



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Ville Ala-Herttuala

Sähkön laatu ja kompensointi

Tekniikka

2024

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Ville Ala-Herttuala
Opinnäytetyön nimi	Sähkön laatu ja kompensointi
Vuosi	2024
Kieli	suomi
Sivumäärä	67 + 6 liitettä
Ohjaaja	Marko Iskala

Opinnäytetyössä tutkitaan Reka Kaapeli Oy:n Keuruulla sijaitsevan kaapelitehtaan sähkön laatua. Selvityksessä oli myös kompensointilaitteiston kunto. Työtä pyydettiin, koska vastaavaa selvitystä ei tehtaan sähkölaitteistolle ole tehty. Tällä haluttiin varmistua, että verkossa ei esiinny häiriöitä ja sähkön laatu vastaa sille asetettuja vaatimuksia.

Tutkimukset perustuivat standardin EN-50160 pienjänniteverkon laatukriteereihin. Työssä avataan standardia ja sen sisältämiä vaatimuksia jännitteen ominaisuuksille. Lisäksi tutustutaan häiriöitä aiheuttaviin laitteisiin ja siihen, kuinka häiriöitä voidaan poistaa. Mittalaitteena käytettiin sähkön laadun analysaattoria Metrel MI 2592 Power Q4.

Työn lopputuloksena on raportti sähkön laadusta sekä korjaus- ja parannusehdotukset. Tutkimukset osoittivat, että tehtaan verkossa ei esiinny häiriöitä. Jännitteen laatu oli hyvällä tasolla ja virtayliaallot vähäisiä. Kompensointilaitteisto sen sijaan paljastui olevan huollon tarpeessa.

ABSTRACT

Author	Ville Ala-Herttuala
Title	Power quality analysis and compensation
Year	2024
Language	Finnish
Pages	67 + 6 Appendices
Name of Supervisor	Marko Iskala

The purpose of this thesis is to examine the power quality of Reka Kaapeli Oy's factory in Keuruu. The conditions of the compensation equipment were also examined. The thesis was requested because no similar analysis had been carried out for the factory's electrical grid. The purpose of this was to ensure that there are no disturbances in the network and that the quality of power meets the requirements set for it.

The studies were based on the quality criteria of standard EN-50160 for low-voltage networks. The standard and its requirements for voltage characteristics were studied, as well as devices that cause disturbance and how those disturbances can be eliminated. The instrument used was the Metrel MI 2592 Power Q4 power quality analyzer.

The result of the thesis is a report on the quality of power and suggestions for repairs and improvements. The studies showed that there are no disturbances in the factory network. The voltage quality was at a good level and the current harmonics were minor. On the other hand, the compensation equipment needs maintenance.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

LIITELUETTELO

MERKKIEN SELITYKSET

1	JOHDANTO.....	10
2	SÄHKÖN LAATU	11
	2.1 Standardi EN-50160	11
	2.1.1 Verkkotaajuus	11
	2.1.2 Jännitetason vaihtelut.....	12
	2.1.3 Nopeat jännitemuutokset.....	12
	2.1.4 Välkynnän häiritsevyyssindeksi	13
	2.1.5 Jakelujännitteen epäsymmetria.....	14
	2.1.6 Harmoninen yliaaltojännite	15
	2.1.7 Jännitehäiriöt	17
	2.2 Tyypillisimmät häiriölähteet	19
	2.2.1 Suuntaajakäytöt	20
	2.2.2 Tyristorikytkimet	22
	2.2.3 Oikosulkumoottorit.....	22
	2.2.4 LED-valaistus	24
	2.2.5 Muuntajat.....	24
	2.2.6 Resonanssitilanteet.....	25
	2.3 Kuinka häiriöitä tunnistetaan/estetään.....	27
	2.3.1 Loisteho ja kompensointi	28
	2.3.2 Yliaallot ja niiden ehkäisy.....	30
3	MITTAUSKOHDDE	34
	3.1 Verkko	34
	3.2 Havaitut ongelmat	36

4	MITTAUSTULOKSET	38
4.1	Mittalaite.....	38
4.2	Keskus PKA1	38
4.3	Keskus PKB1	44
4.4	Keskus PKB2	49
4.5	Keskus PKB3	52
4.6	Estokelapari- stojen kuntotarkastus	57
5	PARANNUSEHDOTUKSET	62
5.1	Sähkön laatu.....	62
5.2	Kompensointilaitteisto.....	63
5.3	Jakeluverkko.....	64
6	YHTEENVETO	66
	LÄHDELUETTELO	67
	LIITTEET	69

KUVA- JA TAULUKKOLUETTELO

Kuva 1 Taajuuspoikkeama [2].	12
Kuva 2 Välkyntä [2].	13
Kuva 3 Harmonisten yliaaltojen säröyttämä jännite [2].	16
Kuva 4 Jännitekuoppa [2].	17
Kuva 5 Ylijännite [2].	18
Kuva 6 Käyttökeskeytys [2].	18
Kuva 7 Transienttiyläjännite [2].	19
Kuva 8 6-pulssisuuntaajan toiminta periaate ja virran vääristyminen [4].	21
Kuva 9 Kompensointikondensaattorin ja muuntajan kelan muodostama rinnakkaisresonanssiipiiri ja sijaiskytkentä [6].	26
Kuva 10 Kompensointikondensaattorin ja muuntajan muodostama sarjaresonanssiipiiri ja sijaiskytkentä [6].	27
Kuva 11 Perustaajuinen tehokolmio [14].	29
Kuva 12 Estokelapariston rakenne [15].	30
Kuva 13 5. ja 7. yliaallon suodattimen sijaiskytkentä [12].	32
Kuva 14 Aktiivisuodattimen toimintaperiaate [16].	33
Kuva 15 Kojeisto A1.	34
Kuva 16 Kojeisto B1.	35
Kuva 17 PKA1-virtamittarit.	37
Kuva 18 PKA1-mittauspiste.	39
Kuva 19 PKA1-harmoniset jänniteyliaallot normalisoituna.	40
Kuva 20 PKA1-virtojen kuvaaja.	41
Kuva 21 PKA1-virran harmonisten yliaaltojen keskiarvot mittausajanjaksolta....	42
Kuva 22 PKA1-tehokuvaajat.	43
Kuva 23 PKA1-vaihekohtaiset tehokertoimet.	44
Kuva 24 PJ-keskukset PKB1 ja PKB2.	45
Kuva 25 PKB1 jännitteen laatu analyysin yhteenveto.	46
Kuva 26 PKB1-virta kuvaajat.	47
Kuva 27 PKB1- ja PKB2-tehokuvaajat.	48

Kuva 28 PKB1- ja PKB2-tehokertoimet.	49
Kuva 29 PKB2-jännitteen harmoniset yliaallot normalisoituna-	50
Kuva 30 PKB2-virtakuvaajat.	51
Kuva 31 PKB2-virran harmonisten yliaaltojen keskiarvot mittausajanjaksolta.	51
Kuva 32 PKB3-mittauspiste.	52
Kuva 33 PKB3-jännitteen harmoniset yliaallot normalisoituna.	53
Kuva 34 PKB3-virtojen kuvaajat.	54
Kuva 35 PKB3-virran harmonisten yliaaltojen keskiarvot mittausajanjaksolta.	55
Kuva 36 PKB3-tehokuvaaja.	56
Kuva 37 PKB3-tehokuvaaja vanha mittaus.	56
Kuva 38 Kondensaattoreiden mittaus pihtiampeerimittarilla.	58
Kuva 39 PKA1-kompensointilaitteiston tarkastuspöytäkirja.	59
Kuva 40 PKB2- ja PKB3-kompensointilaitteiston tarkastuspöytäkirja.	60
Kuva 41 Viallinen PKB3-kontaktori	61
Kuva 42 PKB3-loistehosäätimen näyttö ylikompensointitilanteessa.	61
Taulukko 1 Verkkotaajuudelle määritetyt laatuksiteerit [2].	11
Taulukko 2 Laatuksiteerit jännitetasoille [2].	12
Taulukko 3 Jakelujännitteen epäsymmetria kriteerit ja epäsymmetrian laskenta kaava [2].	15
Taulukko 4 Sallitut arvot harmonisille yliaaltojännitteille pienjänniteverkon liittymispisteessä [1].	16
Taulukko 5 PKA1-virtojen min, max, avg.	41
Taulukko 6 PKA1-tehojen min, max ja avg.	43
Taulukko 7 PKB1-virtojen min, max ja avg.	47
Taulukko 8 PKB1- ja PKB2-tehojen min, max ja avg.	48
Taulukko 9 PKB2-virtojen min, max ja avg.	51
Taulukko 10 PKB3-virtojen min, max ja avg.	54
Taulukko 11 PKB3-tehojen min, max ja avg.	56

LIITELUETTELO

LIITE 1. Tehtaan jakeluverkon sähköpiirustus

LIITE 2. Metrel MI 2592 Power Q4 datalehti

LIITE 3. PKA1 EN-50160 mittausraportti

LIITE 4. PKB1 EN-50160 mittausraportti

LIITE 5. PKB2 EN-50160 mittausraportti

LIITE 6. PKB3 EN-50160 mittausraportti

MERKKIEN SELITYKSET

$\cos \varphi$	tehokerroin
DC	tasavirta
Hz	taajuus
P	pätöteho [W]
Plt	pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi
Pst	lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi
Q	loisteho [VAr]
S	näennäisteho [VA]
THD	harmoninen kokonaissärö
UN	nimellisjännite
UPS	varavirtalaite
V	voltti
μs	mikrosekunti

1 JOHDANTO

Sähkön laatuun tulisi nykyisin kiinnittää entistä enemmän huomiota, sillä häiriöitä aiheuttavien ja häiriöistä kärsivien sähkölaitteiden määrä verkossa on lisääntynyt. Pahimmassa tapauksessa verkossa esiintyvät häiriöt voivat johtaa tuotannon katkeamiseen ja aiheuttaa suuria kustannuksia. Varmistettaessa, että sähkön laatu vastaa sille asetettuja standardeja, voidaan vähentää häviöiden määrää sekä alentaa käyttökustannuksia. Lisäksi sähkölaitteiden elinkaari pitenee ja niissä esiintyvät viat ja laiterikot vähenevät.

Opinnäytetyössä käsitellään sähkön laatustandardia EN-50160 ja sen sisältöä. Lisäksi tutustutaan sähkön laatua heikentäviin laitteisiin, joita löytyy myös työkohteesta. Teollisuudessa käytetään paljon laitteita, jotka kuormittavat verkkoa epälineaarisesti. Tämä aiheuttaa sähköverkkoon erilaisia häiriöitä, jotka eivät ole toivottuja. Osa sähkölaitteista tarvitsee toimiakseen myös loistehoa. Loistehomaksut ovat kasvaneet viime vuosina, ja tämän takia se on järkevää kompensoida kulutuskohteessa. Kerron työssäni, kuinka sähköverkossa esiintyviä häiriöitä voidaan poistaa ja näin parantaa sähkön laatua. Tämän lisäksi perehdyn loistehon kompensointiin ja kuinka se toteutetaan.

Opinnäytetyö tehdään Reka Kaapeli Oy:lle, joka kuuluu kaapeliteollisuuden eturivin toimijoihin. Yhtiö toimittaa kestäviä ja laadukkaita kaapeliratkaisuja ja on nykyisin osa Nexans-konsernia. Työkohteena on yrityksen Keuruulla sijaitseva kaapelitehdas. Tehtäväni on analysoida tehtaan sähkön laatua ja selvittää, missä kunnossa pienjännitepääkeskuksiin sijoitetut kompensointilaitteet ovat. Työn lopputuloksena syntyy kokonaiskuva tehtaan sähköverkon tämänhetkisestä tilasta. Jos verkossa ilmenee ongelmia, on tehtäväni etsiä niihin ratkaisuja.

2 SÄHKÖN LAATU

2.1 Standardi EN-50160

Standardi määrittelee jännitteen pääominaisuudet verkon käyttäjän liittymiskohdassa normaaleissa käyttöolosuhteissa. Jännitteen ominaisuuksien voidaan siis olettaa pysyvän eurooppalaisen yleisen sähköverkon alueella standardin määrittämässä arvoissa tai rajojen sisällä. Käsittelen työssäni ainoastaan pienjänniteverkon laatukriteerejä. Teollisuuden verkot eivät kuulu standardin soveltamisalaan. Standardin vaatimuksia on kuitenkin erittäin suositeltavaa soveltaa, koska laitteiden suorituskyky voi huonontua, jos laite liitetään verkkoon, joka ei vastaa tuotestandardissa asetettuja vaatimuksia. [1.]

2.1.1 Verkkotaajuus

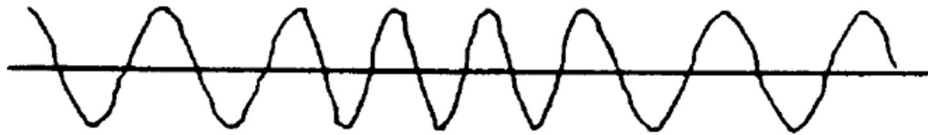
Normaaleissa käyttöolosuhteissa jakelujännitteen perustaajuuden 10 s aikavälillä mitatun keskiarvon tulee olla. 99,5 % vuodesta 50 Hz \pm 1 % eli välillä 49,5 Hz – 50,5 Hz. Ja 100 % ajasta 50 Hz +4 % / -6 % eli välillä 47 Hz – 52 Hz. Taulukossa 1 on listattuna taajuuden laatukriteerit.

Taulukko 1 Verkkotaajuudelle määritetyt laatukriteerit [2].

Hyvä laatu:	50 Hz \pm 1%
Normaalilaatu:	50 Hz \pm 1%
Standardilaatu:	95 % mittauksista välillä 50 Hz \pm 1% ja kaikki 50 Hz + 4% / -6 %. Saareke- tai varavoimakäytössä 95 % välillä 50 Hz \pm 2 % ja kaikki 50 Hz \pm 15 %.
Mittaus:	10 s jaksoina viikon ajan. Mittausjaksoille lasketaan keskiarvo.

Normaalikäytössä taajuuden vaihtelut pohjoismaisessa yhteiskäyttöverkossa ovat +/- 0,1 Hz. Taajuuspoikkeamat eivät ole kovin tavallisia isojen sähkölaitosten jakelualueella. Taajuusvaihteluita esiintyy lähinnä saarekekäytöissä, varavoimakäytöissä ja pienissä jakeluverkoissa. Kuvassa 1 nähdään, miltä taajuuden vaihte-

lu näyttää. Taajuuspoikkeamat johtuvat pääasiassa nopeista kuormituksen muutoksista tai huonoista säätö- ja ohjauslaitteista yksittäisellä generaattorilla. Myös maaseutuverkko, joka on ylikuormitettu ja epästabili, voi kärsiä taajuuden vaihtelusta. [1.] [2.] [3.]



Kuva 1 Taajuuspoikkeama [2].

2.1.2 Jännitetason vaihtelut

Normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon pituisen testijakson aikana tulee jakelujännitteen 10 min tehollisarvoista 95 % olla välillä $U_N \pm 10 \%$. Lisäksi kaikkien jakelujännitteen mitattujen 10 min tehollisarvojen tulee olla välillä $U_N + 10 \%$ / -15% .

Sähköenergialiitto ry määrittelee laadun pienjänniteverkon jännitetasoille seuraavasti: Hyvä laatu, kun 10 min. mittausarvot ovat välillä 220 V – 240 V; normaali laatu, kun 10 min. mittausarvot välillä 207 V – 244 V; standardilaatu, kun mittausarvot ovat välillä 207 V – 253 V. Taulukossa 2 on esitetty jännitetaso laatu kriteerit. [1.] [2.] [3.]

Taulukko 2 Laatu kriteerit jännitetasoille [2].

Hyvä laatu:	$U_n \pm 4 \%$ ja keskiarvo $U_n \pm 2,5 \%$.
Normaalilaatu:	$U_n \pm 10 \%$
Standardilaatu:	95 % välillä $U_n \pm 10 \%$
Mittaus:	10 min jaksoina viikon ajan

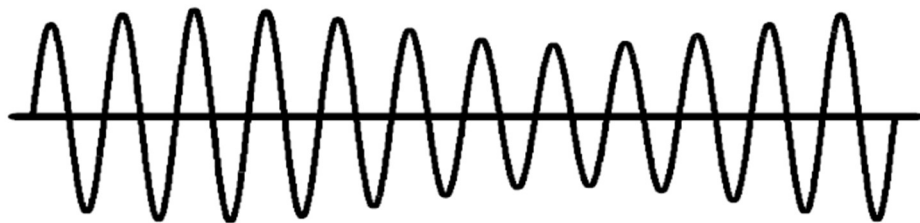
2.1.3 Nopeat jännitemuutokset

Nopeat jännitteen muutokset aiheutuvat yleensä asiakkaan verkossa tehtyjen kytkentätoimenpiteiden, kuormituksen muutoksen, vikojen tai salaman iskun seurauksena. Myös suurien moottoreiden käynnistyminen, hitsauslaitteet ja käämikytkimien ohjaus saattavat aiheuttaa nopeita jännitteen muutoksia.

Nopeat jännitteen muutokset vaikuttavat mm. valaistukseen ja saattavat häiritä elektronisia laitteita. Jos jännitteen muutos ylittää jännitekuopan tai ylijännitteen rajan, luokitellaan tapahtuma enemmän ylijännitteeksi tai jännitekuopaksi kuin nopeaksi jännitteen muutokseksi. [1.] [2.] [3.]

2.1.4 Välkynnän häiritsevyyssindeksi

Välkyntä johtuu pääasiassa isojen kuormien vaihtelusta, hitsauslaitteista tai kuljettimien isoista moottoreista. Välkyntä voi olla tasaista tai satunnaisesti vaihtelevaa. Kuvassa 2 on esitetty tasaisesti vaihteleva jännite, joka aiheuttaa välkyntää. Välkyntä häiritsee valaistuksen lisäksi myös tietokoneita ja kommunikaatiolaitteita.



Kuva 2 Välkyntä [2].

Välkynnän alkuperäiset vaatimukset on kehitetty perustuen ihmisen reaktioihin 60W hehkulampun valon muutokseen, kun syöttöjännitettä muutetaan. Standardin vaatimukset perustuvat edelleen tälle alkuperäiselle välkyntäkäyrälle. Sillä varmistetaan, etteivät nykyiset LED- tai loistevalaisimet aiheuta enempää välkyntää kuin vanhanaikaiset hehkulamput.

Välkynnän häiritsevyyttä voidaan mitata seuraavilla yksiköillä: P_{st} on lyhytaikainen häiritsevyyssindeksi, jonka mittaus tapahtuu kymmenen minuutin aikaväliltä. P_{lt} on pitkäaikainen häiritsevyyssindeksi. Tämä lasketaan kahdestatoista kahden tunnin mittausaikaväliltä saatavasta P_{st} - arvosta kaavan 1 mukaan.

Normaaleissa käyttöolosuhteissa viikon pituisen mittausjakson aikana, syöttöjännitteen muutoksen aiheuttama välkynnän häiritsevyyssindeksin tulisi olla 95 % ajasta $P_{lt} \leq 1$. [1.] [2.]

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{12} \frac{P_{sti}^3}{12}} \quad (1)$$

2.1.5 Jakelujännitteen epäsymmetria

Standardin mukaan viikon pituisen mittausjakson aikana jakelujännitteen vastakomponentin kymmenen minuutin tehollisarvoista 95 % tulee olla 0–2 % myötäkomponentista. Joillakin alueilla epäsymmetria-arvoja esiintyy 3 % saakka, johtuen asiakkaiden yksi- tai kaksivaiheasennuksista. Taulukossa 3 on laatuksiteerit jännitteen epäsymmetrialle sekä epäsymmetrian laskentakaava. Standardi määrittää raja-arvot vain vastakomponentille, koska se on häiriöiden kannalta oleellinen.

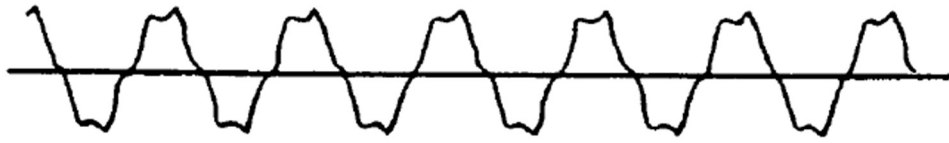
Taulukko 3 Jakelujännitteen epäsymmetria kriteerit ja epäsymmetrian laskenta kaava [2].

Hyvä laatu:	Kaikki u_{nSh} -arvot ≤ 2 %.
Normaalilaatu:	Kaikki u_{nSh} -arvot ≤ 2 %.
Standardilaatu:	Mitatuista u_{nSh} -arvot ≤ 2 %.
Mittaus:	95 % vastakomponentin 10 minuutin tehollisarvosta tulisi olla 0...2 % myötäkomponentista.
Laskenta:	$u_n = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}$, missä $\beta = \frac{U_{12}^4 + U_{23}^4 + U_{31}^4}{(U_{12}^2 + U_{23}^2 + U_{31}^2)^2}$ u_{nSh} = näytteistä laskettu 10 minuutin arvo u_n = epäsymmetria. β = jännitekerroin U_{12} = jännite vaiheiden L1 - L2 välillä U_{23} = jännite vaiheiden L2 - L3 välillä U_{31} = jännite vaiheiden L3 - L1 välillä

Epäsymmetria johtuu pääosin asiakkaiden kuorman epätasaisesta jakautumisesta kolmelle vaiheelle tai siitä, että verkossa yhdeltä vaiheelta tai kompensointilaitteistosta on palanut sulake. Jännitteen epäsymmetria pienentää sähkömoottoreiden momenttia ja kasvattaa niiden roottorihäviöitä sekä lisää ylikuumenemisen riskiä. Lisäksi epäsymmetria saattaa häiritä tietokoneita ja muita elektronisia laitteita. [1.] [2.] [3.]

2.1.6 Harmoninen yliaaltojännite

Standardi määrittelee rajat vain harmonisille yliaalloille. Myös epäharmonisten yliaaltojen osuus on kasvamassa taajuusmuuttajien ja vastaavan elektroniikan lisääntymisen myötä. Epäharmonisille yliaalloille ei ole standardissa määritelty tasoja, mutta sellaiset ovat mahdollisesti tulossa seuraaviin painoksiin. Harmoniset yliaallot säröyttävät jännitteen käyrämuotoa kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3 Harmonisten yliaaltojen säröyttämä jännite [2].

Yliaaltolähteitä ovat esimerkiksi taajuusmuuttajat, tyristorikäytöt, tasasuuntaajat, hakkuriteholähteet, purkausvalaisimet, ylikuormitetut muuntajat ja kaikki epäsymmetrinen kuormitus mitä verkkoon on liitetty. Yliaallot kasvattavat häviöitä verkossa, alentavat laitteiden kuormitettavuutta, aiheuttavat mittareiden virhenäyttämiä ja suojareleiden virhetoimintoja sekä ylikuormittavat nollajohtimia ja muuntajia.

Standardin määrittelemän viikon pituisen mittausjakson aikana 95 % jokaisen yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin tehollisarvon tulee olla enintään taulukossa 4 annetun arvon suuruinen. Lisäksi kokonaissärökerroin THD, tulee olla enintään 8 %. Jännitteen THD lasketaan kaavan 2 mukaan. [1.][2.]

Taulukko 4 Sallitut arvot harmonisille yliaaltojännitteille pienjänniteverkon liittymispisteessä [1].

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	1,0 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,75 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Arvot ovat prosentteina perusaaltoon u_1 nähden.

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 yliaalloille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti hyvin pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

$$THD(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{U_h}{U_n}\right)^2} \quad (2)$$

jossa U_h = yliaaltojännite

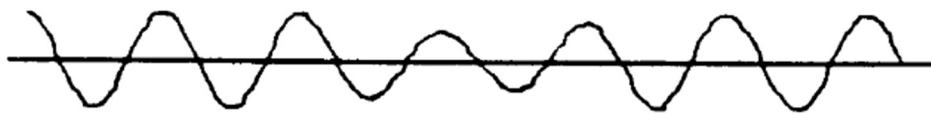
U_n = perustaajuinen jännite

THD(U) = jännitesärö

2.1.7 Jännitehäiriöt

Standardissa ei määritellä rajoja tässä kappaleessa käsiteltäville ominaisuuksille, mutta siinä kerrotaan, millaisia jännitehäiriöitä voi esiintyä ja mistä ne mahdollisesti johtuvat. Tällaisia ovat jännitekuopat, ylijännitteet, transienttiylijännitteet, jännitteen tasakomponentti ja käyttökeskeytykset. Pienjänniteverkossa nelijoh-timisessa kolmivaihejärjestelmässä mitataan vaiheen ja nollan välistä jännitettä. Kolmijoh-timisessa kolmivaihe järjestelmässä mitataan vaiheiden välinen jännite. Yksivaiheisessa järjestelmässä mitataan vaiheen ja nollan välinen jännite tai vaiheiden välinen jännite, syöttötavan mukaan.

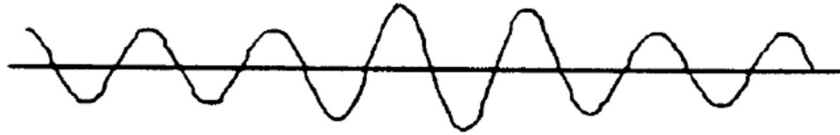
Jännitekuopat tapahtuvat yleensä hyvin satunnaisesti ja odottamattomasti. Kuo-pat johtuvat yleensä jakeluverkossa tapahtuvista oikosulkuvioista, lyhyistä kat-koksista tai suurien moottoreiden käynnistyksestä. Kuvan 4 jännitekäyrässä voi-daan havaita hetkellinen jännitekuoppa. Tavallisesti jännitekuopan havahtumis-jännite on 90 % nimellisjännitteestä.



Kuva 4 Jännitekuoppa [2].

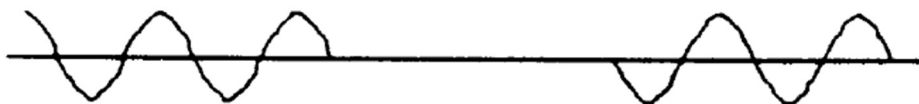
Ylijännitteet aiheutuvat tyypillisesti verkossa tehtävien kytkentätoimenpiteiden ja kuormien erottamisen seurauksena. Tilapäiset käyttötaajuiset ylijännitteet ta-pahtuva asiakkaan verkossa tai yleisessä jakeluverkossa aiheutuvien vikojen ai-

kana ja poistuvat, kun vika saadaan korjattua. Kuvassa 5 nähdään hetkellinen ylijännite. Ylijännitteen havahtumisjännite on 110 % nimellisjännitteestä.



Kuva 5 Ylijännite [2].

Käyttökeskeytykset tapahtuvat joko suunnitellusti tai ennalta arvaamattomasti jonkin vian seurauksena. Suunnitelluista keskeytyksistä on ilmoitettu hyvissä ajoin ja niihin on osattu varautua. Nämä keskeytykset johtuvat yleensä jakeluverkon huolto- tai parannustöistä. Ennalta-arvaamattomat keskeytykset ovat vikojen aiheuttamia eikä niihin voi varautua ennalta. Kuvassa 6 esiintyy hetkellinen käyttökeskeytys. Keskeytyksiä voivat aiheuttaa myrskyt, eläimet tai kaapeli- ja laiteviat.

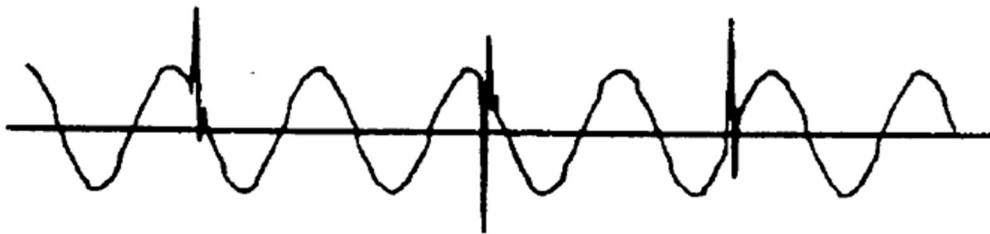


Kuva 6 Käyttökeskeytys [2].

Jännitteen tasakomponentteja esiintyy yleensä vähän ja siitä syystä niiden merkitys on melko vähäinen. Tasakomponentteja synnyttävät suuntaajat sekä muut elektroniset laitteet. Jos tasakomponenttien määrä jostain syystä nousee korkeaksi, aiheuttaa se korroosiota liitoksissa. Lisäksi se saattaa vaurioittaa muuntajia ja aiheuttaa toimintahäiriöitä maavikakatkaisijoille sekä muille virtaherkille piireille.

Transienttiylijännitteet aiheutuvat yleensä järjestelmässä tehtyjen kytkentätoimenpiteiden seurauksena tai ukkosella indusoiduvasta ylijännitteestä. Transienttiylijännitteiden nousuaika vaihtelee mikrosekunneista millisekunneihin. Tran-

sientit jaotellaan lyhyisiin alle 1 μS kestoisiin, keskipitkiin 1–100 μS kestoisiin ja pitkiin yli 100 μS kestoisiin transientteihin. Ukkosen aiheuttamalla indusoituneella ylijännitteellä on yleensä pienempi energiasisältö ja suurempi amplitudi kuin kytkentäylijännitteellä. Kuvassa 7 nähdään tyypillinen transienttiylijännitteen aiheuttama piikki jännitekäyrässä. Valtaosassa tapauksia, kun laitteet suunnitellaan standardien mukaisesti, kestävät laitteet nämä ylijännitteet. Tietokoneet ovat herkkiä transienttiylijännitteille ja niiden tietoja voi tuhoutua. Tarpeen mukaan laitteiden suojaamiseksi käytetään asianmukaista ylijännitesuojaa, joka eliminoi ylijännitteet. [1.] [2.] [3.]



Kuva 7 Transienttiylijännite [2].

2.2 Tyypillisimmät häiriölähteet

Sähkön laatuun heikentävästi vaikuttaa yhä lisääntymässä oleva epälineaarinen kuormitus, jonka verkosta ottama virta poikkeaa sinimuodosta. Aiheuttajia ovat mm. sähkökäytöt, tietokonekuormitus, UPS-laitteet sekä verkon ja kompensointilaitteiden laiminlyöty kunnossapito. Kuluttaja huomaa yleisimmin sähkön laatuun liittyvät ongelmat, kun ilmenee laiterikkoja ja toimintahäiriöitä tai loistehomakset ovat kohonneet. Yleensä näihin havahdutaan vasta, kun sähkön laatu on jo huonontunut merkittävästi. Yleisimmät häiriöilmiöt voidaan jakaa kahteen päätyyppiin, galvaanisiin ja sähkömagneettisiin häiriöihin. [2.]

Galvaanisiet häiriöt:

- jännitetason vaihtelu
- epäsymmetria

- yliaaltojännitteet ja -virrat
- maadoitusviat
- pitkittäiset ja poikittaiset transientit
- jännitekatkot.

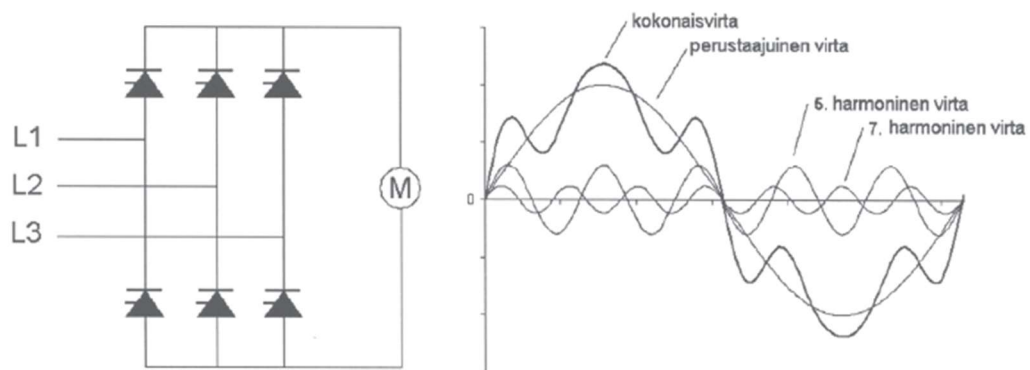
Sähkömagneettiset häiriöt:

- jännitteiden aiheuttamat sähkökentät
- virtojen aiheuttamat magneettikentät
- radiotaajuiset häiriöt.

2.2.1 Suuntaajakäytöt

Erilaiset puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajakäytöt poikkeavat tavanomaisesta verkonkuormituksesta. Verkon kannalta vaikutukset ovat pääosin haitallisia. Suuntaaja on laite, joka muokkaa sähkötehoa muodosta toiseen, esim. vaihtojännitteestä tasajännitteeksi ja toisinpäin. Suuntaajat synnyttävät verkkoon virta- ja jänniteyliaaltoja, minkä lisäksi ne ottavat verkosta suuren määrän loistehoa. Kuvassa 8 on esitetty suuntaajan toimintaperiaate ja suuntaajan verkosta ottaman virran käyrämuoto. Suuntaajia ovat esimerkiksi taajuusmuuttajat, DC-käytöt ja verkkovaihtosuuntaajat.

Suuntaajia voidaan soveltaa monenlaisissa käytöissä ja teollisuudessa niiden yleisin sovelluskohde on moottorien pyörimisnopeuden säätö. Hajautetussa energiantuotannossa verkkovaihtosuuntaajaa voidaan hyödyntää myös tehokertoimen säädössä. Invertteri pystyy tuottamaan loistehoa silloinkin, kun niiden primäärienergianlähde esimerkiksi aurinkopaneelit eivät tuota pätötehoa. Tällöin verkkovaihtosuuntaaja ottaa tarvitsemansa pätötehon verkosta, jolloin sitä voidaan käyttää loistehon kompensoinnissa. Verkosta otettavan pätötehon määrä on kuitenkin hyvin pieni verrattuna kompensoinnin tuomiin hyötyihin.



Kuva 8 6-pulssisuuntaajan toiminta periaate ja virran vääristyminen [4].

Suuntaajat, kuten monet muutkin laitteet tarvitsevat loistehoa. Suuntaajalle ominaista on loistehon tarpeen äkillinen muuttuminen. Loistehon suhde pätötehoon voi olla hyvinkin suuri, erityisesti pyöritettäessä moottoreita pienillä nopeuksilla. Suuntaajien ottamaa loistehoa voidaan pienentää nollakulmaohjauksella, seurantaohjauksella tai kondensaattorilla.

Suuntaajat ovat suuri yliaaltojen lähde. Ne ottavat verkosta suuren määrän epälineaarista virtaa, mikä aiheuttaa virtayliaaltoja. Myös jänniteyliaaltoja voi esiintyä, kun kahden vaiheen tyristorit kommutoivat ja pääjännite suuntaajan navoissa romahtaa kommutoinnin aikana. Tavallisempi syy jänniteyliaaltoihin kuitenkin on virtayliaaltojen aiheuttamat jännitehäviöt, jotka heijastuvat jännitteeseen aiheuttaen säröytymisen. Yksinkertaistetussa yliaaltoteoriassa suuntaajan pulssiluku määrittää sen aiheuttamien yliaaltojen järjestysluvun. Pulssilukua kasvattamalla voidaan kasvattaa syntyvien yliaaltojen järjestyslukua ja samalla pienentää niiden tehollisarvoa. Syntyvien harmonisten yliaaltojen järjestysluku saadaan kaavan 3 mukaan.

$$n = p \times i \pm 1 \quad (3)$$

jossa n = Järjestysluku (taajuus = $n \cdot 50$ Hz)

p = pulssiluku

i = kokonaisluku 0,1,2,3,...

Suuntaajien ollessa yksi pahimmista yliaaltojen aiheuttajista, kärsivät ne myös yliaalloista. Suuntaajat tarvitsevat toimiakseen hyvän jännitteen käyrämuodon. Jos jännitesärö pääsee kasvamaan suureksi, aiheuttaa se vaikeuksia tyristorien syttymiselle. Tämä voi aiheuttaa ohjaukskulmavirheitä ja toiminta käy epästabiiliksi. Suuri jännitteen särö aiheuttaa myös rasiutusta suuntaajan komponenteille ja laskee sen hyötysuhdetta. [5.] [6.] [7.] [8.]

2.2.2 Tyristorikytkimet

Teollisuudessa on usein käytössä tyristorikytkimiä, joita käytetään resistiivisten kuormien ohjaamiseen. Samaan vaiheeseen on kytketty kaksi tyristoria vastarinnan, jolloin voidaan ohjata sekä jännitteen positiivista että negatiivista puolijaksoa. Tavallisimmat ohjaustavat ovat vaihekulma- ja nollapisteohjaus.

Nollapisteohjauksessa tyristoreja ohjataan niin, että ne johtavat halutun määrän kokonaisia jaksoja. Nollakulmaohjaus aiheuttaa epäharmonisia yliaaltoja. Vaihekulmaohjauksessa tehoa säädetään muuttamalla sytytyskulmaa, jolloin tyristorit ovat johtavassa tilassa halutun ajan jokaisen puolijakson aikana. Tällöin tyristorien verkosta ottama virta poikkeaa sinimuodosta ja aiheuttaa verkkovirran vääristymistä ja harmonisia yliaaltoja. [7.]

2.2.3 Oikosulkumoottorit

Verkkoon kytketyt epätahtikoneet aiheuttavat myös häiriöitä. Näistä tyypillisimpiä ovat jännitteen alenemat käynnistettäessä ja niiden käämitysrakenteiden tuottamat yliaallot. Moottoreiden aiheuttamat yliaallot eivät kuitenkaan normaaleissa käyttöolosuhteissa ole kovin merkittäviä. Epätahtikoneet tarvitsevat kuitenkin loistehoa magnetointiin, joka aiheuttaa jännitehäviöitä ja edellyttää kompensointia.

Pienjänniteisissä moottorikeskuksissa jännitteenvaihtelulle sopivana arvona pidetään $U_N \pm 3\%$. Moottorin momentti on verrannollinen jännitteen toiseen potenssiin, joten staattisen jännitteen vaaditaan pysyvän lähellä nimellisjännitettä

normaalikäytössä. Suurten moottorien käynnistyksen aikana syntyvä dynaaminen jännitteen alenema saattaa pahimmillaan aiheuttaa keskuksessa olevien kontaktorien päästämisen alhaisen kelajännitteen vuoksi. Dynaamisen jännitteen aleneman maksimiarvona pidetään 10 %, mutta joissain tilanteissa saatetaan sallia esim. 5 % tai 15 %. Likimääräinen jännitteen alenema voidaan laskea kaavalla 4. Koska muuntajan reaktanssi on monin kerroin suurempi, kuin resistanssi. Aiheuttaa käynnistyksessä suurimmillaan oleva virran loiskomponentti suuren jännitteen aleneman.

$$\Delta U = R * I * \cos\varphi + X * I * \sin\varphi = R * I_p + X * I_q \quad (4)$$

jossa R = verkon resistanssi (Ω)

X = verkon reaktanssi (Ω)

I_p = pätövirta (A)

I_q = loisvirta (A)

Epätahtikoneet synnyttävät myös yliaaltoja, jotka johtuvat käämitysrakenteista ja raudan kyllästymisestä magneettipiirissä. Urakäämityksen synnyttämän lähdejännitteen puolisyymmetrisyyden perusteella syntyy parittomia yliaaltoja, joista kolmella jaolliset kumoutuvat. Näin mahdollisiksi yliaalloiksi jää 5. ja 7. yliaalto. Näistä toinen voidaan kumota muokkaamalla roottorisauvan urakulma yliaallon aallonpituuden mittaiseksi. Jos yliaallot jäävät kokonaan kumoamatta vaikuttavat ne moottorin momenttikäyrään.

Yliaallot haittaavat myös moottoreiden toimintaa. Ne lisäävät moottoreiden virtalämpöhäviöitä, aiheuttavat ääni- ja värinäilmiöitä sekä aiheuttavat heilurimomentteja. Häviöiden kasvaessa moottorit lämpenevät ja niiden eristeiden vanhenemisnopeus kasvaa ja hyötysuhde pienenee. Heilurimomentit voivat aiheuttaa käyttöhäiriöitä ja mekaanisia vaurioita. [6.] [7.] [9.]

2.2.4 LED-valaistus

LED-valaistus on yleistynyt viime vuosina nopeasti. Sen merkittäviä etuja vanhoihin valaisimiin verrattuna ovat energiatehokkuus, hyvä valoteho ja pitkä käyttöikä. Näiden hyötyjen lisäksi tulee myös haittoja, jotka näkyvät sähköverkossa. LED-valaistukseen siirtyminen lisää verkon epälineaarista kuormitusta, sillä valaisimet sisältävät ei lineaarisia komponentteja, kuten diodeja, transistoreja ja muita harmonisten yliaaltojen lähteitä.

LED-valot tarvitsevat toimiakseen tasavirtaa, joten valaisimessa oleva elektronikiipiiri muuntaa vaihtovirran tasavirraksi. Piiri sisältää häiriösuodattimen, tasasuuntaussillan, kondensaattorin ja muuntajan, joka säätää jännitteen LEDille sopivaksi. Näiden aktiivisten komponenttien takia LEDin verkosta ottaman virran käyrämuoto poikkeaa hyvin paljon syöttöjännitteen käyrämuodosta. LED-valaisimien ottaman virran THD saattaakin olla hyvin suuri, mutta vaikutus jännitteeseen on melko vähäinen. [10.] [11.]

2.2.5 Muuntajat

Muuntajat synnyttävät myös yliaalloja, jotka johtuvat rautasydämen magneettisesta epälineaarisuudesta. Magneettivuon tiheys ei kasva lineaarisesti magneetikenttään nähden ja rautasydämen hystereesin takia, poikkeaa magnetointivirta syöttöjännitteen käyrämuodosta. Normaaleissa käyttöolosuhteissa muuntajan tuottamat yliaallot eivät kuitenkaan ole merkittäviä, mutta nostettaessa syöttöjännite yli nimellisjännitteen kasvavat yliaallot rautasydämen kyllästymisen takia. Lisäksi mahdollinen virran tasakomponentti kyllästyttää rautasydämen ja aiheuttaa muuntajaan myös parillisia yliaalloja.

Muuntajan kytkentä, rautasydämen rakenne ja maadoitustapa vaikuttavat yliaaltojen syntyyn ja leviämiseen. Rautasydän rakennetaan taloudellisista syistä epäsymmetriseksi, jolloin kolmipylväsmuuntajan keskipylvään reluktanssi ja magne-

tointivirta on pienempi kuin reunapylväillä. Tästä syystä eri vaiheille syntyvien yliaaltojen suuruudet eroavat toisistaan.

Verkossa esiintyvät yliaallot myös lisäävät muuntajien kuormitushäviöitä. Yliaallot aiheuttavat virtalämpöhäviöitä muuntajan resistansseissa ja voivat pahimmillaan aiheuttaa muuntajan liikalämpenemistä. Nämä vaikuttava myös muuntajan käyttöikänsä. [7.]

2.2.6 Resonanssitilanteet

Paljon yliaaltoja sisältävässä verkossa on vaarana, että jokin yliaalto alkaa värähtelemään kompensointikondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välillä. Tällaisia tilanteita ovat rinnakkais- eli virtaresonanssi ja sarja- eli jänniteresonanssi. Resonanssitilanne syntyy, kun kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi sattuvat olemaan yhtä suuret samalla taajuudella kuin jokin yliaalloista. Resonanssi aiheuttaa jännitteen ja virran säröytymisen kasvua ja ylijännitteitä. Ylijännitteet voivat rikkoa herkkiä elektronisia laitteita ja kompensointikondensaattorit voivat ylikuormittua ja vaurioitua. Kompensointiparistoa hankittaessa on tärkeää tarkistaa, että verkossa esiintyvät yliaaltotaajuudet eivät osu resonanssitaajuudelle.

Verkossa esiintyvät yliaaltovirrat voivat vahvistua moninkertaisiksi loistehon kompensointikondensaattoreiden kapasitanssi ja verkkoa syöttävän muuntajan induktanssin yhdessä muodostamassa rinnakkaisresonanssiipiirissä. Kuvassa 9 on havainnollistettu miltä rinnakkaisresonanssiipiiri näyttää. Pienjänniteverkon rinnakkaisresonanssitilanteessa pienetkin yliaaltovirrat voivat vahvistua jopa 10–15 kertaisiksi. Yliaaltovirtojen sulkeutuessa kondensaattorin kautta aiheuttavat ne myös vastaavan taajuisen jännitekomponentin. Resonanssitilanne verkossa siis aiheuttaa ylijännitteen ja ylikuormittaa kompensointikondensaattoreita niin, että ne voivat pahimmassa tapauksessa tuhoutua. Verkon rinnakkaisresonanssitaajuus on likimääräisesti laskettavissa kaavan 5 mukaan.

$$f_r \approx f \times \sqrt{\frac{S_N}{z_k \times Q}} \quad (5)$$

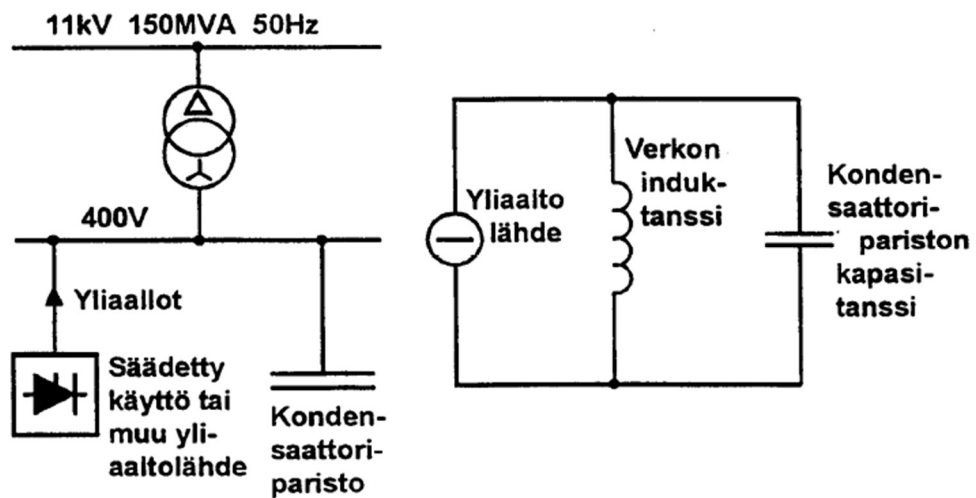
jossa f_r = resonanssitaajuus

f = perustaajuus 50 Hz

S_N = syöttävän muuntajan nimellisteho

z_k = syöttävän muuntajan oikosulkuimpedanssi

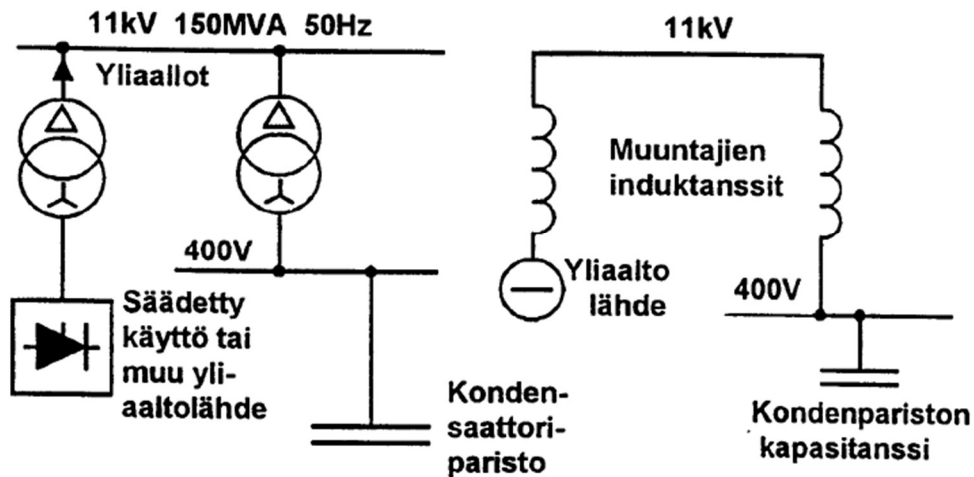
Q = kompensointipariston teho



Kuva 9 Kompensointikondensaattorin ja muuntajan kelan muodostama rinnakkaisresonanssiipiiri ja sijaiskytkentä [6].

Muuntajan induktanssi, kompensointikondensaattorien kapasitanssi ja yliaalto­lähteen sarjakytkentä muodostavat yhdessä sarjaresonanssiipiirin. Sarjaresonanssin ehtona on myös sama kuin rinnakkaisresonanssissa eli että kapasitanssi ja induktanssi ovat yhtä suuret tietyllä taajuudella. Impedanssi on tällöin vain resistanssin suuruinen ja kondensaattorien virta saattaa kasvaa suureksi. Sarjaresonanssiipiiri ja sen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 10. Sarjaresonanssi vahvistaa myös jännitesäröä. Sarjaresonanssin käsittely on haastavampaa kuin rinnakkais-

resonanssin, sillä sen laskennassa pitää huomioida verkkoa laajemmin, kuin rinnakkaisresonanssissa. Vaikka kuorma ei sisältäisi merkittävästi yliaaltoja, ovat siitä huolimatta jännite- ja virtasärö suuria. Tällöin mahdollinen aiheuttaja on sarjaresonanssi. [3.] [6.] [12.]



Kuva 10 Kompensointikondensaattorin ja muuntajan muodostama sarjaresonanssi ja sijaiskytkentä [6].

2.3 Kuinka häiriötä tunnistetaan/estetään

Häiriöiden tunnistamiseksi on suoritettava mittaukset verkkoanalysointilaitteilla. Sähkönlaatuanalyysi voidaan tehdä ennakoivasti tai sitten kun häiriötä ilmaantuu. Sähkönlaatumittaus olisi suositeltavaa tehdä määräajoin esimerkiksi kolmen vuoden välein. Tuloksista saadaan selville, millaisia häiriöitä verkossa esiintyy ja niiden pohjalta lähdetään etsimään ratkaisua häiriöiden vähentämiseksi. Useasti häiriöiden aiheuttajia on useita, eikä selkeää yksittäistä häiriön aiheuttajaa löydetä.

Häiriöiden estämiseksi määritetään haluttu vaimennustaso. Seuraavaksi arvioidaan, millä toimilla häiriötä voidaan vaimentaa ja mitkä ovat kunkin vaihtoehdon kustannukset. Verkkoanalysointilaitteilla saadaan myös selville verkossa kulute-

tun loistehon määrä ja tehokerroin. Mittaustulosten perusteella voidaan mitoit-
taa myös tarvittavat kompensointilaitteet. [13.]

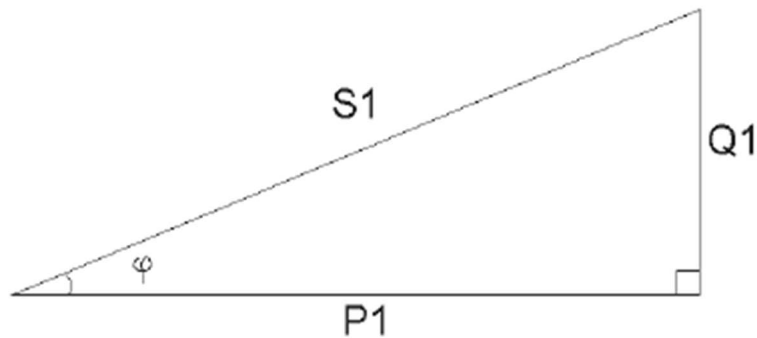
2.3.1 Loisteho ja kompensointi

Monet sähkölaitteet tarvitsevat pätötehon lisäksi toimiakseen myös loistehoa. Tallaisia laitteita ovat ei resistiiviset kuormat kuten moottorit, muuntajat ja purkausvalaisimet. Pätöteho ja loisteho muodostavat yhdessä näennäistehon ja sähköverkko mitoitetaan aina näennäistehon mukaan. Loisteho on välttämätöntä ja se ylläpitää esimerkiksi muuntajien ja moottoreiden magneettikenttää. Loisteho ei ole työtä tekevää tehoa niin kuin pätöteho, vaan se sykkii verkon ja kuorman välillä. Loisteho kuitenkin kuormittaa verkossa olevia johtimia. Näin ollen sitä ei ole järkevää siirtää pitkiä matkoja, ja loisteho olisi hyvä tuottaa käyttökohteessa. Tästä syystä sähköyhtiöt ovat viime vuosina nostaneet loistehomaksuja ja kannustavat näin suuria asiakkaitaan tuottamaan tarvitsemansa loistehon itse. Loistehomaksujen nousun myötä kompensointilaitteiden takaisinmaksuajat ovat lyhentyneet.

Näennäisteho S muodostuu pätötehosta P ja loistehosta Q . Näiden arvot voidaan ratkaista kuvan 11 suorakulmaisesta tehokolmiosta pythagoraan lauseen, kaavan 6 mukaan tai trigonometrian avulla. Sinimuotoisen jännitteen ja virran välistä vaihesiirtokulmaa $\cos \varphi$ nimitetään tehokertoimeksi ja sen suuruus vaihtelee nol-
lan ja yhden välillä. Tehokerroin voi olla kapasitiivisella tai induktiivisella puolella riippuen kuormasta. Se ilmaisee kuorman loistehon tarpeen ja voidaan laskea kaavan 7 mukaan. Pienentämällä tehokerrointa lähemmäksi arvoa yksi, on tällöin kuorman ottama teho lähes pelkästään pätötehoa. Kompensoimalla loisteho kulutuskohteessa saadaan siis pienennettyä kuorman energialaitoksen verkosta ot-
tamaa kokonaisvirtaa. Kompensointi vähentää tällöin myös verkkohäviöitä, josta aiheutuvat säästöt ovat merkittäviä. Lisäksi kompensointi pienentää myös jännit-
teen alenemia. Kompensointi voidaan toteuttaa laitekohtaisella-, ryhmä- tai kes-
kitetyllä kompensoinnilla.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6)$$

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (7)$$



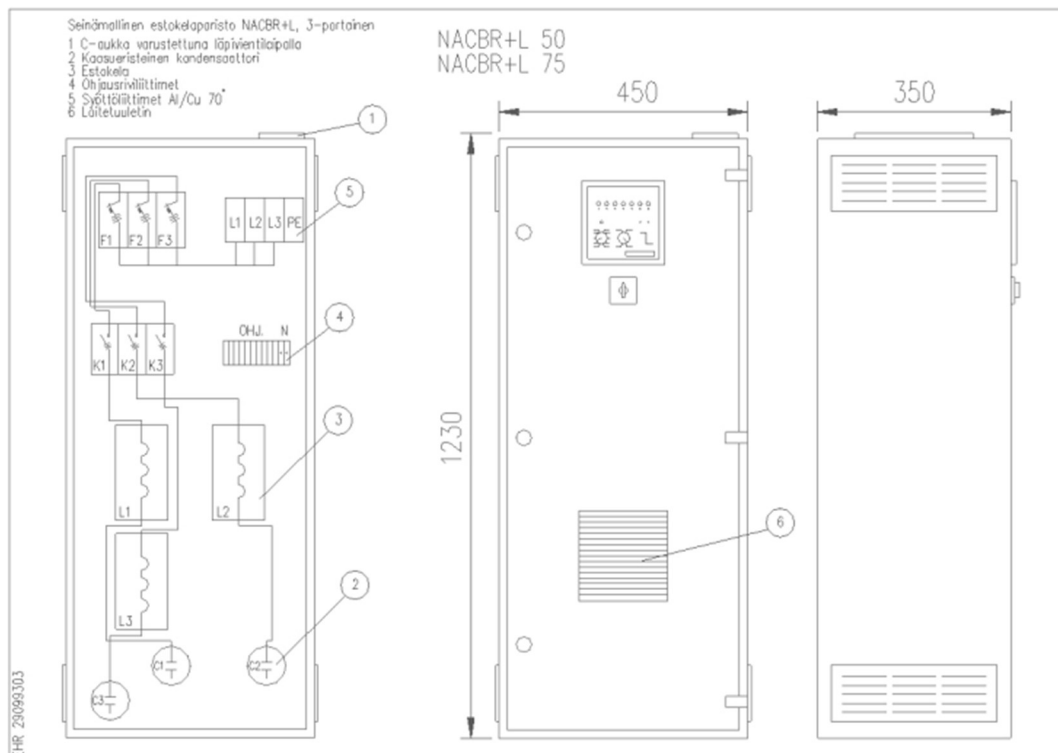
Kuva 11 Perustaajuinen tehokolmio [14].

Laitekohtaisessa kompensoinnissa kondensaattori sijoitetaan loistehoa kuluttavan laitteen yhteyteen. Yleensä tällaisia laitteita ovat oikosulkumoottorit ja purkausvalaisimet. Laitekohtainen kompensointi vähentää teho- ja jännitehäviöitä ja tuo säästöjä kaapelimitoituksessa erityisesti pitkillä syöttöjohdoilla. Mikäli kuorma tuottaa yliaaltoja, on laitekohtaista kompensointia vältettävä resonanssi tilannetteiden ehkäisemiseksi.

Ryhmäkompensointia voidaan käyttää kontaktoriohjatulla 3-vaihekuormilla esimerkiksi valaisinryhmissä tai moottoreilla. Kompensointiparisto sijoitetaan tällöin joko ryhmäkeskukseen tai ryhmäjohtoon. Ryhmäkompensointi toimii parhaiten kuormilla, joissa loistehon vaihtelut ovat pieniä. Laite- ja ryhmäkohtaista kompensointia suositellaan nykyisin välttämään ja vanhat asennukset tulisi vähitellen purkaa, koska niiden huoltaminen ja ylläpito on hankalaa.

Keskitettyssä kompensoinnissa kompensointiparisto sijoitetaan kiinteistön pääkeskukseen niille varatuille sulakelähdöille. Automaattisessa kompensointiparistossa on yleensä useampi kondensaattoriporras, joita loistehonsäädin ohjaa pääl-

le tarvittavan määrän. Loistehon säädin pyrkii pitämään tehokertoimen asetelussa arvossa ja estää ylikompensoinnin. Nykyään lähes kaikki uudet kompensointiparistot on varustettu estokeloilla resonanssi tilanteiden välttämiseksi, mutta myös perinteisiä kompensointiparistoja saattaa vielä olla käytössä. Kuvasta 12 nähdään, että estokelaparisto koostuu kondensaattorin ja kelan muodostamasta sarjaresonanssipiiristä, jonka viritystaajuus on valittu niin, ettei se osu minkään verkossa esiintyvän yliaallon taajuudelle. Yleisin viritystaajuus Suomessa on 189 Hz, mutta myös muita viritystaajuuksia on saatavilla tapauskohtaisesti. Estokelaparisto ei juurikaan suodata yliaaltoja. Jos verkossa esiintyy runsaasti yliaaltoja, on verkkoon lisättävä yliaaltosuodatin. [12.] [14.]



Kuva 12 Estokelapariston rakenne [15].

2.3.2 Yliaallot ja niiden ehkäisy

Epälineaariset kuormat synnyttävät virtayliaaltoja sähkönjakeluverkkoon. Jänniteyliaallot syntyvät pääasiassa virtayliaaltojen aiheuttamasta vastaavan taajuudesta jännitehäviöstä verkon impedansseissa. Harmoniset yliaallot heikentävät te-

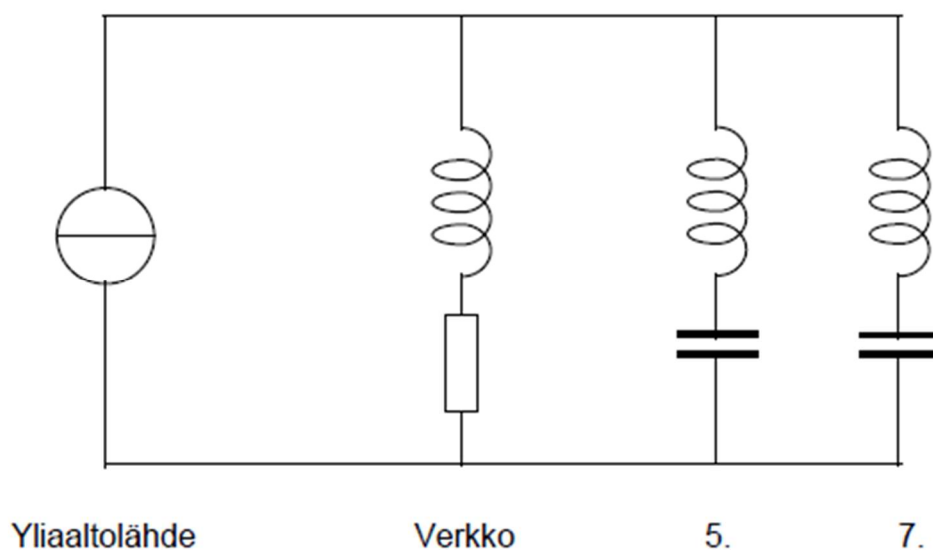
hokerrointa sekä kasvattavat ja säröttävät verkkovirtaa. Näiden aktiivisia komponentteja sisältävien kuormien verkosta ottama siniaallosta poikkeava säröytynyt virta voidaan matemaattisesti jakaa tasakomponenttiin, 50 Hz perustaajuiseen komponenttiin ja perustaajuuden kerrannaisiin harmonisiin yliaaltoihin (100 Hz, 150 Hz jne). Myös yliaaltoja, jotka eivät ole taajuuden kokonaisluvulla kerrannaisia esiintyy. Niitä kutsutaan epäharmonisiksi yliaalloiksi. Yleisen määritelmän mukaan kolmas yliaalto ja sen kerrannaiset syntyvät yksivaiheisesta kuormituksesta ja loput yliaallot syntyvät kolmivaihe kuormituksesta. Toisin kuin muut yliaallot, ei 3. yliaalto kumoudu verkon tähtipisteessä, vaan vaiheiden virrat summautuvat ja jatkavat kulkuaan nollajohtimessa, aiheuttaen nollajohtimen ylikuormitusta ja magneettikenttiä.

Yliaaltojen haittavaikutuksia sähköverkossa:

- lisähäviöt eri verkkokomponenteissa,
- nollajohtimen ylikuormittuminen 3. yliaallosta,
- automaatio- ja atk-järjestelmien häiriöt ja laite rikot,
- suoja-releiden ja mittalaitteiden virhetoiminnot,
- resonanssitilanteet ja sen aiheuttaman jännitesärön kasvu,
- televerkon häiriöt.

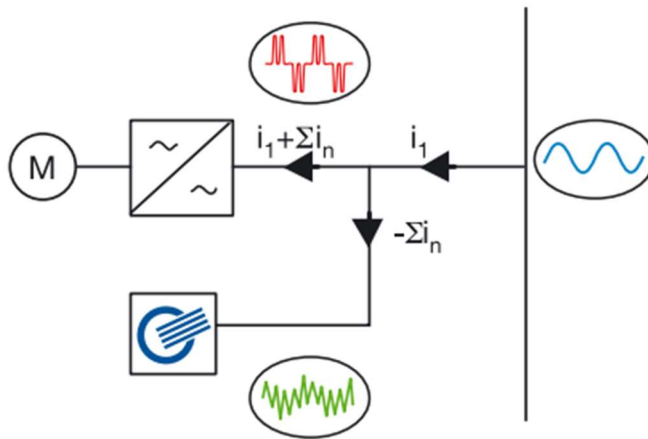
Verkossa esiintyviä yliaaltoja voidaan ehkäistä usealla tavalla. Verkkoa voidaan ylimitoittaa, mutta se on kuitenkin taloudellisesti melko kallis ratkaisu. Toinen vaihtoehto on minimoida syntyvien yliaaltojen määrä. Tämä on mahdollista valitsemalla mahdollisimman suurta pulssilukua käyttäviä suuntaajia tai uusinta puoli-johdetekniikkaa sisältäviä laitteita. Suurilla laitoksilla on myös mahdollista ryhmitellä tasasuuntaajakuorma niin, että puolet kuormasta on kytkentäryhmän D takana ja puolet kytkentäryhmän Y takana. Näin muuntajien 30° vaihesiirto kumoaa 5. ja 7. yliaallon. Kolmas vaihtoehto on suodattaa yliaaltoja. Tämä tapahtuu yliaaltosuodattimilla eli imupiireillä tai aktiivisuodattimella.

Yliaaltosuodattimet ovat yliaaltotaajuuksille viritettyjä sarjaresonanssiipiirejä. Jokainen suodatettava yliaalto vaatii oman haaransa, kuten kuvan 13 suodattimen sijaiskytkennästä nähdään. Suodatin on perustaajuudella kapasitiivinen, joka tarkoittaa sitä, että suodatin tuottaa loistehoa. Suodatin voidaan varustaa loistehon säätimellä, jolloin se toimii mukana loistehon kompensoinnissa ja pienentää yliaaltosäröä. 3. yliaallon suodatin on nollajohtimeen asennettava THF-suodatin. Se on rinnakkaisresonanssiipiiri, joka estää kolmannen yliaallon kulkemisen nolla- ja vaihejohtimissa.



Kuva 13 5. ja 7. yliaallon suodattimen sijaiskytkentä [12].

Aktiivisuodattimen toiminta perustuu sähkönlaadun tarkkailuun ja laite tuottaa jokaiselle yliaallolle vastakkaisen virtakomponentin. Suodatin on siis periaatteessa invertteri, joka tuottaa kuormalle sen ottamat yliaallot. Näin kuorma ottaa verkosta vain perustaajuista virtaa, kuten kuvasta 14 nähdään. Aktiivisuodatinta voidaan käyttää perinteisten imupiirien tilalla pienjänniteverkossa. Aktiivisuodatin pystyy suodattamaan jopa 20 harmonista yliaaltoa samanaikaisesti ja lisäksi laite hallitsee kuormituksen tasaisuutta ja säätää loistehoa portaattomasti. [4.] [6.] [12.]

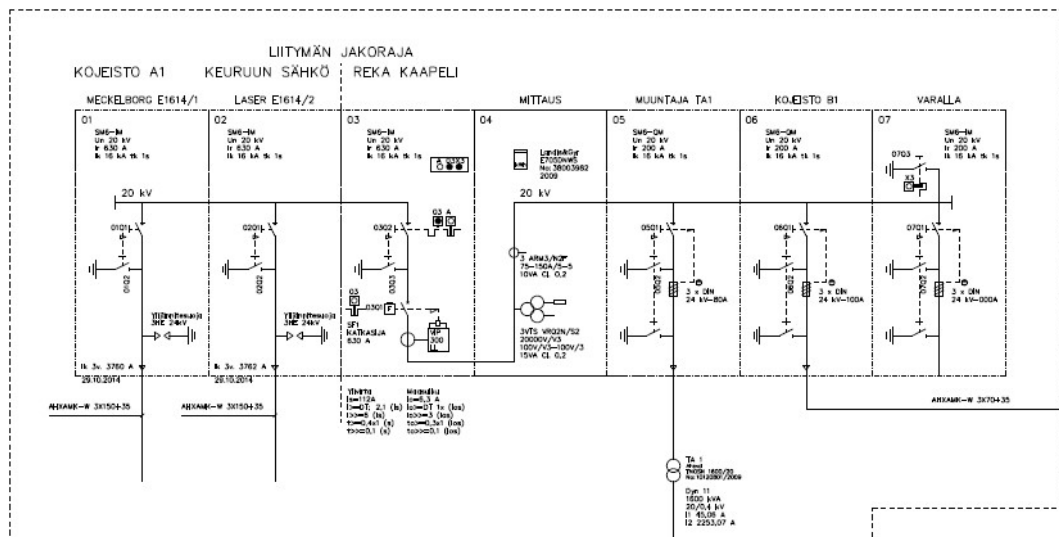


Kuva 14 Aktiivisuodattimen toimintaperiaate [16].

3 MITTAUSKOHDDE

3.1 Verkko

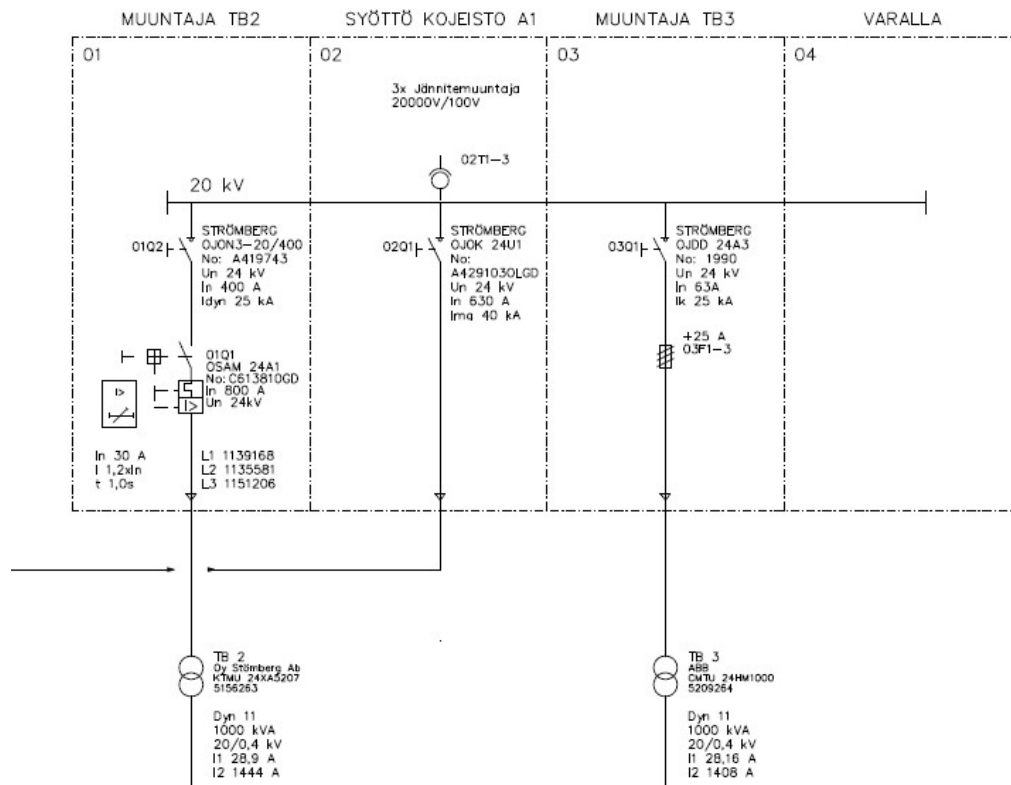
Tehtaalla on kaksi muuntamoa, A ja B. Tehtaan 20 kV sähkönsyöttö on rengas-
syöttö ja se on tuotu muuntamon A kojeistoon A1 kahdella AHXAMK-W
3x150+35 kaapelilla. Kuvassa 15 on kojeiston A1 sähköpiirustus. Kojeistossa si-
jaitsee pääkatkaisija ja energiamittari. Kojeisto A1 syöttää muuntajaa TA 1 ja ko-
jeistoa B1, jonka syöttö on toteutettu AHXAMK-W 3x70+35-kaapelilla. Muuntaja
TA 1, jonka nimellisteho on 1600 kVA syöttää pienjännitekeskusta PKA1.



Kuva 15 Kojeisto A1.

Kojeistosta B1 syötetään muuntajia TB 2 ja TB 3. Kojeiston sähköpiirustus on ku-
vassa 16. Muuntaja TB2, jonka nimellisteho on 1000 kVA, syöttää pienjännitekes-
kuksia PKB1 ja PKB2. Muuntaja TB 3, jonka nimellisteho 1000 kVA, syöttää kes-
kusta PKB3. Myös aurinkovoimala, jonka maksimiteho on 110 kVA, syöttää pien-
jännitekeskusta PKB3. Loistehon kompensointi on toteutettu pienjännite pääkes-
kuksissa keskitetysti eikä yliaaltosuodattimia ole käytössä yhdessäkään keskuksessa. Jakeluverkon kokonaiskuva on liitteessä 1.

KOJEISTO B1



Kuva 16 Kojeisto B1.

Keskuksen PKA1 nimellisjännite on 400 V ja nimellisvirta on 3150 A. Keskuksen kuormana on pääasiassa moottorikäyttöjä, ja tehtaan suurimmat käytöt saavat syöttönsä tästä keskuksesta. Keskuksesta syötetään langanvetolinjoja, kylmävesilaitteita, typpiasemaa, ilmastointia sekä langanvetohallissa olevia valaistus ja pistorasiakeskuksia. Loistehon kompensointi on toteutettu keskitetysti estokelapariistoja käyttäen. Keskuksen kompensointi on toteutettu kahdella Norelko NACBL- ja yhdellä TKF-E300-kaappimallin estokelapariistolla, joiden viritystaajuus on 189 Hz. Ensimmäinen NACBL paristo on varustettu kuudella 50 kVAR kasetilla ja toinen paristo neljällä 50 kVAR- ja kahdella 2x25 kVAR-kasetilla. TKF-E300 paristo on varustettu kuudella 50 kVAR-portaalla. Kompensointitehoa on yhteensä 900 kVAR. Kaikkia portaita ohjataan samalla TKF BLR-CX loistehon säätimellä, jonka asetusarvo on 1.00.

Keskuksen PKB1 nimellisjännite on 400 V ja nimellisvirta 1500 A. Keskuksen kuormana on eriste- ja vaippalinjalla sijaitsevia laitteita sekä kiinteistö- ja apulaittekeskus ja prosessivesilaitteita. Keskukseen ei ole kytketty kompensointiparistoa, vaan kompensointi hoidetaan keskuksen PKB2 kautta.

Keskuksen PKB2 nimellisjännite on 400 V ja nimellisvirta 1600 A. Keskuksesta saa syöttönsä hallien jako-, lämmönsäätö-, apulaitte- ja kiinteistökeskukset. Keskus syöttää myös eristelinjoja ja koestamoita sekä paineilmakompressoria, kylmäkoneita ja springler-laitteistoa. Keskuksen loistehon kompensointi on toteutettu keskitetysti kahdella TKF-E300-kaappimallin estokelaparistolla. Joista ensimmäisessä paristossa on viisi 50 kVAr-porrasta ja kaksi 25 kVAr-porrasta. Toisessa paristossa on kuusi 50 kVAr-porrasta. Kompensointitehoa on keskuksessa yhteensä 600 kVAr. Loistehon säätimenä on TKF BLR-CX, jonka asetusarvo on 1.00. Loistehon säädin saa mittaustietonsa muuntajalta tulevasta virtakiskosta, koska samalla paristolla kompensoidaan myös keskusta PKB1.

Keskuksen PKB3 nimellisjännite on 400 V ja nimellisvirta 1600 A. Keskus syöttää vaippalinjan ja pakkaushallin koneita sekä paineilmakompressoria. Loistehon kompensointi on toteutettu keskitetysti ja se tapahtuu TKF-E300 ja TKF-E150 estokelaparistoilla. TKF-E300-estokelaparisto on varustettu viidellä 50 kVAr-portaalla ja kahdella 25 kVAr-portaalla. TKF-E150 on varustettu kolmella 50 kVAr-portaalla. Kompensointitehoa paristoissa on yhteensä 450 kVAr. Loistehon säädin on mallia TKF BLR-CX ja sen asetusarvona on 1.00.

3.2 Havaitut ongelmat

Tehtaalla ei ole havaittu ongelmia, jotka johtuisivat jännitteen laadusta, joten sähkönlaatu analyysi niiltä osin on puhtaasti ennakkotoimenpide. Keskuksissa kiinteinä olevista tehoanalysointilaitteista on kuitenkin havaittu virroissa esiintyvän huomattavaa epäsymmetriaa vaiheiden kesken. Varmuutta siitä, näyttävätkö mittarit oikeita arvoja, ei ole. Kuvassa 17 näkymä keskuksen virtamittarista, jolloin vaiheet ovat epäsymmetrisesti kuormittuneet.

Kompensointilaitteistoissa on aiempina vuosina havaittu kondensaattoreiden kunnan heikentymistä sekä hajonneita kondensaattoreita. Myös loistehomak-suista on käynyt ilmi, että loistehon kapasitiivinen osuus on hieman ylittänyt il-maisosuuden. Tämä viittaisi ylikompensointiin ja syy sille halutaan selvittää.



Kuva 17 PKA1-virtamittarit.

4 MITTAUSTULOKSET

4.1 Mittalaite

Mittalaitteena työssä käytettiin Metrel MI-2592 PowerQ4 energia-analysointilaitetta. Mittalaitteella voidaan analysoida ja monitoroida kolmivaiheverkkoa ja sitä voidaan käyttää apuna vianhaussa. Laitteesta löytyy neljä jännite- ja virtakanavaa, jotka mahdollistavat kolmivaihemittauksen lisäksi nollajohtimen tarkastelun. Laitte on standardin IEC 61000-4-30-luokan S mukainen ja tehomittaukset ovat IEC 61557-12:n ja IEEE 1448:n mukaiset. Lisäksi laitteesta löytyy valmiiksi esimääritellyt tallennusprofiilit EN-50160-mittaukselle, jota käytimme omilla mittauksilla hyväksi. Laitteella on mahdollista tallentaa ja analysoida 509 eri parametria yhtäaikaista. Tarkemmin laitteen ominaisuuksista kerrotaan datalehdellä, joka on liitteessä 2.

Mittalaitteen mukana toimitetulla PowerView tietokoneohjelmalla on mahdollista analysoida tarkemmin mitattua dataa. Datasta voidaan ohjelman avulla luoda erilaisia kaavioita ja taulukoita sekä tarkastella graafisesti virran ja jännitteen laatua. Mittausarvot ovat myös helposti siirrettävissä taulukkolaskenta ohjelmaan esim. Exceliin jatkotutkimuksia varten. Ohjelmisto tarjoaa myös mahdollisuuden tulostaa sähkölaaturaportteja eri standardeihin perustuen.

4.2 Keskus PKA1

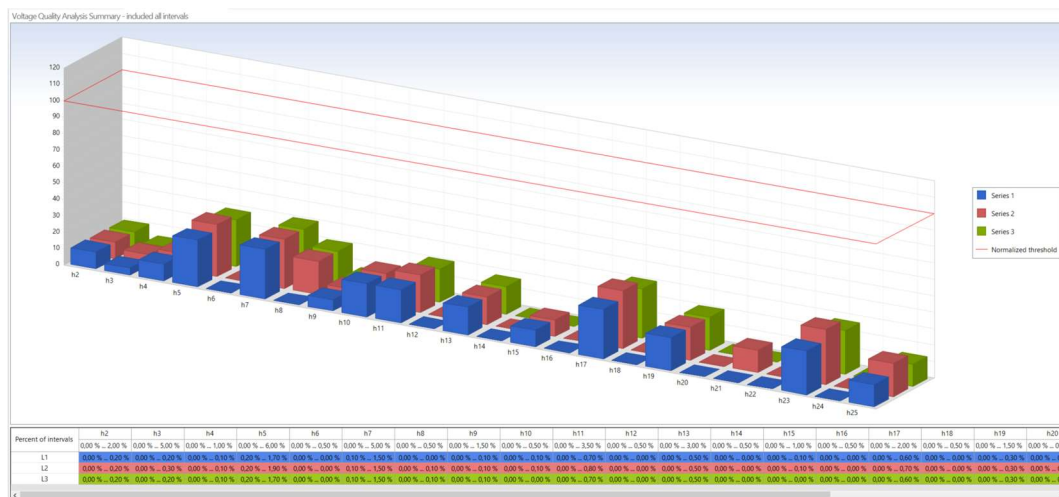
Keskuksen mittaus suoritettiin nelijohdin mittauksena suoraan keskuksen virtakiskoista, jolloin saatiin mittaustulokset niin vaihejohtimista kuin nollajohtimesta. Kuvassa 18 näkyvät virtakiskot, joihin virtapihdit asennettiin. Kosketussuojat piti purkaa ennen mittarin asentamista. Mittapäiden asentamisessa käytettiin asiaan kuuluvia suojakäsineitä ja työkaluja. Tallennusprofiilina käytettiin laitteessa valmiina olevaa standardiin EN-50160 perustuvaa mittausta. Kohteesta tutkittiin jännitteen- ja virranlaatu sekä tehot.



Kuva 18 PKA1-mittauspiste.

Jännitteenlaatu pysyi koko mittausjakson ajan standardin määrittämässä rajoissa. Tehotaajuus vaihteli mittausjakson aikana 49,78–50,15 Hz välillä, joka vastaa hyvää laatua. Taajuuteen ei voida omilla laitteilla vaikuttaa ja verkkoyhtiö vastaa syöttöverkon taajuudesta. Syöttöjännitteen mittausarvot vaihtelivat 232,93–242,40 V välillä, joka vastaa normaalia laatua. Myös välkyntä ja jännitteen epäsymmetria pysyivät standardin määrittämien rajojen sisällä. Välkyntäindeksi P_t vaihteli mittausjakson aikana 0–0,70 välillä. Jännitteen epäsymmetria-arvo vaihteli mittausjakson aikana 0,11–0,43 % välillä, joka vastaa hyvää laatua. Harmoniset jänniteylliaallot eivät myöskään ylittäneet standardin määrittämiä rajoja ja

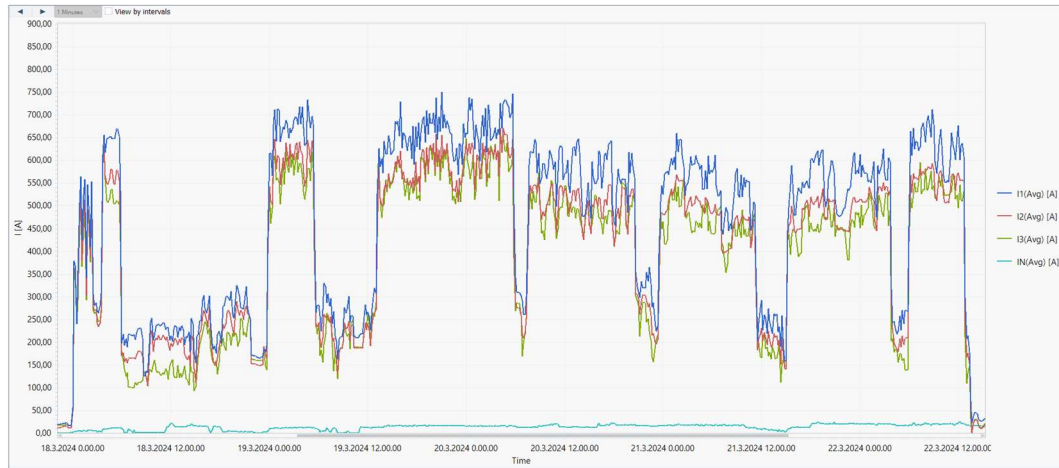
niiden osalta jännitteen laatu oli hyvä. Harmonisten jännite yliaaltojen tasot ovat nähtävissä kuvan 19 pylväskaaviosta. Käyttökeskeytyksiä tai nopeita jännitteen nousuja ei mittausjakson aikana esiintynyt. Mittausjakson aikana esiintyi yksi hetkellinen jännitekuoppa, jonka aikana jännite romahti kaikissa vaiheissa noin 200 volttiin. Kuopan kesto-aika oli noin 300 ms. Kuoppa johtuneee jakeluverkossa tapahtuneesta viasta kestoajan perusteella. Lisäksi tehtaan omassa verkossa kuormitus oli tasaista kyseisellä hetkellä. Liitteessä 3 on Powerview-ohjelmalla luotu EN-60150-raportti, josta voidaan graafisesti ja taulukoista tarkastella mitattuja jännitteen arvoja.



Kuva 19 PKA1-harmoniset jänniteyliaallot normalisoituna.

Kuten keskuksessa olevasta tehoanalysaattorista oli ennen mittauksia havaittu, olivat vaiheet epäsymmetrisesti kuormittuneet. Vaihe L1 oli selkeästi eniten kuormittunein ja vaihe L3 vähiten kuormittunein. Kuvassa 20 on esitetty virtakuvaajat mittausajanjaksolta. Virtojen epäsymmetrian mahdollinen aiheuttaja voi johtua kompensointilaitteistosta. Siellä on mahdollisesti palanut sulake tai viikaantunut kondensaattori. Vanhoissa, vuonna 2014 tehdyissä mittauksissa vastaavaa epäsymmetriaa ei esiintynyt, eikä tämän jälkeen keskuksiin ole lisätty uusia laitteita. Nollajohtimessa on myös havaittavissa virtaa, mikä pääasiassa johtuneee vaihevirtojen epätasaisesta jakautumisesta. Nollavirrasta hyvin pieni osa koostuu 3. yliaallon aiheuttamasta virtakomponentista, joka voidaan nähdä ku-

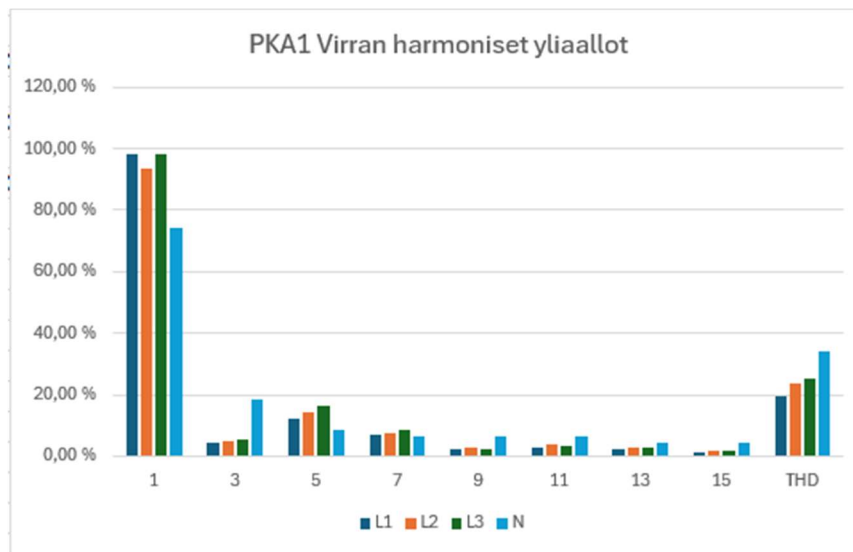
van 21 pylväsgraafista. Taulukossa 5 on listattuna mitattujen virtojen minimi, maksimi ja keskiarvot mittausajan jaksolta.



Kuva 20 PKA1-virtojen kuvaaja.

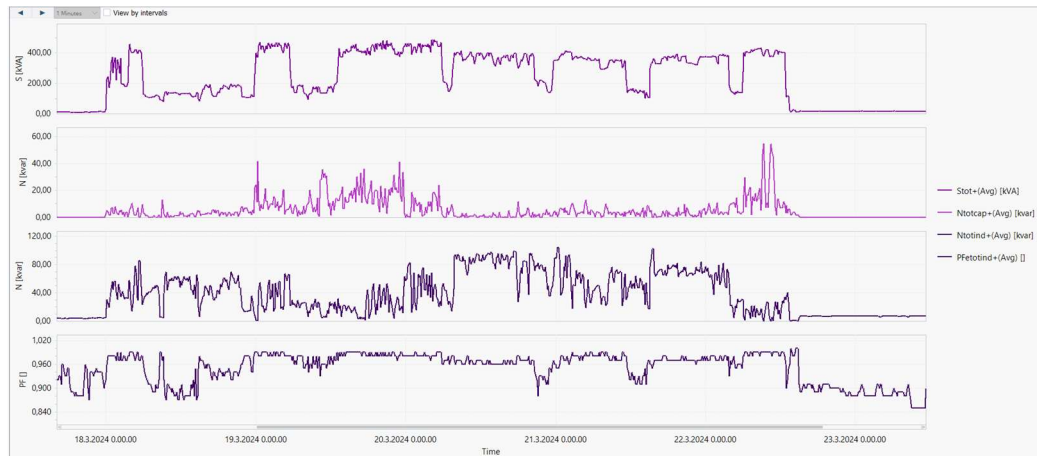
Taulukko 5 PKA1-virtojen min, max, avg.

Quantity	Min	Max	Avg
I1(Avg) [A]	23,10	751,20	438,06
I2(Avg) [A]	0,00	671,40	385,02
I3(Avg) [A]	0,60	659,40	365,54
IN(Avg) [A]	0,00	26,40	14,40



Kuva 21 PKA1-virran harmonisten yliaallojen keskiarvot mittausajanjaksolta.

Mittausjakson aikana loistehon määrä pysyi kohtuullisella tasolla. Tehokerroin oli keskimäärin mittausjakson aikana 0,95, joka ilmenee Taulukko 6. Kuormituksen muuttuessa voidaan Kuva 22 havaita selkeitä loistehopiikkejä sekä kapasitiiviselle että induktiiviselle puolelle. Induktiivinen loistehon huippu on 105,3 kVAR ja kapasitiivinen huippu 55,2 kVAR. Tämä johtunee puhtaasti loistehosäätimen hitautesta. Loistehosäätimen kytkentä viive on 40 sekuntia, joten kuormituksen muuttuessa on havaittavissa, että jokin portaista saattaa jäädä hetkeksi aikaa päälle tai kytkeytyä viiveellä päälle.

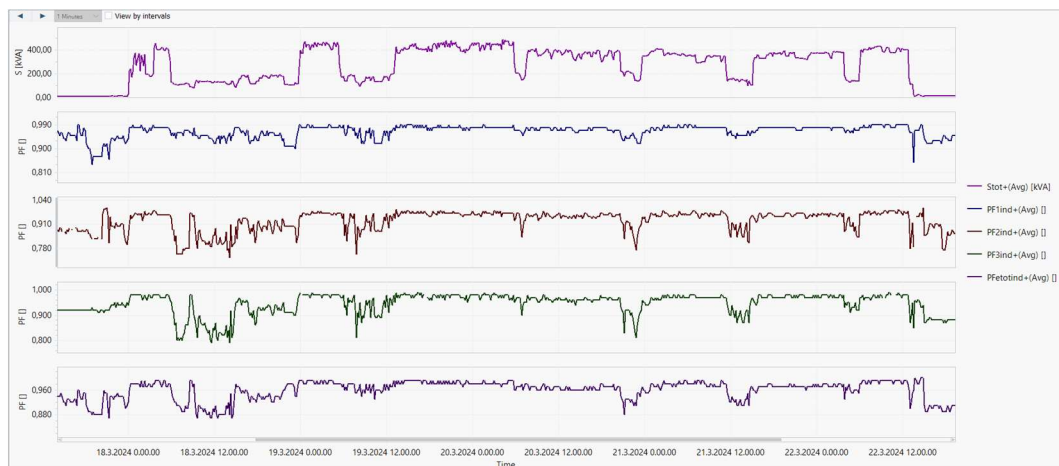


Kuva 22 PKA1-tehokuvaajat.

Taulukko 6 PKA1-tehojen min, max ja avg.

Quantity	Min	Max	Avg
Stot+(Avg) [kVA]	9,30	489,60	235,41
Ntotcap+(Avg) [kvar]	0,00	55,20	5,25
Ntotind+(Avg) [kvar]	0,00	105,30	37,42
PFtotind+(Avg) []	0,85	1,00	0,95

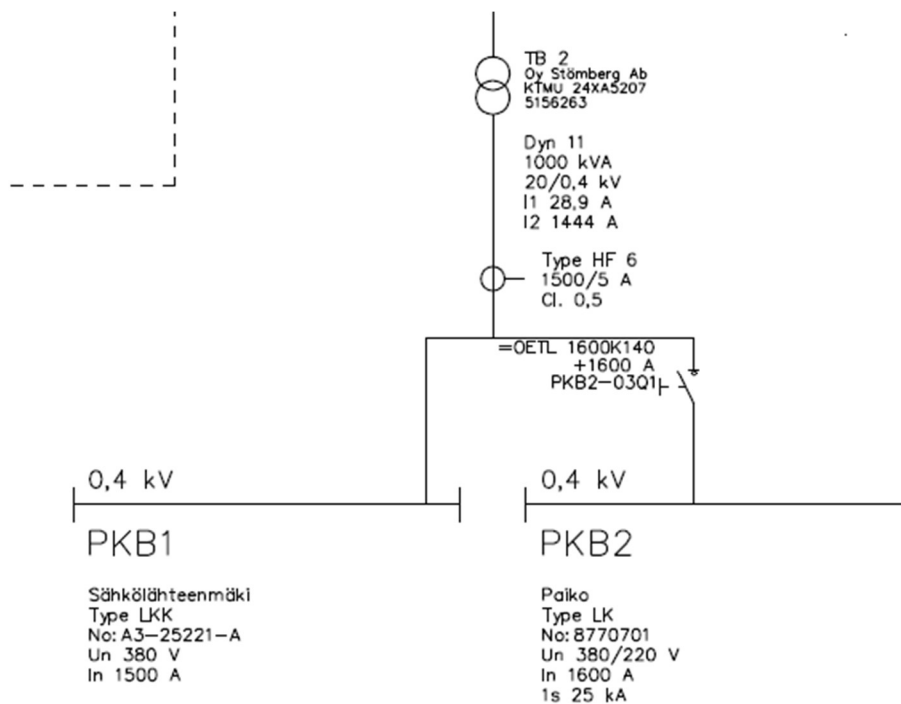
Ihmettelin syytä sille, miksi mittalaitteen näyttämä kokonaistehokerroin ja loistevo säätimen näyttö antoivat välillä eri lukemia. Syyksi paljastui, että loistehosäädin laskee tehokertoimen vaiheesta L1. Näin voi syntyä tilanne, jossa vaiheiden L2 ja L3 tehokerroin saattaa laskea eikä loisteho säädin havaitse sitä. Kuvasta 23 nähdään selvästi muutama esimerkki tällaisesta tilanteesta. Tämä viittaisi siihen, että vaiheilla L2 ja L3 kompensointikondensaattoreiden kunto on huonontunut.



Kuva 23 PKA1-vaihekohtaiset tehokertoimet.

4.3 Keskus PKB1

Keskukseen PKB3 suoritettiin kaksi mittausta. Varsinainen sähkönlaatumittaus suoritettiin kolmijohdinmittauksena keskuksessa olevien mittamuuntajien kautta. Muita mahdollisuuksia ei ollut, koska keskuksen virtakiskoihin oli mahdotonta päästä käsiksi ilman sähkökatkoa. Näin ollen nollajohdinta ei pystynyt tästä keskuksesta mittaamaan. Toinen mittaus suoritettiin muuntajalta tulevien virtakiskojen mittamuuntajista, jotka näkyvät kuvassa 24. Tällä mittauksella tutkittiin verkosta otettavaa tehoa ja varmistettiin, että kompensointilaitteet toimivat oikein. Kompensointilaitteisto on keskuksille PKB1 ja PKB2 yhteinen, joten keskuksien omista virtakiskoista mitattu loistehon määrä ei vastaa verkosta otettua loistehoa.



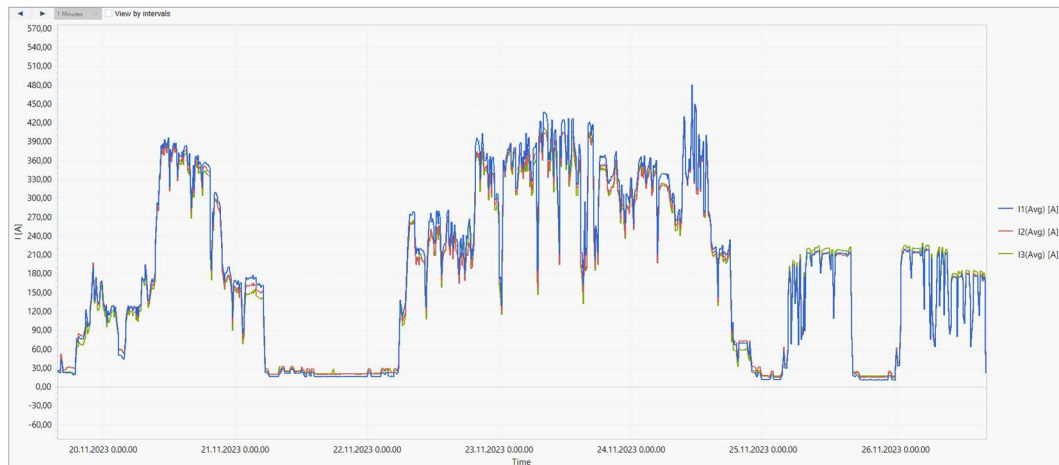
Kuva 24 PJ-keskukset PKB1 ja PKB2.

Jännitteen laatu keskuksessa pysyi koko mittausajanjakson kaikkien standardin EN-50160 määrittelemien ominaisuuksien osalta hyvällä tasolla. Kuvassa 25 on Powerview-ohjelmiston yhteenveto jännitteen laatuanalyysistä. Kaikki mitatut arvot on normalisoitu samaan kuvaajaan, joten punaisen 100 % rajan alittavat palkit ovat standardin mukaan hyväksytyjä. Liitteessä 4 on lisäksi Powerview-ohjelmistolla tehty jännitteen laaturaportti, josta kaikki mitatut arvot ja niiden kuvaajat näkyvät tarkemmin.



Kuva 25 PKB1 jännitteen laatu analyysin yhteenveto.

Mittausjakson aikana kaikki vaiheet olivat tasaisesti kuormittuneet, kuten kuvan 26 virtakuvaajista voidaan havaita. Kuormitus vaihteli voimakkaasti mittausjakson aikana, ja suurimmillaan vaihevirrat kohosivat 480 ampeeriin, kuten taulukosta 7 käy ilmi. Keskuksessa mahdollisesti esiintyvää nollavirtaa ei ollut mahdollista selvittää, joten sen taso jää puhtaasti arvailujen varaan.

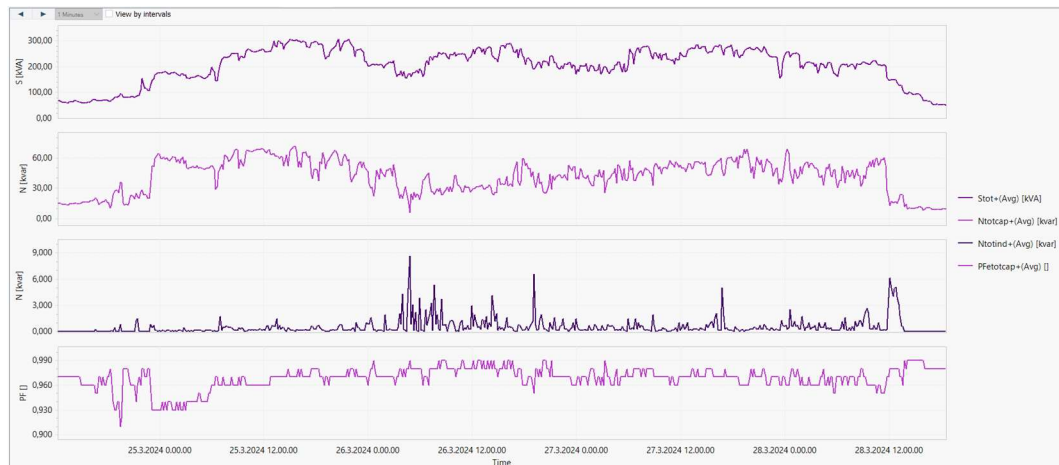


Kuva 26 PKB1-virta kuvaajat.

Taulukko 7 PKB1-virtojen min, max ja avg.

Quantity	Min	Max	Avg
I1(Avg) [A]	11,25	481,20	194,40
I2(Avg) [A]	15,60	475,80	189,32
I3(Avg) [A]	16,95	481,20	188,50

Keskusten tehomittauksessa paljastuu, että loisteho pysyy koko mittauksen aja lievästi kapasitiivisellä puolella. Tämä voidaan havaita kuvasta 27. Keskuksissa esiintyy siis ylikompensointia ja loistehoa syötetään tarpeettomasti verkkoon päin. Keskimäärin kapasitiivisen loistehon määrä mittausjakson aikana oli 44,46 kVAR, joka voidaan nähdä taulukosta 8.

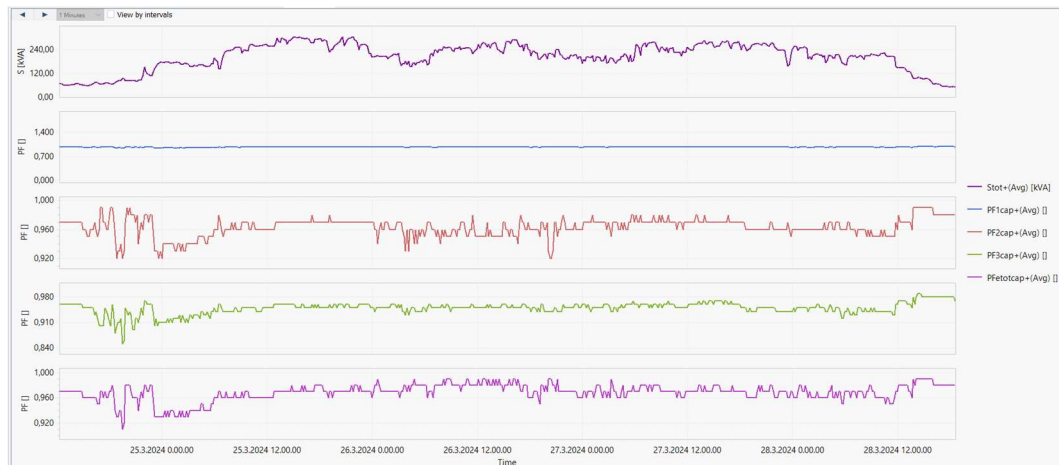


Kuva 27 PKB1- ja PKB2-tehokuvaajat.

Taulukko 8 PKB1- ja PKB2-tehojen min, max ja avg.

Quantity	Min	Max	Avg
Stot+(Avg) [kVA]	51,15	307,05	221,58
Ntotcap+(Avg) [kvar]	6,15	71,40	44,46
Ntotind+(Avg) [kvar]	0,00	8,70	0,59
PFtotcap+(Avg) []	0,93	0,99	0,97

Syy ylikompensointiin löytyy tutkimalla vaihekohtaisia tehokertoimia. Kuten kuvasta 28 voidaan nähdä, tehokerroin vaiheessa L1 pysyy koko ajan lähellä loistehosäätimen asetusarvoa. Vaiheissa L2 ja L3 tehokerroin on taas hieman kapasitiivisella puolella. Loisteho säädin näyttää toimivan hyvin, sillä se saa mittaustietonsa vaiheesta L1 ja säätelee loistehoa sen mukaan. Ylikompensoinnin aiheuttaa mahdollisesti vaiheen L1 huonontunut kompensointikondensaattorien kunto tai vaiheiden epätasainen loistehon tarve.

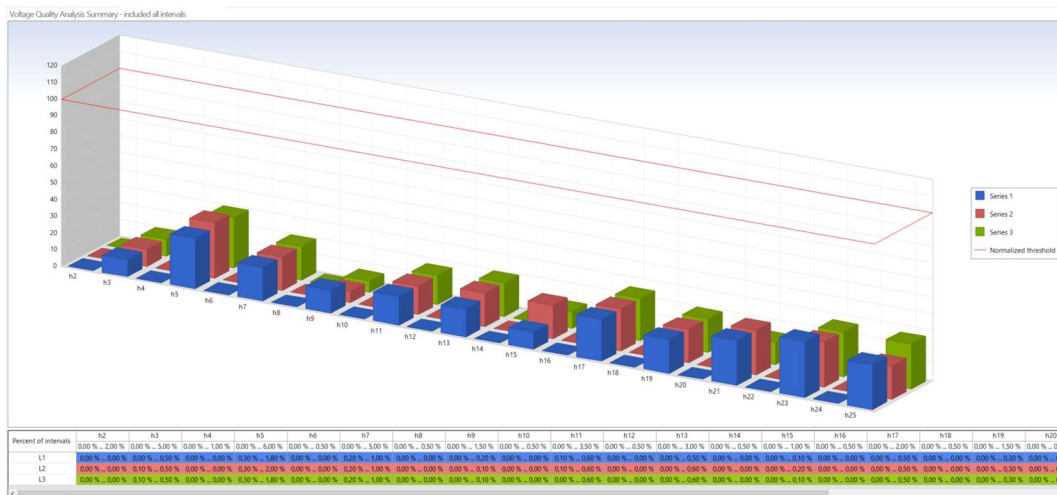


Kuva 28 PKB1- ja PKB2-tehokertoimet.

4.4 Keskus PKB2

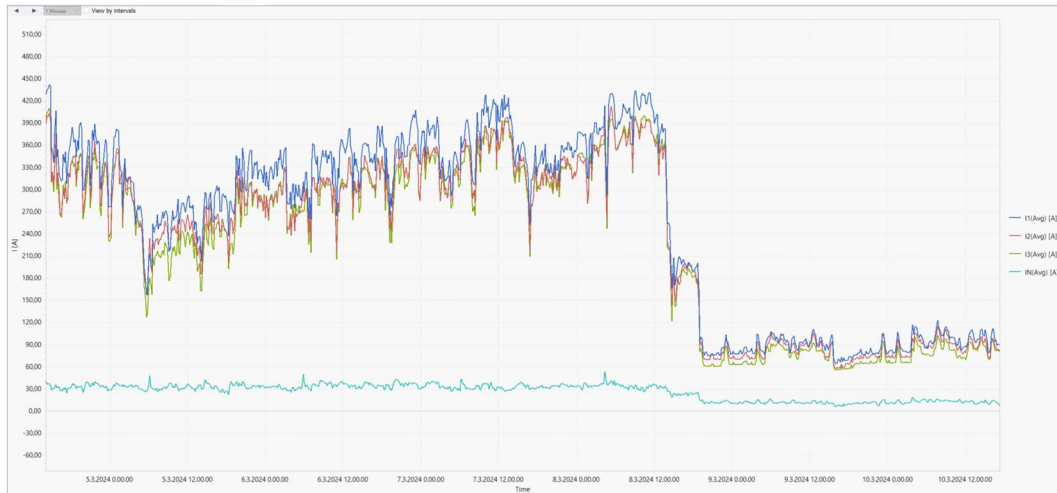
Keskukseen PKB2 suoritettiin sähkönlaatumittaus kuvassa 24 näkyvän kuormakytkimen kohdalta. Mittaus tehtiin kaikista neljästä johtimesta, jolloin voitiin analysoida vaihejohtimien lisäksi myös nollajohdinta. Mittauksessa käytettiin joustavia virtapihtejä, jotka voitiin asettaa helposti virtakiskon ympärille. Tallennusprofiilina käytettiin standardiin EN-50160 perustuvaa mittauksia.

Jännitteen laatu pysyi koko mittausjakson ajan standardin hyväksymällä tasolla. Jännitetasojen vaihtelu oli pientä, eikä syöttöjännitteessä esiintynyt hetkellisiä jännitteen nousuja tai jännitekuoppia. Myös välkyntä ja jännitteen epäsymmetria pysyivät hyvällä tasolla. Harmonisten jänniteylijaltojen taso oli myös hyvä ja vaiheiden THD oli 2,4 %. Kuvassa 29 Powerview-ohjelman luoma kuvaaja harmonisten ylijaltojen tasoista normalisoituna samaan kuvaajaan. Liitteessä 5 on jännitteen laaturaportti, josta mitattujen suureiden arvoja ja kuvaajia voi tarkastella.



Kuva 29 PKB2-jännitteen harmoniset yliaallot normalisoituna-

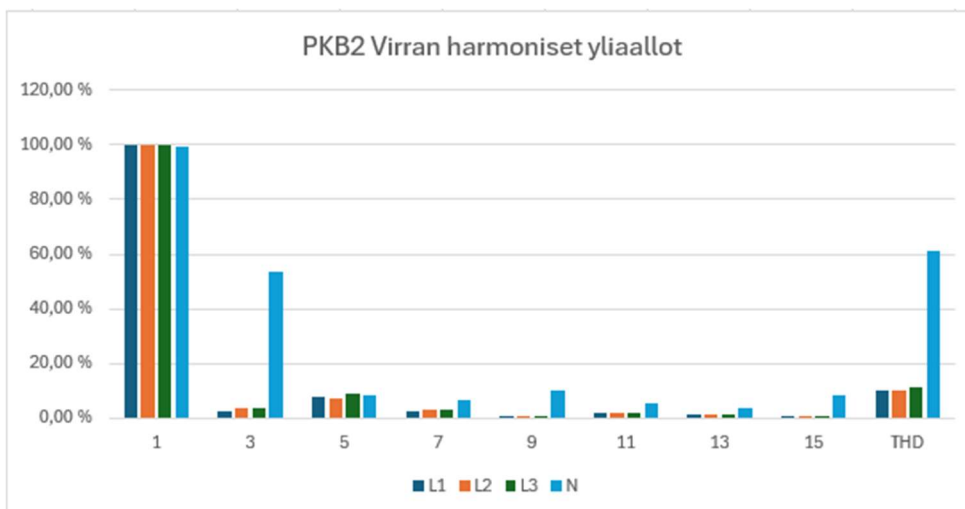
Keskuksen virroissa on havaittavissa pientä epäsymmetriaa, kuten kuvan 30 vir-takuvaajista voidaan nähdä. Epäsymmetria ei ole kovin suurta, noin 6 % vaihevir-tojen keskiarvosta, mutta siitä huolimatta nollavirta on noin 10 %. Syyksi paljas-tuu 3. yliaalto, joka kasvattaa nollavirran määrää. Kuten kuvan 31 pylväsgraafista voidaan nähdä, on 3. yliaallon osuus varsin suuri nollavirrasta. Suurimmillaan nol-lavirran 10 minuutin keskiarvo kohoaa 54 ampeeriin. Tämä voidaan havaita tau-lukosta 9, johon on listattu virtojen 10 minuutin RMS arvojen minimi-, maksimi- ja keskiarvot.



Kuva 30 PKB2-virtakuvaajat.

Taulukko 9 PKB2-virtojen min, max ja avg.

Quantity	Min	Max	Avg
I1(Avg) [A]	63,90	433,80	247,54
I2(Avg) [A]	57,90	412,80	227,94
I3(Avg) [A]	55,80	400,20	220,77
IN(Avg) [A]	6,00	54,00	25,82



Kuva 31 PKB2-virran harmonisten yliaaltojen keskiarvot mittausajanjaksolta.

4.5 Keskus PKB3

Keskuksen PKB3 sähkönlaadunmittaus suoritettiin kuvassa 32 näkyvän kuormakytkimen kohdalta. Mittaus suoritettiin kaikilta vaiheilta ja nollajohtimesta nelijohdin mittauksena. Mittauksessa käytettiin joustavia mittapäitä, jotka oli helppo asetella virtakiskon ympärille. Mittapäiden asennuksessa käytettiin asianmukaisia suojakäsineitä. Tallennusprofiilina käytettiin standardiin EN-50160 perustuvaa mittausta. Keskuksesta mitattiin jännitteen- ja virranlaatu sekä tehot.



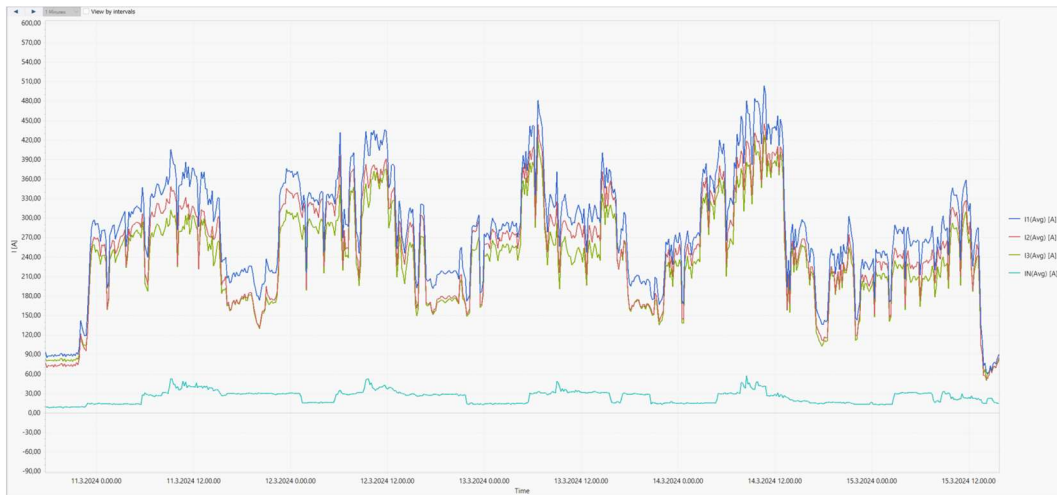
Kuva 32 PKB3-mittauspiste.

Jännitteen laatu pysyi keskuksessa koko mittausajanjakson hyvällä tasolla. Mitatut jännitteen arvot olivat standardin sallimissa rajoissa. Jännitteen harmonisia yliaaltoja tarkasteltaessa huomataan, että keskuksessa esiintyy muista keskuksista poiketen myös parillisia yliaaltoja. Kuvassa 33 näkyvät harmonisten yliaaltojen tasot normalisoituna samaan kuvaajaan. Syyksi tälle paljastui keskusta syöttävä aurinkovoimala. Jännitteen THD pysyy kuitenkin 3,6 %, joka vastaa normaali laatua jännitesärön osalta. Myöskään yksittäisten yliaaltotaajuuksien tasot eivät ole korkeita. Aurinkovoimala syöttää verkkoon vain pätötehoa. Tämä kävi ilmi mitatessamme aurinkovoimalan syöttökaapelia. Liitteessä 6 on standardiin EN-50160 pohjautuva jännitteenlaaturaportti, josta kaikki mitattuja suureita ja niiden tasot voidaan tarkastella.



Kuva 33 PKB3-jännitteen harmoniset yliaallot normalisoituna

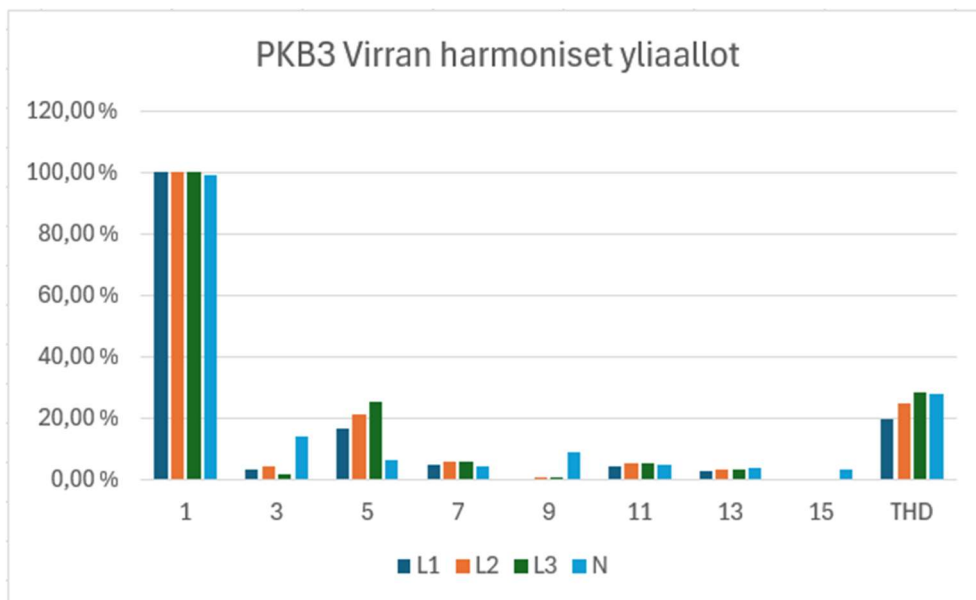
Keskuksen vaihevirroissa esiintyi mittausjakson aikana jatkuvaa epäsymmetriaa. Suurin kuormitus on vaiheella L1, kuten kuvan 34 virtakuvaajista nähdään. Epäsymmetria on noin 10 % vaihevirtojen keskiarvosta. Nollajohtimessa virta nousee suurimmillaan 57,6 ampeerin, kuten Taulukosta 10 voidaan havaita. Syy nollavirtaan vaikuttaisi olevan epäsymmetrinen kuormitus vaihejohtimien kesken, sillä tarkasteltaessa keskuksessa esiintyviä yliaaltoja, jotka näkyvät kuvan 35 pylväskaaviossa, on 3. yliaallon osuus nollavirrasta varsin pieni.



Kuva 34 PKB3-virtojen kuvaajat.

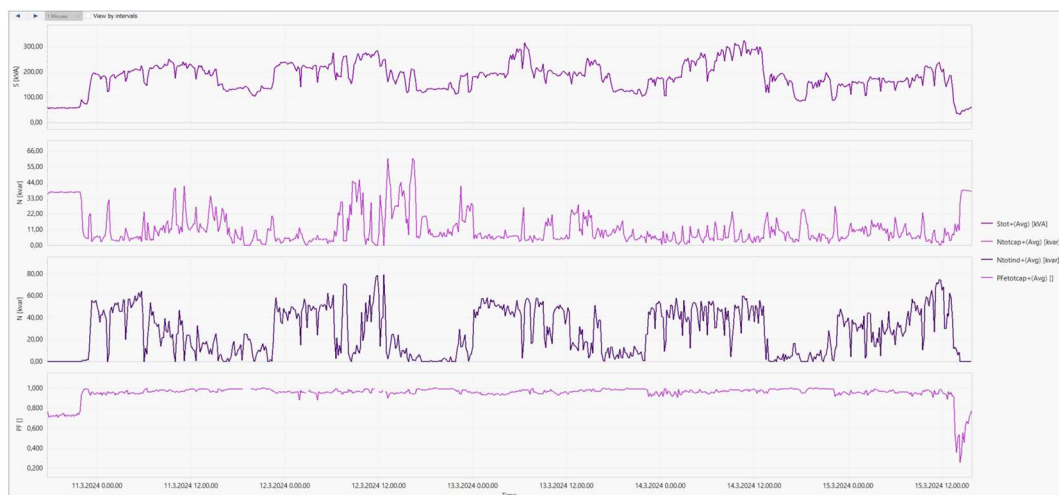
Taulukko 10 PKB3-virtojen min, max ja avg.

Quantity	Min	Max	Avg
I1(Avg) [A]	60,30	504,00	291,47
I2(Avg) [A]	52,20	445,20	260,93
I3(Avg) [A]	49,80	427,80	243,41
IN(Avg) [A]	12,60	57,60	25,74



Kuva 35 PKB3-virran harmonisten yliaaltojen keskiarvot mittausajanjaksolta.

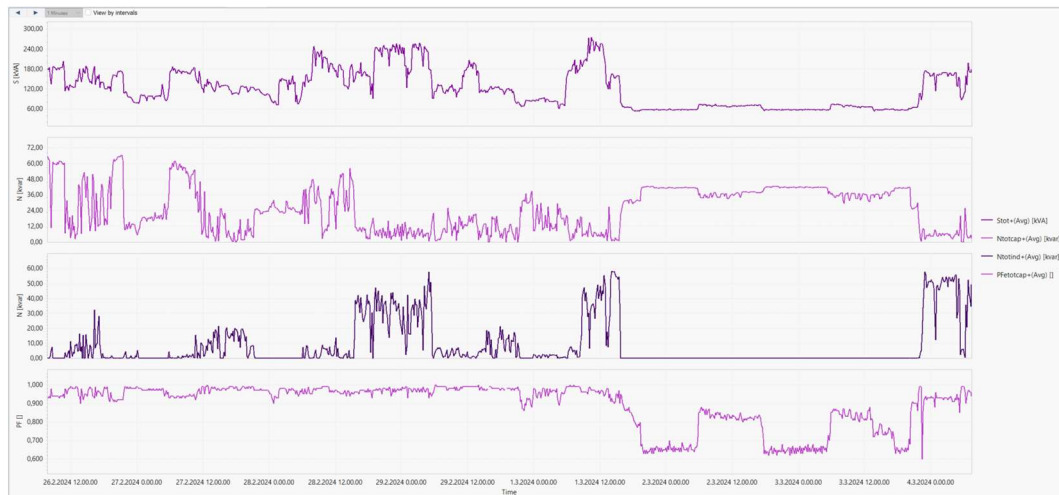
Mittausjakson aikana loisteho vaihtelee sekä induktiivisella että kapasitiivisellä puolella. Kuormituksen muuttuessa näkyy selkeitä piikkejä, mutta tehokerroin pysyy hyvällä tasolla, kuten taulukosta 11 voidaan todeta. Huomio kiinnittyy mittausjakson alussa ja lopussa tapahtuviin ylikompensointitilanteisiin. Kuten kuvasta 36 huomataan, tehokerroin laskee selvästi, ja keskuksessa on noin 40 kVAR verran ylikompensointia. Keskukseseen suoritettiin useampi mittaus, joten tutkin toista mittausta, jossa mittari oli ollut viikonlopun yli tallentamassa. Mittausdatasta käy ilmi, että keskuksessa on koko viikonlopun ajan ollut noin 40 kVAR ylikompensointia ja tehokerroin on ollut huonoimmillaan 0,63. Kuvasta 37 nähdään kuinka perjantaina kuormituksen vähentyessä laskee tehokerroin huomattavasti kapasitiiviselle puolelle. Todennäköisin syy tälle on kontaktorin jumiutuminen estokelapariestossa, sillä paristot sisältävät 50 kVAR-portaita.



Kuva 36 PKB3-tehokuvaaja.

Taulukko 11 PKB3-tehojen min, max ja avg.

Quantity	Min	Max	Avg
Stot+(Avg) [kVA]	31,20	325,50	185,74
Ntotcap+(Avg) [kvar]	0,00	60,90	10,95
Ntotind+(Avg) [kvar]	0,00	79,20	27,41
PFetotcap+(Avg) []	0,26	1,00	0,96



Kuva 37 PKB3-tehokuvaaja vanha mittaus.

4.6 Estokelaparistojen kuntotarkastus


Kompensointilaitteistolle suoritettiin valmistajan ohjeiden mukainen vuosittainen määräaikaistarkastus. Määräaikaistarkastuksessa tarkastetaan johdinliitoksien, sulakkeiden ja kondensaattoreiden kunto sekä loistehon säätimen ja kontaktorien toiminta. Lisäksi laitteiston jäähdytys puhallin ja suodatin tulisi tarkistaa ja tarvittaessa vaihtaa.

Tarkastus suoritettiin jännitteisenä, joten johdinliitokset katsottiin silmämääräisesti. Lämpökameralla olisi myös mahdollista havaita mahdolliset löystyneet liitokset, mutta sellaista ei valitettavasti ollut käytössä. Puhaltimien suodattimet tarkistettiin ja putsattiin. Jokaisen kondensaattorin kunto mitattiin kuvassa 38 näkyvällä pihtiampeerimittarilla ohjaamalla manuaalisesti loistehon säätimestä jokainen porras yksitellen päälle. Mitatut virta-arvot kirjattiin tarkastuspöytäkirjaan, jossa niitä voitiin verrata nimellisvirtaan. Jos kompensointiportaan virta on valmistajan mukaan pudonnut $>10\%$, tulee sylinterikondensaattorit vaihtaa. Kontaktorien ja sulakkeiden kunto sekä loistehosäätimen toiminta testattiin samalla, kun portaita ohjattiin manuaalisesti päälle.




Kuva 38 Kondensaattoreiden mittaus pihtiampeerimittarilla.

Mittauksista käy ilmi, että keskuksessa PKA1 kondensaattoreiden kunto on heikentynyt usealla portaalla. Lisäksi osassa portaita on havaittavissa, että vaiheiden väliset virta erot ovat suuria. Kuten kuvan 39 tarkastuspöytäkirjasta nähdään, on vaiheiden välinen virtaero suuri portaassa 12.1. Portailta 11 ja 11.1 ovat vaiheen L2 kondensaattorit hajonneet kokonaan. Kapasitanssiarvojen heikentyessä syntyy riski estokelapariston joutumisesta resonanssiin 5. yliaallon kanssa.

 K A A P E L I SÄHKÖLAITTEISTON HOITO- JA KUNNOSSAPITO-OHJELMA									
Muuntamo A		415 V / 50 Hz		-5/10%					
Kohde	Porras	Q _n /kVAr	I _n /A	I / L1	I / L2	I / L3	I / L1	I / L2	I / L3
PKA1-0503	1	25	34,8	25,7	27,2	27,5	74 %	78 %	79 %
PKA1-0406	2	25	34,8	24,1	24	23,6	69 %	69 %	68 %
	3	25	34,8	24,7	25,5	24,3	71 %	73 %	70 %
	4	25	34,8	0	0	0	0 %	0 %	0 %
	5	50	69,5	51,7	49,6	52,4	74 %	71 %	75 %
	6	50	69,5	54,9	56,2	55,8	79 %	81 %	80 %
	7	50	69,5	48,5	45,7	49,4	70 %	66 %	71 %
	8	50	69,5	51,6	50,2	52,7	74 %	72 %	76 %
	9	50	69,5	66	66,9	65,9	95 %	96 %	95 %
	10	50	69,5	0	0	0	0 %	0 %	0 %
	11	50	69,5	62,2	0	62,1	89 %	0 %	89 %
	11.1	50	69,5	59,5	0	59,6	86 %	0 %	86 %
	12	50	69,5	0	0	0	0 %	0 %	0 %
	12.1	50	69,5	57,7	31,8	58,2	83 %	46 %	84 %
PKA1-0212	5.1	50	69,5	66,8	65,8	67,5	96 %	95 %	97 %
	6.1	50	69,5	65,8	65,1	65,5	95 %	94 %	94 %
	7.1	50	69,5	67,1	65,5	65,9	97 %	94 %	95 %
	8.1	50	69,5	67,6	66,4	67,8	97 %	96 %	98 %
	9.1	50	69,5	67,7	65,5	66,8	97 %	94 %	96 %
	10.1	50	69,5	67,7	64,8	65,6	97 %	93 %	94 %
		900					72 %	61 %	72 %
							KA	68 %	
HUOM! Jos kapasitanssiarvo putoaa yli 40% estokelasta tulee 5. aallon suodatin >>>> mahdollisesti palaa									

Kuva 39 PKA1-kompensointilaitteiston tarkastuspöytäkirja.

Myös muuntamon B kompensointilaitteistoissa ovat kondensaattoreiden virta arvot laskeneet ja yksittäisiä portaita hajonnut. Molemmista keskuksista löytyy myös portaita, joilla esiintyy vaiheidenvälistä virtaeroa. Nämä käyvät ilmi, kun tarkastellaan kuvassa 40 näkyvää tarkastuspöytäkirjaa. Keskuksen PKB3 estoke-laparistosta löytyi portaasta 10 kiinni jumiutunut kontaktori. Kuten kuvassa 41 nähdään, kulki kontaktorin läpi virtaa, vaikka sen ei pitänyt olla päällä. Kontaktorin jumiutuminen aiheutti keskuksen ylikompensointitilanteen aina kuorman pudotessa. Keskuksessa vallitsi ylikompensointitilanne myös mittaushetkellä, kuten kuvan 42 loistehosäätimen näytöstä huomataan.

 K A A P E L I										
SAHKÖLAITTEISTON HOITO- JA KUNNOSSAPITO-OHJELMA										
Mittauspöytäkirja: 2.1.2024										
Mittaajat: Ville					Vikaraja (%)					
Loistehon kompensointiparistot					10					
Muuntamo B		415 V / 50 Hz			-5/10%			%		
Kohde	Porras	Q _n /kVAr	I _n /A	I / L1	I / L2	I / L3	I / L1	I / L2	I / L3	
PKB2-031	1	25	34,7	0	0	0	0 %	0 %	0 %	
	2	25	34,7	29,7	29,1	29,1	86 %	84 %	84 %	
	3	50	69,5	58,6	58,6	57,7	84 %	84 %	83 %	
	4	50	69,5	66,4	66,2	67,6	96 %	95 %	97 %	
	5	50	69,5	54,2	27,8	54,3	78 %	40 %	78 %	
	6	50	69,5	59,7	57,3	59,9	86 %	82 %	86 %	
	7	50	69,5	61,1	58,2	61,5	88 %	84 %	88 %	
PKB2-020	8	50	69,5	63,3	63,5	64,4	91 %	91 %	93 %	
	9	50	69,5	64,2	64,1	64,1	92 %	92 %	92 %	
	10	50	69,5	66,5	67,3	67,8	96 %	97 %	98 %	
	11	50	69,5	67,4	68,2	69,4	97 %	98 %	100 %	
	12	50	69,5	68,4	68,3	69,6	98 %	98 %	100 %	
12.1	50	69,5	67,6	67,6	67,8	97 %	97 %	98 %		
		600					84 %	80 %	84 %	
							KA	83 %		
Muuntamo B		415 V / 50 Hz			-5/10%			%		
Kohde	Porras	Q _n /kVAr	I _n /A	I / L1	I / L2	I / L3	I / L1	I / L2	I / L3	
PKB3-010	1	25	34,8	29,9	28,5	28,3	86 %	82 %	81 %	
	2	25	34,8	30,2	29,5	30,6	87 %	85 %	88 %	
	3	50	69,5	60,6	47	46,9	87 %	68 %	67 %	
	4	50	69,5	0	0	0	0 %	0 %	0 %	
	5	50	69,5	60,9	58,6	58,5	88 %	84 %	84 %	
	6	50	69,5	58,3	56,8	58,3	84 %	82 %	84 %	
	7	50	69,5	60,4	59	60,6	87 %	85 %	87 %	
PKB3-042	8	50	69,5	64,3	64,5	66,7	93 %	93 %	96 %	
	9	50	69,5	64,8	64	67,2	93 %	92 %	97 %	
	10	50	69,5	64,8	63,9	64,1	93 %	92 %	92 %	
	11									
	12									
		450					80 %	76 %	78 %	
							KA	78 %		

sulakkeet poistettu 7.2.2023

Kuva 40 PKB2- ja PKB3-kompensointilaitteiston tarkastuspöytäkirja.



Kuva 41 Viallinen PKB3-kontaktori



Kuva 42 PKB3-loistehosäätimen näyttö ylikompensointitilanteessa.

5 PARANNUSEHDOTUKSET

5.1 Sähkön laatu

Jännitteen laadussa ei yhdessäkään keskuksessa esiintynyt ongelmia. Kaikki mitatut jännitteen arvot olivat standardin EN-50160 sallimissa rajoissa ja jännitteen laatu oli suurimmaksi osaksi jopa hyvällä tasolla. Tämä ei kuitenkaan tarkoita, etteikö vastaisuudessa ongelmia voisi esiintyä. Sähkön laadun mittaus olisi hyvä lisätä huolto-ohjelmaan tehtäväksi esimerkiksi kolmen vuoden välein. Näin voitaisiin varmistua, että laatu vastaa sille asetettuja standardeja. Lisäksi tällöin on helpompi arvioida uusia laitehankintoja tehtäessä, millaiset verkkovaikutukset niillä mahdollisesti olisi.

Keskusten PKA1, PKB2 ja PKB3 virroissa esiintyi epäsymmetriaa. Keskuksen PKA1 osalta se todennäköisimmin johtuu kompensointilaitteiston rajusti huonontuneesta kunnosta, sillä virtojen epäsymmetriaa on havaittu vasta viime vuosina, eikä sähkölaitteistoon ole tehty muutoksia. Kompensointilaitteiston huollon jälkeen tulisi suorittaa uusi mittaus ja varmistaa autoivatko korjaustoimenpiteet. Jos epäsymmetriaa esiintyy edelleen, on siirryttävä tutkimaan alakeskuksia mahdollisen muun aiheuttajan paikallistamiseksi.

Keskuksissa PKB2 ja PKB3 on enemmän yksivaiheista kuormitusta, joka on selvästi painottunut vaiheelle L1. Kytettäessä uusia laitteita näihin keskuksiin tulisi huomioida tarkemmin, että kuormitus jakautuisi tasaisesti vaiheiden kesken. Jakeluverkon muuntajien ollessa Dyn-kytkettyjä, ei jännite-epäsymmetriaa pääse syntymään, vaikka vaiheita kuormitetaan epätasaisesti. Vaihevirtojen epäsymmetria kuitenkin aiheuttaa tällä hetkellä nollajohtimiin virtaa, jota siellä ei saisi esiintyä.

Virran harmonisten yliaaltojen tasot pysyvät keskuksissa maltillisilla tasoilla. Poikkeuksena on keskus PKB2, jossa nollavirrasta suurin osa koostuu kolmannen yliaallon aiheuttamasta virrasta. Virran määrä on kuitenkin niin pieni, että siihen

puuttuminen esimerkiksi kolmannen yliaallon suodattimella ei ole tällä hetkellä kustannustehokasta.

5.2 Kompensointilaitteisto

Suurimmat ongelmat verkossa liittyivät kompensointilaitteistoon. Jokaisesta keskuksista löytyi kondensaattoreita, joiden virta arvot olivat laskeneet vikarajan alle. Lisäksi estokelaparistoissa on jo aiemmin hajonneita ja käytöstä poistettuja portaita. Pahin tilanne on keskuksessa PKA1. Paristojen valmistaja suosittelee vaihtamaan sylinterikondensaattorit, joiden virta arvo on pudonnut alle vikarajan. Nämä kondensaattorit tulisi vaihtaa, jotta kompensointilaitteisto toimisi sille luvutulla tavalla. Keskuksen PKB3 estokelapariston portaan 10 kontaktori tulee myös uusiksi. Kontaktori on tällä hetkellä jumiutunut ja porras on poistettu käytöstä.

Korjaustoimenpiteiden jälkeen tulee loistehosäätimet resetoida. Säätimen resetointiin löytyy valmistajan manuaalista opastus. Jos pariston huollon jälkeen esiintyy ylikompensointia, on yksi mahdollisuus säätää loistehosäätimen asetusarvoa. Tälle ei kuitenkaan pitäisi olla tarvetta, sillä jakelumuuntajat tarvitsevat loistehoa ja pieni ylikompensointi pienjännite pääkeskuksissa ei pitäisi näkyä verkon liittymispisteessä.

Laitteistolle olisi myös syytä suorittaa vuotuinen lämpökuvaukset. Edellisestä huolto-ohjelmaan kuuluvasta kuvauksesta on kulunut vuosi. Lämpökuvauksella voidaan paikallistaa mahdolliset löystyneet johdinliitokset. Löystyneiden liitosten lämpötila voi kohota korkeaksi aiheuttaen eristeiden vaurioitumista ja pahimmassa tapauksessa tulipalon.

Aurinkovoimalan invertterin hyödyntämistä loistehon kompensoinnissa pitäisi tutkia enemmän. Mielestäni laitteiston koko potentiaali tulisi hyödyntää, kun kyseinen laitteisto on hankittu. Mikäli osa loistehon kompensoinnista pystyttäisiin korvaamaan invertterillä, voitaisiin säästää olemassa olevan kompensointilait-

teiston huoltokustannuksissa. Kondensaattorit ovat kuluvia osia ja vähentämällä niihin kohdistuvaa kuormitusta voidaan niiden elinikää pidentää. Tämä edellyttää kuitenkin sitä, että aurinkovoimalan käytöstä kompensoinnissa sovitaan laitteiston omistajan kanssa, eikä siitä aiheutuisi suuria lisäkustannuksia.

Kunnossapidon tarkastusohjeet kompensointilaitteistolle ovat pienen päivityksen tarpeessa. Ohjeeseen tulisi lisätä, että kondensaattorit mitataan niiden ollessa sekä kytkettyinä että kytkemättömänä. Tällä toimenpiteellä voidaan havaita mahdolliset vikaantuneet kontaktorit. Kontaktoreista on päällepäin mahdotonta sanoa ovatko ne kunnossa, sillä niissä ei ole indikaattoria, joka ilmaisee niiden asennon. Kompensointilaitteiston kunto tulisi myös tarkistaa paikan päällä tehtävillä mittauksilla, eikä vain tarkkailemalla sähkölaskun loistehon osuutta. Jos laitteistosta löytyy viallisia kondensaattoreita tai kontaktoreja, tulisi nämä mitä pikimmin vaihtaa uusiin. Laitteiston kuntoa ei tulisi päästää heikkenemään, niin kuin nyt on käynyt.

5.3 Jakeluverkko

Kojeisto B1 on vanha ja sen uusiminen alkaa olla lähivuosina ajankohtaista. Syöttökaapeli on uusittu 14 vuotta sitten, joten sen uudistaminen ei ole tarpeellista. Uudistettaessa kojeisto B1 olisi hyvä muuttaa johtolähdöt keskijännitesulakkeista katkaisijalähdöiksi.

Muuntamon B sähkötilan kaikki pienjännitekeskukset olisivat myös uudistuksen tarpeessa. Uudet keskukset tulisi varustaa pienjännitekatkaisijoilla ja kytkinvarokkeilla. PKB1 ja PKB2 voitaisiin tällöin yhdistää yhdeksi uudeksi keskuksiksi, jolloin sähkötila ei olisi niin ahdas. Näin päästäisiin eroon vanhoista uuninluukkuvarokekytkimistä ja saataisiin uusien standardien mukaiset varokekytkimet. Keskukset voitaisiin tällöin myös tehdä jännitteettömäksi pienjännitepuolelta huoltotöiden ajaksi. Tällä hetkellä keskuksissa ei ole tätä mahdollisuutta, vaan katkaisu on tehtävä keskijännitepuolelta.

Pääkeskukset PKB1 ja PKB2 sisältävät tällä hetkellä useita pieniä johtolähtöjä. Näistä päästäisiin eroon lisäämällä uusi nousukeskus halliin 1. Uudesta pääkeskuksesta varattaisiin yksi suurempi kytkinvaroke lähtö nousukeskukselle ja pienet lähdöt siirrettäisiin tehdashalliin. Tällöin laitteiden huollettavuus ja käytettävyys myös helpottuisi. Sähkötilasta on halliin valmiina oleva johtotie, joten muutoksen pitäisi onnistua pienellä työllä.

Sähkölaitteiston ennakkohuolto-ohjelma vaikuttaa muuten hyvältä, mutta tähän voitaisiin lisätä sähkön laadun mittaus kolmen vuoden välein. Noudatettaessa suunnitelman mukaista huolto-ohjelmaa, pitäisi laitteiston läpäistä syksyllä suoritettava määräaikaistarkastus. Alla on listattuna laitteiston huolto-ohjelman sisältöä, josta kaikki suoritetaan 2024 kesän aikana, lukuun ottamatta katkaisija ja erotinhuoltoa, joka on seuraavan kerran vuonna 2026.

- Määräaikaistarkastus 10 vuoden välein
- Katkaisija ja erotin huolto 5 vuoden välein
- Pääkeskus huolto vuosittain
- Muuntajien puhdistus ja tarkistus vuosittain
- Muuntajien öljyanalyysit 3 vuoden välein
- Lämpökuvaus vuosittain
- Kompensoinnin tarkistus vuosittain
- Maadoitusmittaukset 6 vuoden välein

6 YHTEENVETO

Opinnäytetyö tarkoituksena oli tutkia Reka Kaapeli Oy:n Keuruulla sijaitsevan kaapelitehtaan sähkön laatua ja kompensointilaitteiston kuntoa. Sähkön laadussa ei löytynyt juuri moitittavaa jännitteen eikä virtojen osalta. Kompensointilaitteisto sen sijaan paljastui olevan huollon tarpeessa. Sähkö laatua olisi kuitenkin syytä tarkkailla tasaisin väliajoin, jotta osataan jatkossa reagoida ajoissa mahdolliseen laadun heikkenemiseen.

Mittaukset onnistuivat pääosin hyvin. Tehtaalla kulutus on hyvin vaihtelevaa ja hyvien mittaussajankohtien löytäminen oli välillä haasteellista. Mittauksille oli kuitenkin työssä varattu hyvin aikaa, joten lopulta tästä ei aiheutunut ylimääräistä kiirettä. Onnistuimme saamaan hyviä mittaustuloksia, joista voitiin analysoida pienjännitekeskusten tilaa. Harmittavasti emme onnistuneet mittaamaan verkkoa liittymispisteestä, sillä kojeisto, jossa mittamuuntajat sijaitsevat, on verkkoyhtiön sinetöimä.

Powerview-ohjelmassa esiintyi myös ongelmia, joita yritin selvittää maahan-tuojan kanssa. Ongelmaksi muodostui virtojen harmoniset yliaallot, jotka skaalautuivat tietokoneella kolminkertaisiksi. Tämä kävi ilmi vertailllessani tuloksia mittalaitteen näytöltä ja tietokoneelta. Syytä tälle ei saatu selville edes maahan-tuojan avulla. Näinpä jouduin pyörittelemään ja skaalaamaan tulokset Exelissä. Silloin ne vastasivat mittalaitteesta näkyviä lukemia.

Lopuksi haluan vielä kiittää Reka Kaapeli Oy:n Keuruun tehtaan henkilökuntaa mahdollisuudesta tehdä opinnäytetyö. Olen työn aikana saanut paljon arvokasta kokemusta ja päässyt oppimaan uutta. Sain hyvän mahdollisuuden päästä hyödyntämään koulutuksessa saamaa osaamistani käytännön läheisessä työssä.

LÄHDELUETTELO

- [1] S. ry, SFS-EN-50160:2022, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, 2022.
- [2] "TTT-käsikirja Luku 4: Sähkön laatu," 2000.
- [3] M. Lehtonen, "Sähköenergiatekniikka Luento 13 Sähkön laatu," [Online]. Available:
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/879452/mod_resource/content/1/Luento%20luku%2013%20%5BCompatibility%20Mode%5D.pdf.
- [4] J. Uusimäki ja J. Lavi, "ST 52.16 YLIAALTOSUODATINLAITTEET JA NIIDEN SIIJOITUS ALLE 1000 V:N PIENJÄNNITEVERKOSSA," Sähkötieto ry, 2014.
- [5] K. Jokinen, Tehoelektroniikka, VAMK / VY.
- [6] K. Jokinen, Teollisuuden ja voimalaitoksen sähköjärjestelmät.
- [7] L. Korpinen, M. Mikkola, T. Keikko ja E. Falck, "YLIAALTO-OPUS," [Online]. Available: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>.
- [8] K. Jokinen, Moottorikäyttöjen säätö, Vaasan Ammattikorkeakoulu.
- [9] V. Verkkonen, SÄHKÖMOOTTORIKÄYTÖT 2 EPÄTAHTIKONEET, VAMK, 2017.
- [10] S. Adhigunarto, E. Mulyana ja W. Surya, "The Analysis of Harmonics on LED Lamps," Department of Electrical Engineering Education, Universitas Pendidikan Indonesia, 2017. [Online]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/384/1/012061>.

- [11] T. Tähti, "LED-VALAISTUKSEN VAIKUTUKSET KIINTEISTÖN SÄHKÖVERKOSSA," LUT School of Energy Systems, 2 3 2020. [Online]. Available:
https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/160722/Kandidaatintyo%CC%88_Ta%CC%88hti_Tuukka.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [12] "TTT-käsikirja Luku 9: Loistetehon kompensointi ja yliaaltosuojaus," 2000.
- [13] J. Viitala, "ST 97.21 SÄHKÖJÄRJESTELMIEN KUNTOTUTKIMUS. SÄHKÖN LAADUN ARVIOINTI JA MITTAAMINEN," Sähkötieto ry, 2006.
- [14] J. Uusimäki ja J. Lavi, "ST 52.15 LOISTEHON KOMPENSOINTI JA KOMPENSOINTILAITTEET ALLE 1000 V:N PIENJÄNNITEVERKOSSA," Sähkötieto ry, 2016.
- [15] "Loistehon kompensointijärjestelmät Norelco NACB," Norelco Oy, [Online]. Available:
https://www.norelco.fi/files/2022/February/NACB_esite.pdf.
- [16] "Pienjännitetuotteiden tuote-opas," Nokian Capacitors Oy, [Online]. Available: <https://sahkonumerot.fi/5704770/doc/brochure/>.

LIITTEET

Metrel MI-2592 PowerQ4

energia-analysointilaitte kolmivaiheverkon analysointiin

Uutuus:
kanavainen malli
4-



Paikallista sähkönlaatuun liittyvät ongelmat nopeasti ja tarkasti

Mittaa virtaa ja jännitettä kolmesta vaiheesta sekä nollajohtimesta samanaikaisesti

Metrel MI-2592 on kädessä pidettävä ja helppokäyttöinen energia-analysointilaitte kolmivaiheverkon analysointiin, moni torointiin sekä vianhakuun. MI-2592:n neljä kanavaa mittaa samanaikaisesti virtaa ja jännitettä, joka tekee siitä entistä nopeamman ja luotettavamman työkalun verkon ongelmien selvittämiseen. MI-2592:n monipuoliset ja helppokäyttöiset toiminnot, yhdistettynä uuteen PowerView-ohjelmistoon, tarjoaa käyttäjälleen helpon tavan tulostaa, analysoida ja tallentaa mittaustuloksia. MI-2592 on ensimmäinen kädessä pidettävä analysointilaitte, joka on IEC 61000-4-30 luokka S ja IEC 61557-12 standardin mukainen.

Ominaisuuksia:

- 4 jännitekanavaa, 0...1000 Vrms (Cat III 1000V)
- 4 virtakanavaa, automaattisella pihdintunnistuksella
- Reaaliaikaiset mittaukset (U, I, P, Q, S, PF, cosφ, THD)
- EN50160-mittaus sekä välkyntä
- 4-kvadranttimitaus (generaattorit ja kuormat, kapasitiivinen tai induktiivinen)
- Yhteensä 509 erilaista parametria voidaan analysoida tai tallentaa samanaikaisesti
- 8 MB muisti mahdollistaa yli 4 viikon yhtäjaksoisen mittauksen
- PowerQ4 on IEC 61000-4-30 luokka S, sähkönlaadun standardin mukainen
- Tehomittaukset on IEC 61557-12 ja IEEE 1448 mukaiset
- Suuri ja selkeä 320x200 pisteen LCD-näyttö
- Reaaliaikaiset Scope-, Trend-mittaustoiminnot
- Taipuisat virtapihdit, jotka toimivat ilman ulkoista jännitelähdettä
- 8-kanavan 16-bittinen samanaikainen mittaus
- Jopa 15 tunnin toiminta-aika yhdellä latauksella
- Tehokas PowerView-ohjelmisto
- Jännite TRMS, huippuarvo ja CF (4 kanavaa)
- Virta TRMS, huippuarvo ja CF (4 kanavaa)
- Teho (pätöteho, näennäisteho ja loisteho)
- Tehokerroin, cosφ
- Välkyntämittaus
- Harmoonisten analysointi 50 harmooniseen asti, THD
- Energiamittaukset generaattorit ja kuormat, kapasitiivinen tai induktiivinen
- Sähkönlaadun analysointi EN50160
- Katkoksien, jännitealenemien kuoppien tallennus
- Käynnistysvirtojen tarkkailu ja tallennus
- Tallennus (10 aseteltavaa hälytystä)
- Aaltomuodon näyttö

Teknisiä tietoja:

AC-jännite

Sisääntulokanavat:	4 kpl
Jännitealue:	5 ... 1500 Vrms L – N (20 ... 2600 Vrms L – L)
Tarkkuus:	0,2 % lukemasta
Resoluutio:	10 mV, 100 mV
Näytteenottotaajuus:	1024 kpl / 10 sek
Taajuusalue:	10 ... 70 Hz

AC-virta

Sisääntulokanavat:	4 kpl
Sisääntulojännite:	20,0 mVrms ... 2 Vrms
Mittausvirta:	3...6000 A (pihdit A1227)
Resoluutio:	0,1 mV (0,1 A pihdit A1227)
Tarkkuus:	0,25 % lukemasta
Näytteenottotaajuus:	1024 kpl / 10 periodi

Toiminnot	Mittausalue	Resoluutio	Tarkkuus
Taajuus:	10,00...70,00 Hz	2 mHz	±10 mHz
Teho	0,000k...9,999 M	4 dig	±0,5 % lukemasta
Tehokerroin	-1,00...1,00	0,01	±0,02 %
cosφ	0,00...1,00	0,01	±0,02 %
	Uhn < 3 % Unom	10 mV	±0,15 % Unom
	3 % U4nom		
Harmooniset	< Uhn < 20 % Unom	10 mV	5% Uhn
50 asti	lhn < 10 % IN	10 mV	±0,15 % IN
	10 % IN < lhN		
	< 100 % IN	10 mV	5% InN
	0 % Unom < THDU		
	< 20 %Unom	0,1 %	±0,3
	0 % IN < THDI		
THD	< 100 % IN	0,1 %	±0,6
	100 % IN < THDI		
	< 200 % IN	0,1 %	±1,5

Jännitteenalenema

Suuruus	20...1500 V
	10 mV, 100 mV 0,5 % lukemasta
Kesto	30 ms...168 h ; 1 ms ; ±20% ms

Tallennus

Intg.periodi	1 ... 3600 s
Maks. parametrit	509
Portit	USB, RS232
Näyttö	LCD, 320x200
Muistimoduuli	8 MB flash
Käyttöjännite	230 VAC tai 6x1,2 V akkuparisto
Ylijännite	1000 V CAT III, 600 V CAT IV
Suojaus	Kaksoiseristys
Koko / paino	220x115x90 mm / 0,65 kg

Peruspaketti



- Power Q4 -mittalaite
- 1-vaihe taipuisat virtapihdit 3 kA, 300 A 30 A 4 kpl (A1227)
- Mittapää punainen 3 kpl
- Mittapää musta 1 kpl
- Krokotiili punainen 3 kpl
- Krokotiili musta 1 kpl
- Mittajohdin musta 1 kpl
- Mittajohdin vihreä 1 kpl
- Mittajohdin punainen 3 kpl
- PC-ohjelmisto PowerView
- Muuntaja
- 1,2 V NiMH akkuparistot 6 kpl
- Kantolaukku
- Instruction manual
- Kalibraatiotodistus

Lisätarvikkeet



EN 50160 Report

Company

Name	Ville Ala-Herttuala
Company	Vaasan ammattikorkeakoulu
Address	Wolffintie 30, 65200 Vaasa
Phone	
Email	



Client

Name	
Company	Reka Kaapeli Oy
Address	Sepänkuja, 42700 Keuruu
Phone	
Email	



Measurement

Objective	PKA1
Site description	Muuntamo A
Start time	15.3.2024 23.59.59,869
Stop time	22.3.2024 23.59.59,814
Duration	6 d 23 h 59 min 59 s 945 ms Time period is less than a week
Interval	10 minutes

Connection	Three phase four wire
Nominal voltage	230,00 V
Nominal frequency	50,00 Hz
System type	Systems with synchronous connection
Effective measurement period	100,00 %
EN 50160 Limits	LV
Operating conditions	Normal

Instrument

Instrument name	METREL MI2592 Fw11.0.869
Instrument model	MI2592
Manufacturer	METREL
Serial Number	13140612
Firmware version	11.0.869
Operator name	OMISTAJA
Current clamps	Smart (1x3kA), range 100%Smart (1x3kA), range 100%
Additional equipment	

Additional Information

** for informational purposes only and not related to EN 50160 standard*

Swells			
	L1	L2	L3
Count	0	0	0
Max. Value [V]	N/A	N/A	N/A
Max. Duration	N/A	N/A	N/A

Dips

	L1	L2	L3
Count	1	1	1
Min. Value [V]	202,30	200,20	204,60
Max. Duration	291 ms	321 ms	271 ms

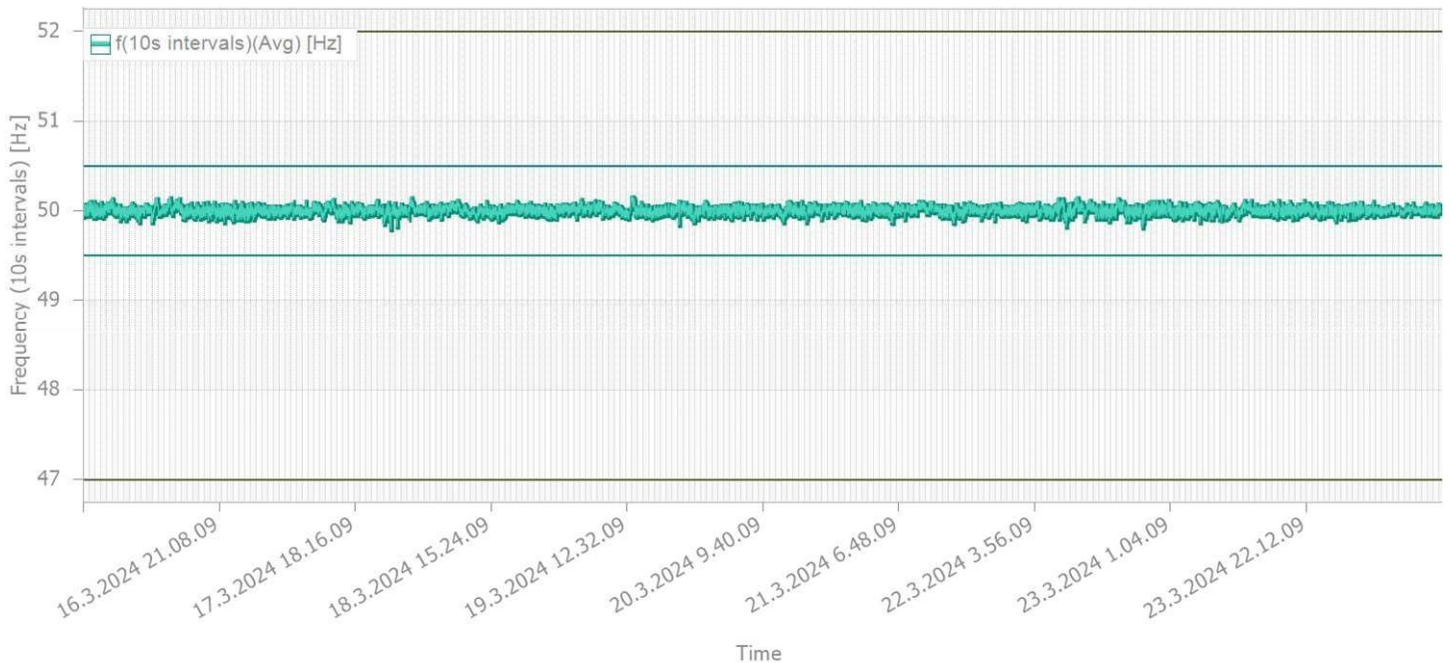
EN50160 Compliance summary

Power frequency	Passed
Supply Voltage Variations	Passed
Flicker Severity	Passed
Voltage Unbalance	Passed
Harmonic Voltages	Passed
Interharmonic Voltages	Measured
Signalling	Not Measured
Dips	1
Interruptions	0
Swells	0

Power frequency

Nominal frequency	50,00 Hz
Measured quantity	Mean value of the fundamental frequency measured over 10 seconds (f_{10s})
Criteria	Systems with synchronous connection
EN 50160 standard	Section 4.2.1

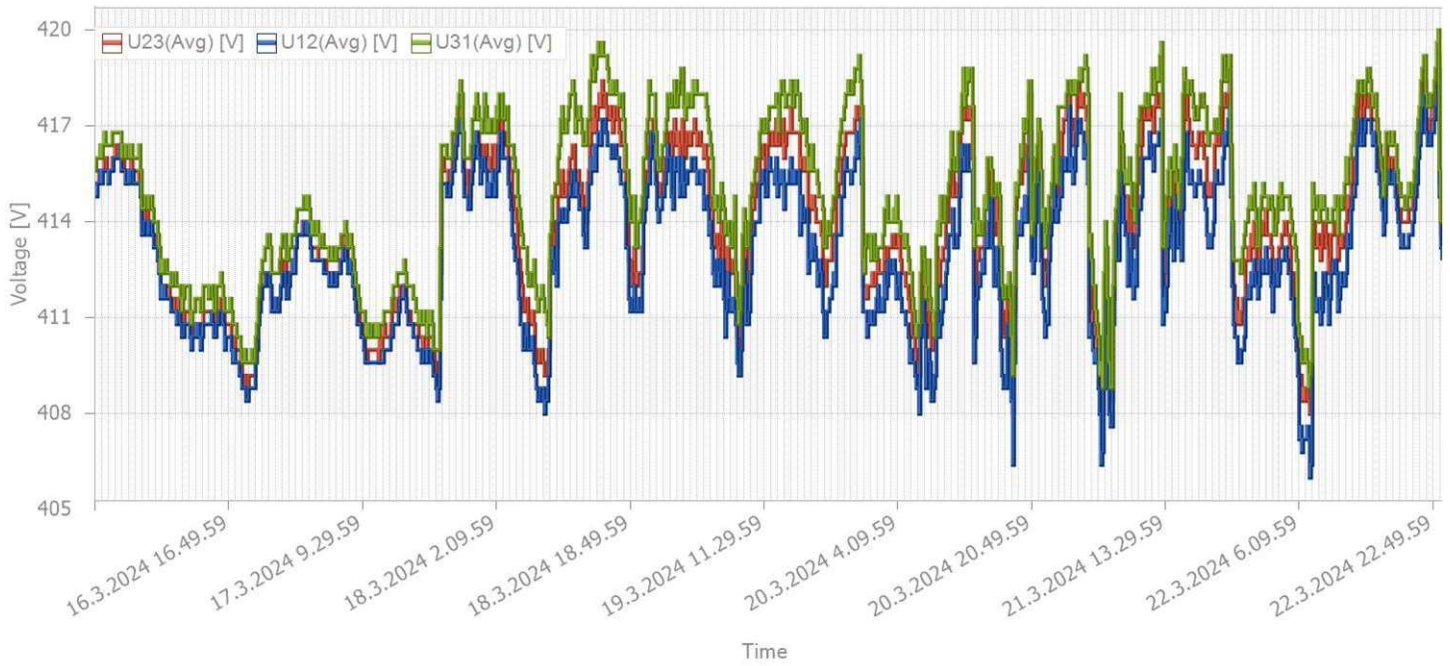
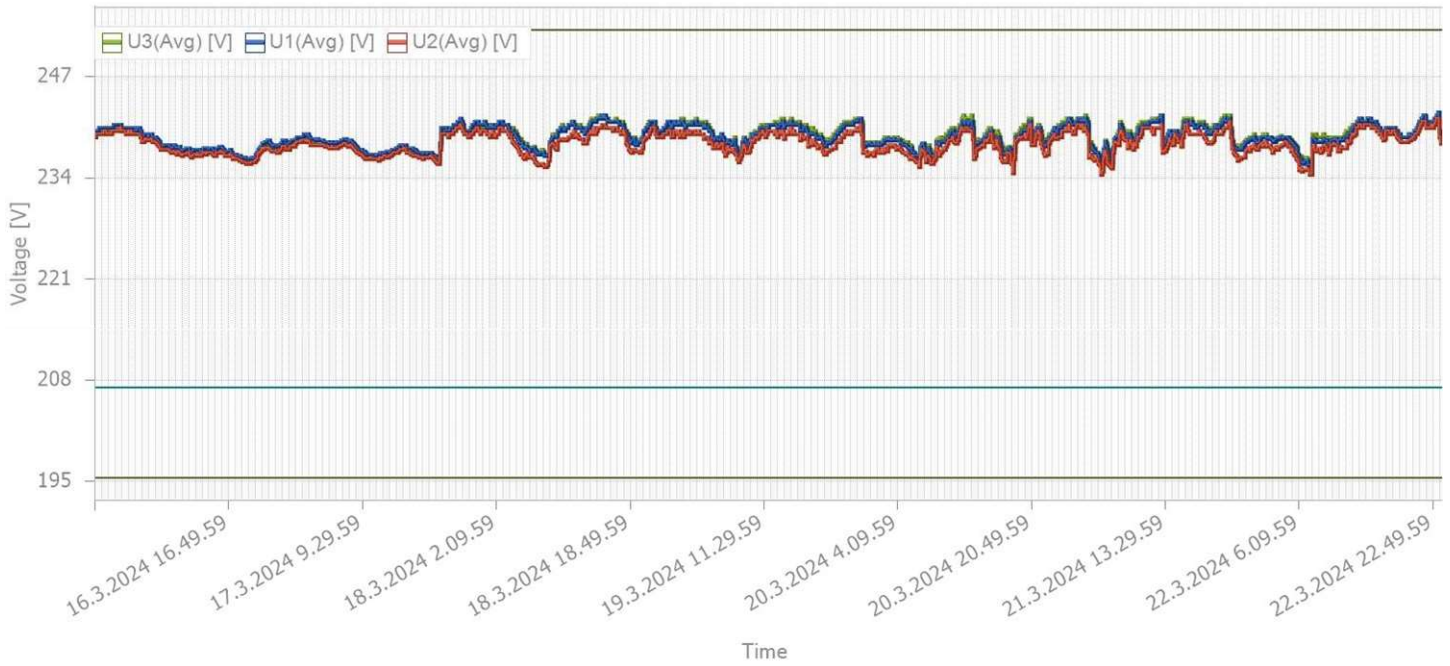
Requirements		Measured	Status
49,50 – 50,50 Hz	99,50 % of interval (week)	49,87 – 50,12 Hz	Passed
47,00 – 52,00 Hz	100,00 % of interval (week)	49,78 – 50,15 Hz	Passed



Supply Voltage Variations

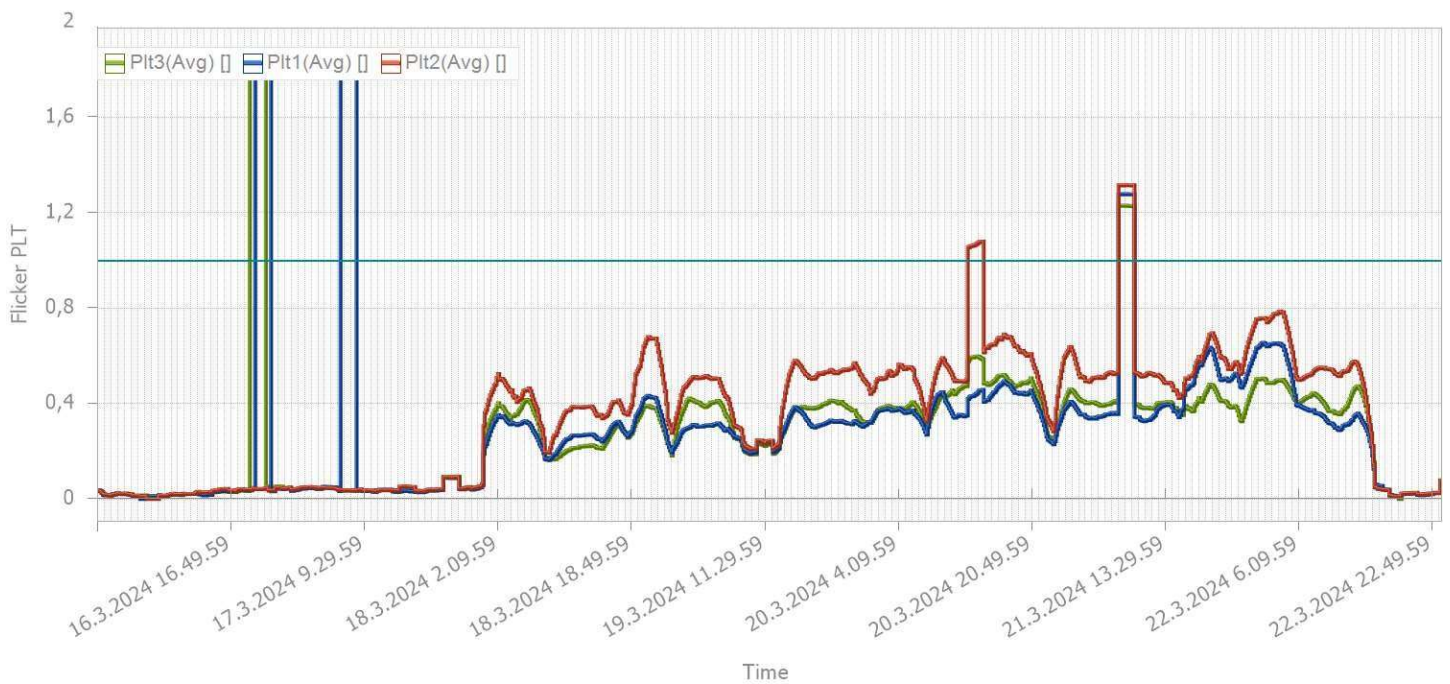
Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	10 minutes mean RMS value U_{rms}
Criteria	Systems with synchronous connection

EN 50160 standard	Section 4.2.2		
Requirements		Measured	Status
207,00 – 253,00 V	95,00 % of interval (week)	234,40 – 241,60 V	Passed
195,50 – 253,00 V	100,00 % of interval (week)	232,93 – 242,40 V	Passed



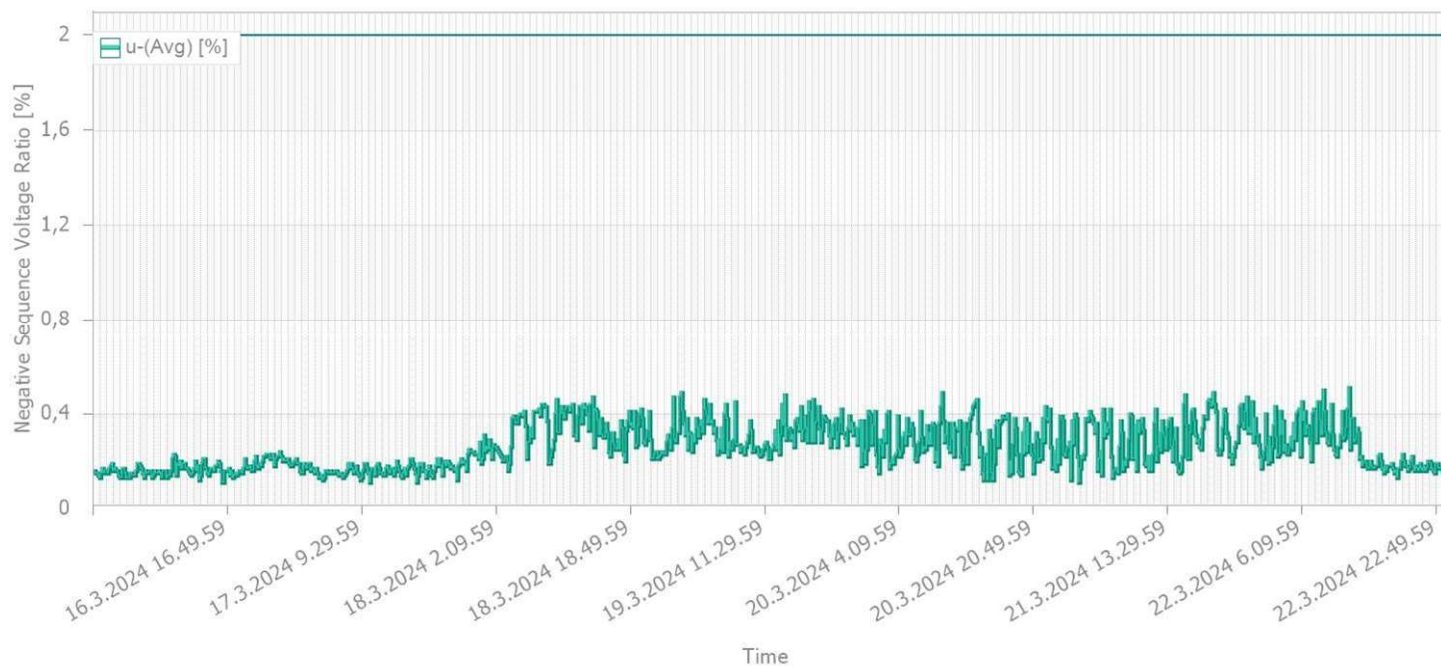
Flicker Severity

Measured quantity	Long term flicker severity (P_{lt})		
EN 50160 standard	Section 4.2.3.2		
Operating conditions	Normal		
Requirements		Measured	Status
$P_{lt} < 1$	95,00 % of interval (week)	0,00 – 0,70	Passed



Voltage Unbalance

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the negative sequence ratio u_-		
EN 50160 standard	Section 4.2.4		
Operating conditions	Normal		
Requirements		Measured	Status
$u_- < 2,00 \%$	95,00 % of interval (week)	0,11 – 0,43 %	Passed



Harmonics voltage

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the harmonic and total harmonic distortion
EN 50160 standard	Section 4.2.5
Operating conditions	Normal

		L1		L2		L3	
Harmonic	Requirement	Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
THD	< 8,00 %	2,40 %	Passed	2,60 %	Passed	2,40 %	Passed
2	< 2,00 %	0,30 %	Passed	0,20 %	Passed	0,20 %	Passed
3	< 5,00 %	0,20 %	Passed	0,30 %	Passed	0,20 %	Passed
4	< 1,00 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
5	< 6,00 %	1,70 %	Passed	1,90 %	Passed	1,70 %	Passed
6	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
7	< 5,00 %	1,50 %	Passed	1,50 %	Passed	1,50 %	Passed
8	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed

9	< 1,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
10	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed
11	< 3,50 %	0,70 %	Passed	0,80 %	Passed	0,70 %	Passed
12	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
13	< 3,00 %	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed
14	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
15	< 1,00 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed
16	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
17	< 2,00 %	0,60 %	Passed	0,70 %	Passed	0,60 %	Passed
18	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
19	< 1,50 %	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed
20	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
21	< 0,75 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed
22	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
23	< 1,50 %	0,40 %	Passed	0,50 %	Passed	0,40 %	Passed
24	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
25	< 1,50 %	0,20 %	Passed	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed

Interruptions

Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of interrupts within predefined duration ranges
Measurement method	Voltage interruption begins when the Urms voltages of all channels fall below the voltage interruption threshold and ends when the Urms voltage on any one channel is equal to, or greater than, the voltage interruption threshold plus the hysteresis.
Interrupt threshold	5,00 % of nominal voltage
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage

Operating conditions	Normal	
EN 50160 standard	Section 4.3.1	
Residual voltage (% of nominal)	Duration	
	$t \leq 3 \text{ min}$	$t > 3 \text{ min}$
$U < 5,00$	0	0

Dips

Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of dips within predefined voltage and duration ranges
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$. Dip begins when the voltage of one or more channels is below the dip threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or above the dip threshold plus the hysteresis voltage.
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage
Operating conditions	Normal
EN 50160 standard	Section 4.3.2.4

Residual voltage (% of nominal)	Duration (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\ 000$	$1\ 000 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$90 > U \geq 80$	0	1	0	0	0
$80 > U \geq 70$	0	0	0	0	0
$70 > U \geq 40$	0	0	0	0	0
$40 > U \geq 5$	0	0	0	0	0
$U < 5$	0	0	0	0	0

Swells

Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	Number of swells within predefined voltage and duration ranges		
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$ Swell begins when the voltage of one or more channels is above the swell threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or below the swell threshold minus the hysteresis voltage.		
Operating conditions	Normal		
EN 50160 standard	Section 4.3.2.6		
Swell voltage (% of nominal)	Duration (ms)		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\,000$	$5\,000 < t \leq 60\,000$
$120 > U > 110$	0	0	0
$U \geq 120$	0	0	0

EN 50160 Report

Company

Name	Ville Ala-Herttuala
Company	Vaasan ammattikorkeakoulu
Address	Wolffintie 30, 65200 Vaasa
Phone	
Email	



Client

Name	
Company	Reka Kaapeli Oy
Address	Sepänkuja, 42700 Keuruu
Phone	
Email	



Measurement

Objective	PKB1
Site description	Muuntamo B
Start time	19.11.2023 23.50.59,854
Stop time	26.11.2023 16.25.03,730
Duration	6 d 16 h 34 min 3 s 876 ms Time period is less than a week
Interval	10 minutes

Connection	Three phase four wire
Nominal voltage	230,00 V
Nominal frequency	50,00 Hz
System type	Systems with synchronous connection
Effective measurement period	100,00 %
EN 50160 Limits	LV
Operating conditions	Normal

Instrument

Instrument name	METREL MI2592 Fw11.0.869
Instrument model	MI2592
Manufacturer	METREL
Serial Number	13140612
Firmware version	11.0.869
Operator name	OMISTAJA
Current clamps	A1122 (1500/5A), range 100%A1122 (1500/5A), range 100%
Additional equipment	

EN50160 Compliance summary

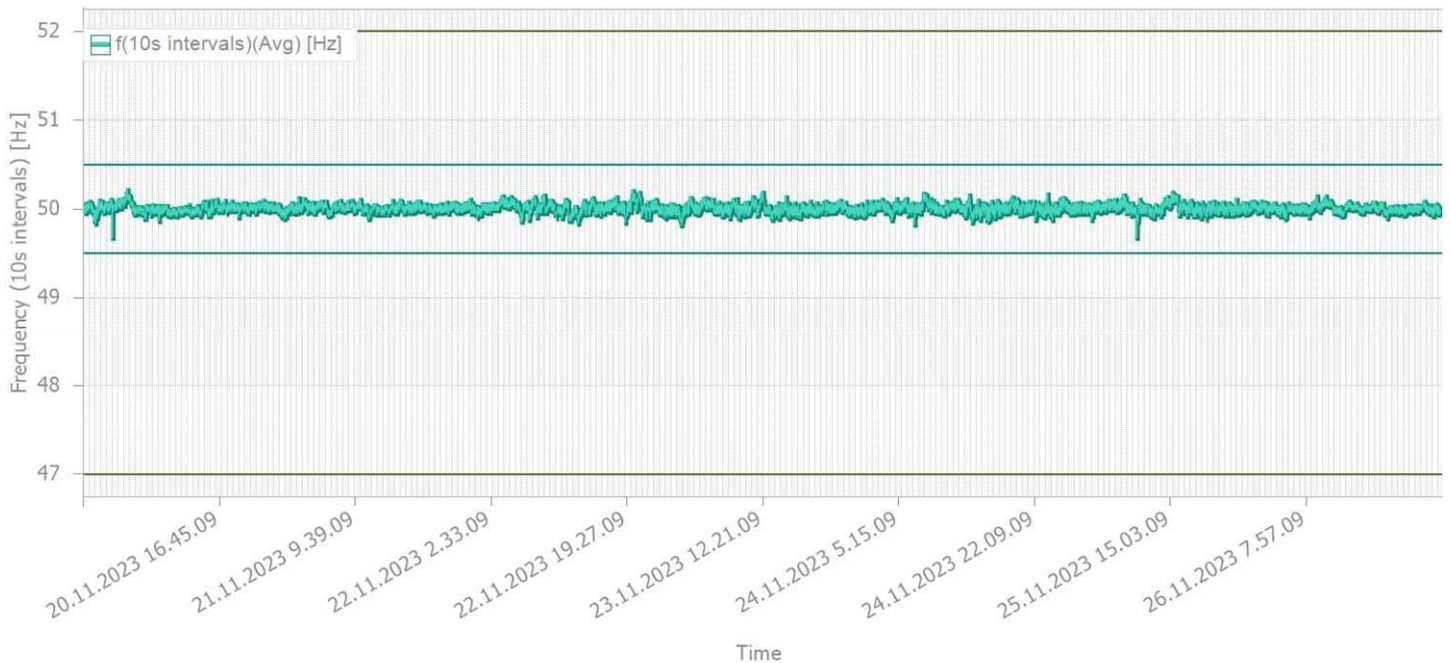
Power frequency	Passed
Supply Voltage Variations	Passed
Flicker Severity	Passed
Voltage Unbalance	Passed
Harmonic Voltages	Passed
Interharmonic Voltages	Measured
Signalling	Not Measured

Dips	0
Interruptions	0
Swells	0

Power frequency

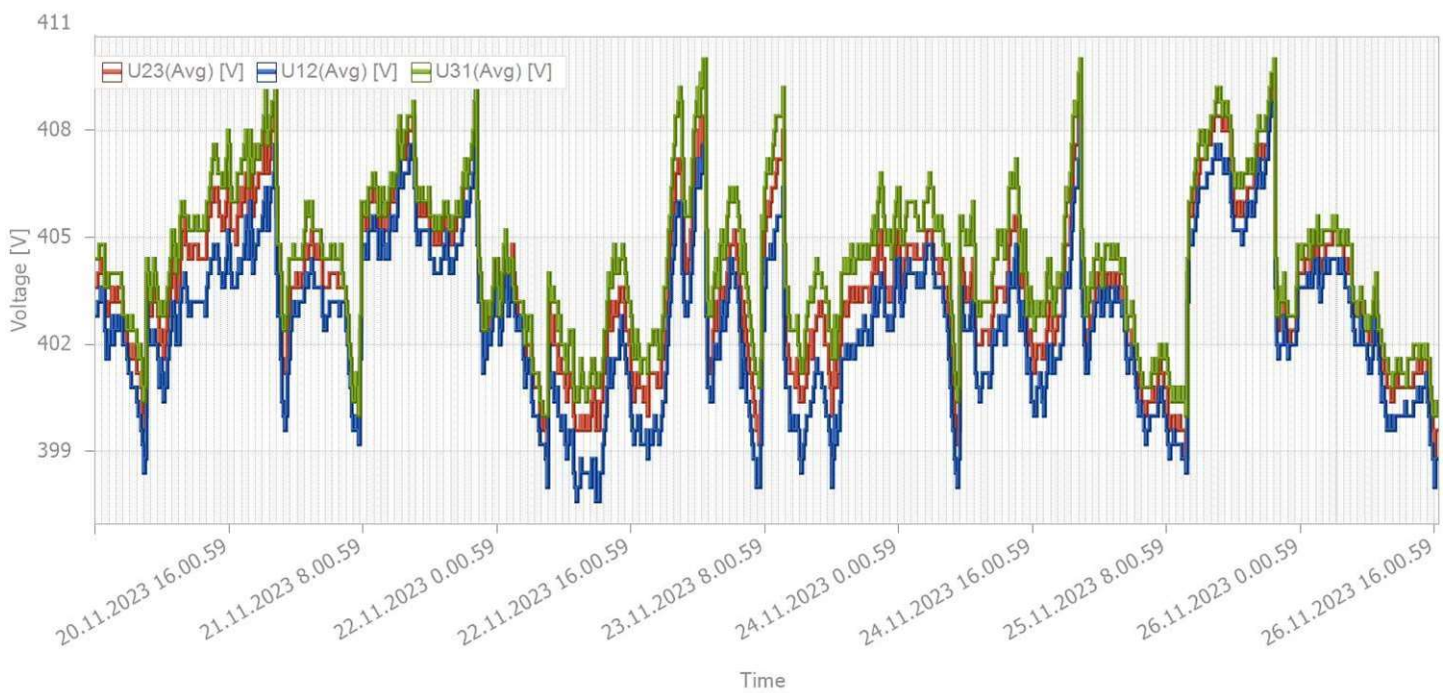
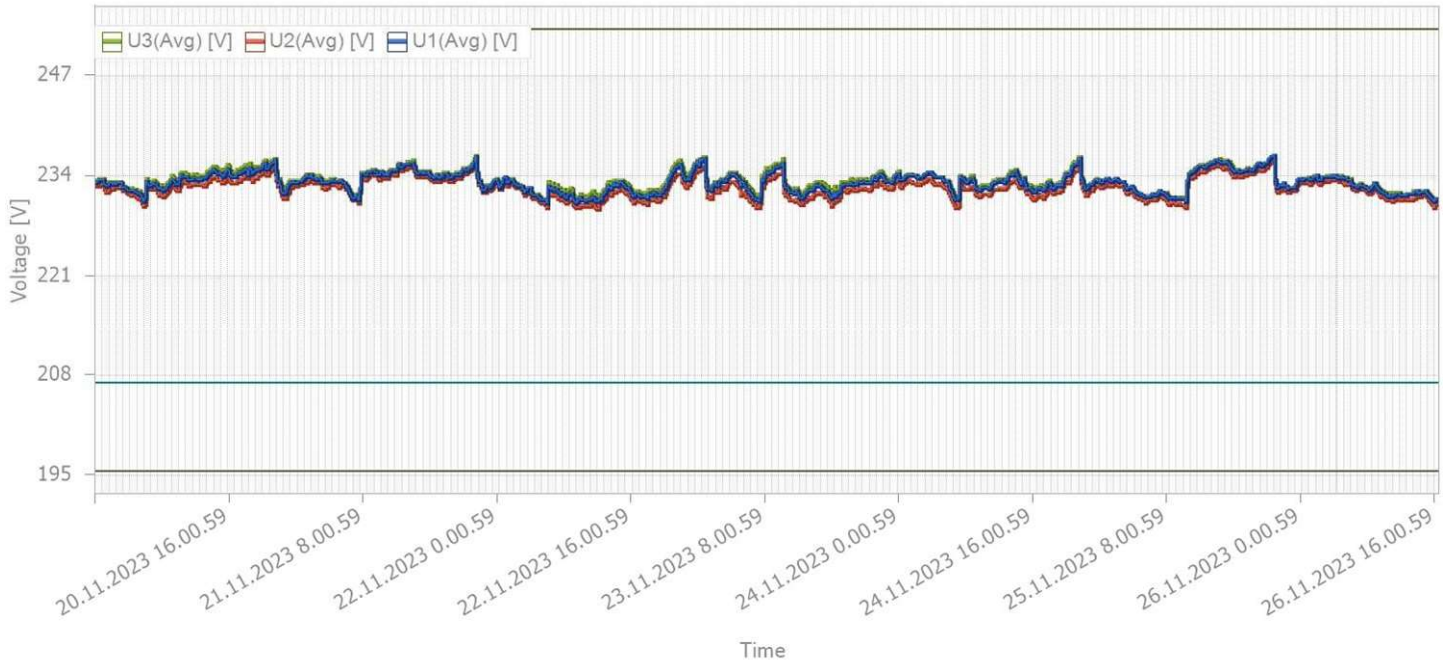
Nominal frequency	50,00 Hz
Measured quantity	Mean value of the fundamental frequency measured over 10 seconds (f_{10s})
Criteria	Systems with synchronous connection
EN 50160 standard	Section 4.2.1

Requirements		Measured	Status
49,50 – 50,50 Hz	99,50 % of interval (week)	49,85 – 50,15 Hz	Passed
47,00 – 52,00 Hz	100,00 % of interval (week)	49,66 – 50,21 Hz	Passed



Supply Voltage Variations

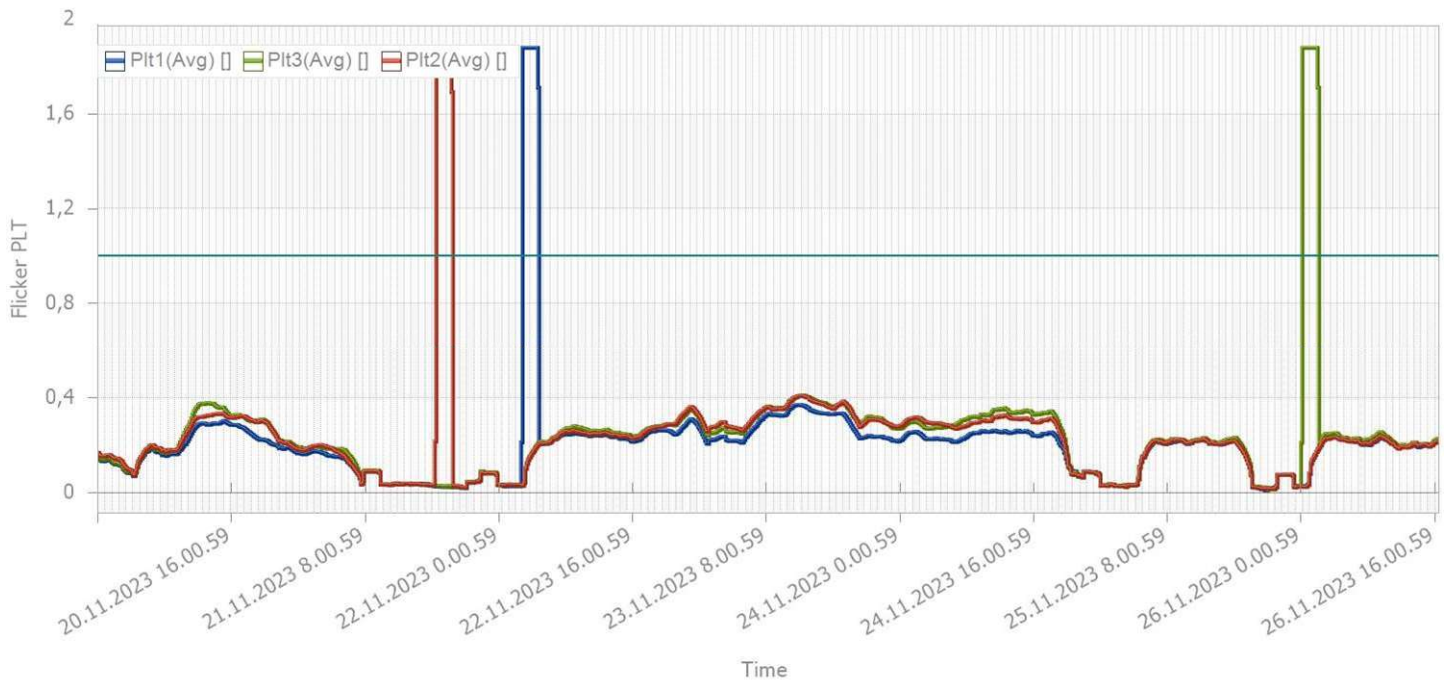
Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	10 minutes mean RMS value Urms		
Criteria	Systems with synchronous connection		
EN 50160 standard	Section 4.2.2		
Requirements		Measured	Status
207,00 – 253,00 V	95,00 % of interval (week)	229,60 – 235,60 V	Passed
195,50 – 253,00 V	100,00 % of interval (week)	229,60 – 236,60 V	Passed



Flicker Severity

Measured quantity	Long term flicker severity (P_{lt})
EN 50160 standard	Section 4.2.3.2
Operating conditions	Normal

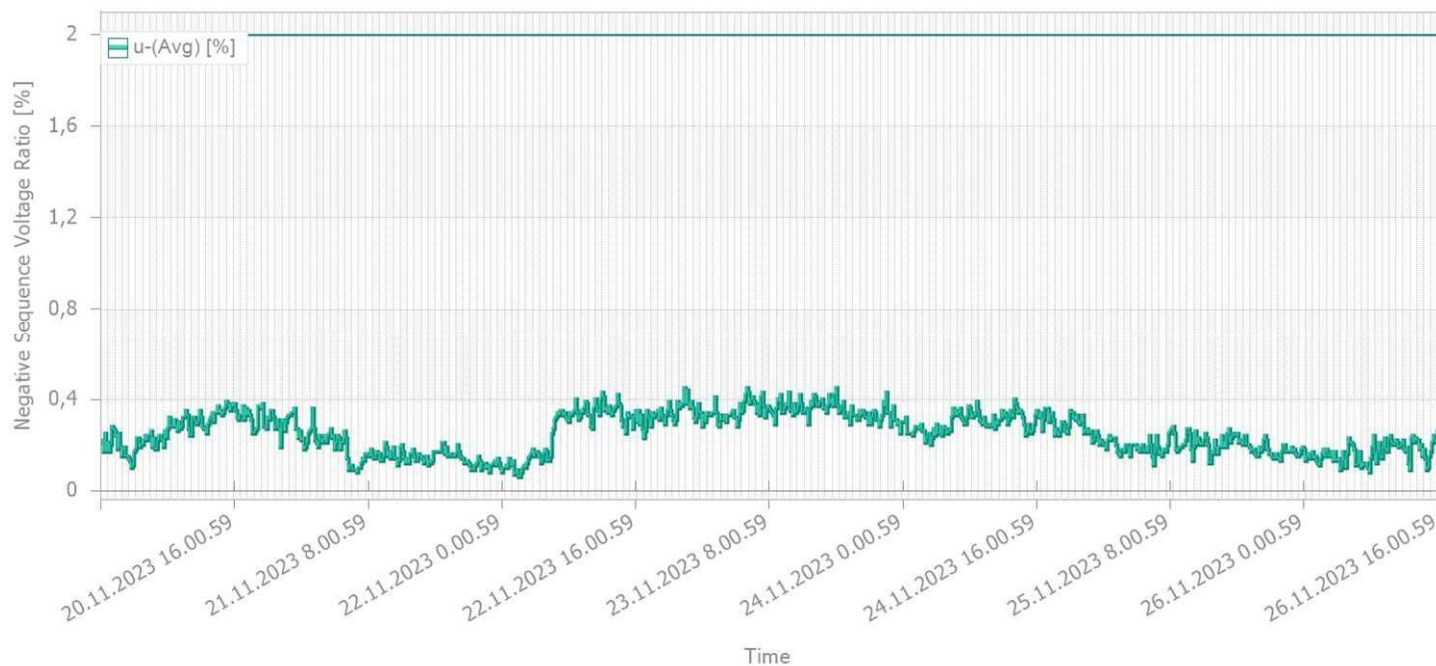
Requirements		Measured	Status
Plt < 1	95,00 % of interval (week)	0,01 – 0,37	Passed



Voltage Unbalance

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the negative sequence ratio u-
EN 50160 standard	Section 4.2.4
Operating conditions	Normal

Requirements		Measured	Status
$u_- < 2,00 \%$	95,00 % of interval (week)	0,06 – 0,38 %	Passed



Harmonics voltage

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the harmonic and total harmonic distortion
EN 50160 standard	Section 4.2.5
Operating conditions	Normal

		L1		L2		Residual voltage	
Harmonic	Requirement	Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
THD	< 8,00 %	2,80 %	Passed	2,90 %	Passed	2,80 %	Passed
2	< 2,00 %	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed	0,10 %	Passed
3	< 5,00 %	0,30 %	Passed	0,40 %	Passed	0,40 %	Passed
4	< 1,00 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
5	< 6,00 %	2,10 %	Passed	2,30 %	Passed	2,20 %	Passed
6	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
7	< 5,00 %	1,40 %	Passed	1,40 %	Passed	1,30 %	Passed
8	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed

9	< 1,50 %	0,20 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
10	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
11	< 3,50 %	0,80 %	Passed	0,80 %	Passed	0,80 %	Passed
12	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
13	< 3,00 %	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed
14	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
15	< 1,00 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed
16	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
17	< 2,00 %	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed
18	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
19	< 1,50 %	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed	0,40 %	Passed
20	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
21	< 0,75 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
22	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
23	< 1,50 %	0,70 %	Passed	0,70 %	Passed	0,60 %	Passed
24	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
25	< 1,50 %	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed	0,40 %	Passed

Interruptions

Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of interrupts within predefined duration ranges
Measurement method	Voltage interruption begins when the Urms voltages of all channels fall below the voltage interruption threshold and ends when the Urms voltage on any one channel is equal to, or greater than, the voltage interruption threshold plus the hysteresis.
Interrupt threshold	5,00 % of nominal voltage
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage

Operating conditions	Normal	
EN 50160 standard	Section 4.3.1	
Residual voltage (% of nominal)	Duration	
	$t \leq 3 \text{ min}$	Residual
$U < 5,00$	0	0

voltage

Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of dips within predefined voltage and duration ranges
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$. Dip begins when the voltage of one or more channels is below the dip threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or above the dip threshold plus the hysteresis voltage.
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage
Operating conditions	Normal
EN 50160 standard	Section 4.3.2.4

Residual voltage (% of nominal)	Duration (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\ 000$	$1\ 000 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$90 > U \geq 80$	0	0	0	0	0
$80 > U \geq 70$	0	0	0	0	0
$70 > U \geq 40$	0	0	0	0	0
$40 > U \geq 5$	0	0	0	0	0
$U < 5$	0	0	0	0	0

Swells

Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	Number of swells within predefined voltage and duration ranges		
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$ Swell begins when the voltage of one or more channels is above the swell threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or below the swell threshold minus the hysteresis voltage.		
Operating conditions	Normal		
EN 50160 standard	Section 4.3.2.6		
Swell voltage (% of nominal)	Duration (ms)		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\,000$	$5\,000 < t \leq 60\,000$
$120 > U > 110$	0	0	0
$U \geq 120$	0	0	0

EN 50160 Report

Company

Name	Ville Ala-Herttuala
Company	Vaasan ammattikorkeakoulu
Address	Wolffintie 30, 65200 Vaasa
Phone	
Email	



Client

Name	
Company	Reka Kaapeli Oy
Address	Sepänkuja, 42700 Keuruu
Phone	
Email	



Measurement

Objective	PKB2
Site description	Muuntamo 2
Start time	4.3.2024 23.51.59,903
Stop time	10.3.2024 17.15.02,733
Duration	5 d 17 h 23 min 2 s 830 ms Time period is less than a week
Interval	10 minutes

Connection	Three phase four wire
Nominal voltage	230,00 V
Nominal frequency	50,00 Hz
System type	Systems with synchronous connection
Effective measurement period	100,00 %
EN 50160 Limits	LV
Operating conditions	Normal

Instrument

Instrument name	METREL MI2592 Fw11.0.869
Instrument model	MI2592
Manufacturer	METREL
Serial Number	13140612
Firmware version	11.0.869
Operator name	OMISTAJA
Current clamps	Smart (1x3kA), range 100%Smart (1x3kA), range 100%
Additional equipment	

EN50160 Compliance summary

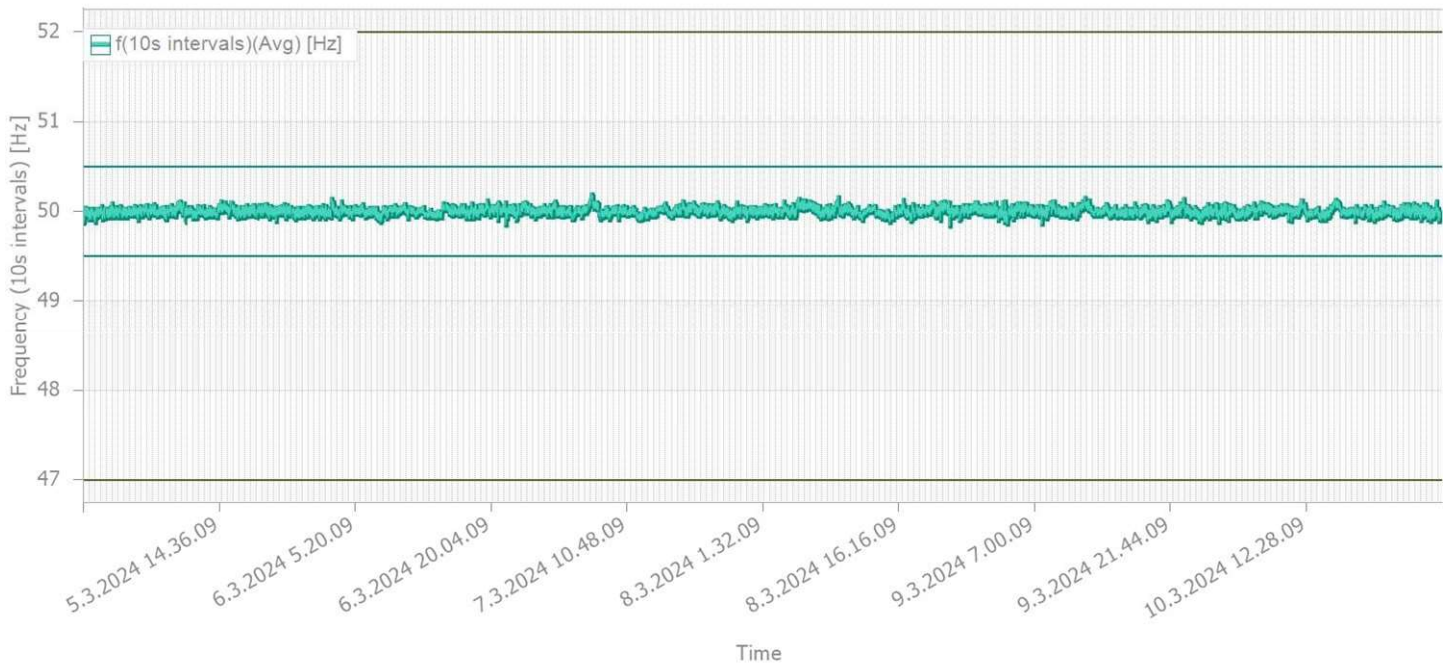
Power frequency	Passed
Supply Voltage Variations	Passed
Flicker Severity	Passed
Voltage Unbalance	Passed
Harmonic Voltages	Passed
Interharmonic Voltages	Measured
Signalling	Not Measured

Dips	0
Interruptions	0
Swells	0

Power frequency

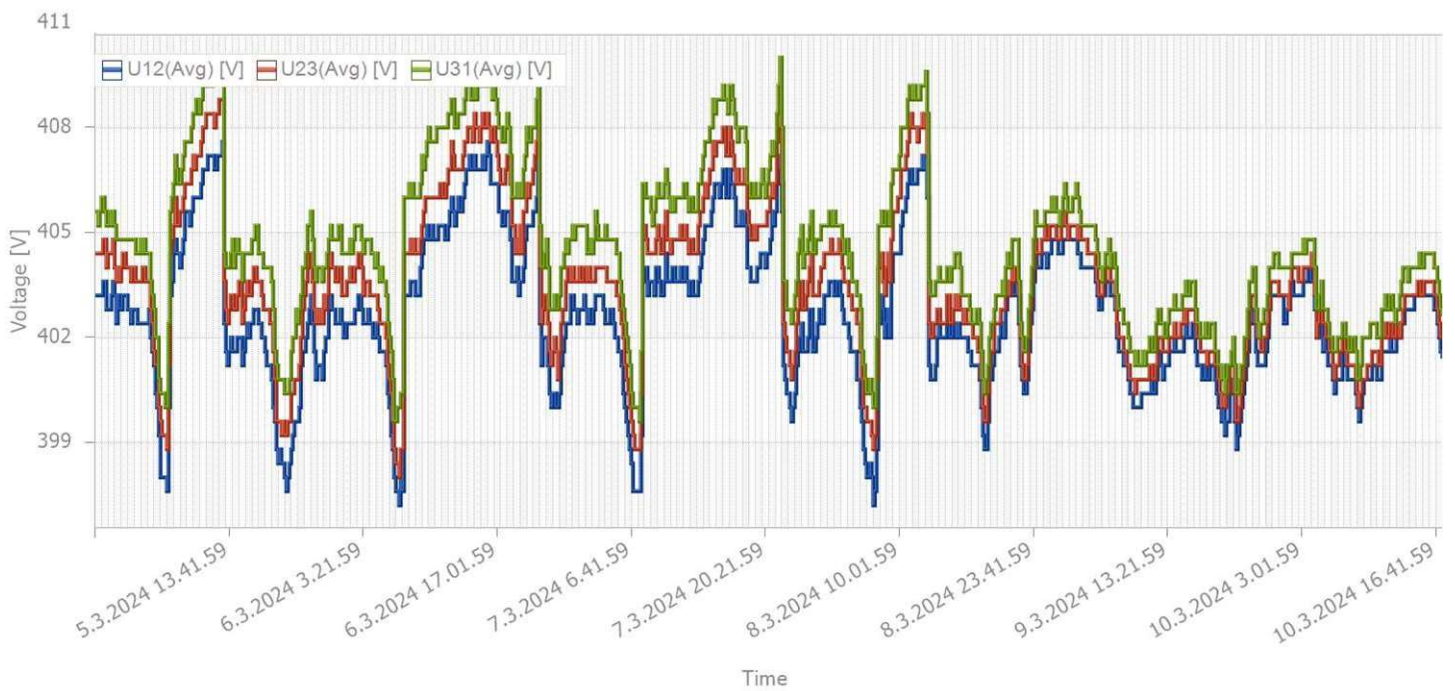
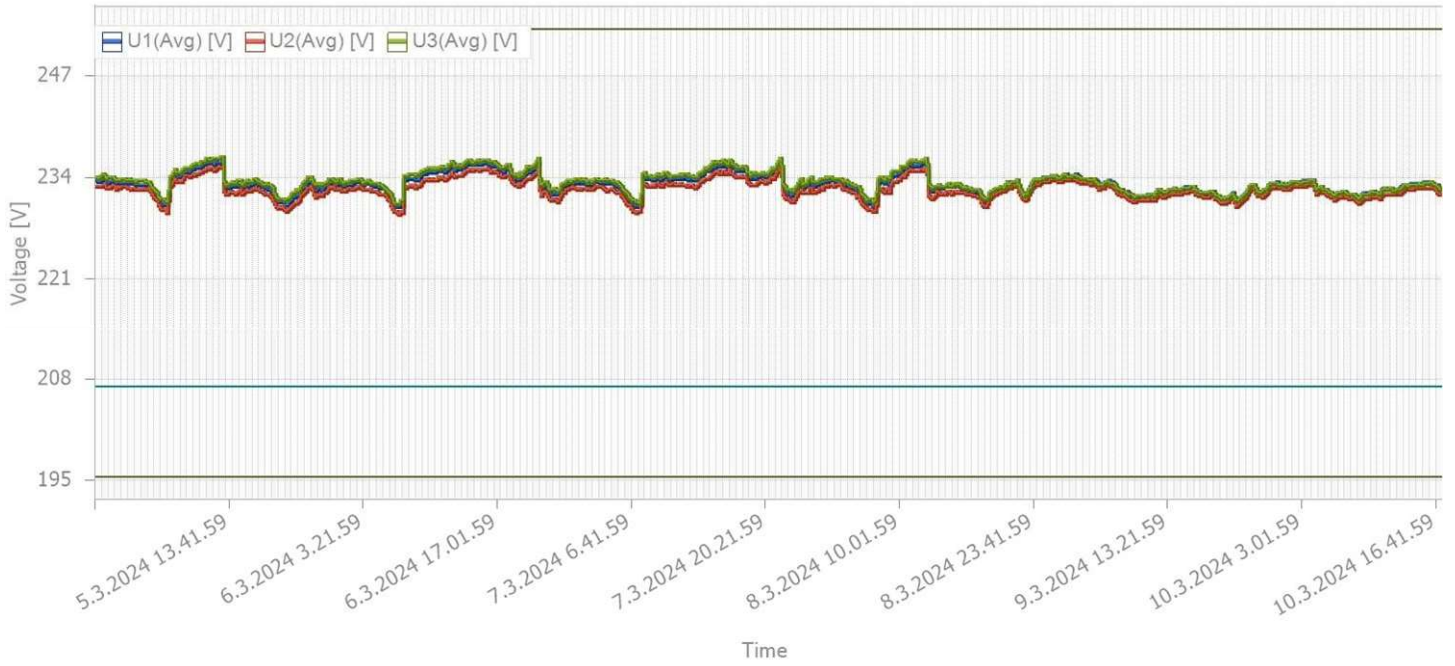
Nominal frequency	50,00 Hz
Measured quantity	Mean value of the fundamental frequency measured over 10 seconds (f_{10s})
Criteria	Systems with synchronous connection
EN 50160 standard	Section 4.2.1

Requirements		Measured	Status
49,50 – 50,50 Hz	99,50 % of interval (week)	49,89 – 50,11 Hz	Passed
47,00 – 52,00 Hz	100,00 % of interval (week)	49,83 – 50,19 Hz	Passed



Supply Voltage Variations

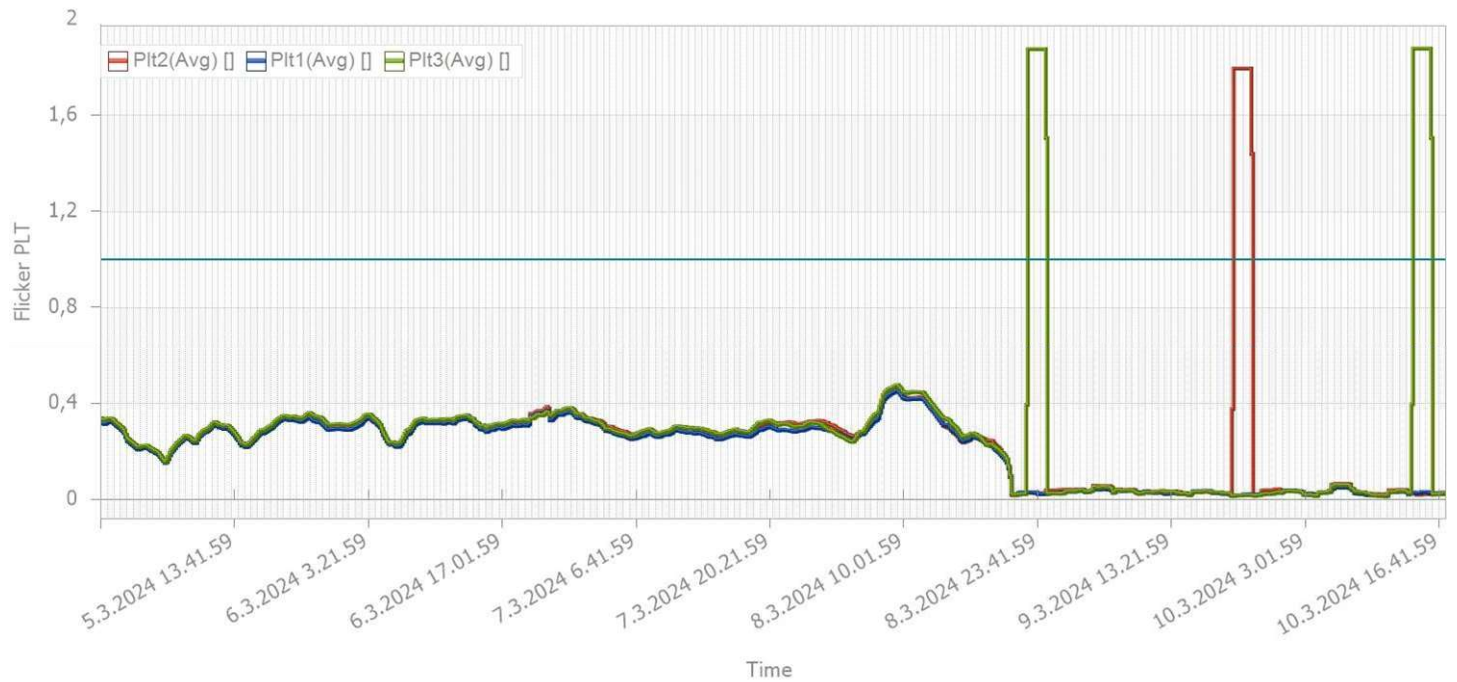
Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	10 minutes mean RMS value Urms		
Criteria	Systems with synchronous connection		
EN 50160 standard	Section 4.2.2		
Requirements		Measured	Status
207,00 – 253,00 V	95,00 % of interval (week)	229,20 – 236,00 V	Passed
195,50 – 253,00 V	100,00 % of interval (week)	229,20 – 236,60 V	Passed



Flicker Severity

Measured quantity	Long term flicker severity (P_{lt})
EN 50160 standard	Section 4.2.3.2
Operating conditions	Normal

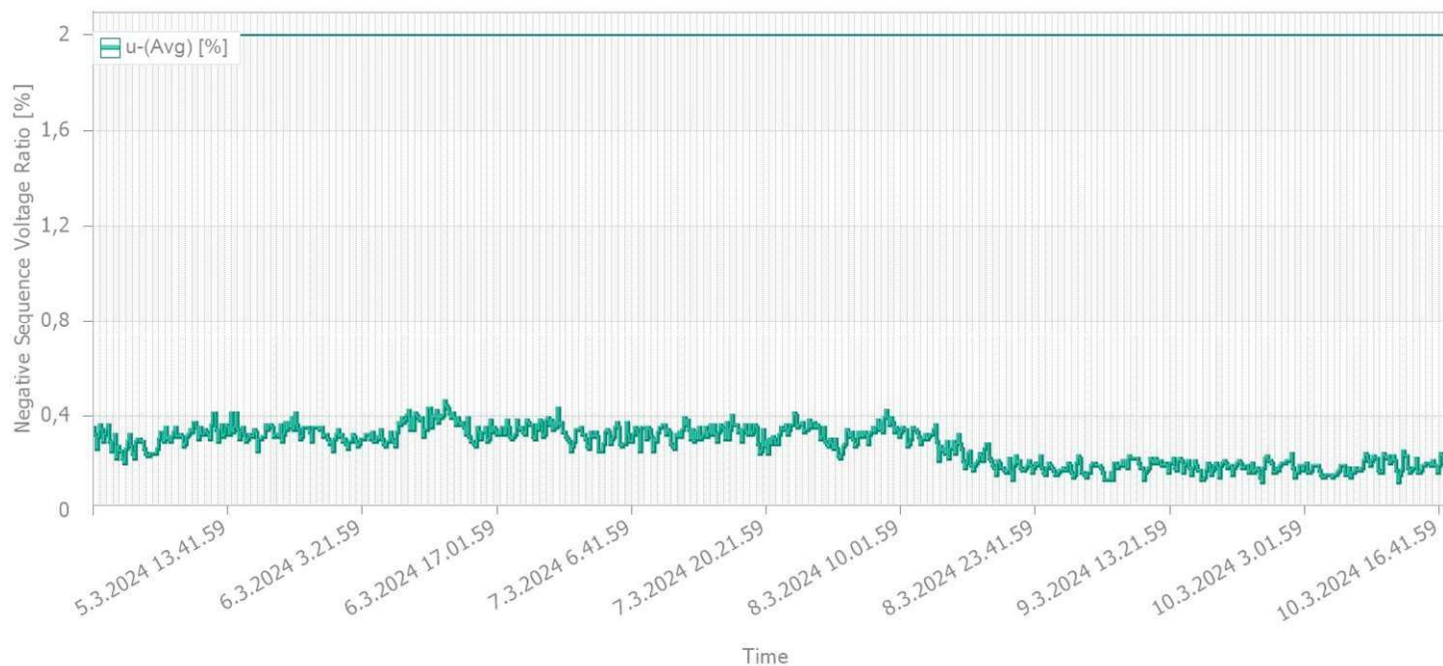
Requirements		Measured	Status
Plt < 1	95,00 % of interval (week)	0,01 – 0,45	Passed



Voltage Unbalance

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the negative sequence ratio u-
EN 50160 standard	Section 4.2.4
Operating conditions	Normal

Requirements		Measured	Status
$u_- < 2,00 \%$	95,00 % of interval (week)	0,12 – 0,38 %	Passed



Harmonics voltage

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the harmonic and total harmonic distortion
EN 50160 standard	Section 4.2.5
Operating conditions	Normal

		L1		L2		Residual value	
(% of nominal)	Requirement	Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
THD	< 8,00 %	2,40 %	Passed	2,40 %	Passed	2,40 %	Passed
2	< 2,00 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
3	< 5,00 %	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed
4	< 1,00 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
5	< 6,00 %	1,80 %	Passed	2,00 %	Passed	1,80 %	Passed
6	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
7	< 5,00 %	1,00 %	Passed	1,00 %	Passed	1,00 %	Passed
8	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed

9	< 1,50 %	0,20 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
10	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
11	< 3,50 %	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed
12	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
13	< 3,00 %	0,50 %	Passed	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed
14	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
15	< 1,00 %	0,10 %	Passed	0,20 %	Passed	0,10 %	Passed
16	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
17	< 2,00 %	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed
18	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
19	< 1,50 %	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed
20	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
21	< 0,75 %	0,20 %	Passed	0,20 %	Passed	0,10 %	Passed
22	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
23	< 1,50 %	0,50 %	Passed	0,50 %	Passed	0,40 %	Passed
24	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
25	< 1,50 %	0,40 %	Passed	0,30 %	Passed	0,40 %	Passed

Interruptions

Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of interrupts within predefined duration ranges
Measurement method	Voltage interruption begins when the Urms voltages of all channels fall below the voltage interruption threshold and ends when the Urms voltage on any one channel is equal to, or greater than, the voltage interruption threshold plus the hysteresis.
Interrupt threshold	5,00 % of nominal voltage
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage

Operating conditions	Normal	
EN 50160 standard	Section 4.3.1	
Residual voltage (% of nominal)	Duration	
	$t \leq 3 \text{ min}$	Residual
$U < 5,00$	0	0

voltage	
Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of dips within predefined voltage and duration ranges
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$. Dip begins when the voltage of one or more channels is below the dip threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or above the dip threshold plus the hysteresis voltage.
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage
Operating conditions	Normal
EN 50160 standard	Section 4.3.2.4

Residual voltage (% of nominal)	Duration (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\ 000$	$1\ 000 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 60\ 000$
$90 > U \geq 80$	0	0	0	0	0
$80 > U \geq 70$	0	0	0	0	0
$70 > U \geq 40$	0	0	0	0	0
$40 > U \geq 5$	0	0	0	0	0
$U < 5$	0	0	0	0	0

Swells

Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	Number of swells within predefined voltage and duration ranges		
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$ Swell begins when the voltage of one or more channels is above the swell threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or below the swell threshold minus the hysteresis voltage.		
Operating conditions	Normal		
EN 50160 standard	Section 4.3.2.6		
Swell voltage (% of nominal)	Duration (ms)		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\,000$	$5\,000 < t \leq 60\,000$
$120 > U > 110$	0	0	0
$U \geq 120$	0	0	0

EN 50160 Report

Company

Name	Ville Ala-Herttuala
Company	Vaasan ammattikorkeakoulu
Address	Wolffintie 30, 65200 Vaasa
Phone	
Email	



Client

Name	
Company	Reka Kaapeli Oy
Address	Sepänkuja, 42700 Keuruu
Phone	
Email	



Measurement

Objective	PKB3
Site description	Muuntamo B
Start time	10.3.2024 23.59.59,813
Stop time	15.3.2024 15.44.50,565
Duration	4 d 15 h 44 min 50 s 752 ms Time period is less than a week
Interval	10 minutes

Connection	Three phase four wire
Nominal voltage	230,00 V
Nominal frequency	50,00 Hz
System type	Systems with synchronous connection
Effective measurement period	100,00 %
EN 50160 Limits	LV
Operating conditions	Normal

Instrument

Instrument name	METREL MI2592 Fw11.0.869
Instrument model	MI2592
Manufacturer	METREL
Serial Number	13140612
Firmware version	11.0.869
Operator name	OMISTAJA
Current clamps	Smart (1x3kA), range 100%Smart (1x3kA), range 100%
Additional equipment	

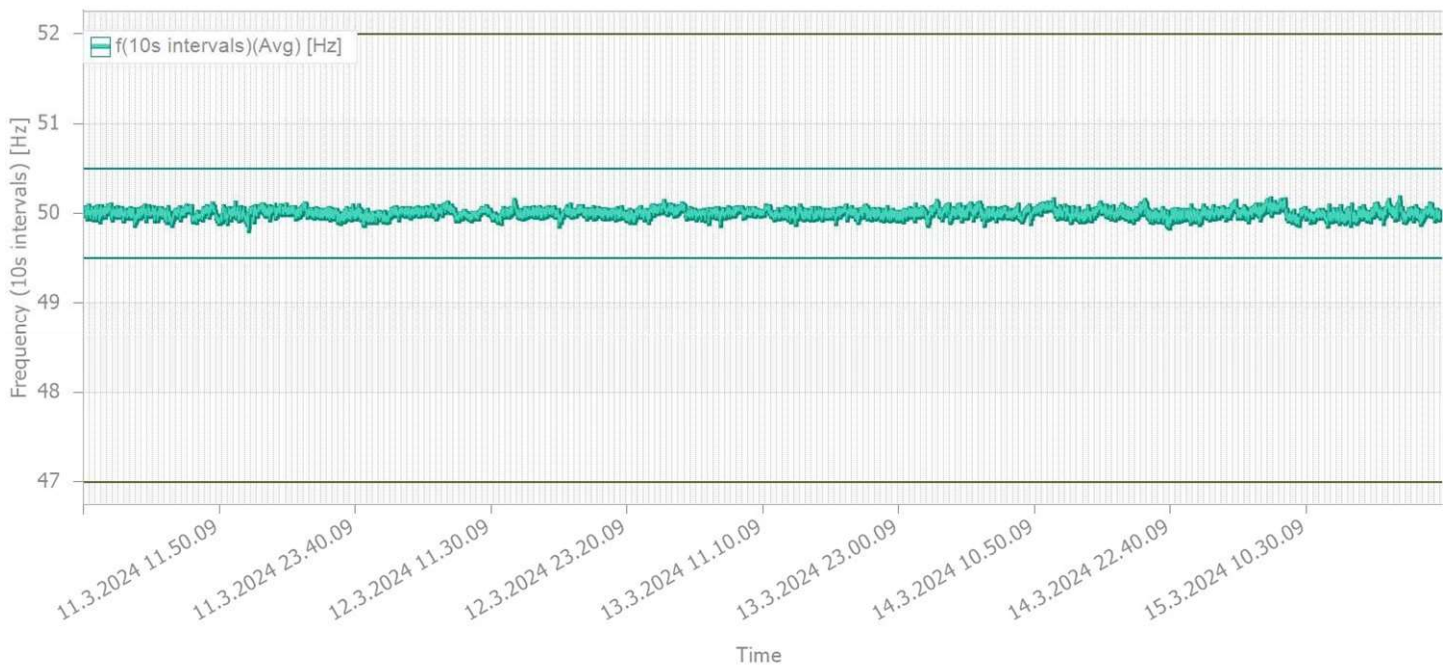
EN50160 Compliance summary

Power frequency	Passed
Supply Voltage Variations	Passed
Flicker Severity	Passed
Voltage Unbalance	Passed
Harmonic Voltages	Passed
Interharmonic Voltages	Measured
Signalling	Not Measured

Dips	0
Interruptions	0
Swells	0

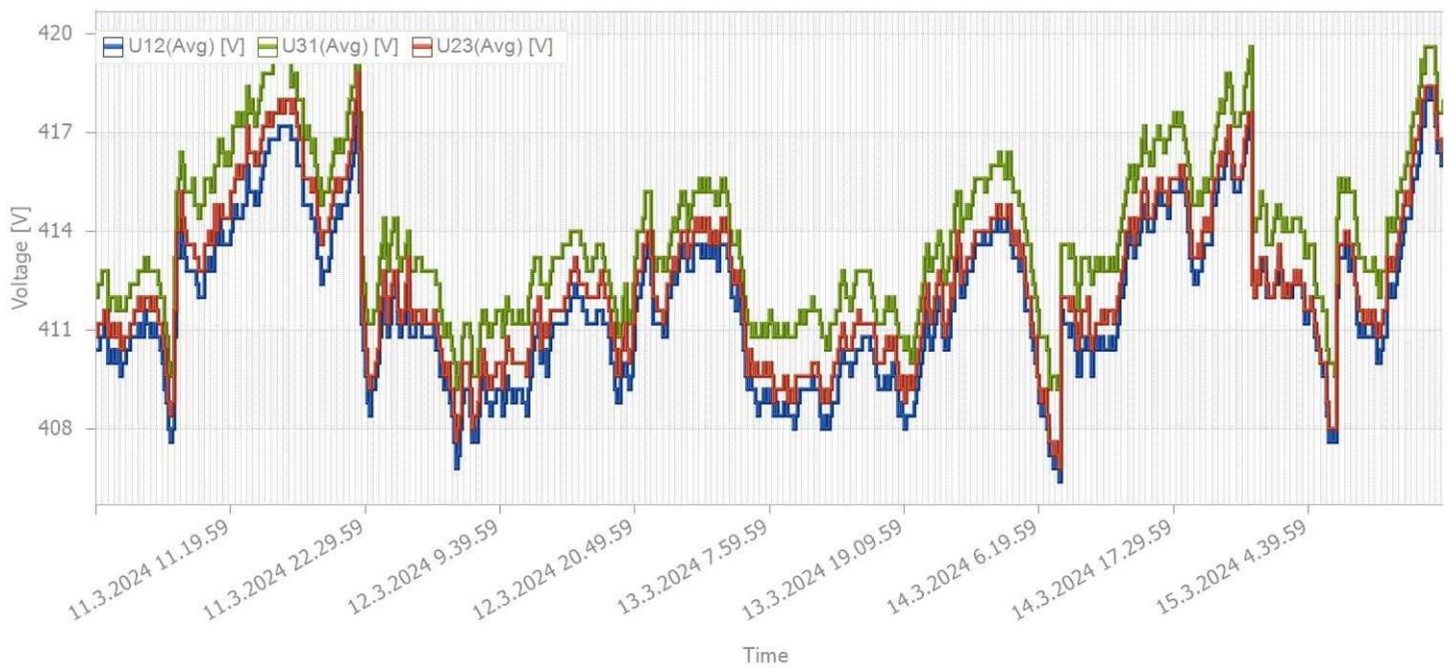
Power frequency

Nominal frequency	50,00 Hz		
Measured quantity	Mean value of the fundamental frequency measured over 10 seconds (f_{10s})		
Criteria	Systems with synchronous connection		
EN 50160 standard	Section 4.2.1		
Requirements		Measured	Status
49,50 – 50,50 Hz	99,50 % of interval (week)	49,87 – 50,13 Hz	Passed
47,00 – 52,00 Hz	100,00 % of interval (week)	49,80 – 50,18 Hz	Passed



Supply Voltage Variations

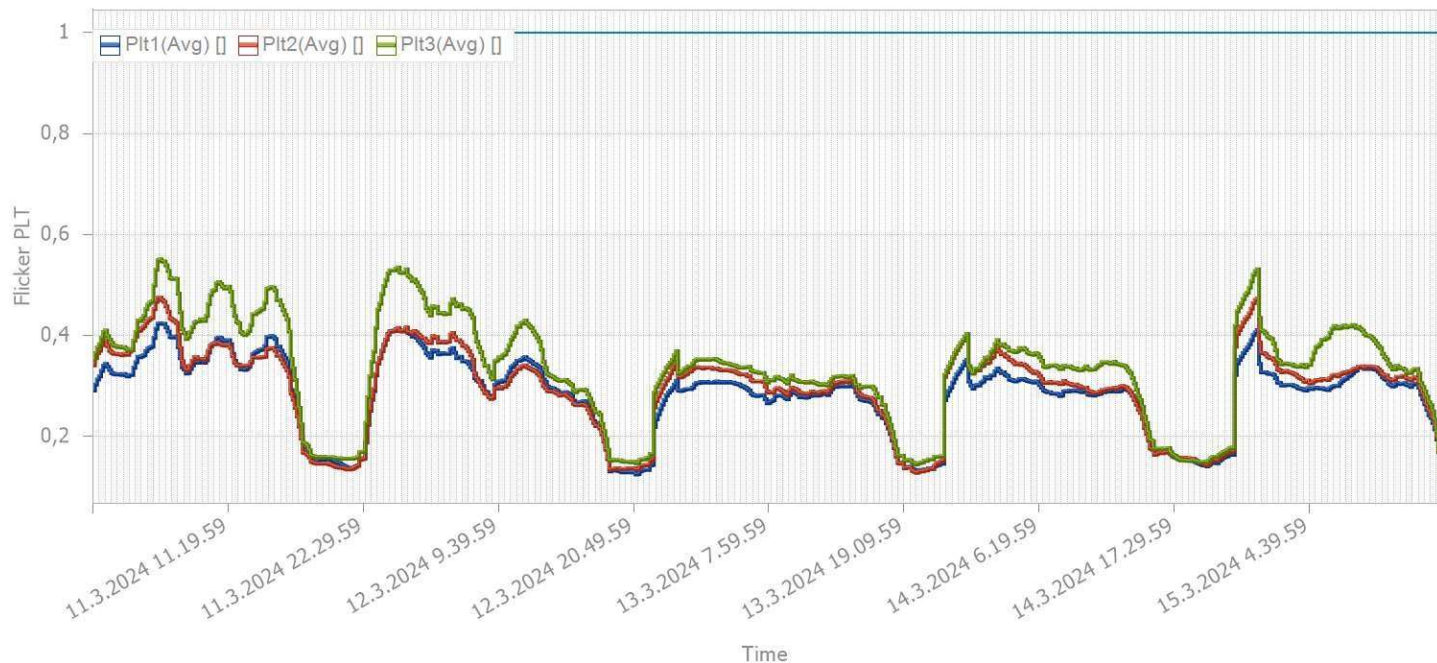
Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	10 minutes mean RMS value Urms		
Criteria	Systems with synchronous connection		
EN 50160 standard	Section 4.2.2		
Requirements		Measured	Status
207,00 – 253,00 V	95,00 % of interval (week)	234,40 – 241,20 V	Passed
195,50 – 253,00 V	100,00 % of interval (week)	232,93 – 242,00 V	Passed



Flicker Severity

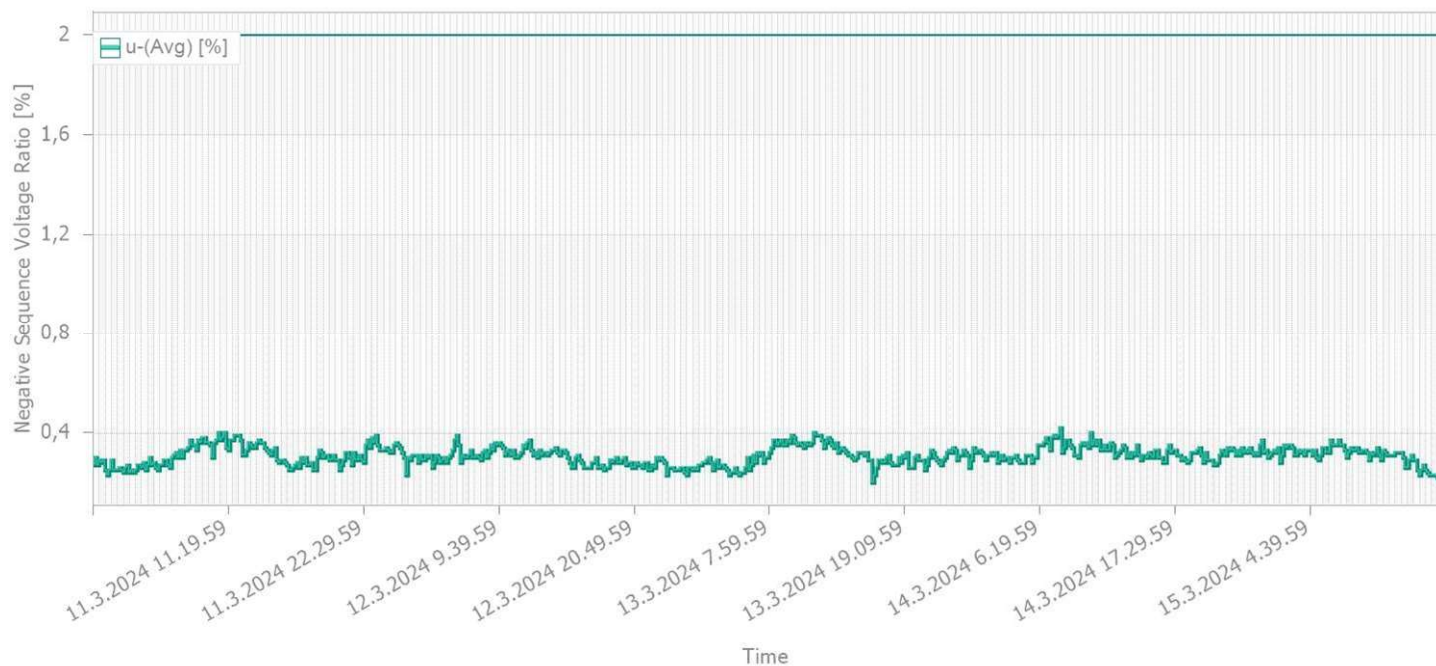
Measured quantity	Long term flicker severity (P_{lt})
EN 50160 standard	Section 4.2.3.2
Operating conditions	Normal

Requirements		Measured	Status
Plt < 1	95,00 % of interval (week)	0,11 – 0,50	Passed



Voltage Unbalance

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the negative sequence ratio u-		
EN 50160 standard	Section 4.2.4		
Operating conditions	Normal		
Requirements		Measured	Status
u- < 2,00 %	95,00 % of interval (week)	0,20 – 0,37 %	Passed



Harmonics voltage

Measured quantity	10 minutes mean RMS values of the harmonic and total harmonic distortion
EN 50160 standard	Section 4.2.5
Operating conditions	Normal

		L1		L2		Residual value	
(% of nominal)	Requirement	Measured	Status	Measured	Status	Measured	Status
THD	< 8,00 %	3,10 %	Passed	3,60 %	Passed	3,50 %	Passed
2	< 2,00 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
3	< 5,00 %	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed	0,30 %	Passed
4	< 1,00 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
5	< 6,00 %	2,20 %	Passed	2,60 %	Passed	2,70 %	Passed
6	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
7	< 5,00 %	1,20 %	Passed	1,30 %	Passed	1,20 %	Passed
8	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed

9	< 1,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
10	< 0,50 %	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed	0,00 %	Passed
11	< 3,50 %	1,10 %	Passed	1,20 %	Passed	1,10 %	Passed
12	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
13	< 3,00 %	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed
14	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,20 %	Passed
15	< 1,00 %	0,20 %	Passed	0,20 %	Passed	0,20 %	Passed
16	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
17	< 2,00 %	0,80 %	Passed	0,80 %	Passed	0,70 %	Passed
18	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
19	< 1,50 %	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed	0,60 %	Passed
20	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed
21	< 0,75 %	0,20 %	Passed	0,20 %	Passed	0,10 %	Passed
22	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed	0,10 %	Passed
23	< 1,50 %	0,70 %	Passed	0,70 %	Passed	0,70 %	Passed
24	< 0,50 %	0,10 %	Passed	0,10 %	Passed	0,00 %	Passed
25	< 1,50 %	0,80 %	Passed	0,80 %	Passed	0,80 %	Passed

Interruptions

Nominal voltage	230,00 V
Measured quantity	Number of interrupts within predefined duration ranges
Measurement method	Voltage interruption begins when the Urms voltages of all channels fall below the voltage interruption threshold and ends when the Urms voltage on any one channel is equal to, or greater than, the voltage interruption threshold plus the hysteresis.
Interrupt threshold	5,00 % of nominal voltage
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage

Operating conditions	Normal	
EN 50160 standard	Section 4.3.1	
Residual voltage (% of nominal)	Duration	
	$t \leq 3 \text{ min}$	Residual
$U < 5,00$	0	0

voltage					
Nominal voltage	230,00 V				
Measured quantity	Number of dips within predefined voltage and duration ranges				
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$. Dip begins when the voltage of one or more channels is below the dip threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or above the dip threshold plus the hysteresis voltage.				
Hysteresis voltage	2,00 % of nominal voltage				
Operating conditions	Normal				
EN 50160 standard	Section 4.3.2.4				
Residual voltage (% of nominal)	Duration (ms)				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 < t \leq 500$	$500 < t \leq 1\ 000$	$1\ 000 < t \leq 5\ 000$	$5\ 000 < t \leq 30\ 000$
$90 > U \geq 80$	0	0	0	0	0
$80 > U \geq 70$	0	0	0	0	0
$70 > U \geq 40$	0	0	0	0	0
$40 > U \geq 5$	0	0	0	0	0
$U < 5$	0	0	0	0	0

Swells

Nominal voltage	230,00 V		
Measured quantity	Number of swells within predefined voltage and duration ranges		
Measurement method	One cycle RMS updated each half cycle $U_{rms}(1/2)$ Swell begins when the voltage of one or more channels is above the swell threshold and ends when the voltage on all measured channels is equal to or below the swell threshold minus the hysteresis voltage.		
Operating conditions	Normal		
EN 50160 standard	Section 4.3.2.6		
Swell voltage (% of nominal)	Duration (ms)		
	$10 \leq t \leq 500$	$500 < t \leq 5\,000$	$5\,000 < t \leq 60\,000$
$120 > U > 110$	0	0	0
$U \geq 120$	0	0	0