



Sähkönlaadun tutkimus

Olli Heikkinen

Opinnäytetyö
Joulukuu 2021

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma
Sähkövoimatekniikka

HEIKKINEN, OLLI:
Sähkönlaadun tutkimus

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 1 sivu
Joulukuu 2021

Opinnäytetyön kohteena oli Valmet Fabrics Oy:n Tampereen Kaukajärvellä sijaitsevan tehdaskiinteistön sähkön laadun tutkimus. Sähkön laadulla on vaikutusta sähkönkäyttäjän laitteiston toimintaan, ja työssä tavoitteena oli mittaamalla selvittää sähkön laadun nykyinen tila ja olemassa olevan sähkönjakelulaitteiston toimivuus. Tehdaskiinteistössä tehtävä tuotanto on muuttunut viime vuosien aikana, joten työssä vertailtiin tämänhetkistä tilannetta vuoteen 2016 verrattuna.

Opinnäytetyön aikana mitattiin standardin SFS-EN 5016 määrittelemät yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Mittausten mukaan sähkön laatuominaisuudet täyttivät standardin vaatimukset. Mittauksissa tuli kuitenkin ilmi poikkeamia, jotka pitää ottaa huomioon tulevaisuudessa sähkönjakeluverkon mahdollisissa uudistuksissa ja uusia laitteita asennettaessa.

Opinnäytetyön tuloksena saatiin kattava kuvaus tehdaskiinteistön sähkönjakeluverkon toimivuudesta ja tämänhetkisestä kuormitustilanteesta. Työn tuloksia voidaan hyödyntää sähkönjakeluverkon ylläpidossa ja kehittämisessä ja ne voidaan huomioida tuotannon mahdollisesti laajentuessa tulevaisuudessa.

ABSTRACT

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

HEIKKINEN, OLLI:
Analysis of Power Supply Quality

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 1 page
December 2021

The subject of this thesis was analysis of power supply quality at the Valmet fabrics Ltd production unit in Kaukajärvi. Quality of power supply affects operations of the end user's equipment and the objective of this thesis was to determine by measurement the present state of power supply quality and functioning of electricity distribution. Production on the plant has varied during recent years, thus the present situation was compared to year 2016.

During this study, voltage characteristics of electricity supplied by public networks was measured as defined in the standard SFS-EN 50160. According to the measurements, the quality of power supply fulfills the requirements of the standard. However, the measurements revealed some deviations that need be considered if the power distribution network at the plant is renewed or new machinery is installed in the future.

As a result of this study, a comprehensive report was created about the functionality of electricity power supply and situation of load at present state at the production plant. The results can be utilized in maintenance and development of the power supply, also if production will be expanded.

Key words: electric power quality, reactive power, harmonics, harmonic voltage

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEORIA	7
	2.1 Teho.....	7
	2.2 Yliaallot	9
	2.2.1 Yliaaltojen aiheuttajia.....	9
	2.2.2 Yliaaltojen haittoja	10
	2.3 Särö	11
	2.3.1 THD	11
	2.3.2 Tehokerroin	12
	2.4 Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteistot.....	13
	2.4.1 Kompensointikondensaattori	14
	2.4.2 Estokelaparisto.....	15
	2.4.3 Aktiivisuodatin.....	15
3	TUTKITTAVA LAITTEISTO	17
	3.1 Tehdasverkko.....	17
	3.1.1 Muuntajat.....	17
	3.1.2 Kompensointilaitteistot.....	18
4	SÄHKÖNLAADUN MITTAUS	19
	4.1 Mittauslaitteisto	19
	4.2 Mittauspaikat ja mittaustavat.....	19
	4.3 Tulokset ja tulkinta	20
	4.3.1 PK1.....	21
	4.3.2 PK2.....	22
	4.3.3 PK3.....	24
	4.3.4 PK4.....	25
	4.3.5 PK5.....	27
	4.3.6 PK6.....	29
	4.3.7 PK7.....	30
	4.3.8 PK8.....	31
	4.3.9 PK9.....	33
	4.3.10PK10	35
	4.3.11PK12	36
	4.3.12PK13	38
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	40
	LÄHTEET.....	41
	Liitteet	42

LYHENTEET JA TERMIT

IEEE	(Institute of Electrical and Electronics Engineer) kansainvälinen tekniikan alan järjestö
PF	(power factor) tehokerroin
P_{it}	välkynnän häiritsevyyssindeksi
PWM	(Pulse With Modulation) pulssinleveysmodulaatio
THD	(total harmonic distortion) harmoninen kokonaissärö
UPS	(uninterruptible power supply) keskeytymätön virransyöttö
I	virta, A
I_{rms}	virran tehollisarvo
p	hetkellinen teho
P	pätöteho, W
T	jakson aika
U	jännite, V
U_h	harmoninen yliaaltojännite
U_{rms}	jännitteen tehollisarvo
Q	loisteho, var
φ	vaihekulma

1 JOHDANTO

Sähkön laatu on monista suureista koostuva kokonaisuus ja sillä on merkittävä vaikutus erilaisten laitteiden toiminnan kannalta. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuuksien laatuvaatimukset on määritelty standardissa SFS-EN 50160. Sähkön laatuun kulutuskohteissa vaikuttaa sähkön tuottajan ja toimittajan lisäksi sähkön käyttäjän laitteiston tyyppi ja toiminta.

Opinnäytetyön aiheeksi on valittu sähkön laadun tutkimus Valmet Fabrics Kaukajärven tuotantoyksikössä. Sähkön kulutus on muuttunut tuotantokoneiden siirrostä toiseen tuotantoyksikköön ja uudenlaisen toiminnan kiinteistöön siirtymisen seurauksena, ja tästä syystä nykyinen sähkönlaadun tila on tarpeellista selvittää.

Työn tarkoituksena on mitata nykyinen sähkön laatu, ja tarkastella olemassa olevan laitteiston toimintaa sekä soveltuvuutta vallitsevaan kuormitukseen. Nykyiset muuntajat ja kompensointilaitteet ovat osittain varsin ikääntyneitä ja sähkönkulutuksen luonne on merkittävästi muuttunut viime vuosina mm. säädettävien käytöjen yleistyessä. Verkossa on myös esiintynyt häiriöitä, jotka ovat heikentäneet joidenkin laitteiden toimintaa, ja työssä on tarkoitus selvittää näiden häiriöiden syy ja mahdolliset korjaustoimenpiteet häiriöiden vähentämiseksi.

Työssä tarkastellaan erityisesti loistehon kompensoinnin tarvetta, muuntajien mitoitusta tehonkulutukseen verrattuna sekä verkon yliaaltopitoisuutta sekä yliaaltosuodatuksen toimivuutta.

2 TEORIA

2.1 Teho

Vaihtosähköteho on työtä, joka impedanssin läpi kulkeva sinimuotoinen sähkövirta suorittaa tietyssä ajassa. Hetkellinen teho p voidaan laskea jännitteen hetkellisarvon $\hat{u} \sin(\alpha + \varphi)$ ja virran hetkellisarvon $i \sin \alpha$ avulla, jossa vaihesiirtokulma φ voi olla sekä induktiivinen eli positiivinen että kapasitiivinen eli negatiivinen

$$p = ui = \hat{u} \sin(\alpha + \varphi) \hat{i} \sin(\alpha). \quad (1)$$

Tästä soveltamalla saadaan hetkellisen tehon lauseke seuraavaan muotoon

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + \varphi). \quad (2)$$

Keskimääräinen teho yhden tai useamman jakson T aikana on

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi, \quad (3)$$

jossa P on teho, U on jännite ja I on virta. (Aura & Tonteri 1997, 197.)

Pätötehon yksikkö on

$$P = UI \cos \varphi = W \text{ (watti)}. \quad (4)$$

Tehon yhtälössä esiintyvä lauseke UI on vaihtojännitteen ja -virran tehollisarvojen tulo, jota nimitetään näennäistehoksi S , sen yksikkö on

$$S = UI = VA \text{ (volttiampeeri)}. \quad (5)$$

(Aura & Tonteri 1997, 202.)

Näennäisteho sisältää työtä tekevän pätötehon P , joka siirtyy pysyvästi sähkölähteestä sekä työtä tekemättömän loistehon Q , joka kulkee edestakaisin sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä. Loistehon yksikkö on

$$Q = UI \sin \varphi = VAr \text{ (vari)}. \quad (6)$$

(Aura & Tonteri 1997, 198.)

Kolmivaihejärjestelmän pätöteho on vaihekohtaisten pätötehojen summa,

$$P_{3v} = P_1 + P_2 + P_3 \quad (7)$$

loisteho vaihekohtaisten loistehojen summa,

$$Q_{3v} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (8)$$

ja näennäisteho voidaan laskea näiden avulla

$$S_{3v} = \sqrt{(P_1 + P_2 + P_3)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_3)^2} \quad (10)$$

(Männistö 2018, 18).

2.2 Yliaallot

Vaihtojännitteet ja -virrat ovat säröytyneitä, kun niiden käyrämuoto ei ole täysin sinimuotoinen. Verkkajännitettä säröyttää lähinnä epälineaaristen kuormitusten verkosta ottamat tai verkkoon syöttämät virrat. Jännite säröytyy, koska muodoltaan perustaaajuisesta sinikäyrästä poikkeavat virrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä

Vaikka jännitteen tai virran käyrämuoto on säröytynyttä, voidaan näitä yleensä käsitellä jaksollisesti vaihtelevina suureina. Tällöin ne voidaan matemaattisesti esittää syntyneenä useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta komponentista.

Jaksollinen funktio, tässä tapauksessa jännite, voidaan esittää Fourierin sarjakehitelmän avulla:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{T}\right) + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{T}\right), \quad (11)$$

jossa n on kokonaisluku, T on jakson pituus, U_0 on jännitteen tasakomponentti ja A_n ja B_n ovat Fourierin sarjan kertoimia.

Fourierin sarjakehitelmän avulla voidaan siis jaksollinen epäsinimuotoinen funktio esittää tasakomponentin, perustaaajuisen komponentin ja harmonisten yliaallojen summana. Harmoniset yliaallot ovat taajuudeltaan perustaaajuuden kokonaislukukertoimia. (Männistö 2018, 18.)

2.2.1 Yliaallojen aiheuttajia

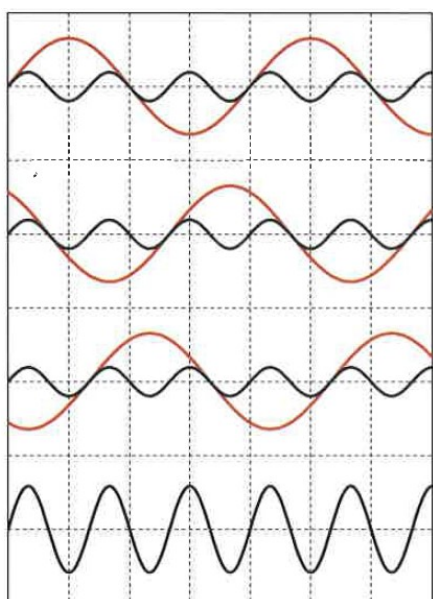
Tyypillisiä epäsinimuotoista virtaa aiheuttavat laitteet ovat tasa- ja vaihtosuuntaajat, tyristorisäätimet, hakkuriteholähteet, puolijohdekytkimet, hitsauslaitteet, viikaantuneiden muuntajien ja moottoreiden magneettipiirit sekä UPS-laitteet. (Männistö 2018, 18.)

2.2.2 Yliaaltojen haittoja

Yliaallot aiheuttavat häviöiden kasvua ja siten kuormitettavuuden alentumista. Kuormitettaessa muuntajaa nimellisen kuormituksen suuruisella ei-sinimuotoisella kuormavirralla tasavirtahäviöt pysyvät samansuuruisina, mutta pyörrevirtahäviöt kasvavat perustaajuutta korkeampitaajuuksien harmonisten virtojen takia. Tämä johtaa käämityksen lämpötilan nousuun, eikä muuntajaa pysty käytännössä kuormittamaan sen nimellisellä teholla.

Moottoreissa yliaallot aiheuttavat ylimääräistä lämpenemistä sekä eritaajuisia momenteja sekä värähtelyjä.

Pienjänniteverkossa nollajohdin ei kuormitu perustaajuisella symmetrisellä kolmi-vaihekuormalla lainkaan. Epäsymmetrisellä kuormalla nollajohdin kuormittuu korkeintaan saman verran kuin eniten kuormitettu vaihejohdin. Kolmella jaottomat harmoniset yliaallot kuormittavat nollajohdinta samalla tavalla kuin virran perusaalto. Sen sijaan kolmella jaolliset ja parittomat yliaallot voivat saada aikaan nollajohtimeen tehollisarvoltaan vaihejohtimien virtoja suuremman virran, koska ne summautuvat nollajohtimeen (kuvio 1). Sen lisäksi johtimen kuormitettavuus samalla pienenee virran taajuuden kasvaessa, kun johdon vaihtovirtaresistanssi kasvaa.



KUVIO 1. Samanvaiheiset vaihejohtimien kolmannet yliaaltovirrat summautuvat siten, että amplitudi nollajohtimessa on kolminkertainen (Männistö 2018. 33.)

Yliaallot voivat aiheuttaa myös automaatiolaitteiden, mittareiden ja suojarleiden virhetoimintoja.

2.3 Särö

Epälineaarisen kuormituksen aiheuttamien yliaaltojen määrä suhteessa perustaajuiseen sinikomponenttiin voidaan laskea yliaaltoanalyysin tuloksesta kaavojen 12 ja 13 avulla. Virran ja jännitteen tehollisarvot I_{rms} ja U_{rms} saadaan summamalla neliöllisesti yliaaltokomponentit toisiinsa ja ottamalla neliöjuuri saadusta summasta. (Hietalahti 2013, 274.)

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_0^n i_n^2} \quad (12)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\sum_0^n u_n^2} \quad (13)$$

2.3.1 THD

Virran ja jännitteen poikkeamaa sinimuodosta kuvataan THD prosenttiluvulla eli särökertoimella kaavojen 14 ja 15 avulla, joka määritetään IEEE standardeissa seuraavasti (Hietalahti 2013, 274).

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_{n,rms}^2}}{I_{1,rms}} \quad (14)$$

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} u_{n,rms}^2}}{U_{1,rms}} \quad (15)$$

Yleisestä sähköjakeluverkosta syötetyn sähkönn jänniteominaisuuksia määritellään jännitestandardissa SFS-EN 50160. Tämän standardin mukaan normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon aikana 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen U_h tehollisarvo 10 minuutin keskiarvoista tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin suuri taulukon 1 arvo.

TAULUKKO 1. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittämiskohdassa prosentteina perustaajuisesta jännitteestä (SFS-EN 50160).

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U_h)	Järjestysluku h	Suhteellinen 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.

Tämän vaatimuksen lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen THD_u tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.

Kulutuspaikan laitteistosta riippuen saattaa kuitenkin jo tätä pienempi jännitesäro häiritä laitteiden toimintaa (Männistö 2018. 21).

Standardissa on määritelty arvo kokonaissäro kertoimelle, jonka ollessa $\leq 3\%$, voidaan sähkönlaatu luokitella tältä osin korkeaksi.

2.3.2 Tehokerroin

Tehokerroin PF kuvaa sähköisen pätötehon ja loistehon välistä suhdetta,

$$PF = \frac{P}{S} \quad (16)$$

ja sinimuotoisessa tapauksessa määrittää myös virran ja jännitteen välisen vaihekulmaeron.

$$PF = \cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (17)$$

Tämä ei kuitenkaan toteudu, jos virta tai jännite on säröytynyttä. Jos jännite riittävän sinimuotoista ja virta epäsinimuotoista, voidaan tehokerroin määrittää seuraavasti,

$$PF = \frac{I_{1,rms} \cos \varphi}{I_{rms}} = K_p \cos \varphi \quad (18)$$

eli kerroin K_p kuvaa yliaaltojen suhdetta perustajuiseen aaltoon nähden. (Hieta-lahti 2013. 275.)

2.4 Loistehon kompensointi ja kompensointilaitteistot

Loistehon siirto pienentää pätötehon siirtokykyä ja lisää johtojen ja muuntajien jännite-, teho- ja energiahäviöitä. Loisvirran aiheuttamat pätöteho- ja energiahäviöt merkitsevät häviökustannusten kasvua pelkkään pätötehon siirtoon verrattuna. Tästä syystä olisi tarkoituksenmukaista tuottaa loissähkö mahdollisimman lähellä kulutuspaikkaa.

Sähkön kuluttajan kannalta loistehon kompensointitarve syntyy lähinnä jakeluverkon haltijan loissähkön hinnoittelusta. Loistehon siirto saattaa myös lisätä tarvetta kasvattaa asiakkaan liittymän kokoa, ja johtaa näin suurempaan liittymis- ja perusmaksuun. (Männistö 2018, 20.)

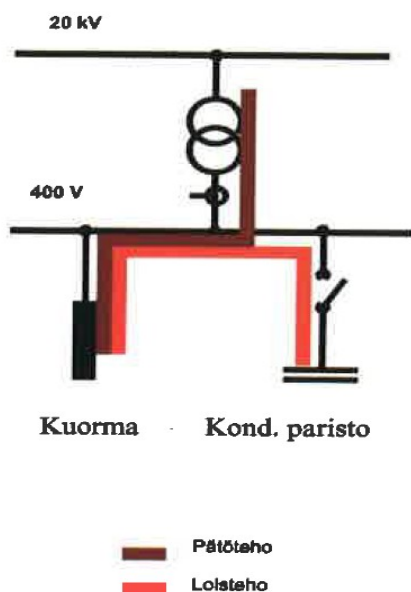
Loistehon kompensointiin ja yliaaltojen suodattamiseen käytettävät laiteratkaisut valitaan kompensoitavien laitteiden ja verkon yliaaltopitoisuuden mukaan. Kompensointi voidaan toteuttaa laite- tai ryhmäkohtaisesti tai keskitetysti. (Männistö 2018, 47.)

2.4.1 Kompensointikondensaattori

Pienjännitekondensaattoriyksikkö koostuu useasta rinnankytketystä kondensaattorielementistä. Pienjänniteyksiköt ovat yleensä 3-vaiheisia ja sisäisesti kolmioon tai tähteen kytkettyjä. Yksikkökoot ovat tyypillisesti 3,25-75 kvar, ja nimellisjännitteet 525 V tai 890 V.

Kondensaattoriyksiköt kytketään yleensä kuorman kanssa rinnan, ja ne voidaan ja kahteen ryhmään, kiinteisiin ja säädettäviin paristoihin. Kiinteissä yksiköissä kondensaattoriteho siirtyy sähköverkkoon ilman säätöä. Säädettävissä yksiköissä sähköverkkoon kytkettyä kondensaattoritehoa säädetään portaittain.

Pienjänniteverkoissa automaattisia yksiköitä ohjataan yleensä loistehonsäätäjällä, johon on aseteltu halutut havahtumisrajat sekä induktiiviselle että kapasitiiviselle puolelle. (Männistö 2018, 48.)



KUVA 1. Rinnakkaiskompensoinnin periaate (Männistö 2018, 49)

Kompensointikondensaattorin kapasitanssi ja syöttävän verkon induktanssi muodostavat aina rinnakkaisresonanssipiirin. Mikäli verkossa esiintyy yliaaltoja lähellä rinnakkaisresonanssipiirin ominaistajuutta, vahvistuvat yliaaltovirrat moninkertaisiksi. Tämä aiheuttaa sähkönlaadun huononemista sekä häiriöiden ja vaurioiden lisääntymistä. (ABB 2000, 5.)

Resonanssien välttämiseksi kuorman rinnalle kytkettäviä kompensointikondensaattoreita käytetään nykyään lähinnä kohteissa, joissa yliaaltoja ei juurikaan esiinny, kuten suorissa sähkömoottorilähdöissä.

2.4.2 Estokelaparisto

Estokelaparistolla vältetään haitallisten resonanssien syntyminen kondensaattorin kapasitanssin ja syöttävän verkon induktanssin välille lievästi yliaaltopitoisissa verkoissa.

Estokelapariston jokainen porraskoostuu kondensaattorin ja kuristimen sarjakytkenästä. Näin muodostuu sarjaresonanssiipiiri, joka on viritetty eri taajuudelle kuin verkossa esiintyvät yliaaltotaajuudet. Viritystaajuuden alapuolella, kuten verkon nimellistaajuudella, paristo on kapasitiivinen eli tuottaa loistehoa, kun taas viritystaajuuden yläpuolella paristo on induktiivinen eikä vahvasta yliaaltoja tyypillisillä yliaaltotaajuuksilla. Yleinen viritystaajuus on 189 Hz, joka osuu 3. ja 5. yliaallon väliin, eikä siten aiheuta resonanssia.

Estokelaparisto myös suodattaa jonkin verran verkossa esiintyviä yliaaltoja, viritystaajuudesta ja kompensoinnin tehosta riippuen. 189 Hz taajuudelle viritetty estokelaparisto suodattaa tyypillisesti 10-30 % viidennen yliaaltovirran määrästä. (Männistö 2018, 51-52.)

Estokelaparistoa voidaan käyttää kiinteinä vakioitehoisten laitteiden rinnalla, portaittain säädettävissä verkoissa, joissa on vaihteleva kuormitus, sekä tyristorikytkettynä verkoissa, joissa kuormitus muuttuu nopeasti.

2.4.3 Aktiivisuodatin

Aktiivisuodatin ovat puolijohdetekniikalla toteutettu virtalähde, joka mittaa virran yliaaltokomponentit ja tuottaa sen kanssa 180° vaihesiirrossa olevan virran joka

kumoo alkuperäisen yliaaltovirran, jolloin verkon kannalta kuormitus näyttää sinimuotoiselta.

Aktiivisuodatin toimii samalla periaatteella kuin taajuusmuuttaja, eli kompensoitavan verkon lataamat tasajännitekondensaattorit toimivat energialähteinä ja invertteri PWM-modulaatiolla halutun virran verkkoon.

Aktiivisen suodattimen etuja passiivikomponenteilla toteutettuun suodattimeen, ovat mm. mahdollisuus valita useita suodatettavia taajuuksia, mahdollisuus suodatukseen ilman loistehon tuotantoa, rinnakkaisresonanssivaaran välttäminen ja pienempi tilantarve. Aktiivisuodattimella saadaan myös kompensoitua kolmella jaolliset parittomat yliaallot. Aktiivisuodattimien yleistymisen esteenä on ollut puoli-johtimien suorituskyky ja passiivisuodatinratkaisuun verrattuna korkeampi hankintahinta. (Männistö 2018, 60.)

3 TUTKITTAVA LAITTEISTO

Työn kohteena on Valmet Fabrics Oy:n Tampereella Yrittäjänkadulla sijaitsevan tuotantolaitoksen pienjännitejakeluverkko.

3.1 Tehdasverkko

Tehdasverkko koostuu 20 kV:n keskijänniteverkosta, josta 7 tehdasmuuntamolla, 13 muuntajalla, jännite muutetaan 400 V jännitetasoon omille pääkeskuksille. 20 kV keskijänniteverkko on rakennettu rengasmaisesti ja liityntä verkkoyhtiön keskijänniteverkkoon on mahdollista kahdesta pisteestä tilaajamuuntamon T042 tai tehdasmuuntamon V kautta (liite 1).

3.1.1 Muuntajat

Kaikki muuntajien yläjännite on 20 kV ja alajännite 0,4 kV. Muuntajat on varustettu väliottokytkimillä, joka mahdollistaa $\pm 2 \times 2,5$ % muuntosuhteen säädön. Muuntajat ovat Dyn11-kytkettyjä.

TAULUKKO 2. Käytössä olevien muuntajien nimellistehot

Muuntaja	Merkki	Nimellisteho (kVA)
M1	ACC CTF-800 / 20,5 PNm	800
M2	Strömberg KTMU 24 x 4619	800
M3	ABB CTF-1250 / 20,5 PNS	1250
M4	ABB CTF-1000 / 20,5 PNm	1000
M5	Strömberg KTMU 24 x 4627	1000
M6	Strömberg KTMU 24 x 4627	1000
M7	Strömberg KTMU 24 x 5227	1000
M8	Strömberg KTMU 24 x 5227	800
M9	Siemens 4GB6064-3DC	1000
M10	Merlin Gerin Trihal	800
M11	TESAR TAA 800	800
M12	TMC Italia	1250
M13	ABB CTF-1250 / 20,5 PNSm	1250

3.1.2 Kompensointilaitteistot

Kompensoinnit on toteutettu keskitetysti keskuskohtaisesti. Pääkeskuksilla 8, 9, 11 ja 13 ei ole kompensointilaitteistoa, koska kuorma on näiltä osin ollut sähköjakelua suunniteltaessa pääasiassa resistiivistä.

TAULUKKO 3. Kompensointilaitteistojen tehot ja tehoportaat

Keskus	Kompensointilaitteiston	Teho, Q_n (kVAr)	Portaat (kVAr)
PK1	Estokelaparisto	200	4x50
PK2	Estokelaparisto	100	12,5 2x25 37,5
PK3	Estokelaparisto	600	6x100
PK4	Estokelaparisto	600	6x100
PK5	Estokelaparisto	150	3x50
PK6	Estokelaparisto	200	4x50
PK7	Estokelaparisto	200	4x50
PK10	Automatiikkaparisto	300	6x50
PK12	Estokelaparisto	300	2x25+5x50

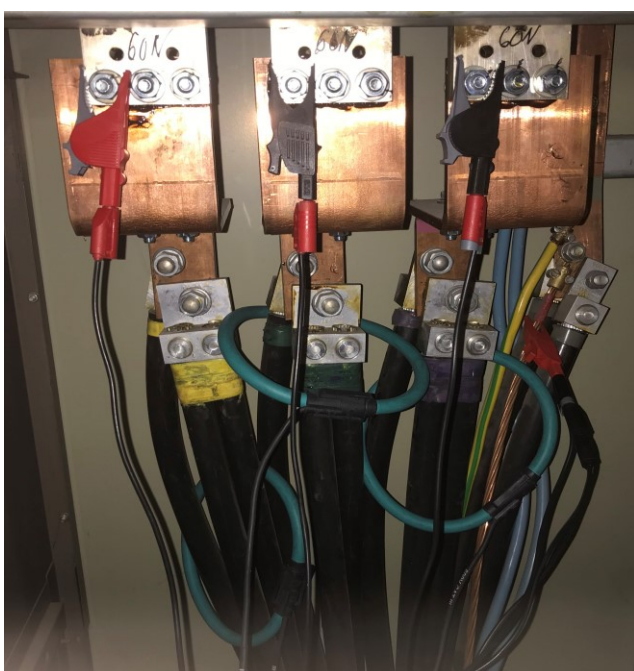
4 SÄHKÖNLAADUN MITTAUS

4.1 Mittauslaitteisto

Sähkönlaadun mittaukseen ja tiedon tallentamiseen käytettiin pääkeskuksilla PK2, PK4 ja PK7 Mavowat 70 Power Xplorer analysaattoria. Keskusten PK2, PK6 PK9 ja PK9 mittauksissa käytettiin Lem Topas 1000 analysaattoria ja keskuksilla PK3, PK5, PK10 ja PK12 Sonel PQM-703 analysaattoria. Jännitteiden mittaukseen käytettiin hauenleukapuristimia ja vaihevirtojen mittaukseen lenkkivirtapihtejä (kuva 2).

4.2 Mittauspaikat ja mittaustavat

Mittaukset suoritettiin pääosin mittaamalla virrat ja jännitteet pääkeskusten syötökiskostoista tai -kaapeleista. Mittausten aikana kompensointilaitteistot olivat normaalisti toiminnassa. Osa virtamittauksista tehtiin energiankulutusmittareiden virtamuuntajien toisioista. Mittaustapojen välillä ei havaittu eroja tarkkuudessa, ja molemmilla mittausmenetelmillä saadaan riittävän luotettavat mittaustulokset analysointia varten. Kuvassa 2 esitetty Pääkeskus 1 mittauskytkenät.



KUVA 2. PK1 Vaihevirtojen ja jännitteiden mittauskytkenät

4.3 Tulokset ja tulkinta

Mittaustulokset on esitetty keskuskohtaisesti. Vaiheet on nimetty siten, että L1-vaihe on nimetty kirjaimella A, L2-vaihe kirjaimella B ja L3-vaihe kirjaimella C. Mittaustuloksissa esitellään kaikkien mitattujen keskusten vaihejännitteiden, vaihevirtojen, pätö- ja loistehon sekä harmonisen kokonaisjännitesärön minimi-, maksimi- ja keskiarvot kymmenen minuutin jaksoissa.

Myös jakelujännitteen taajuus mitattiin kaikista keskuksissa koko mittausjakson ajan. Taajuuspoikkeamia ei mittaustuloksista havaittu ja taajuus pysyi kaikissa keskuksissa hyvin standardin SFS-EN 50160 määrittelemien rajojen sisäpuolella, eikä mittaustuloksia siitä syystä tässä esitellä. Myöskään merkittäviä jännitekuoppia tai ylijännitteitä ei mittausten aikana esiintynyt.

Tuloksia on verrattu vuoden 2016 mittaustuloksiin niiltä osin, joissa vanhoja tuloksia on saatavilla. Vuoden 2016 mittaustulokset ovat pääosin mitattu 10 minuutin jaksoina yhden tunnin aikana, joten kuormituksen ajoittumisesta johtuen mittaustulokset eivät kaikilta osin ole vertailukelpoisia. Myös tehon maksimiarvon esitystapa poikkeaa aikaisemmista mittauksista, mutta tällä ei ole merkittävää vaikutusta lopputulokseen.

Tuloksien käsittelyn yhteydessä tuodaan esille myös mittaustuloksissa ilmi tulleita poikkeamia ja erityispiirteitä, vaikka nämä eivät kuulu standardissa määriteltyihin ominaisuuksiin.

Pääkeskus PK13 on otettu käyttöön vasta vuonna 2021, joten vertailukohtana käytettäviä tuloksia ei ollut saatavilla. Keskuksen virtamittaus suoritettiin keskuksen oman tehoanalyysointilaitteen mittarin virtamuuntajien toisioista. Mittaustuloksista ilmeni, että tehoanalyysointilaitte oli kytketty väärin, ja tästä syystä analyysointilaitteen mitaamat vaihesiirtokulmat eivät ole todenmukaisia ja lasketut tehot eivät pidä paikkaansa. Mittaustuloksista käyttökelpoisia ovat kuitenkin virran ja jännitteen arvot, joten tässä raportissa keskitytään käsittelemään näitä mittaustuloksia.

Pääkeskuksella PK11 ei mittauksia suoritettaessa ollut kuormitusta, joten tältä osin mittauksia ei tehty.

4.3.1 PK1

PK2 vaihejännitteet olivat keskimäärin 232 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittauksen aikana 215 - 484 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 4,5 % tasolla. Taulukon 4 mukaan keskuksen kuoritus oli alhaisemmalla tasolla vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna, johtuen huollon takia pois käytöstä olevasta pumpun moottorista.

TAULUKKO 4. PK1 mittaustulokset

PK1	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	227,4	234,4	231,9	227,1	235,3	231,9
B U_{rms} (V)	224,5	235,0	232,5	222,9	235,6	231,9
C U_{rms} (V)	216,7	235,0	232,4	215,3	246,0	233,5
A I_{rms} (A)	335,8	587,3	398,2	277,9	484,3	340,7
B I_{rms} (A)	301,4	543,8	360,7	236,3	432,5	296,4
C I_{rms} (A)	262,7	552,9	360,7	253,4	447,5	306,4
P (kW)	211,6	353,1	242,5	188,7	279,0	213,0
Q (kVAr)	70,2	108,1	78,6	-24,6	24,9	4,2
A THD _u (%)	2,28	4,06	2,75	2,24	4,30	2,96
B THD _u (%)	2,46	4,42	3,00	2,36	4,48	3,10
C THD _u (%)	2,42	4,19	2,89	2,29	4,29	3,02

Huomioitavaa mittaustuloksissa on L3-vaihejännitteen minimi- ja maksimiarvot, jotka poikkeavat huomattavasti nimellisarvosta. Nämä poikkeavat arvot esiintyvät vain yhdessä 10 minuutin aikajaksossa, eikä jännitevaihtelulle löytynyt syytä muista mittaustuloksista.

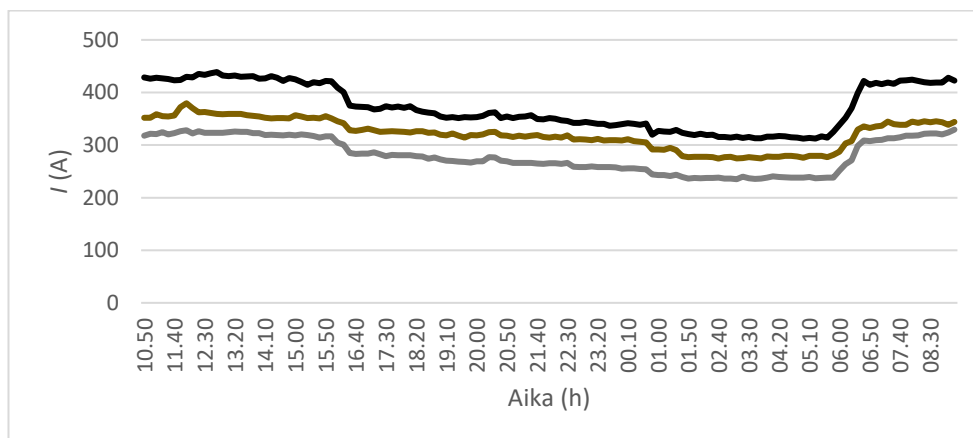
4.3.2 PK2

PK2 vaihejännitteet olivat keskimäärin 232 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirrat mittauksen aikana 235 - 476 A. Vaihevirroissa havaittavissa epäsymmetrinen kuormitus. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 3,5 % tasolla. Taulukon 5 mukaan keskuksen kuormitus oli hieman alhaisemmalla tasolla vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 5. PK2 mittaustulokset

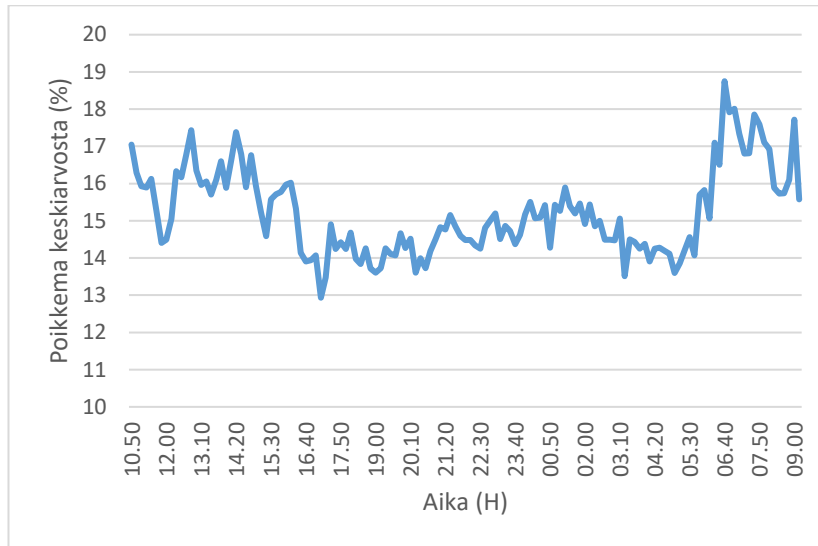
PK2	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	227,5	229,9	N/A	227,9	236,3	233,1
B U_{rms} (V)	229,3	231,4	N/A	228,3	235,5	232,4
C U_{rms} (V)	228,8	231,6	N/A	229,2	236,5	233,4
A I_{rms} (A)	468,2	518,3	N/A	306,1	476,1	372,3
B I_{rms} (A)	398,4	433,3	N/A	267,9	411,3	321,3
C I_{rms} (A)	387,1	425,0	N/A	235,1	372,1	280,8
P (kW)	274,3	287,0	N/A	189,9	262,1	224,1
Q (kVar)	89,8	94,5	N/A	1,1	58,8	26,2
A THD _u (%)	1,48	1,86	N/A	1,20	3,46	1,94
B THD _u (%)	1,62	1,94	N/A	1,25	3,47	1,93
C THD _u (%)	1,61	1,98	N/A	1,29	3,46	1,94

PK2 mittaustuloksissa huomionarvoista on vaihevirtojen epäsymmetria, joka on esitetty kuviossa 2. Vaihevirrat olivat koko mittauksen ajan epäsymmetrisiä.



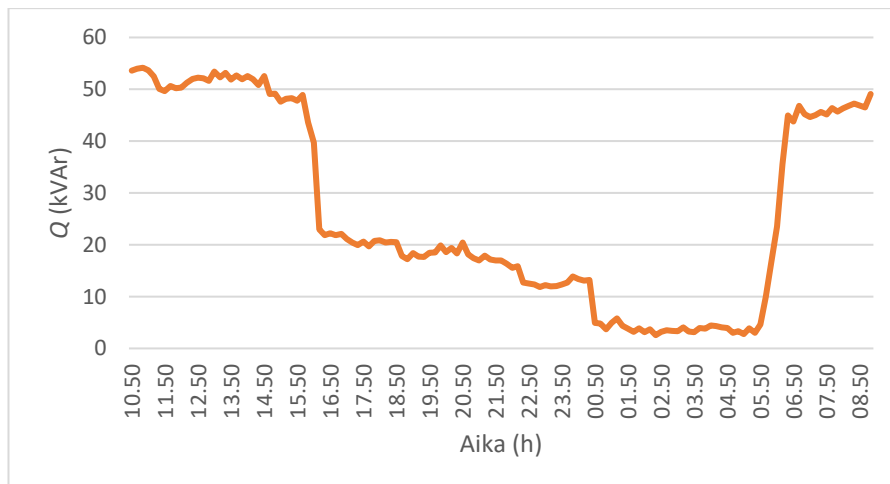
KUVIO 2. PK2 vaihevirtojen 10 minuutin keskiarvot mittauksen aikana

Vaikka standardi SFS-EN 50160 ei ota kantaa vaiheiden vinokuormitukseen, on kuitenkin ST-kortiston osassa 52.51.04 mainittu suositus, jonka mukaan suurin sallittu sähkökeskuksen vinokuormitus on $\pm 10\%$. Tämä arvo ylittyy koko mittausjakson ajan (kuvio 3).



KUVIO 3. Vaihejännitteiden suhteellinen poikkeama keskiarvosta mittauksen aikana

Vuoden 2016 mittausten aikana loistehon kompensointilaitteisto on ollut pois käytöstä, ja verrattuna tähän tulokseen on vuoden 2021 mittauksen loistehon taso epäilyttävän korkea (kuvio 4). Taulukon 3 mukaan kyseisen keskuksen kompensointilaitteiston teho on porrastettu viiteen eri portaaseen, ja sen pitäisi pystyä pitämään loistehon kulutus alhaisemmalla tasolla. Tästä syystä voidaan epäillä, että kompensointilaitteisto ei toimi halutulla tavalla.



Kuvio 4. Kokonaisloistehon tehollisarvon keskiarvo mittauksen aikana

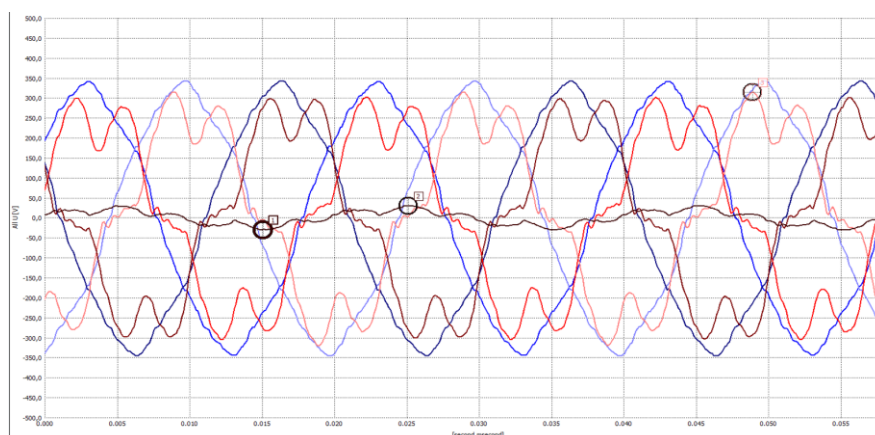
4.3.3 PK3

PK3 vaihejännitteet olivat keskimäärin 232 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirrat mittauksen aikana 300 - 1177 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 5,3 % tasolla. Taulukon 6 mukaan keskuksen kuormitus oli hieman alhaisemmalla tasolla vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 6. PK3 mittaustulokset

PK2	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	223,4	231,3	N/A	226,1	235,1	231,6
B U_{rms} (V)	224,5	232,0	N/A	226,4	235,0	231,6
C U_{rms} (V)	224,6	232,2	N/A	227,4	236,1	232,4
A I_{rms} (A)	598,4	1244,0	N/A	299,6	1075,0	583,8
B I_{rms} (A)	614,2	1276,0	N/A	300,2	1060,0	593,2
C I_{rms} (A)	613,6	1253,0	N/A	300,2	1177,0	597,0
P (kW)	391,9	588,5	N/A	220,4	612,4	392,1
Q (kVAr)	40,9	250,6	N/A	3,7	94,8	50,6
A THD _u (%)	3,53	4,65	N/A	3,24	5,17	4,00
B THD _u (%)	3,54	4,65	N/A	3,36	5,34	4,02
C THD _u (%)	3,51	4,62	N/A	3,25	5,11	3,96

Osittain säädetyistä sähkömoottorikäytöistä koostuvan kuormituksen ottama ei-sinimuotomainen virta vaikuttaa jännitteen käyrämuotoon niin, että jännite säröytyy, mutta ei kuitenkaan haitallisen paljon, ja kokonaisjännitesärö pysyi alle standardin SFS-EN 50160 määrittelevän 8 % arvon (kuva 3).



KUVA 3. PK3 vaihevirtojen ja -jännitteiden käyrämuodot

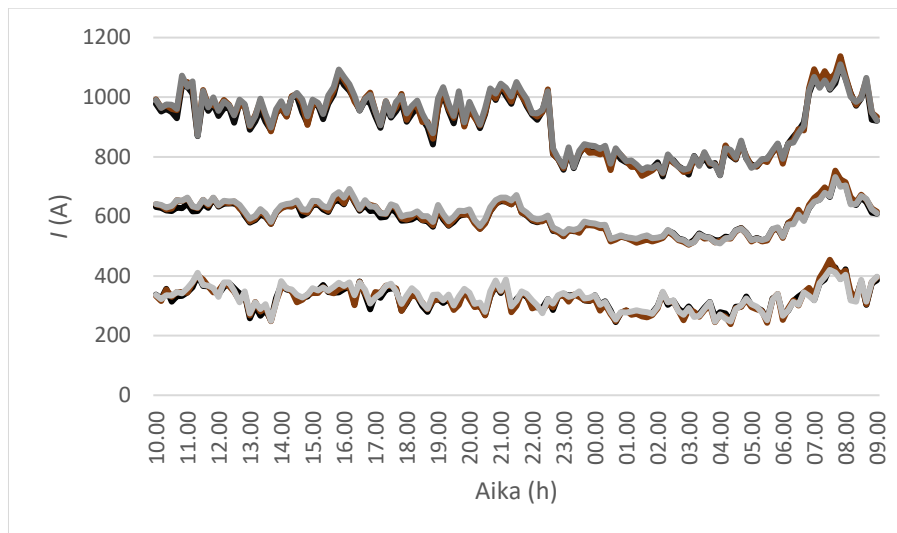
4.3.4 PK4

PK4 vaihejännitteet olivat keskimäärin 233 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Jännitetaso on noussut aikaisemmasta 2016 vuoden mittauksesta (taulukko 7). Jännitteen nousu johtuu muuntajan väliottokytkimen asettelun muuttamisesta, joka on tehty vuoden 2016 jälkeen. Vaihevirratt mittauksen aikana 239 - 1138 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 3,2 % tasolla. Keskuksen kuoritus oli hieman alhaisemmalla tasolla vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 7. PK4 mittaustulokset

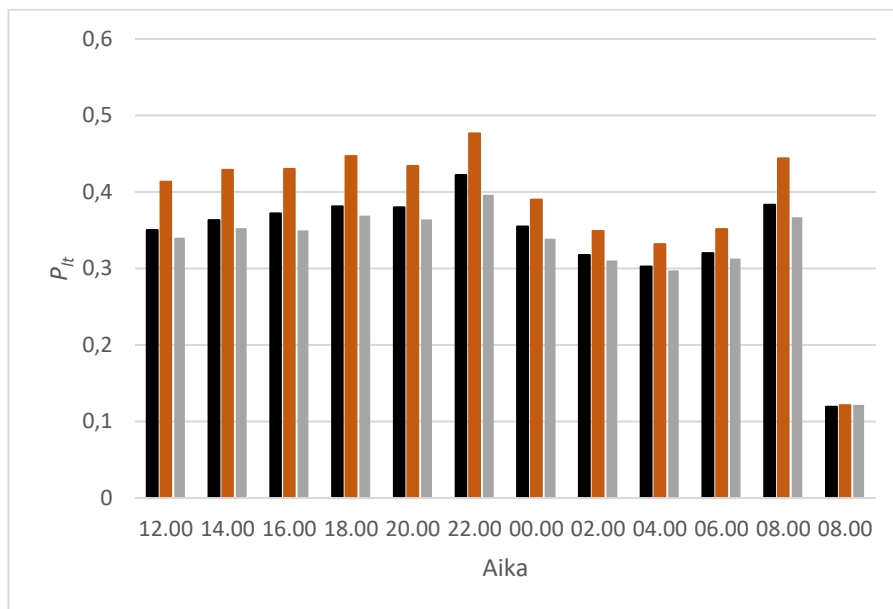
PK4	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	218,9	222,5	221,0	229,8	236,6	233,2
B U_{rms} (V)	218,0	222,5	220,9	228,3	235,3	231,7
C U_{rms} (V)	218,7	222,9	221,5	229,6	236,4	232,9
A I_{rms} (A)	562,0	1212,0	812,5	245,5	1107,8	594,6
B I_{rms} (A)	571,9	1220,0	823,0	238,6	1137,5	597,6
C I_{rms} (A)	556,3	1206,0	810,5	246,8	1110,4	602,1
P (kW)	374,8	585,2	466,5	311,3	732,1	372,0
Q (kVAr)	242,2	323,2	262,7	12,7	105,9	35,8
A THD _u (%)	3,19	3,62	3,40	1,54	3,06	2,46
B THD _u (%)	3,43	3,88	3,66	1,57	3,19	2,63
C THD _u (%)	3,38	3,83	3,62	1,56	3,23	2,63

Mittaustuloksissa huomionarvoista on, että kuormitus vaihtelee 10 minuutin pituisten mittausjaksojen aikana huomattavasti (kuvio 5). Tämä johtuu kuormasta, joka suurelta osin koostuu säädetyistä sähkömoottorikäytöistä, joiden kuormitus vaihtelee n. yhden sekunnin taajuudella. Nämä sähkökäytöt ovat lisäksi osittain verkkoon jarruttavia.



KUVIO 5. PK4 vaihevirtojen maksimi- keski- ja minimiarvot

Kuormituksen nopea vaihtelu voi aiheuttaa jännitevaihteluita liityntäpisteessä, josta voi seurata haittaa valojen välkyntänä. Kuormitus ei kuitenkaan vaikuttanut jännitteeseen niin paljon, että välkyntän häiritsevyyttä kuvaava indeksi P_{ft} kasvaisi millään 10 minuutin mittausjaksolla yli SFS_EN 50160 standardin määrittelemän raja arvon 1 (kuvio 6).



KUVIO 6. PK4 välkyntän häiritsevyyssindeksi vaiheittain mittauksen aikana kahden tunnin jaksoissa

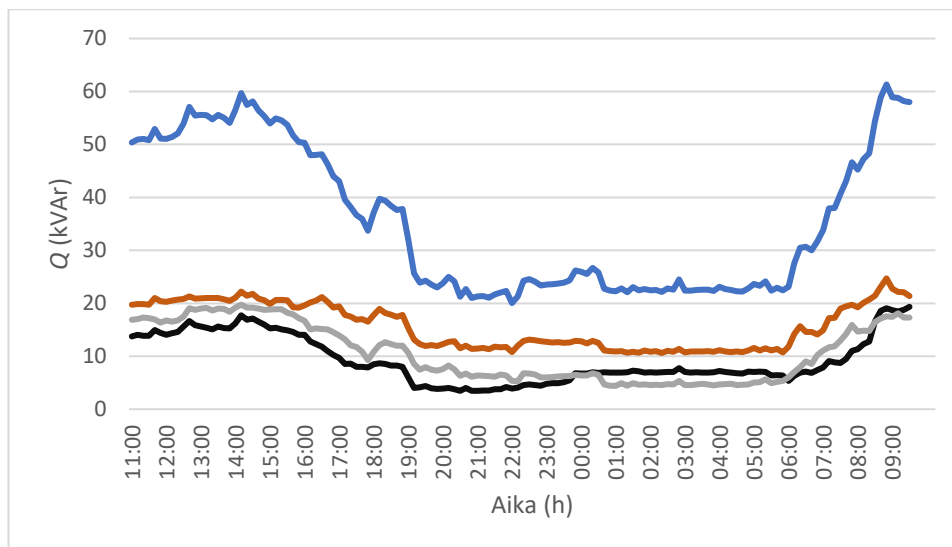
4.3.5 PK5

PK5 vaihejännitteet olivat keskimäärin 236 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittauksen aikana 178 - 498 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan alle 3 % tasolla. Taulukon 8 mukaan keskuksen kuormitus oli pysynyt ennallaan vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 8. PK5 mittaustulokset

PK5	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	228,4	232,0	N/A	228,7	236,2	232,8
B U_{rms} (V)	229,6	233,1	N/A	228,9	235,8	232,6
C U_{rms} (V)	228,9	233,1	N/A	229,9	237,2	233,7
A I_{rms} (A)	420,8	506,8	N/A	196,4	482,7	292,8
B I_{rms} (A)	378,0	467,0	N/A	190,8	498,3	292,9
C I_{rms} (A)	381,2	461,4	N/A	177,6	466,0	273,7
P (kW)	267,8	307,1	N/A	136,1	283,1	196,0
Q (kVar)	12,3	66,2	N/A	20,0	61,3	35,7
A THD _u (%)	1,78	2,35	N/A	1,32	2,82	2,11
B THD _u (%)	1,82	2,39	N/A	1,34	2,83	2,19
C THD _u (%)	1,81	2,37	N/A	1,36	2,84	2,20

PK5 mittaustuloksista havaittiin, että loistehon kulutus on suhteellisen korkea kuormitukseen ja loistehon kompensointilaitteiston tehoon verrattuna. Kuviossa 7 on esitettyä loistehon kokonaiskulutus sinisenä ja vaihekohtaiset kulutukset mustalla, ruskealla ja harmaalla. Koska vuoden 2016 mittauksissa loistehon kompensointi ei ole ollut käytössä ja maksimiarvo on hyvin lähellä 2021 mitattuja tuloksia, voidaan olettaa, että kompensointilaitteisto ei ole aktivoitunut mittauksen aikana. Tämä johtuu todennäköisesti kompensointilaitteiston loistehonsäätimen asetteluarvoista.



KUVIO 7. PK5 loistehon kulutus vaiheittain ja kokonaisuutena

4.3.6 PK6

PK5 vaihejännitteet olivat keskimäärin 234 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittauksen aikana 186 - 365 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 3,4 % tasolla. Taulukon 9 mukaan keskuksen kuoritus oli alhaisempi vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna. Kuormitus oli tasainen mittausjakson aikana, eikä mittaustuloksista tullut ilmi mitään poikkeavaa.

TAULUKKO 9. PK6 mittaustulokset

PK6	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	229,3	232,6	N/A	231,3	238,5	235,1
B U_{rms} (V)	228,9	232,5	N/A	228,9	235,5	232,4
C U_{rms} (V)	229,6	233,0	N/A	230,0	237,0	233,7
A I_{rms} (A)	305,8	551,0	N/A	186,3	364,5	227,2
B I_{rms} (A)	285,2	527,7	N/A	188,3	363,9	226,1
C I_{rms} (A)	295,4	526,7	N/A	198,3	377,3	240,1
P (kW)	188,3	293,5	N/A	131,8	197,5	152,2
Q (kVAr)	18,3	168,2	N/A	10,5	27,8	16,5
A THD _u (%)	2,54	3,38	N/A	2,03	3,22	2,62
B THD _u (%)	2,63	3,45	N/A	2,19	3,37	2,75
C THD _u (%)	2,68	3,54	N/A	2,17	3,33	2,77

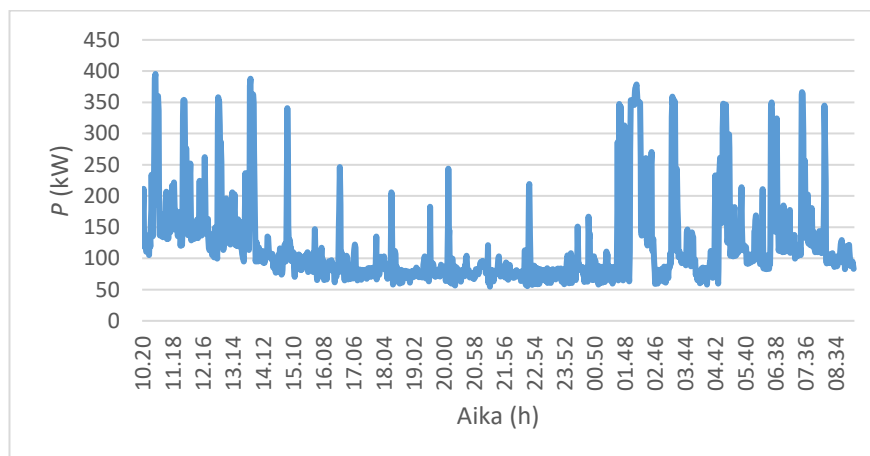
4.3.7 PK7

PK7 vaihejännitteet olivat keskimäärin 228 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirrat mittauksen aikana 76 - 597 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli alle 3 % tasolla. Taulukon 10 mukaan keskuksen kuormitus oli merkittävästi korkeampi vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 10. PK7 mittaustulokset

PK7	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	225,0	226,7	N/A	225,6	232,3	229,1
B U_{rms} (V)	225,4	227,3	N/A	224,1	230,8	227,7
C U_{rms} (V)	225,1	226,8	N/A	225,1	231,9	228,5
A I_{rms} (A)	101,2	167,9	N/A	88,6	597,4	185,2
B I_{rms} (A)	98,7	161,0	N/A	79,2	586,7	175,5
C I_{rms} (A)	89,3	145,9	N/A	75,6	580,9	169,4
P (kW)	45,8	56,2	N/A	53,3	403,9	120,2
Q (kVar)	10,2	19,3	N/A	-14,4	28,4	-4,7
A THD _u (%)	1,50	1,77	N/A	1,39	2,73	1,95
B THD _u (%)	1,58	1,83	N/A	1,38	2,74	1,93
C THD _u (%)	1,54	1,81	N/A	1,53	2,82	2,04

Keskuksen kuormitus on mittausten mukaan vaihtelevaa (kuvio 8), eikä vuonna 2016 suoritetun lyhyen mittausjakson aikana ole ollut tuotannosta johtuvaa kuormitusta.



Kuvio 8. PK7 pätöteho mittauksen aikana

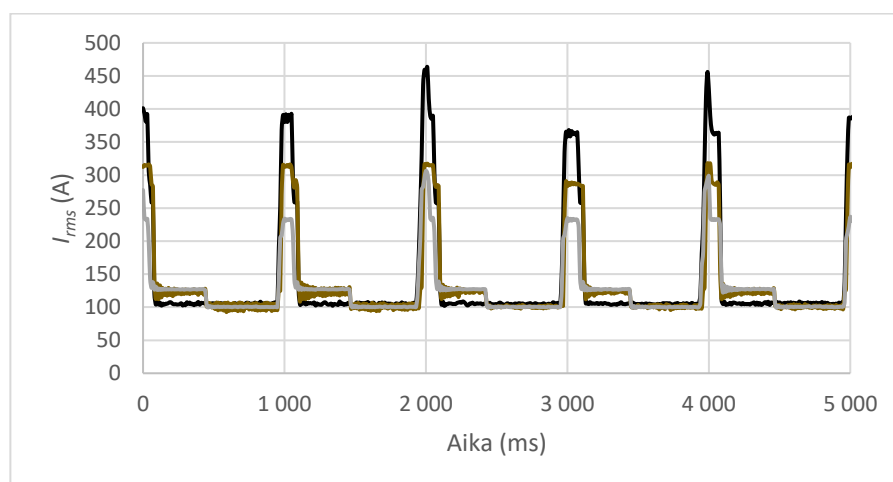
4.3.8 PK8

PK8 vaihejännitteet olivat keskimäärin 234 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittauksen aikana 8 - 543 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli alle 3 % tasolla. Taulukon 11 mukaan keskuksen kuormitus oli samalla tasolla vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 11. PK8 mittaustulokset

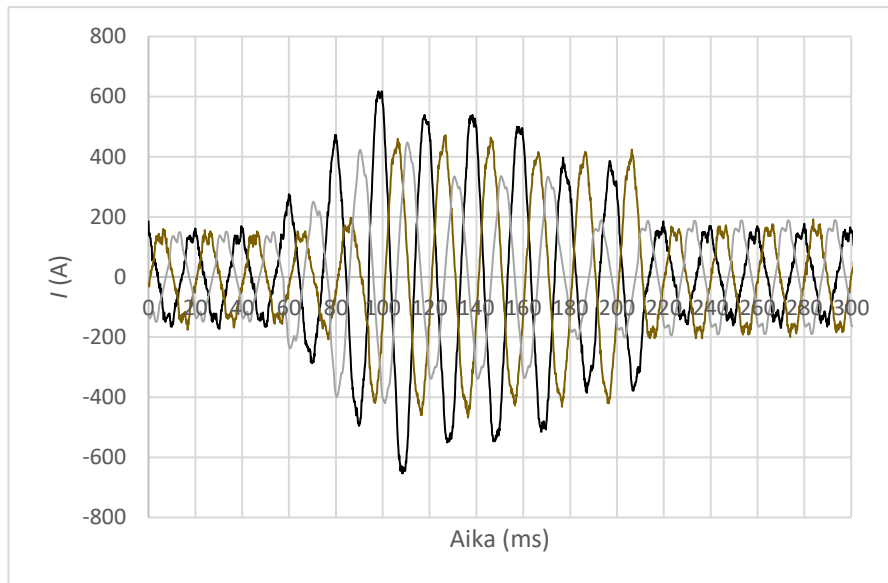
PK8	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	228,7	236,3	233,0	227,9	237,0	233,4
B U_{rms} (V)	229,2	236,7	233,5	230,4	238,9	235,0
C U_{rms} (V)	229,0	236,4	233,3	229,1	238,1	234,2
A I_{rms} (A)	22,5	553,8	95,9	11,3	501,7	63,0
B I_{rms} (A)	16,8	560,7	92,5	7,8	543,6	62,3
C I_{rms} (A)	17,2	561,3	99,5	12,3	517,8	61,2
P (kW)	11,1	258,9	67,9	8,8	292,5	35,4
Q (kVar)	6,0	75,4	17,1	-1,4	38,4	8,4
A THD _u (%)	0,99	1,86	1,39	0,92	2,25	1,52
B THD _u (%)	1,20	2,10	1,56	0,97	2,40	1,59
C THD _u (%)	1,15	1,99	1,52	0,97	2,35	1,63

Huomionarvoista mittaustuloksissa oli keskuksen kuorituksen nopeat muutokset, jotka johtuvat alipaineuuniin tehonsäädön toiminnasta. Kuviossa 9 on esitetty keskuksen virta ajan funktiona, josta voidaan havaita virran suuri vaihtelu yhden sekunnin sykleissä.



Kuvio 9. PK8 vaihevirratt ajan funktiona

Kuviossa 10 on esitetty kuormitusvirran vaiheiden käyrämuodot yhden kuormitussyklin ajan, ja kuviosta voidaan havaita virranmuodon säilyvän melko sinimuotoisena kuormituksen aikana.



Kuvio 10. PK8 vaihevirrat yhden kuormitussyklin aikana

Kuviosta 9 ja 10 voidaan havaita myös merkittävä ero vaihevirtojen amplitudien välillä, mutta tämä ei kuitenkaan aiheuta suuria haittavaikutuksia, koska kuormitushuiput ovat hyvin lyhytkestoisia.

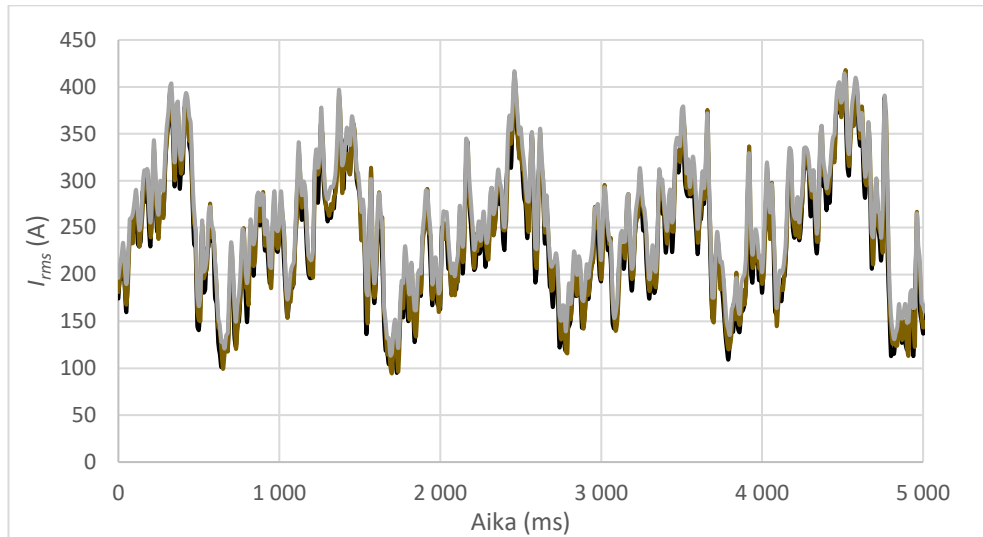
4.3.9 PK9

PK9 vaihejännitteet olivat keskimäärin 233 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittauksen aikana 73 - 667 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 4,3 % tasolla ja taulukon 12 mukaan suurempi kuin vuonna 2016 mitattu. Myös keskuksen kuormitus oli korkeampi vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 12. PK9 mittaustulokset

PK9	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	228,8	231,6	230,2	228,0	235,3	232,1
B U_{rms} (V)	229,2	231,8	230,5	227,6	235,1	231,9
C U_{rms} (V)	228,8	232,1	230,8	230,1	237,8	234,6
A I_{rms} (A)	99,9	368,8	146,5	76,2	647,0	210,0
B I_{rms} (A)	97,8	381,2	145,0	73,0	661,9	217,1
C I_{rms} (A)	102,8	382,0	158,8	82,2	666,5	227,6
P (kW)	50,9	143,2	N/A	59,3	177,0	122,9
Q (kVAr)	63,9	81,5	N/A	58,2	76,2	68,0
A THD _u (%)	1,68	2,31	N/A	1,55	4,23	2,51
B THD _u (%)	1,81	2,40	N/A	1,69	4,32	2,66
C THD _u (%)	1,73	2,38	N/A	1,70	4,34	2,65

Mittauksissa havaittiin, että kuormitus nopeasti vaihtelevaa ja kuormitusvirtahuit ovat huomattavasti keskimääräistä kuormitusta suurempia (kuvio 11). Vaihtelu johtuu tuotantokoneiden säädetyistä sähkömoottorikäytöistä, joiden nopeus vaihtelee noin yhden sekunnin taajuudella.



KUVIO 11. PK9 vaihekohtaiset kuormitusvirrat ajan funktiona

Keskusta ei ole varustettu loistehon kompensointilaitteistolla ja loistehon määrä suhteessa pätötehoon oli mitausten aikana korkealla tasolla. Jos keskuksen loisteho haluttaisiin tehokkaasti kompensoida, tulisi se kuormituksen nopean vaihtelun takia varustaa aktiivisella suodatuslaitteistolla eikä se loistehon matalan tehollisarvon vuoksi ole kannattavaa.

4.3.10 PK10

PK10 vaihejännitteet olivat keskimäärin 232 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittauksen aikana 101 - 584 A. Jännitteen harmoninen kokonaissärö oli suurimmallaan 3,7 % tasolla. Taulukon 13 mukaan keskuksen kuormitus oli pysynyt ennallaan vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TALUKKO 13. PK10 mittaustulokset

PK10	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	227,8	231,4	N/A	226,7	235,0	231,9
B U_{rms} (V)	228,6	231,7	N/A	226,8	235,1	231,9
C U_{rms} (V)	228,5	232,0	N/A	227,8	236,1	232,8
A I_{rms} (A)	177,3	529,0	N/A	143,6	583,7	252,0
B I_{rms} (A)	168,6	458,5	N/A	101,3	527,6	210,7
C I_{rms} (A)	164,6	444,5	N/A	104,5	515,9	209,3
P (kW)	127,1	289,7	N/A	92,9	321,8	144,3
Q (kVar)	-4,3	88,3	N/A	-7,6	67,4	45,8
A THD _u (%)	1,35	1,69	N/A	1,35	3,66	1,86
B THD _u (%)	1,48	1,81	N/A	1,20	3,66	1,98
C THD _u (%)	1,52	1,83	N/A	1,45	3,69	2,05

Keskuksen loistehon kompensointi on toteutettu automatiikkaparistolla. Vaikka kompensointilaitteistoa ei ole varustettu estokeloilla, eivät verkossa esiintyvät yliaaltovirratt pääse synnyttämään rinnakkaisresonanssiipiiriä, joka vahvistaisi niitä haitallisen paljon, ja sähkön laatu heikkenisi.

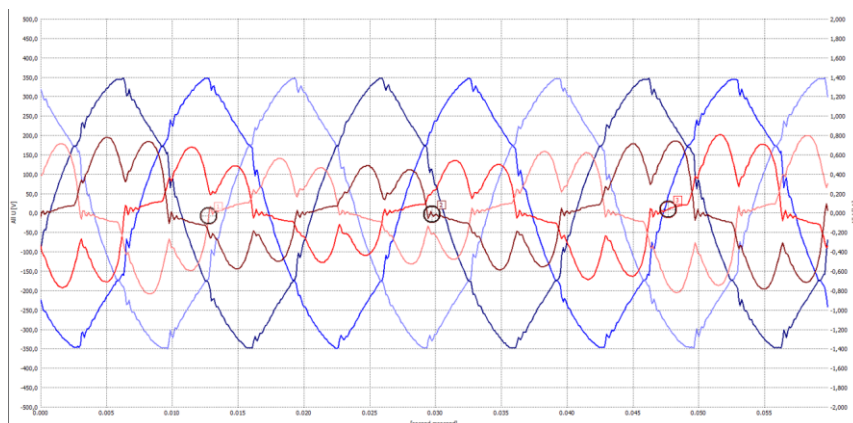
4.3.11 PK12

PK12 vaihejännitteet olivat keskimäärin 233 V, eikä vaihejännitteissä ollut merkittävää poikkeamaa nimellisjännitteestä. Vaihevirratt mittausten aikana 78 - 926 A. Taulukon 14 mukaan keskuksen kuormitus oli pysynyt ennallaan vuoden 2016 tilanteeseen verrattuna.

TAULUKKO 14. PK12 mittaustulokset

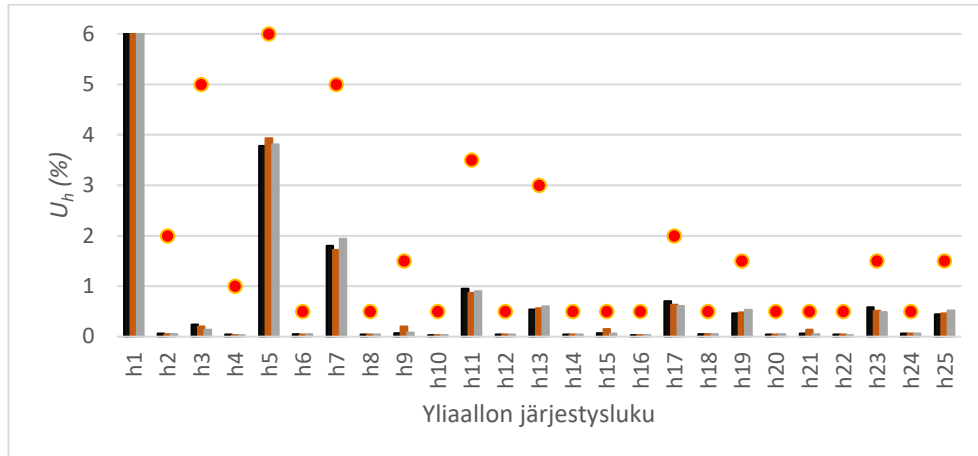
PK12	2016			2021		
	min	max	KA	min	max	KA
A U_{rms} (V)	228,5	236,3	233,2	228,2	237,0	233,2
B U_{rms} (V)	229,4	236,9	233,6	228,3	237,1	233,2
C U_{rms} (V)	228,7	236,5	233,4	229,0	238,0	234,0
A I_{rms} (A)	74,5	812,8	136,0	89,0	888,2	157,6
B I_{rms} (A)	77,2	839,1	135,6	86,2	915,7	158,5
C I_{rms} (A)	66,0	839,6	129,7	77,8	926,1	153,8
P (kW)	52,5	421,2	90,2	65,5	295,5	103,7
Q (kVar)	-2,4	75,1	4,5	-11,6	36,5	6,2
A THD _u (%)	1,25	5,82	1,91	1,63	6,49	2,67
B THD _u (%)	1,42	5,89	2,07	1,66	6,54	2,69
C THD _u (%)	1,41	5,87	2,08	1,78	6,50	2,76

Mittaustuloksista huomionarvoista on kokonaissärökertoimen arvo, joka kuormituksen aikana jopa yli 6,5 %. Tämä johtuu säädettävien sähkökäyttöjen ottaman hyvin ei-sinimäisen virran aiheuttamasta jännitteen aaltomuodon poikkeamisesta sinimuodosta (kuva 4).



KUVA 4. Vaihejännitteiden ja -virtojen käyrämuodot

Yksittäisistä harmonisista yliaaltovirroista viides 250 Hz virtayliaalto oli voimakkain n. 200 ampeeria ja tämä aiheutti verkon impedansseissa n. 4 % suhteellisen yliaaltojännitteen perusaaltoon verrattuna. Yksittäiset suhteelliset harmoniset yliaaltojännitteet eivät kuitenkaan ylittäneet standardissa SFS-EN 50160 ilmoitettuja sallittuja maksimiarvoja (kuvio 12).



KUVIO 12. PK12 suhteelliset harmoniset yliaaltojännitteet ja raja-arvot järjestyslukuun 25 asti

Vaikka mittaustulokset alittavat standardissa SFS-EN 50160 määritellyt raja-arvot, voi keskuksen sähkön laatu olla riittämätön joillekin laitteistoille ja tämä tulee ottaa huomioon mahdollisia sähköverkon muutoksia suunniteltaessa tämän pääkeskuksen jakelualueella.

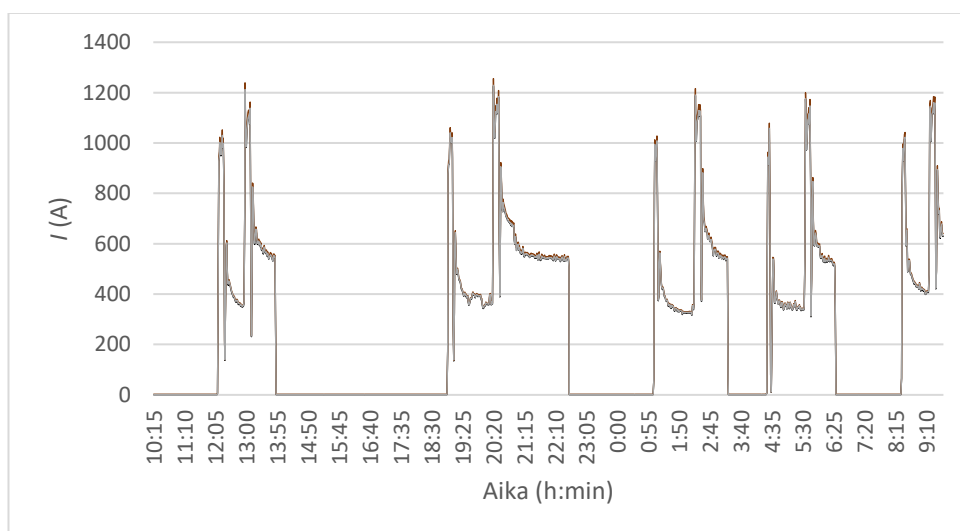
4.3.12 PK13

Pääkeskus PK13 jännitteet olivat keskimäärin 231 V. Jännite laskee hieman kuormituksen aikana. Vaihevirrat olivat mittauksen aikana 1-1337 A (taulukko 15).

TAULUKKO 15. PK13 mittaustulokset

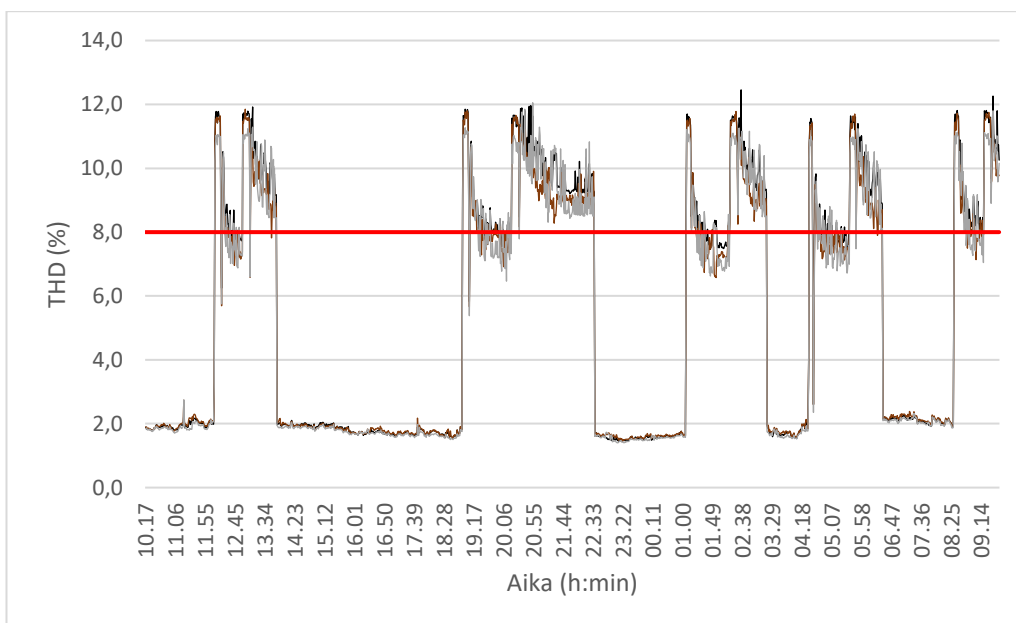
PK13	min	max	KA
Avrms (V)	227,0	238,2	232,3
BVrms (V)	224,9	235,7	230,1
CVrms (V)	224,8	235,9	230,1
Airms (A)	0,9	1304,2	258,1
Birms (A)	1,3	1337,2	263,0
Cirms (A)	1,0	1309,6	259,0
A THD U (%)	1,46	12,45	5,19
B THD U (%)	1,45	11,85	4,97
C THD U (%)	1,40	12,05	4,86

Kuviossa 13 on esitetty vaihevirrat mustalla, ruskealla ja harmaalla, mittauksen aikana, ja tästä voidaan havaita, että kuormitus vaihtelee voimakkaasti. Tämä johtuu kuormasta, joka koostuu pelkästään lämpökäsittelykoneen ilmanlämmitys-laitteistosta.



KUVIO 13. PK13 vaihevirrat

Ilmanlämmityslaitteisto on toteutettu neljällä vastusyksiköllä, joista kolmen nimellisteho on 277 kW ja yhden 158 kW. Laitteiston tehonsäätö on toteutettu tyristoritehonsäätimellä, joka säätelee vastusten tehoa tyristorin sytytyksen vaihekulmaa muuttamalla. Tästä johtuen virta ei ole sinimuotoista, ja virtaan syntyy transientteja, jotka säröyttävät myös jännitteen. Kuviossa 14 on kuvattu vaihekohtaisesti jännitteen harmoninen säröprosentti THD_u mittauksen aikana. Verrattaessa säröprosentin arvoa punaisella viivalla esitettyyn standardin SFS-EN 50160 määrittelemään 8 % sallittuun maksimiarvoon, voidaan havaita säröprosentin olevan kuormituksen aika tätä paljon suurempi.



KUVIO 14. PK13 vaihekohtainen kokonaissärö THD_u

Koska keskuksessa ei ilmanlämmittimen lisäksi ole muuta kuormaa, ei tämä aiheuta ongelmia, vaikka standardissa määritellyt sähkön laadun kriteerit eivät täyty.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kokonaisuutena mittaukset onnistuivat hyvin, eikä mittaustuloksista löytynyt vakavia puutteita sähkön laadussa. Kaikissa mitatuissa kohteissa, pääkeskus PK13 lukuun ottamatta, sähkön laatu ylittää standardissa SFS-EN 50160 määritellyt laatuvaatimukset.

Mittaustuloksista tuli kuitenkin ilmi, että joillain keskuksilla kuormitus ei ole symmetrinen, ja näiltä osin olisi hyvä tarkastella, voisiko kuormia mahdollisesti ryhmitellä niin että kuormitus jakautuisi tasaisemmin.

Käyttökokemusten mukaan pääkeskus PK4:n syöttämällä sähkönjakelualueella on esiintynyt joidenkin sähkölaitteiden virhetoimintoja. Tässä työssä pääkeskuksesta suoritettujen mittausten tuloksista ei kuitenkaan käynyt ilmi mitään sellaista, mikä selittäisi kyseiset ilmiöt. Jos toimintahäiriöitä tulevaisuudessa esiintyy, tulee mittaukset suorittaa verkon osista, jotka ovat lähempänä häiriöiden esiintymispaikkaa.

Tämä tutkimustyö antoi myös hyvän kuvan kiinteistön sähkönverkon kompensoinnin ja yliaaltosuodatuksen tämänhetkisestä tilasta. Loistehon kompensoinnin toimivuutta voisi kehittää kompensointilaitteiden säätimien parametrejä muuttamalla ainakin keskusten PK2 ja PK5 osalta. Tässä työssä ei kuitenkaan tutustuttu tarkemmin kompensointilaitteistojen säätimien toimintaan. Kokonaisuudessaan loistehon kulutus ei kuitenkaan ole niin korkealla tasolla, että siitä laskutettaisiin erikseen.

Yliaaltosuodatuksen osalta haasteellista tutkituissa järjestelmissä on osin nopea tehonvaihtelu, johon estokelaparisto-tyyppiset loisten säätöyksiköt eivät pysty tarpeeksi nopeasti reagoimaan. Jos jännitesäro ja sen aiheuttamat ongelmat kasvavat liian suuriksi, tai kyseisten keskusten alle halutaan asentaa häiriöille herkempiä järjestelmiä, tulee kyseisiin keskuksiin harkita aktiivisuodattimien lisäämistä.

LÄHTEET

Aura, L., Tonteri A. 1994. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-5. painos. Helsinki: WSOY.

Hietalahti, L. 2013. Sähkövoimatekniikan perusteet. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tam-
mertekniikka.

Männistö, M. 2018. Yliaallot ja kompensointi. 2. painos. Helsinki: Sähkö- ja teleurakoit-
sijaliitto STUL ry.

SFS-EN 50160. 2010. Suomen standardisoimisliitto SFS.

ST 52.51.04. 2006. Sähkön laatu. Vinokuormitus, nollajohdin ja transienttiylijännitteet.
Espoo: Sähkötieto ry.

TTT-käsikirja 2000-7. 2000. ABB Oy.

Liitteet

Liite 1. 20 kV pääkaavio

