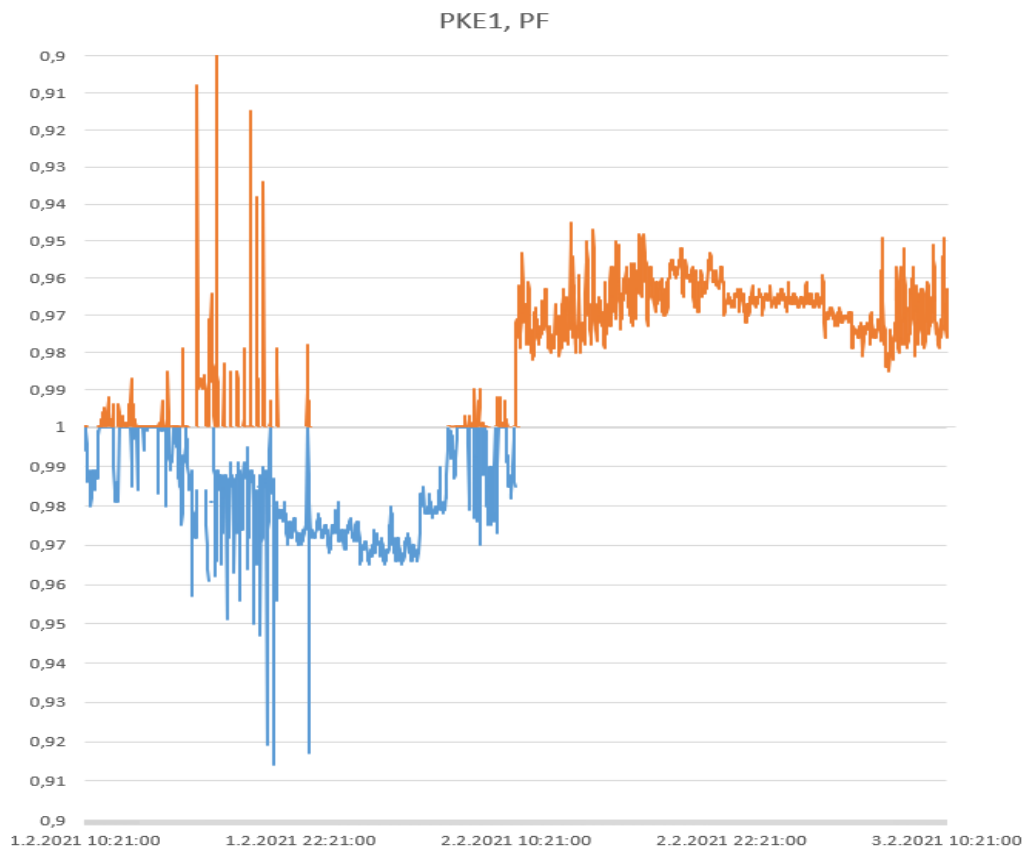
Analysointinäytteenottovälinä on yksi minuutti ja kuviot on muodostettu mitatuista minuutin keskiarvoista. Analysointilaitteet mitataan erikseen induktiiviselta ja kapasitiiviselta puolelta. Kuviot on muodostettu näiden yhdistelmästä, minkä takia joissain kuvioissa voi näyttää olevan samalla ajan hetkellä loistehoa molempiin suuntiin.

### 5.1 PKE1

E-siiven ensimmäisen pääkeskuksen loistehon mittaustulokset ovat nähtävillä kuvioissa 1 ja 2. Kuvion keskeltä havaitaan selkeästi hetki, kun kompensointiparisto on kytketty pois päältä. Kapasitiivinen puoli on esitetty sinisellä ja induktiivinen oranssilla.



Kuvio 1. PKE1, loisteho.

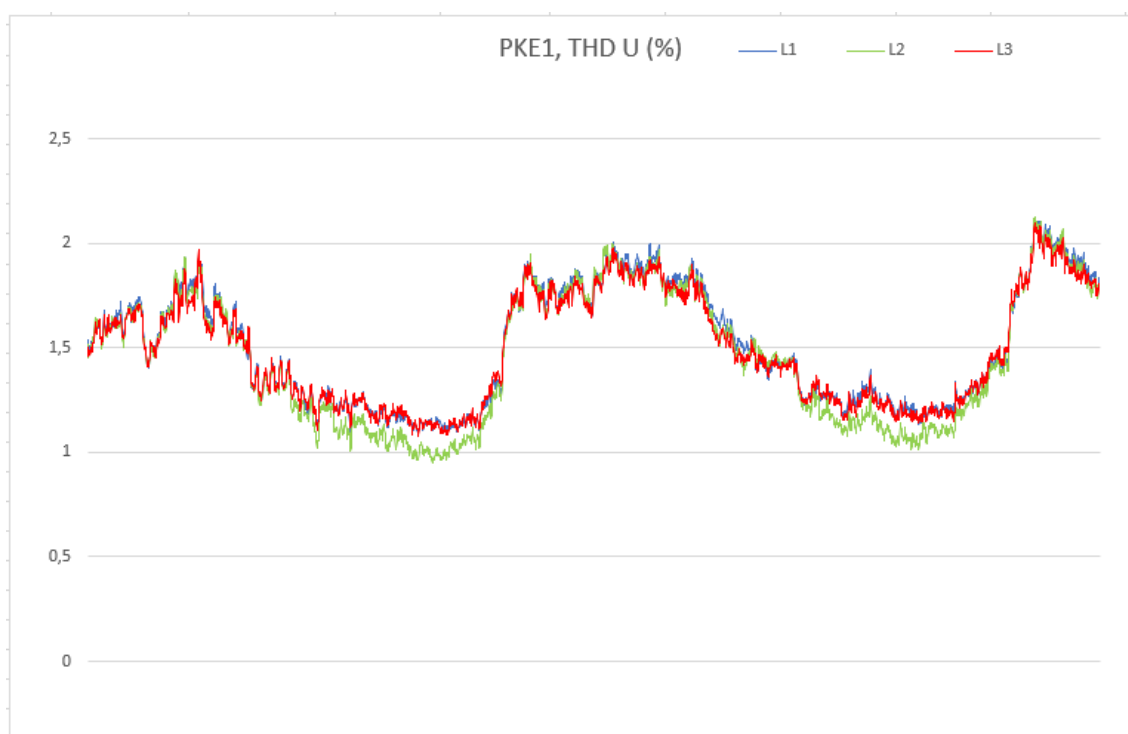


Kuvio 2. PKE1, tehokerroin.

Kuviosta 1 nähdään ensimmäisen vuorokauden aikana kompensoinnin ollessa päällä loistehon vaihtelevan korkeimmillaan noin 30 kVArissa sekä induktiivisella että kapasitiivisella puolella. Suurimman osan ajasta loisteho pysyttelee kuitenkin noin 15 kVAr induktiivista – 15 kVAr kapasitiivista välissä, kun kompensoimattomana se on noin 15 kVAr – 35 kVAr induktiivisella puolella. Pa-

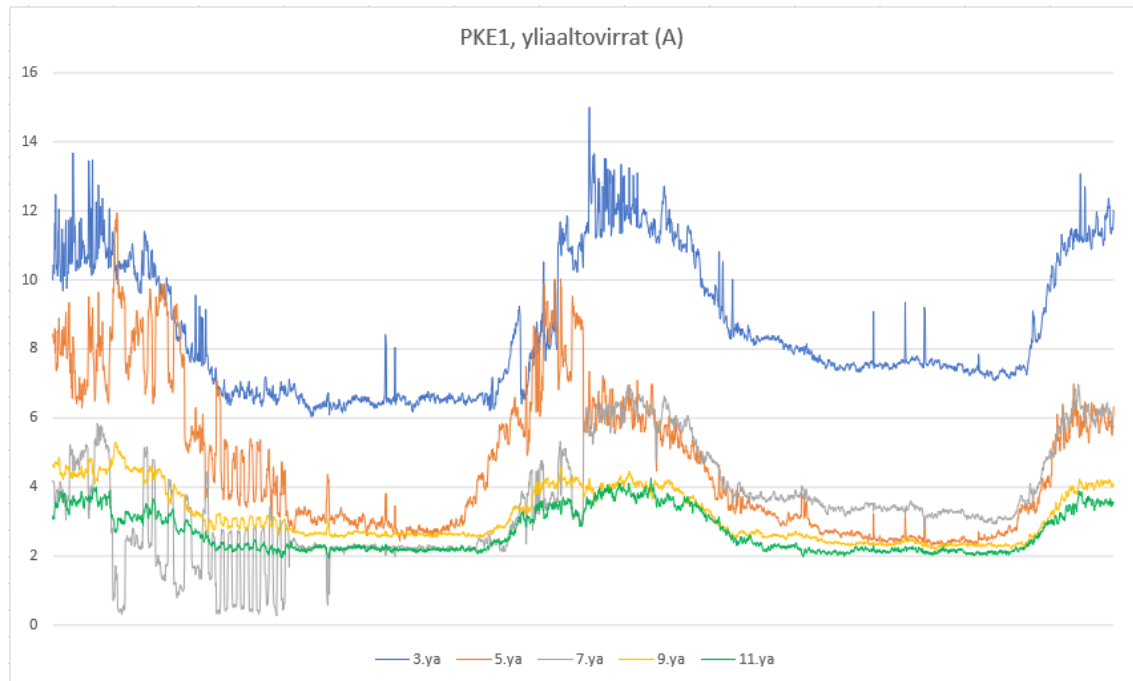
risto käyttänee siis yhtä tai kahta porrasta kerrallaan. Kuviossa 2 nähtävästä tehokertoimen käyrästä havaitaan lyhyitä piikkejä lukuun ottamatta, että tehokeroin pysyy noin 0,97 paremmalla puolella. Verkko on suurimman osan ajasta lievästi ylikompensoituneena.

Kaikkien keskusten osalta tutkitaan myös kompensoinnin vaikutusta jännitesäeroon ja yliaaltovirtoihin. Kuviossa 3 on esitetty THD U kaikkien vaiheiden osalta.



Kuvio 3. PKE1, harmoninen kokonaissärö.

Kuten kuviosta nähdään, pysyy jännitteen kokonaissärö lähes koko mittauksen ajan alle 2 %:n, kun standardin mukainen raja on 8 %, ja yleisesti hyvän sähkönlaadun rajana pidetään 3 %. Koska THD U:n arvo on kaikilla keskuksilla niin pieni, ei työssä ole esitetty yksittäisten yliaaltojännitteiden arvoja. Eri yliaaltovirtojen arvot ampeereina on kuitenkin esitetty kuviossa 4. Vaiheet ovat keskenään melko symmetriset, joten selkeyden vuoksi kuvio on piirrettynä vain vaiheelta L1. Tämä tapa toistuu myös tulevissa kuvioissa.

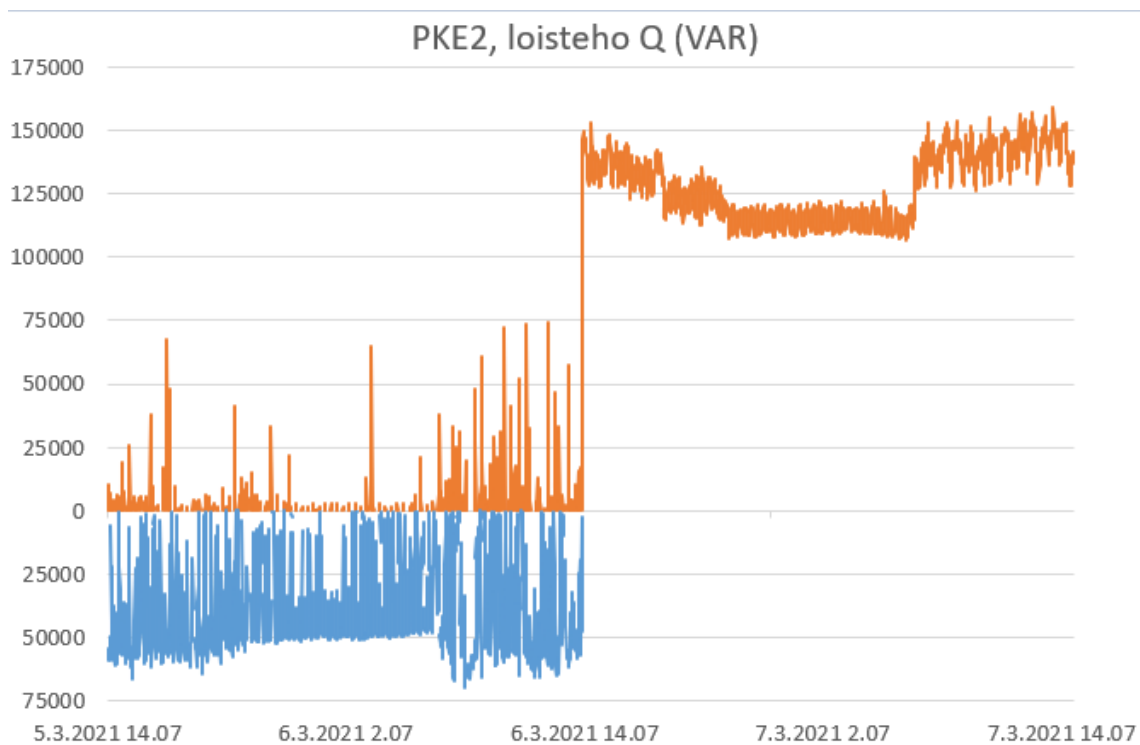


Kuvio 4. PKE1, viisi ensimmäistä paritonta yliaaltovirtaa.

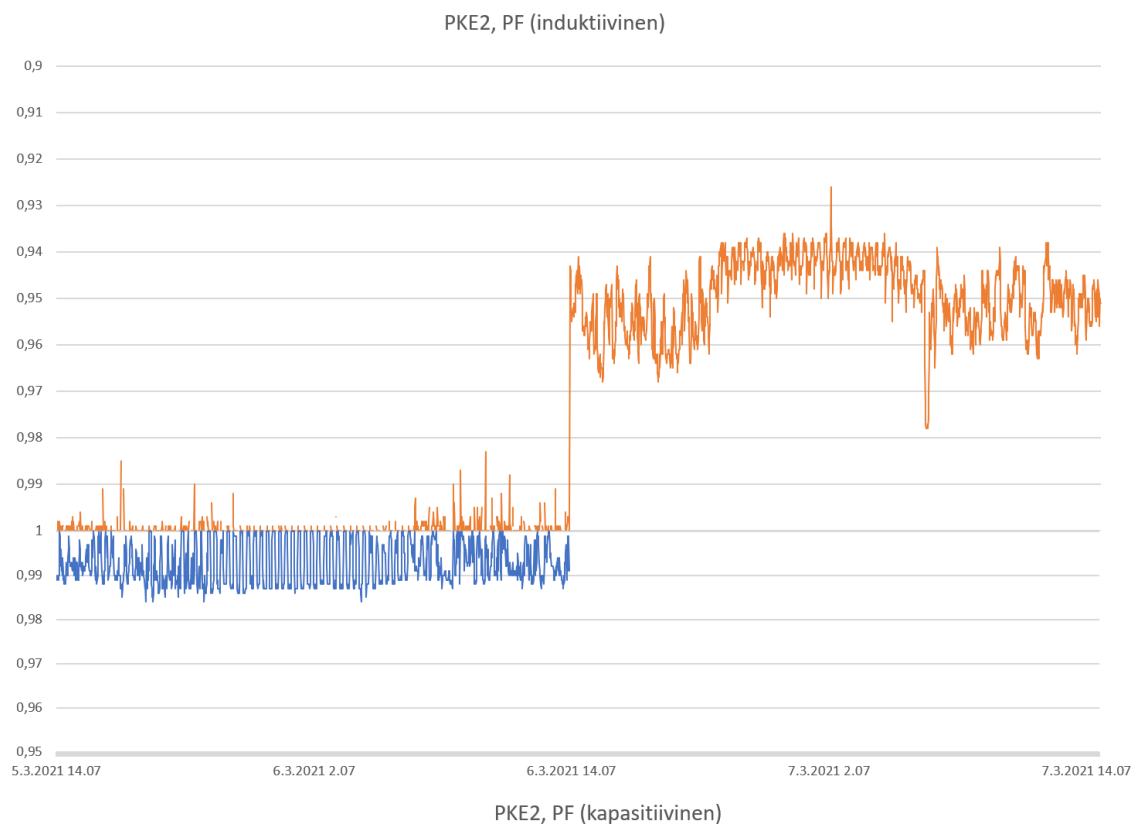
Kuviota tarkasteltaessa huomataan, ettei estokelaparistolla näyttäisi olevan yliaaltovirtoihin käytännössä vaikutusta. Kolmas yliaaltovirta näyttäisi kompensoituna olevan hieman pienempi, mutta estokelaparisto ei oikeasti pysty sitä suodattamaan.

## 5.2 PKE2

E-siiven toisen pääkeskuksen PKE2:n tehot olivat selkeästi suuremmat kuin PKE1:ssä. Kuvioissa 5 ja 6 on esitetty keskuksen loistehon ja tehokertoimen arvot.



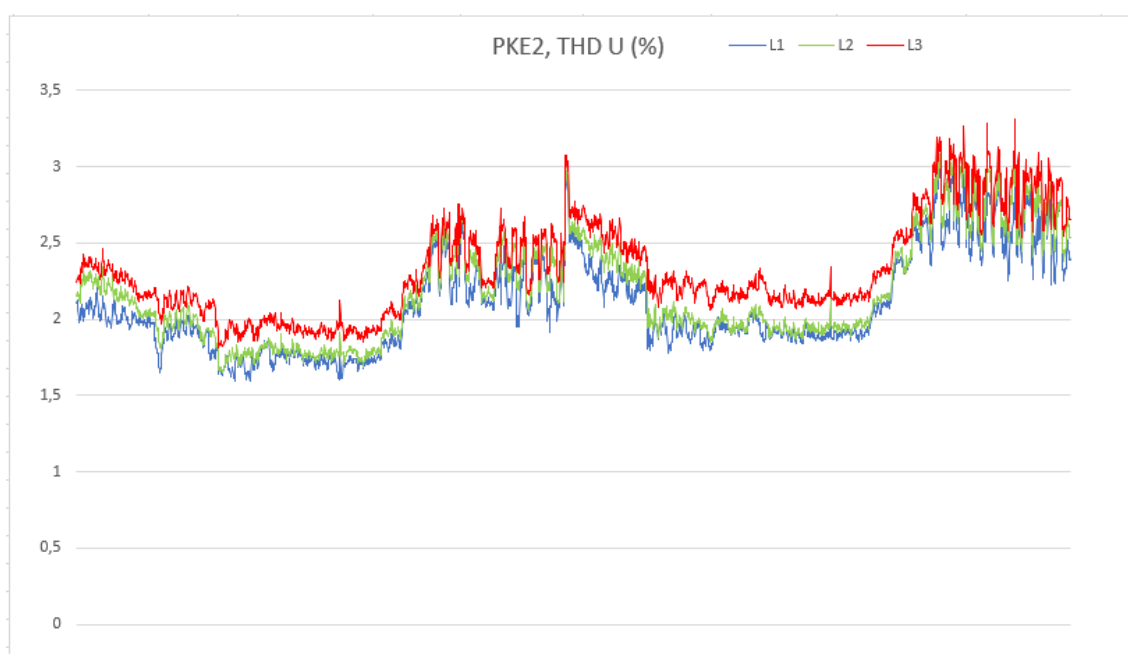
Kuvio 5. PKE2, loisteho.



Kuvio 6. PKE2, tehokerroin.

Kuviosta 5 nähdään PKE2:n loistehon sahaavan noin 70kVAria induktiivisella ja kapasitiivisella puolella, vaihdellen tasaisesti. Kun kompensoinnit on kytketty pois käytöstä, on induktiivisen loistehon määrä moninkertainen PKE1:een verrattuna. Loisteho yöaikaan on ollut noin 110 kVAria, kun päivällä se on noussut jopa 150 kVAriin asti. Pelkkää loistehon piirtämää käyrää katsomalla voisi kuvitella, että kompensointi ei toimisi täysin oikein. Kuitenkin kuviosta 6 nähdään keskuksen tehokertoimen kompensoituna lähentelevän arvoa 1 kaikkina aikoina, huonoimmillaankin arvon ollessa noin 0,99. PKE2:n kompensointi näyttäisi toimivan optimaalisesti.

Harmoninen kokonaissärö keskuksella näyttää hyvin samantyylliseltä kuin keskuksella PKE1. Tällä keskuksella kompensoinnilla näyttäisi olevan jännitesärön pienen pieni parantava vaikutus, mutta ei kovin merkittävästi. Kyse voi myös olla sattumasta. THD U pysyy kaukana raja-arvosta, ollen huonoimmillaan noin 3 %.

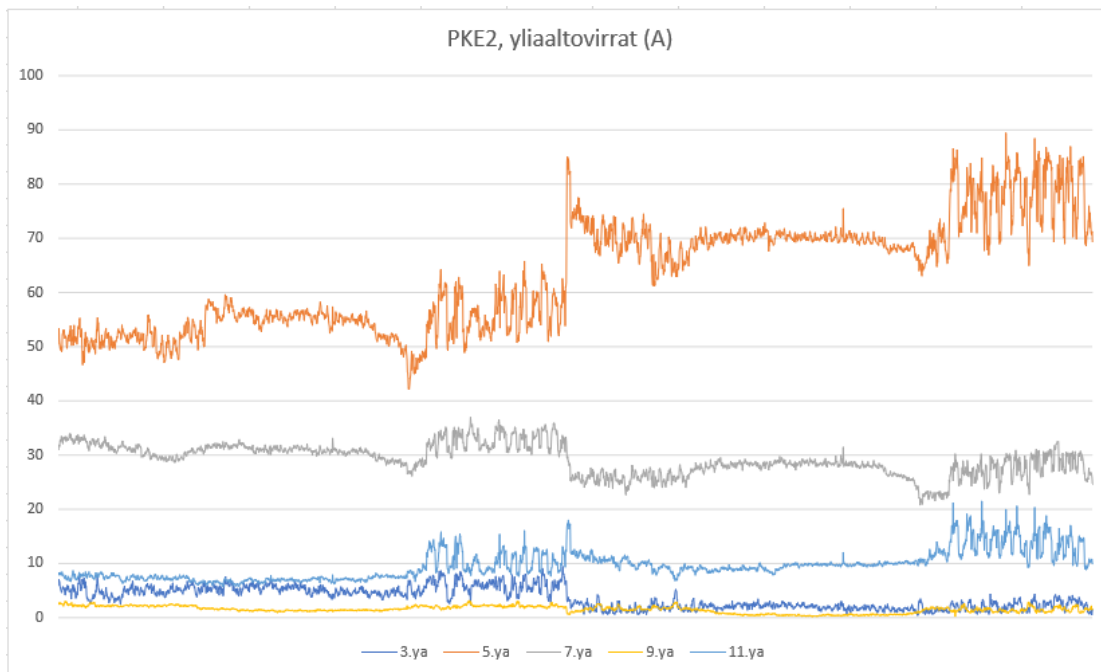


Kuvio 7. PKE2, harmoninen kokonaissärö.

Harmonisista yliaaltovirroista varsinkin viidennen ja seitsemännen yliaallon arvot ovat huomattavan suuret. Kuviossa 8 on esitetty keskuksen yliaaltovirtoja. Kuvion perusteella estokelaparistolla näyttäisi olevan viidenteen yliaaltoon noin



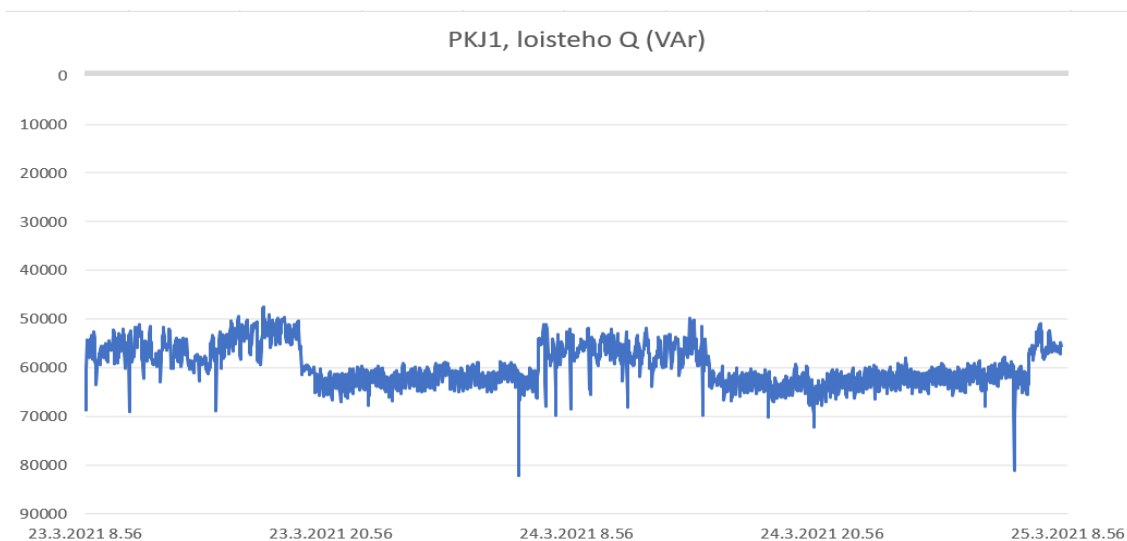
20-25 %:n alentava vaikutus. Siitäkin huolimatta yliaaltovirta on moninkertainen PKE1:een verrattuna.



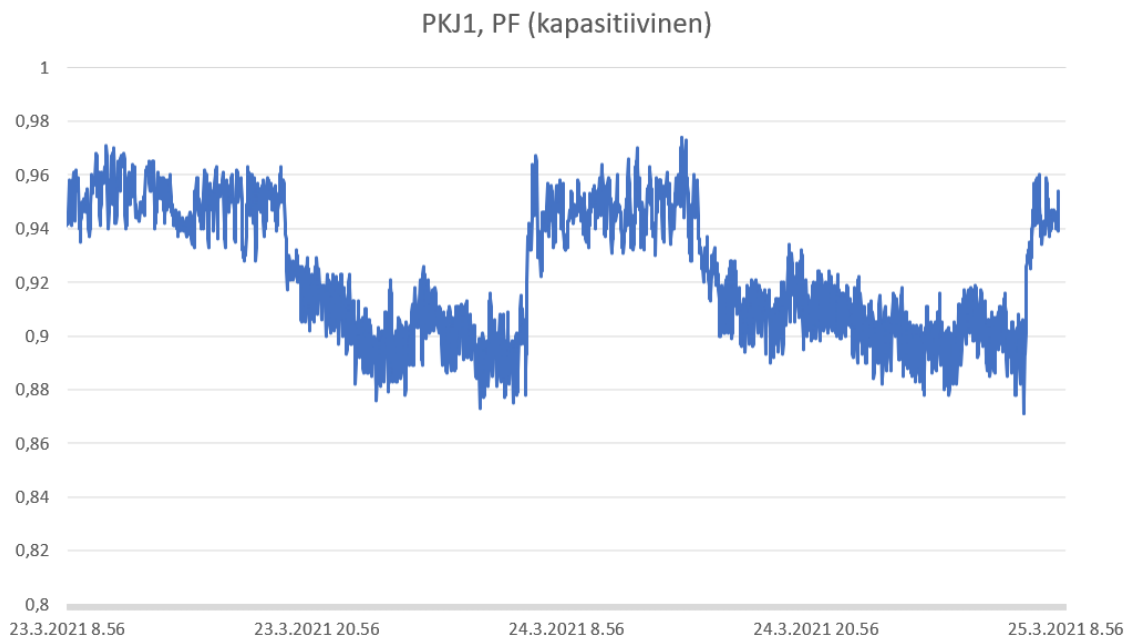
Kuvio 8. PKE2, viisi ensimmäistä paritonta yliaaltovirtaa.

### 5.3 PKJ1

J2-talon pääkeskusten mittaustulokset ovat hyvin poikkeavat verrattuna E-talon keskuksiin. PKJ1:n loistehon ja tehokertoimen arvot on esitetty kuvioissa 9 ja 10.



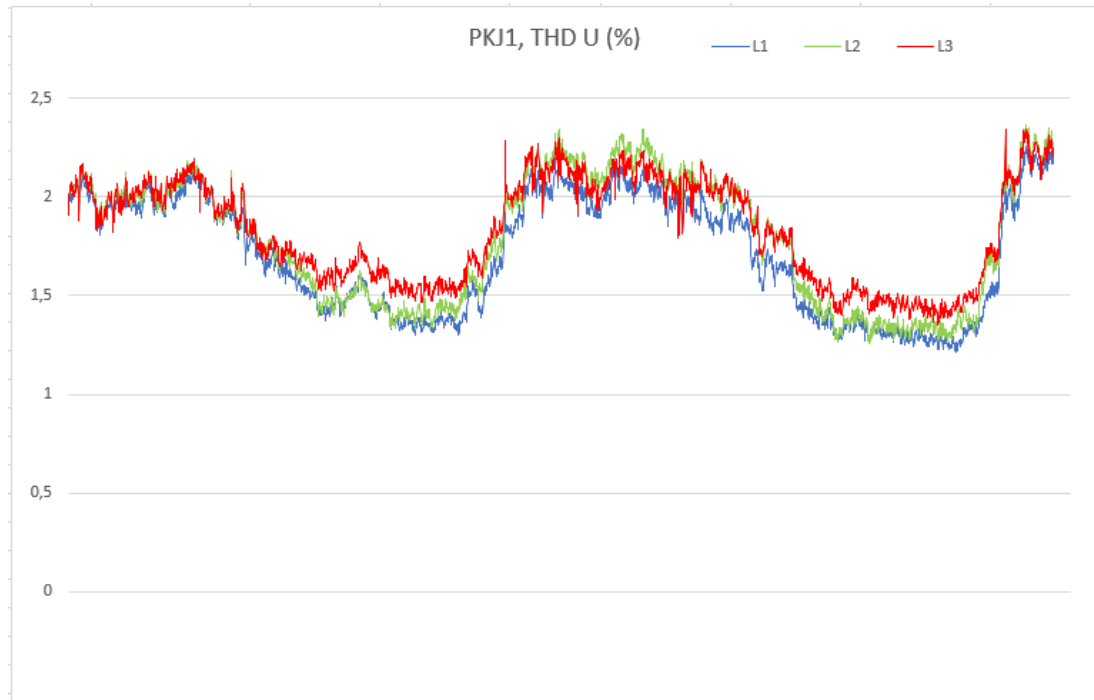
Kuvio 9. PKJ1, loisteho.



Kuvio 10. PKJ1, tehokerroin.

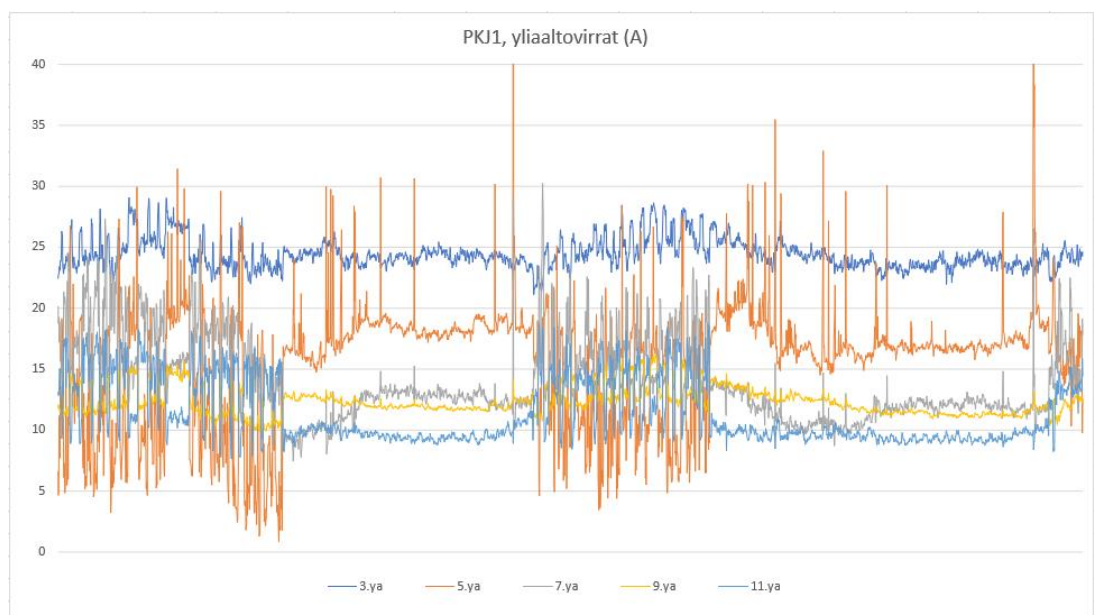
Mittausten mukaan PKJ1:n verkko ei käy kertaakaan induktiivisella puolella, vaan on reilusti kapasitiivinen koko ajan. Myös tehokerroin on lähes jatkuvasti huono, yöllä jopa vain noin 0,9. Kuvioista on myös huomattavissa, että kapasitiivista loistehoa on päiväsaikaan vähemmän, kuin yöaikaan. Tämä voisi johtua siitä, että päivällä on käytössä enemmän induktiivista kuormaa, jolloin se kompensoi kapasitiivista verkkoa. Yöaikaan myös LED-valaistuksen tarve on todennäköisesti suurempi, mikä voisi aiheuttaa kapasitiivisuutta.

Mittausten jälkeen portaiden käyttökerrat varmistettiin loistehon säätimestä, eivätkä käytöt olleet lisääntyneet mittausta edeltäneestä tilanteesta. Koska verkko on koko ajan kapasitiivinen eikä kompensointi ollut missään vaiheessa päällä, ei sen vaikutuksista yliaaltoihin voida sanoa mitään. Jännitesäro ja yliaaltovirrat on esitetty kuvioissa 11 ja 12.



Kuvio 11. PKJ1, harmoninen kokonaissärö.

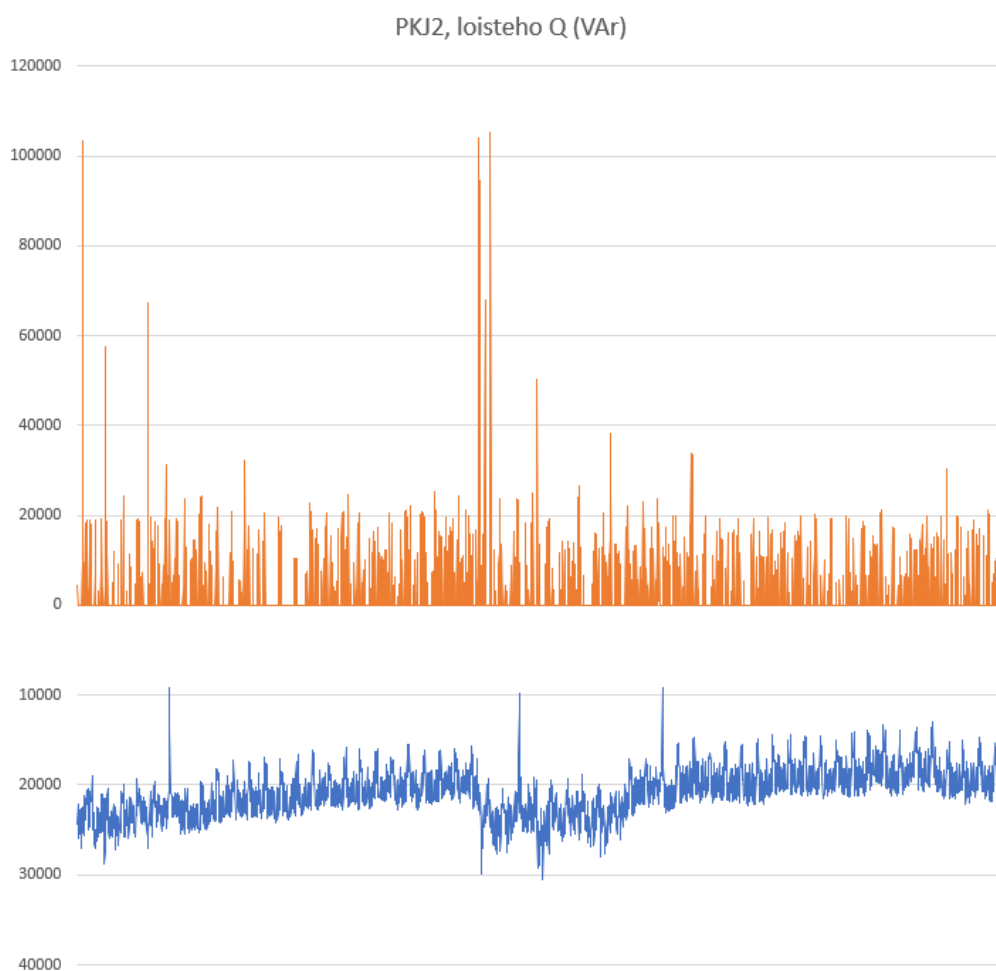
Jännitesärö on tässäkin keskuksessa hyvin matala, vaihdellen noin prosenttiyksikön sisällä huipun ollessa alle 2,5 %. Yksittäisiä yliaaltovirtoja tarkasteltaessa, nähdään varsinkin viidennen ja seitsemännen yliaallon piirtävän todella sahalaitaisen kuvaajan (kuvio 12). Huomion arvoista on, että suurimman yliaaltovirran aiheuttaa kolmas, eikä viides yliaalto.



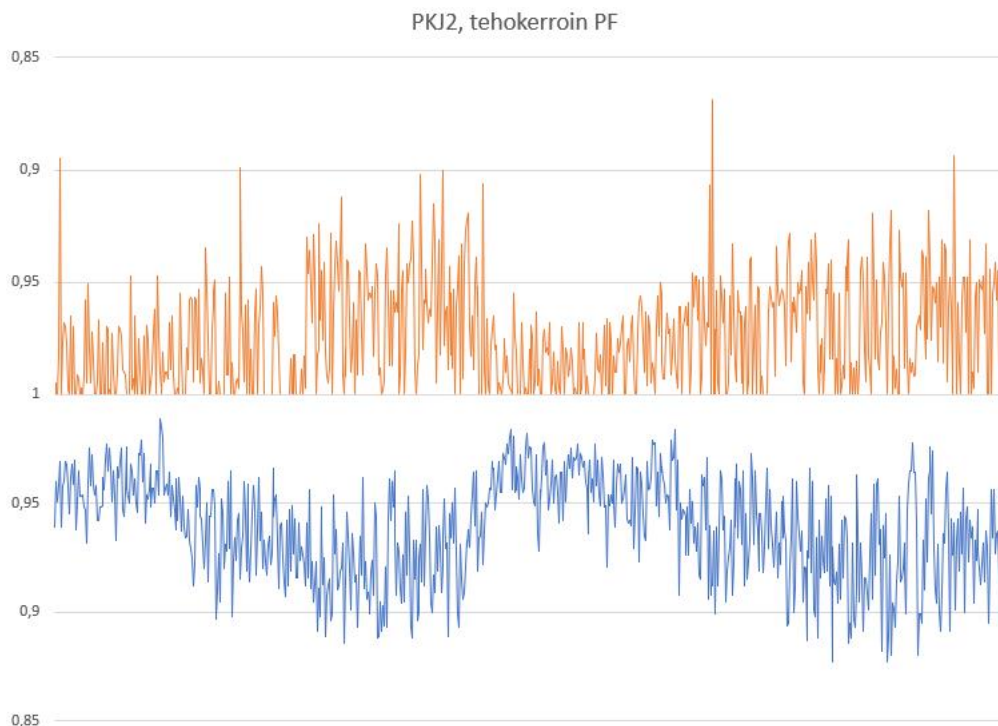
Kuvio 12. PKJ1, viisi ensimmäistä paritonta yliaaltovirtaa.

## 5.4 PKJ2

PKJ2:n mittaustulokset ovat muista selkeästi poikkeavat. Mittausten mukaan (kuvio 13) loisteho on vaihdellut koko mittausajan 20 kVAr ind. ja 25 kVAr kap. välissä muutamaa jopa 100 kVArin induktiivista piikkiä lukuun ottamatta. Koska loisteho selvästi vaihtelee nopeasti ja mittaustulokset ovat minuutin keskiarvoja erikseen induktiiviselta ja kapasitiiviselta puolelta, ei kuvaajasta tule yhtä selkeää yhden viivan piirtämää kuin aiemmista kuvaajista. Kuviossa 13 on keskuksen loisteho ja kuviossa 14 tehokerroin.



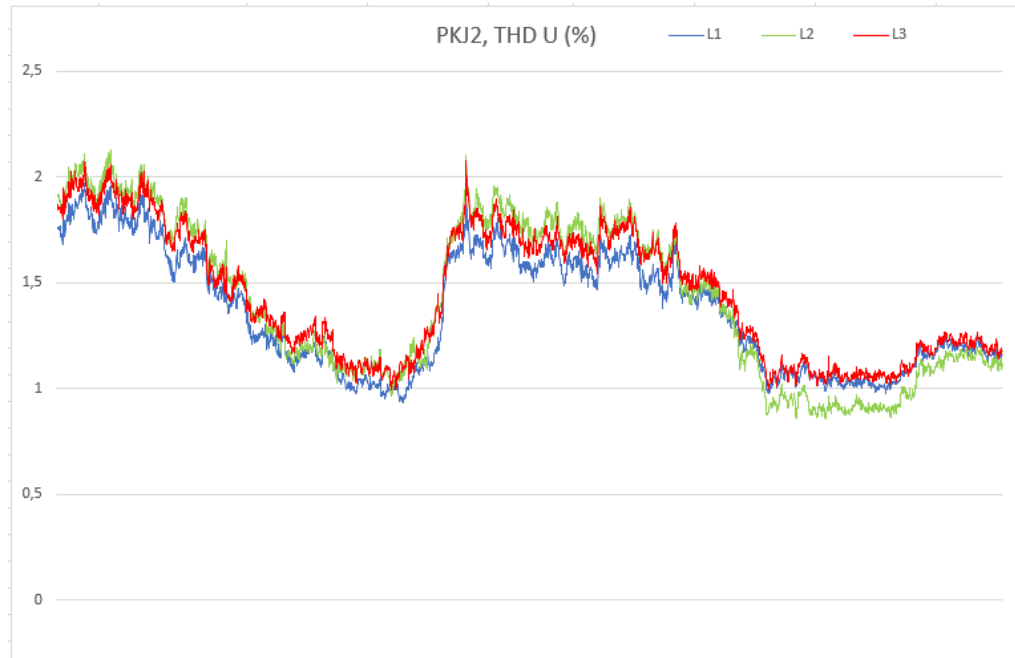
Kuvio 13. PKJ2, loisteho.



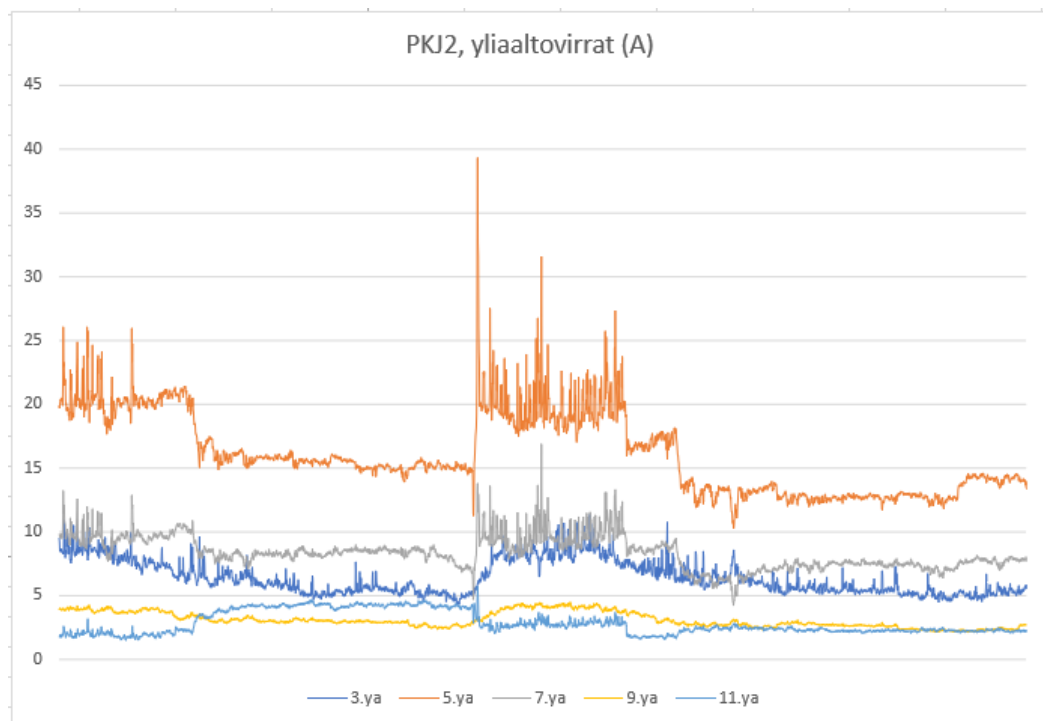
Kuvio 14. PKJ2, tehokerroin.

Myös keskuksen tehokerroin on hieman hankalammin tulkittavissa, kuin aiempien keskusten kuviot. Koska tehokerroin vaihtelee puolelta toiselle, tähänkin kuvioon piirtyy kaksi eri viivaa aiemmin selitetyn mukaisesti. Loistehon ja tehokertoimen kuvioista voidaan kuitenkin havaita niiden olevan koko ajan hyvin lähellä yhtä suuret molemmilla puolin. Tämä tarkoittanee, että loistehon antoa ja ottoa on suunnilleen yhtä paljon, ja pidemmän ajan keskiarvona keskuksen todellinen tehokerroin lienee lähempänä arvoa 1.

Yliaallot ja THD sen sijaan noudattivat tuttua kaavaa. Harmoninen kokonaissärö pysyi jälleen lähes koko ajan alle 2 %, ja yliaaltovirroista suurin oli jälleen viides yliaaltovirta. THD ja yliaaltovirrat on esitetty kuvioissa 15 ja 16.



Kuvio 15. PKJ2, harmoninen kokonaissärö.



Kuvio 16. PKJ1, viisi ensimmäistä paritonta yliaaltovirtaa.

Myös PKJ2:n osalta säätimen tallentamat portaiden käyttökerrat tarkistettiin mittauksen jälkeen, eivätkä nekaan olleet kertaakaan käytössä. Sen takia tälläkään paristolla ei ole yliaaltoihin suodattavaa vaikutusta. Jännitesärö pysyy jälleen oikein hyvällä tasolla, mutta yliaaltovirtoja esiintyy jonkin verran. Varsinkin viides yliaaltovirta tuottaa selkeästi muita korkeampia piikkejä.

## 6 Pohdinta

Vaikka mittaukset olivat lyhytkestoiset, mielestäni tulosten perusteella voidaan todeta selkeitä johdonmukaisuuksia kompensoinnin tarpeesta. Vanhassa E-talossa induktiivista loistehoa esiintyy reilusti, ja perinteisille estokelaparistoille on siellä selkeä tarve. E-talon paristot ovat mitoitettu ehkä hivenen liian suuriksi, mutta toisaalta pieni pelivara ei ole pahitteeksi. Ei ole myöskään varmaa satuivatko loistehohuiput mittauksien ajalle. Paristojen säädöt näyttäisivät toimivan halutulla tavalla. Koska loistehomaksujen periaatteena on tunnin keskiarvo, eivät lyhytkestoiset loistehopiikit haittaa. Uudessa J2-talossa kompensoinnit on todennäköisesti mitoitettu jonkun vanhan tavan mukaan, mikä on johtanut molemmissa keskuksissa todella reiluihin ylimitoituksiin. PKJ2:ssa kompensointitarvetta on ollut jonkin verran, mutta portaista vain kaksi ensimmäistä on ollut joskus käytössä. Paristo voisikin varmasti olla teholtaan puolet pienempi. PKJ1:n kompensointi on yhtä kertaa lukuun ottamatta ollut käyttämättömänä sen koko elinkaaren ajan, eli se on ollut täysin turha.

J2-talossa, varsinkin PKJ1:ssä olisi aiheellista miettiä induktiivista kompensointiparistoa. Noin 75 kVARin kokoinen paristo luultavasti riittäisi kompensoimaan kaiken kapasitiivisen loistehon. Ennen investointeja kannattaisi asiasta kuitenkin varmistua pidempikestoisten mittausten avulla ja konsultoimalla kompensointiin perehtynyttä ammattilaista. Luultavasti tulevaisuudessa sähköverkkojen kapasitiivisuus tulee yleistymään, mikä johtaa myös induktiivisen kompensoinnin yleistymiseen. Koska kapasitiivinen loisteho aiheuttaa loistehomaksuja ja rasittaa verkkoa yhtä lailla kuin induktiivinenkin, on sen kompensointi yhtä tärkeää. Varsinkin suurissa korjausrakentamisen kohteissa, kuten keskussairaalan tulevassa E-talon saneerauksessa koko rakennuksen tekniikan uusiutuessa nykyaikaiseksi pidän mahdollisena, että sen sähköverkko voi muuttua J2-talon tapaan kapasitiiviseksi.

Yliaaltoja esiintyy molemmissa rakennuksissa kaikissa keskuksissa jonkin verran. Yliaaltojen osalta tässä työssä keskityttiin kuitenkin vain siihen, onko nykyisillä paristoilla vaikutusta yliaaltojen suuruuteen. Rakennuksissa ei ole erillisiä

yliaaltosuodattimia, joten käytännössä estokelan vaikutukset pitäisi näkyä viidennessä yliaallossa. J2-talon osalta tähän ei saatu vastausta, mutta PKE2:ssa tämä näyttäisi pitävän paikkansa. Toisaalta PKE1:ssä vastaavaa selkeää eroa ei syntynyt, joten kyse voi olla myös sattumasta. Koska estokelapariiston tarkoitus onkin toimia käytännössä vain loistehon kompensoijana, voisi passiivinen suodatinparisto tai aktiivisuodatin olla estokelaa toimivampi ratkaisu.

Yliaaltojen määrän vuoksi niitä kannattaisi mielestäni tutkia tarkemmin. Jännitesäröön ne eivät missään keskuksessa vaikuttaneet, mutta varsinkin viides yliaalto PKE2:ssa oli huomattavan suuri. Toisena kehitysehdotuksena tälle työlle voisi yliaaltojen tutkimisen lisäksi olla verkkojen kapasitiivisuuden syiden tutkiminen. Kapasitiivisista verkoista ja induktiivisesta kompensoinnista on vain vähän tietoa saatavilla, ja aihe muuttuu jatkuvasti ajankohtaisemmaksi.



## Lähteet

1. Granlund Oy. 2021. Meistä. <https://www.granlund.fi/granlund/meista/>. 25.1.2021.
2. Hirvonen, H. 2016. Tikkamäki – terveyden temppeli. Pohjois-Karjalan keskussairaala 1953-2016. Helsinki: Libris Oy.
3. Siun Sote. 2021. Pohjois-Karjalan keskussairaala. <https://www.siun-sote.fi/pohjois-karjalan-keskussairaala>. 6.2.2021.
4. Siun Sote. 2020. E-siiven peruskorjaus alkaa. <https://www.siunsote.fi/-/keskussairaalan-e-siiven-peruskorjaus-alkaa-ja-sairaalan-paasisaankaynti-muuttuu-8-10->. 28.1.2021.
5. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2018. Yliaallot ja kompensointi. Espoo: Sähköinfo Oy.
6. ST-kortti 52.15. 2016. Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteet alle 1000V:n pienjänniteverkossa. Espoo: Sähköinfo Oy.
7. Kymenlaakson Sähköverkko. 2018. Loistehon kompensointiohje.
8. Caruna Espoo Oy. 2018. Verkkopalveluhinnasto. [https://caruna-cms-prod.s3-eu-west-1.amazonaws.com/verkkopalveluhinnasto\\_caruna\\_espoo\\_oy\\_1.7.2018\\_2021.pdf?RL07jMHI9Nq\\_J0HuDRcDfSBUqd1aIYk](https://caruna-cms-prod.s3-eu-west-1.amazonaws.com/verkkopalveluhinnasto_caruna_espoo_oy_1.7.2018_2021.pdf?RL07jMHI9Nq_J0HuDRcDfSBUqd1aIYk). 15.2.2021.
9. SFS 6000-5-52:2017. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
10. SFS-EN 50160:2010+A1:2015+A2:2019+A3:2019. 2019. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.
11. Areva T&D. 2009. Pienjännitetuotteiden tuoteopas. <https://www.sahkonumerot.fi/5705639/doc/technicalinfodoc/>. 10.2.2021.
12. Tampereen Kondensaattoritehdas Oy. 2021. Induktiiviset kompensointiparistot. <https://www.tkf.fi/induktiiviset-kompensointiparistot/#harmoniset>. 27.3.2021.
13. Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. 2008. Yliaalto-opus. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>. 10.2.2021.

14. ST-kortti 52.16. 2014. Yliaaltosuodatinlaitteet ja niiden sijoitus alle 1000V:n pienjänniteverkossa. Espoo: Sähköinfo Oy.
15. ST-käsikirja 31. 2019. Varavoimakoneet ja -laitokset. Espoo: Sähköinfo Oy.
16. Eaton Oy. 2006. Käyttöohje UPS 20-40kVA. <https://docplayer.fi/19055570-Kayttoohje-ups-20-40-kva-230-400-v-50-60-hz-lahto-3-vaihetulo-lahto.html>  
[6.2.2021](https://docplayer.fi/19055570-Kayttoohje-ups-20-40-kva-230-400-v-50-60-hz-lahto-3-vaihetulo-lahto.html).
17. ST-kortti 52.35.02. 2010. UPS-laitteella varmennetun sähkönjakelujärjestelmän suunnittelu ja toteutus. Espoo: Sähköinfo Oy.