

Alexi Ripatti

LÄMPÖTILAN VAIKUTUS LED-VALAISIMIEN KÄYTTÖIKÄÄN JA LEDIEN AIHEUTTAMAT HÄIRIÖT

Opinnäytetyö
Sähkö- ja automaatiotekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä/Tekijät	Tutkinto	Aika
Aleksi Ripatti	Sähkö- ja automaatiotekniikka	Joulukuu 2017
Opinnäytetyön nimi		35 sivua
Lämpötilan vaikutus led-valaisimien käyttöikään ja Ledien aiheuttamat häiriöt		4 liitesivua
Toimeksiantaja		
Stora Enso: Ingerois Mill		
Ohjaaja		
Hannu Honkanen		
Tiivistelmä		
<p>Opinnäytetyön ensimmäisessä osuudessa selvitetään lämpötilan vaikutusta led-valaisimien käyttöikään ja toisessa osiossa tutkitaan led-valaisimien aiheuttamia häiriöitä sähköverkkoon. Tavoitteena oli pohtia korkean sisäisen ja ulkoisen lämpötilan vaikutuksia led-valaisimien käyttöikään. Lisäksi työssä tutkittiin, aiheuttavatko kartonkikonesaliin asennetut uudet led-valaisimet häiriöitä sähköverkkoon.</p> <p>Lämpötilan vaikutuksia ledien käyttöikään selvitettiin valmiista tutkimuksista, artikkeleista sekä kokemuksista. Ledien häiriöitä mitattiin Fluken verkkoanalysointorilla valaisimien ollessa pois päältä sekä päällä ja vertailtiin saatuja tuloksia keskenään sekä standardiin.</p> <p>Lämpötilan vaikutuksista led-valaisimien käyttöikään saadut tulokset keskittyvät pääasiassa komponenttien laatuun, joka vaikuttaa lämmönsietoon. Lisäksi olennaista on liitoslämmön poisjohtamisen tehostaminen. Tutkimuksen mukaan led-valaisimen lämpöresistanssin puolitaminen laskee ledin liitoslämpötilaa kymmenen astetta. Kartonkikonesalin led-valaistusta syöttävän keskuksen mittauksessa, led-valaisimien ollessa päällä, mitatut häiriöt pienenevät vertailumittaukseen nähden, jolloin led-valaisimet eivät olleet päällä.</p> <p>Ympäristön lämpötila on led-valaisimien pahin vihollinen, koska valmistajat eivät pysty vaikuttamaan ulkoiseen lämpötilaan muuten kuin antamalla käyttöolosuhteille lämpötilarajat. Led-valaisimet kehittyvät jatkuvasti, ja led-valaisimia on saatavilla jo suhteellisen korkeisiin käyttölämpötiloihin.</p> <p>Mittausten perusteella voitiin todeta, että uudet led-valaisimet, joista mittaukset tehtiin, eivät aiheuttaneet huomattavia häiriöitä sähköverkkoon. Häiriöiden kompensointiin ei mitausten perusteella ole tarvetta ryhtyä.</p>		
Asiasanat		
led, lämpö, häiriöt, käyttöikä		

Author (authors)	Degree	Time
Aleksi Ripatti	Bachelor of Electrical Engineering	December 2017
Thesis Title HEATS EFFECT ON LEDS WORKING LIFE AND DISTURBANCES CAUSED BY LED-LIGHTNING		35 pages 4 pages of appendices
Commissioned by Stora Enso: Ingerois Mill		
Supervisor Hannu Honkanen		
<p data-bbox="164 869 1460 1052">Abstract</p> <p data-bbox="164 869 1460 1052">The objective of the thesis was to find out how heat effects on LEDs working life. Second part of this thesis focused on investigated disturbances caused by led-lightning. The goal was to think how high junction and ambient temperature effects on led-lightnings working life. Thesis also had an investigation about disturbances caused by Ingerois mills' machine halls new led lighting.</p> <p data-bbox="164 1093 1460 1232">Temperatures effect on LEDs working life were figured out from ready investigations, articles and experiences. LEDs disturbances were measured with Flukes' power quality and energy analyzer when LED-lightning were off and on. Received results were compared with each other and to standard SFS-EN 50160.</p> <p data-bbox="164 1272 1460 1456">Results for heats effectivity on LEDs working life concentrated mainly on components quality which effects on heat-resistance. Also, relevant result was increase leading junction temperatures out from base. According research halving fixtures heat resistance lowers LEDs junction temperature ten degrees Celsius. Measured disturbances were lower when LED-lightning were on than when it was off.</p> <p data-bbox="164 1496 1460 1635">Ambient temperature is worst enemy of LED-lightning because manufacturers can't have a strait influence on ambient where LED is installed. All they can do is to give limits for ambient temperatures. LED-lightning is being developed all the time and there are applications for relative high ambient temperatures.</p> <p data-bbox="164 1675 1460 1780">According measurements can be said that new LED-lightning which were object of measurements won't cause disturbances for the grid. There won't be needed to do compensation for disturbances.</p>		
<p data-bbox="164 1865 319 1899">Keywords</p> <p data-bbox="164 1933 686 1966">LED, heat, disturbances, working life</p>		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	LÄMMÖN VAIKUTUS LED-VALAISIMIIN.....	7
2.1	Sisäinen lämpötila.....	7
2.2	Ympäristön lämpötila.....	9
2.3	Ledin komponentit ja lämpö.....	11
3	LEDIEN AIHEUTTAMAT HÄIRIÖT.....	14
3.1	Yleistä häiriöistä.....	14
3.2	Yliaallot.....	14
3.3	Kokonaissärö- ja k-kertoimet.....	15
3.4	Sähkön laadun mittaaminen.....	17
4	MITTAUSTEN SUORITTAMINEN.....	18
4.1	Käytetyt mittalaitteet, ohjelmat ja mittaukset.....	18
4.2	Ennen mittauksien aloittamista.....	19
4.3	Mittaukset.....	20
5	TULOKSET JA ANALYSOINTI.....	21
5.1	Ennen led-valaistusta.....	21
5.2	Led-valaisimet päällä.....	23
5.3	Tulosten analysointi.....	26
6	JOHTOPÄÄTÖKSET.....	29
6.1	Tärkeimmät tulokset.....	29
6.2	Tulokset käytännössä.....	30
7	LOPPUPÄÄTELMÄT JA -EHDOTUKSET.....	30
7.1	Mittausten luotettavuus.....	30
7.2	Yliaaltojen kompensointi.....	31
	LÄHTEET.....	33
	LIITTEET	

Liite 1. Fraterin, Heffernanin ja Watsonin (2008) tutkimuksen tulokset eri valonlähteiden yliaaltojen osalta

Liite 2. Epäsymmetrisen kuorman vaikutus nollavirtaan

Liite 3 Loisenergiämäärät kuvaajina mittausten ajalta

Liite 4. Kokonaissärökerroin ja yliaallot -kuvaajat

1 JOHDANTO

Led-valaisimet yleistyvät kovaa vauhtia. Energiatehokkuus, valotehokkuus ja kilpailukykyiset kustannukset ajavat LED-tekniikkaa yhä enemmän yleisvalaistuskäyttöön teollisuudessa, kaduilla sekä yksityisillä käyttäjillä. Ledien monipuolisuus sekä laskeneet valmistuskustannukset ovat olleet oiva ponnahduslauta kehitys- ja tutkimustyölle.

Tiede-lehden artikkelin mukaan (Rantanen 2006) valoa lähettävä diodi (Light emitting diode) eli led muodostuu kaksiosaisista puolijohdekiteistä, joita on muokattu saostamalla. Sähkövirran kulkiessa diodin läpi, alkaa puolijohteiden rajakerros säteillä valoa. Eri puolijohteilla ja erilaisilla saostuksilla saadaan aikaan eri värejä, Rantanen (2006) jatkaa.

Vaikka ledit ovatkin ylivoimaisia monin tavoin, löytyy niistä vielä kehitettävääkin. Led-valaisimissa on paljon elektroniikkaa, joilla muun muassa muutetaan jännitettä ledeille sopivaksi ja voidaan toteuttaa säätöjä. Yleisesti onkin oletuksena, että kaikenlainen tehoelektroniikka aiheuttaa sähköverkolle erilaisia haittavaikutuksia. Näitä ei-toivottuja vaikutuksia ovat esimerkiksi yliaallot, sähköverkon säröytyminen ja oudot toiminnat muissa elektronisissa laitteissa. Vaikka ledit eivät aiheuta lämpösäteilyä, kuten esimerkiksi hehkulamput, niin monien yllätykseksi led-valaisimet lämpenevät paljon. Lämpeneminen ja suhteellisen heikko lämmönkestävyys aiheuttavat toistaiseksi jonkin verran rajoitteita led-valaisimien käytölle etenkin teollisuudessa.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutustua ledien aiheuttamiin häiriöihin ja miettiä, miten niitä voisi tarvittaessa estää. Lisäksi työn toimeksiantaja halusi tietoa lämmön vaikutuksesta led-valaisimien käyttöikänsä, joten tutustun tutkimuksiin, artikkeleihin ja valmistajien tietoihin, joissa käsitellään led-valaisimien lämmönkestoa sekä lämmön vaikutusta ledien käyttöikänsä. Ledien lämmönkestävyyteen tutustutaan sisäisen sekä ulkoisen lämpötilan ja komponenttien vaikutuksen avulla. Opinnäytetyö toteutetaan Stora Enso Oy:n toimeksiantona Inkeröisten kartonkitehtaalle. Työn osana analysoin Inkeröisten kartonkitehtaalle tulevien led-valaisimien vaikutusta sähköverkkoon häiriöiden osalta. Stora Enson kartonkitehtaalle uusitaan osittain kartonkikonesalin valaistusta. Saliin tulee uusia led-valaisimia, joiden vaikutusta sähköverkkoon

mitataan verkkoanalysointorilla. Tarkoituksena on selvittää tulevia valaistusinvestointeja varten ledien häiriöalttiutta ja lämmön vaikutusta käyttöikänsä.

Stora Enso on maailmanlaajuinen uusiutuvien pakkaus-, biomateriaali-, puu- ja paperiratkaisujen tuottaja. Stora Ensolla on Kouvolan Inkeröissä paperi- sekä kartonkitehtaat. Tehtaat työllistävät suoraan noin 550 työntekijää. Inkeröisten kartonkitehdas valmistaa taivekartonkia kuluttajapakkausiksi ja onkin tunnettu maailmalla arvostettujen Tambrite- ja Tamfold-tuotenimien ansiosta. Paperia ja kartonkia on valmistettu samalla tehdasalueella jo vuodesta 1872. (Stora Enso 2017.)

2 LÄMMÖN VAIKUTUS LED-VALAISIMIIN

Etenkin teollisuudessa led-valaisimien käyttöön siirtymisen usein tuntuu estävän valaisimen ympäristön lämpötila. Olen havainnut, että monesti (paperi)teollisuuden prosessitilat ja tilat, joihin kaivataan valoa, ovat myös kuumia paikkoja. Led-valaisimet luovuttavat lämpöä ympäristöön johtamalla, joten valaisimissa on eräänlainen kehikko, josta lämpö pääsee haihtumaan ympäröivään ilmaan. Jos puhutaan, että led-valaisimen ympäröivä lämpötila on esimerkiksi yli 50 °C, niin lämmön johtuminen ympäristöön tapahtuu todennäköisesti hyvin paljon huonommin kuin normaalissa huonelämpötilassa.

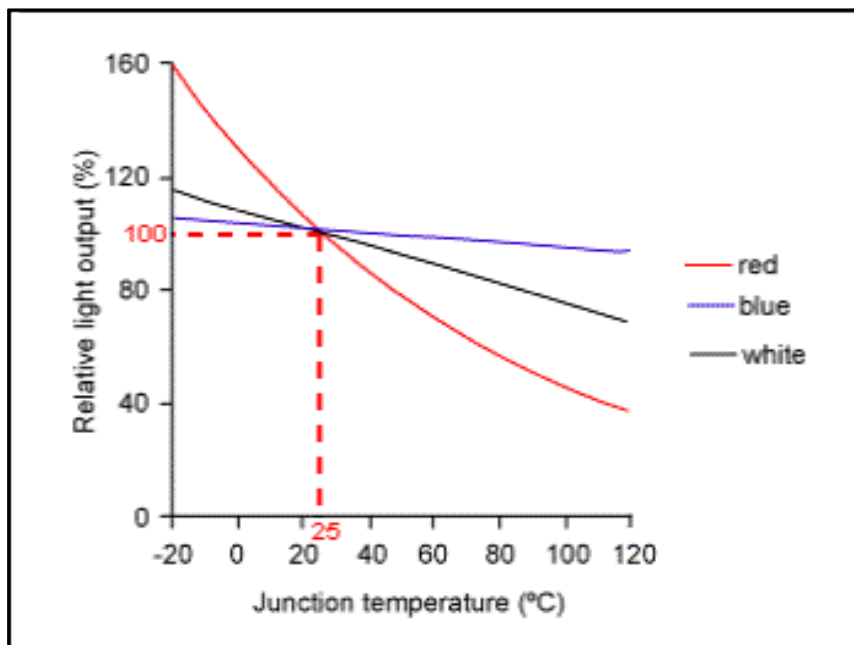
Led-valaisimiin voisi varmasti keksiä tehokkaampia jäähdytysmenetelmiä kuin vain metallikehikot; kuten vesi- tai ilmajäähdytys. Nämä kuitenkin lisäävät investointi- ja huoltokustannuksia huomattavasti. Lisäksi voisi olla mahdollista käyttää puhaltimella varustettuja led-valaisimia. Tällöin tulee kuitenkin varmistaa, että puhaltimella on tarpeeksi pitkä käyttöikä, sillä liikkuvat osat kuluvat yleensä nopeammin kuin led-moduulit. (Heliospectra 2015). Lisäksi puhaltimien siirtämä lämpö pitäisi ohjata viileämpään paikkaan, mikä nostaa taas investointikustannuksia.

2.1 Sisäinen lämpötila

Normaaleissa valaisimissa muodostuva infrapunasäteily tekee lamppujen pinnoista kuumia ja lämpö säteilee myös lampun ympäristöön infrapunasäteilynä. Siksi normaalit polttimot ovat huonoja esimerkiksi elintarviketeollisuudessa,

jossa ylimääräinen lämpö edistää tuotteiden pilaantumista tai kuormittaa jäähdytyskoneita. Led lamput eivät muodosta infrapunasäteilyä ympäristöönsä ja soveltuvatkin sen takia paremmin paikkoihin, joissa ei toivota ylimääräistä lämpösäteilyä. Silti suurin osa ledien ottamasta sähkötehosta muuttuu lämmöksi etenkin puolijohteiden liitoskohdassa. (Whitaker 2005.)

Suurimman lämpöhäviön led-komponentti tuottaa n- ja p-tyypin rajapinnassa. Tämä puolijohteiden liitoskohdan lämpötila vaikuttaa myös suoraan ledin kirkkauteen (kuva 1). Useimmat ledit ovat optimoitu noin 25 °C lämpötilalle eli yleiselle käyttölämpötilalle. Liitoslämpötilan laskiessa valo kirkastuu ja toisaalta liitoslämpötilan noustessa valo himmenee suhteessa nimelliseen valotehoon. Erivärisillä ledeillä muutokset lämpötilan suhteen tapahtuvat hieman eri tahtiin, mutta muutos on kuitenkin aina saman suuntainen. (Lightning Research Center 2003.)

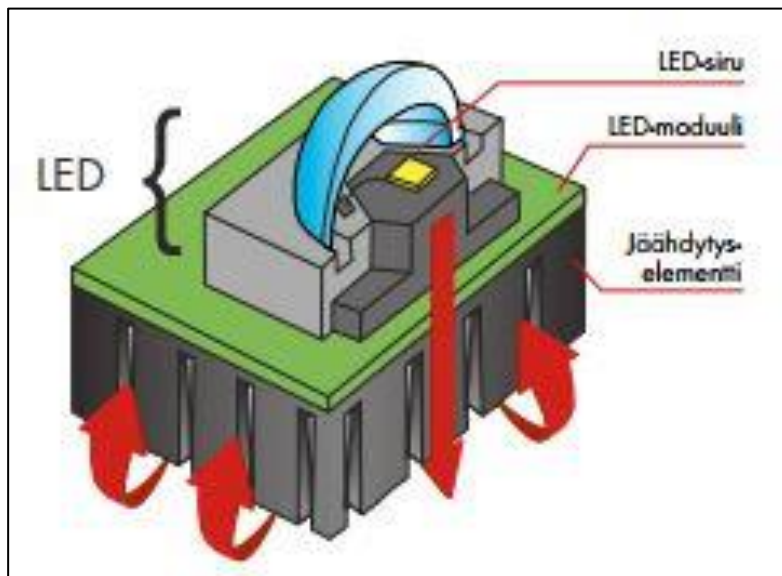


Kuva 1. Suhteellinen ledin valoteho liitoslämpötilan funktiona (Lightning Research Center 2003)

Kuvassa 1 on kuvattu punaisen, sinisen ja valkoisen ledin suhteellista ulosannettavaa valoa liitoslämpötilan funktiona. Liitoslämpötilaan vaikuttaa kolme eri tekijää: ympäristön lämpötila, ledin läpi kulkeva virta ja valaisimen lämmönluovutuskyky. Jotkut valmistajat käyttävät kompensatiopiirejä valaisimissa, joilla säädetään ledin läpi kulkevaa virtaa, mikä vaikuttaa ledin sisäiseen läm-

pötilaan. Tämä mahdollistaa käytön erilaisissa ympäristön lämpötiloissa. Kompensaatiopiirien käyttö saattaa kuitenkin aiheuttaa ylikuormitusta ledeille, jolloin niiden käyttöikä laskee. (Lightning Research Center 2003.)

Ledien liitoskohdassa ja sisäisissä komponenteissa muodostuva lämpö johdetaan ulos valaisimesta erilaisilla metallisilla lämpönieluilla (*engl. heat sink*). Kuvasssa 2 näkyy hyvin poikkileikkaus led-elementistä ja se, kuinka lämpö johtuu pois valaisimesta. Jo tilapäinen lämpötilan nousu on haitaksi ledeille, sillä ulostuleva valoteho voi vähentyä pysyvästi, vaikka hetkellinen lämpötilaongelma saataisiin ratkaistua. (Floroiu 2015.)



Kuva 2. Ledin rakenne ja lämmön johtuminen (Glamox Luxo Lightning 2013, 3)

Mikäli liitoslämpötila nousee liikaa, eikä lämpönielu pysty johtamaan muodostunutta lämpöä pois (kuva 2), voi seurata jopa ledin täydellinen rikkoutuminen. Kun heikoin lenkki saavuttaa murtorajansa tietyssä lämpötilassa, ei led enää toimi, vaikka liitoslämpötila saataisiin laskemaan (Floroiu 2015). Led-tekniikan asiantuntija Viktor Floroiu (2015) jatkaa vielä, että vaikka heikoimman komponentin murtorajaa ei saavutettaisiinkaan, saattavat materiaalit saada pysyviä vaurioita vähentäen ulostulevaa valotehoa.

2.2 Ympäristön lämpötila

Lämpö on led-tekniikan pahin vihollinen. Kun ledin sisäinen lämmön muodostuminen on saatu kuriin, täytyy vielä keksiä, kuinka saadaan minimoitua ympäristön lämpötilan vaikutus sisäiseen lämpöön.

Ympäristön lämpötila vaikuttaa merkittävästi ledin liitoslämpötilaan. Ympäristön lämpötila on myös asia, johon valaisimien valmistajat eivät pysty suoraan vaikuttamaan. Valmistajat usein ilmoittavatkin sallitut lämpötilarajat, joilla valaisin toimii hyväksyttävästi. Pitkittynyt lämpö voi lyhentää merkittävästi led-järjestelmien hyödyllistä käyttöikä. Korkea ympäristön lämpö heikentää liitoselementtiä merkittävästi, laskien ulosannettavaa valotehoa nopeammin kuin matalampi lämpötila. (Lightning Research Center 2003.)

Yleensä ledit tulisi vaihtaa, kun niistä on hävinnyt 30 % niiden alkuperäisestä valotehosta ja valmistajat ilmoittavatkin usein ledin käyttöiän kirjainyhdistelmän avulla (esim. L70) Floroiu (2015) kertoo (ks. Glamox Luxo Lightning 2013, 5). Kirjainyhdistelmä, esimerkiksi L70, tarkoittaa siis hetkeä, jolloin valaisimen ulosannettavaa valotehoa on jäljellä 70 % alkuperäisestä Floroiu (2015) jatkaa. Esimerkiksi merkintä L70 = 50 000 h tarkoittaa, että 50 000 tunnin kulluttua led-valaisimen valoteho on laskenut 30 % nimellisestä, mikäli valaisinta on käytetty valmistajan määrittämässä ympäristön lämpötilassa.

Liitoslämpötila määrittelee ledin käyttöiän ja ympäristön lämpötila vaikuttaa selvästi liitoslämpötilaan. Liitoslämpötila saadaan laskettua kaavan 1 avulla, kun tiedetään ledin lämpöresistanssi sekä ledin ja lämpönielun aiheuttama kokonaislämpöresistanssi sekä tehot. (Floroiu 2016.)

$$T_j = T_a + P_{tot} \cdot R_{hs} + P_{led} \cdot R_{led} \quad (1)$$

jossa	T_j	Liitoslämpötila	[°C]
	T_a	Ympäristön lämpötila	[°C]
	P_{tot}	Kokonaisteho	[W]
	R_{hs}	Kokonaislämpöresistanssi	$\left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right]$
	P_{led}	Ledin teho	[W]
	R_{led}	Ledin lämpöresistanssi	$\left[\frac{^\circ\text{C}}{\text{W}}\right]$

Kaavassa 1 ledin teho ja lämpöresistanssi tarkoittavat yhden led-komponentin arvoja. Kokonaislämpöresistanssi taas muodostuu ledien ja lämpönielun yhteisestä lämmönluovutuskyvystä. Kokonaistehoon otetaan huomioon kaikkien

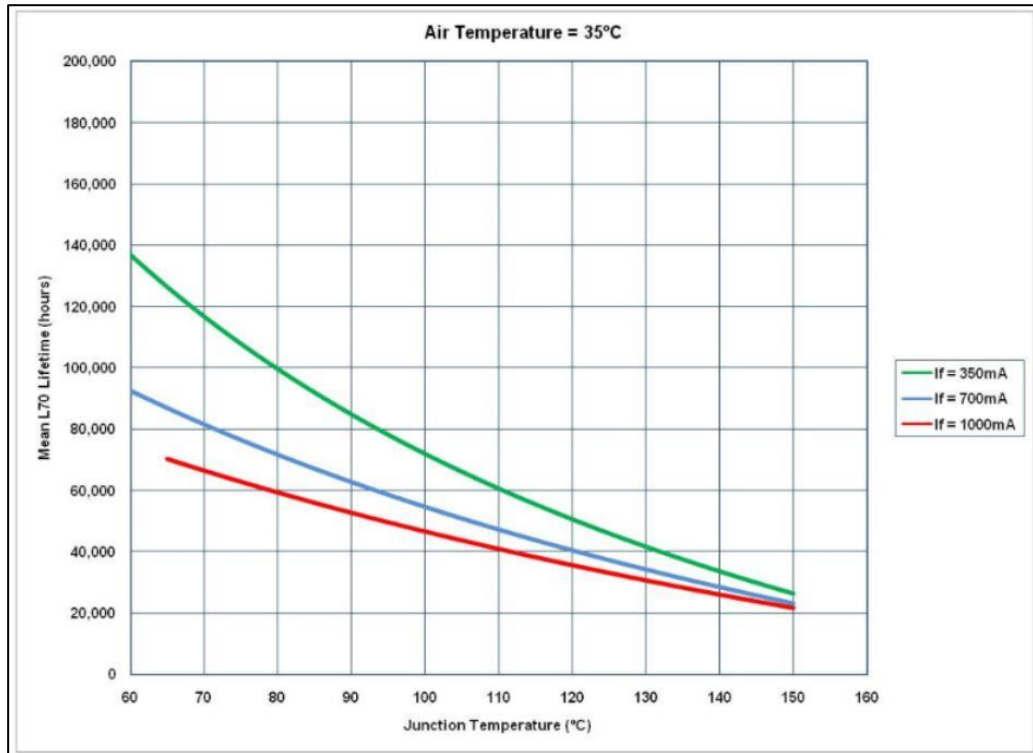
led-komponenttien teho, kun taas ledin teho tarkoittaa yhden komponentin tehoa.

Glamox Luxo Lightning (2013, 6) kertoo yleisesti oletettavan, että kun ympäristön lämpötila nousee kymmenen astetta, niin ledin käyttöikä puolittuu. Eli jos normaalissa huonelämpötilassa (noin 20 °C) valaisimelle luvataan 50 000 h käyttöikää (L70), niin 30 °C:n lämpötilassa valaisimen käyttöikä olisi enää 25 000 tuntia. Glamox Luxo Lightning (2013, 6) kuitenkin lisää, että heidän valaisimissaan tämä oletamus ei pidä paikkansa, vaan heillä 10 °C asteen nousu vähentää led-valaisimen käyttöikää vain noin 10 000 tuntia. Mutta tämäkin arvo vaihtelee eri valaisimilla ja eri valaisimien tarkat tiedot ovat saatavilla erikseen pyytämällä (Glamox Luxo Lightning 2013, 6.)

2.3 Ledin komponentit ja lämpö

Kolmas ledin lämmönkestämiseen ja -muodostumiseen vaikuttava tekijä, sisäisen ja ulkoisen lämpötilan lisäksi, on led-valaisimen komponentit. Puolijohdeiden rajapinnan yli kulkeva virta lämmittää liitoskohtaa ja lämpönielun materiaali vaikuttaa lämmön johtumiskykyyn pois valaisimesta. Eri valmistajat tuottavat komponentteja eri paikoissa ja erilaisilla sekä erilaatuisilla aineilla ja yhdistelmillä. Onkin varmasti perusteltua ihmetellä, miksi markkinoilta löytyvien ledien hinnat vaihtelevat runsaasti. Vaikka halvin mahdollinen ledi saattaa toimia hienosti normaalissa huonelämpötilassa, kalliimmat ledit ovat hyvin todennäköisesti toteutettu laadukkaammilla komponenteilla, mikä mahdollistaa monipuolisemman käytön eri ympäristön lämpötiloissa.

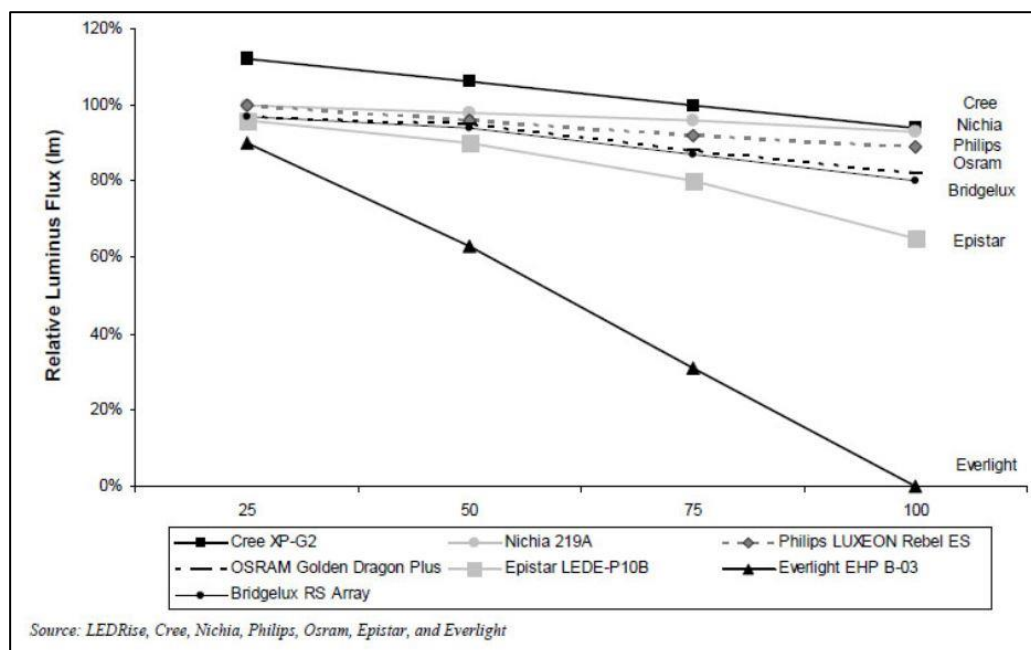
Ledin liitoskohdan puolijohdemateriaalien yli kulkevat jännitteet sekä liitoslämpötila vaikuttavat led-komponentin ottamaan virtaan. Jännitteen nosto lisää ledin kirkkautta ja nostaa myös virtaa (Floroiu 2016). Kuvassa 3 on ledin käyttöikä kuvattuna liitoslämpötilan funktiona eri virroilla, kun ympäristön lämpötila on 35 °C.



Kuva 3. Ledin käyttöikä liitoslämpötilan suhteen eri virta-arvoilla (Floroiu 2016)

Kuvasta 3 näkee hyvin, kuinka pienemmällä virralla ledin käyttöikä on lähes kaksi kertaa suurempi kuin jos virta kolminkertaistuu liitoslämpötilan ollessa suhteellisen matala. Kuitenkin liitoslämpötilan noustessa yli sadan asteen käyttöiät tasaantuvat, vaikka virtaerot pysyvätkin edelleen suurina. Lisäksi kuvasta on havaittavissa, että matalammilla liitoslämpötiloilla lämpötilan aiheuttama käyttöiän lasku on selvästi riippuvainen led-komponenttien ottamasta virrasta. Ledin kirkkaus on riippuvainen sen läpi kulkevasta virrasta, ja siksi olisi tärkeää löytää mahdollisimman suurta virtaa kestävät komponentit.

Eri valmistajilla on erilaisia ja eri materiaaleista valmistettuja komponentteja, joten eri valmistajien ledeillä on melko erilaisia lämmönkesto-ominaisuuksia. Monet valmistajat tarjoavat tietoja lämmön vaikutuksista käyttöikään tai valotehon muutokseen erikseen pyytämällä. Floroiun (2016) esittämässä kuvassa 4 onkin kerätty eri valmistajien tietolehdiltä antamista tiedoista kuvaaja liitoslämpötilan vaikutuksesta valotehoon.



Kuva 4. Eri valmistajien ledien valovirtojen käyrät liitoslämpötilan funktiona (Florioiu 2016)

Kuvasta 4 näkee hyvin, että vertaillen seitsemän eri valmistajan led-komponenttien valovirtojenkäyriä eri liitoslämpötiloilla voi niistä löytyä suuriakin eroja. Huonoimmillaan led ei saavuta edes normaalissa huonelämpötilassa täyttä sadan prosentin kirkkautta. Parhaimmilla ledeillä taas liitoslämpötilan nouseminen lähelle sataa astetta ei laske ulosannettavaa valotehoa kuin jotain prosentteja.

Suomessakin on tutustuttu ledien jäähdytykseen ja tutkittu, miten jäähdytystä voisi parantaa. VTT:n tutkija Eveliina Juntunen perehtyi tutkijaryhmän kanssa, Tekesin rahoittamassa tutkimuksessa, hyvin lämpöä johtaviin läpivienteihin ledien jäähdytyksessä. Tulosten perusteella he totesivat, että: ”suoraan led-siirun alle asennettuna lämpöläpiviennit alensivat lämpöresistanssia noin 55 %, valaisimen piirilevyllä toteutetut lämmönjohtimet noin 30 %”. Tutkijat totesivat, että lämpöresistanssin pienentämisellä puoleen alkuperäisestä ledin liitoslämpötila laskee noin kymmenen astetta. (Partanen 2015.)

Ledit ovat kehittyneet hurjasti viimeisen kymmenen vuoden aikana ja tutkimus- sekä kehitystyö parantavat koko ajan ledien ominaisuuksia. Toistaiseksi ledien tietoja tutkiessa tuntuu, että yli 50 °C ympäristön lämpötilaan olevia led-valaisimia ei ole kovin paljon markkinoilla. Kuitenkin parhaimmillaan löysin valaisimia, jotka ovat suunniteltu 70 °C :en ympäristön lämpötilaan. Triluxin

(2017) valaisin on nettisivujen mukaan käytettävissä -30 °C – 70 °C ympäristön lämpötiloissa. Valaisimelle luvataan vielä lisäksi L80 = 50 000 h, jopa 70 °C ympäristön lämpötilassa (Trilux 2017). Näiden tietojen mukaan valaisin menettäisi korkeassa 70 °C:n ympäristön lämpötilassa vain 20 % nimellisestä valotehostaan 50 000 tunnin aikana.

3 LEDIEN AIHEUTTAMAT HÄIRIÖT

3.1 Yleistä häiriöistä

Aikaisemmin teollisuudessa yleisvalona käytetyt loisteputket ovat olleet suosittuja hinnan, tehokkuuden ja pitkän vaihtovälin takia. Ne ovat kuitenkin olleet aina herkkiä sähköjärjestelmän häiriöille. Jännitteen häiriöt ovat aiheuttaneet välkyntää, mikä taas aiheuttaa yliaalloja. Loisteputkien kirkkautta on ollut vaikea säätää, ja niillä on ollut melko huono valojako. Oikeanlaisilla valonohjaimilla toteutettuna led-valaisimet voidaan saada lähes immuuneiksi sähköverkon häiriöille. (Frater, Heffernan & Watson 2008.)

Vaikka ledit voidaan saada lähes immuuneiksi sähköverkossa oleville häiriöille, niin ledit usein aiheuttavat häiriöitä. Ledien aiheuttamista häiriöistä yleisimpiä ovat varmaan yliaallot. Yliaallot jaetaan harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Lisäksi ledit voivat aiheuttaa esimerkiksi sähköverkon säröytymistä (THD), välkyntää, taajuuden vaihtelua, epäsymmetriaa sekä loistehoa.

Useimmat sähköverkon häiriöt aiheuttavat erilaisia ei-toivottuja toimintoja, etenkin elektroniikkaan. Laitteet voivat esimerkiksi käynnistyä tai sulkeutua itsekseen. Lisäksi häiriöt voivat aiheuttaa vikajännitettä väärissä paikoissa, joka voi pahimmillaan aiheuttaa tulipaloriskin tai ei-toivottuja komentoja. Tämän työn osiossa, joka käsittelee ledien häiriöitä, keskitytään kuitenkin pääasiassa ledien aiheuttamiin yliaaltoihin ja kokonaissärökertoimeen.

3.2 Yliaallot

Yliaaltoja esiintyy harmonisina ja epäharmonisina. Suomen sähköverkko toimii 50 hertsin taajuudella, ja harmoniset yliaallot ovat sen kerrannaisia. Harmoniset yliaallot summautuvat verkon taajuuden päälle, ja aallot on numeroitu ko-

konaiskertoimen mukaan. Esimerkiksi 100 hertsin yliaalto on 2. yliaalto ja vastaavasti 150 hertsin yliaalto on 3. yliaalto jne. Harmonisia yliaaltoja aiheuttaa epälineaarista kuormista, joiden virta ei ole sinimuotoista. Esimerkiksi ledien hakkuriteholähteet muodostavat siniaallosta poikkeavaa virtaa, joten ilman suodattimia ledeistä aiheutuu harmonisia yliaaltoja. (Alanen & Hätönen 2006, 16.)

Alasen ja Hätösen mukaan (2006) epäharmonisia yliaaltoja syntyy erittäin epälineaarissa kuormissa, jolloin virta vaihtelee jännitteestä riippumattomasti. Epäharmoniset aallot eivät ole perustajuuden kerrannaisia, joten summautuessaan ne aiheuttavat joko yli tai alle 50 hertsin vaihtelua. Epäharmoniset yliaallot ovat hyvin harvinaisia, eivätkä ne aiheuta mainittavia ongelmia nykypäivän sähköverkossa, Alanen ja Hätönen (2006, 16) jatkavat.

Frater, Heffernan ja Watson (2008) tutkivat loisteputken, loisteputken korvaavan led-putken ja uuden led-valaisimen aiheuttamia häiriöitä. He tutkivat loisteputkivalaisinta tehokerrointa korjaavan kondensaattorin (PFCC) kanssa sekä ilman. Heidän tutkimustulostensa perusteella (Liite 1) loisteputkivalaisin ilman kondensaattoria aiheutti enemmän kolmatta yliaaltoa kuin led-putki tai uusi led-valaisin. Kondensaattorin kanssa loisteputki pääsi häiriöiden suhteen hyvin lähelle led-versioita kolmannella yliaallolla. Seuraavilla yliaalloilla loisteputkivalaisin muodosti vähemmän yliaaltoja kuin led-versiot, jopa ilman kondensaattoria.

3.3 Kokonaissärö- ja k-kertoimet

Fourier-analyysin avulla pystytään tarkastelemaan yliaaltoja sinifunktion summana. Alkuperäinen signaali aikatasossa muutetaan Fourierin kaavan 2 avulla niin sanotuksi särökertoimeksi. (Alanen & Hätönen 2006, 16.)

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} (f) e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

jossa	f	alkuperäinen signaali aikatasossa	[Hz]
	ω	kulmataajuus	[rad]

F Fourier muunnettu signaali aikatasossa
[Hz]

Fourierin kaavan 2 avulla saadulla särökertoimella voidaan laskea kokonaissärökerroin THD (= Total Harmonic Distortion, kaava 3) neliösummana suhteellisista yliaalloista eli särökertoimista. Kokonaissärökerroin (3) kertoo perusaaltoa suurempien taajuuksien kokonaismäärän. (Alanen & Hätönen 2006, 16.)

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{F_n}{F}\right)^2} \quad (3)$$

jossa F_n n:nnen yliaallon komponentti [Hz]
 F signaalin perustaajuuden tehollisarvo [Hz]

Kokonaissärökerroin antaa suhteellisen arvon perustaajuuteen nähden kaikille yliaalloille. Tässä työssä ei tarvitse laskea näitä kertoimia, sillä käytetty verkkoanalysointilaite antaa arvot suoraan mittausten yhteydessä.

Kokonaissärökertoimen ohella yliaaltojen vaikutuksia kuvaava kerroin on k-kerroin (engl. K-factor). Kokonaissärökertoimen lisäksi k-kertoimen pitäminen kurissa on olennaista, sillä ne aiheuttavat sähköjärjestelmissä ongelmia, kuten muuntajien ylimääräistä lämpenemistä ja nousevaa nollajohtimen virtaa. K-kerroin on painotettu tekijä, jonka avulla saamme laskettua aaltomuotoisista yliaalloista luvun, jossa otetaan huomioon korkeampien taajuuksien suurempi vaikutus muuntajien lämpenemiseen. (Lunera 2017.)

K-kerroin kuvaa yliaaltojen aiheuttamaa muuntajien lämpenemistä. Jos K-kerroin on 1.0, niin kuorma on lineaarinen, eikä yliaaltoja esiinny. Mitä suurempi K-kerroin on, sitä suurempi on yliaaltojen lämmitysvaikutus. K-kerroin kertoo erityisesti virran aiheuttamista yliaalloista kuormassa. Muuntajia on saatavilla erilaisilla k-kertoimilla, jonka takia k-kertoimelle ei ole suoraan mitään standardirajaa, vaan käytössä olevan muuntajan k-kerroin kertoo sallitun arvon. (Xitron Technologies 2017.)

3.4 Sähkön laadun mittaaminen

Jotta kuluttajat saavat riittävän laadukasta sähköä, on sekä laitteille että sähköverkolle määritelty kansainvälisiä sekä kansallisia suosituksia ja standardeja. Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid onkin suorittanut vuodesta 2003 asti erilaisia verkon mittaus- ja analysointitoimenpiteitä ja näin seurannut sähkön laatua. (Rauhala 2011, 24-25.)

Pääasiassa standardeissa sähkön laatua määritellään jännitteestä. Yleisimmin sähkönlaatustandardit rakentuvat standardin SFS-EN 50160 ja sen kansallisten sovellutusten pohjalle. Nykyään kuitenkin muun muassa ANSI/IEEE -standardeissa otetaan kantaa myös virran tarkasteluun, jolloin laatuhäiriöiden aiheuttajat pyritään löytämään. (ABB 2000, 7.)

Standardin SFS-EN 50160 (2010, 22) mukaan *normaaleissa käyttöolosuhteissa, kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin keskimääräisistä tehollisarvoista tulee olla pienempiä tai yhtä suuria kuin taulukossa 1 annettu arvo. Lisäksi jakelujännitteen kokonaissärökertoimen tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %.*

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

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

Taulukko 1 Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot liittymiskohdassa järjestyslukuun 25 saakka prosentteina perustajuisesta jännitteestä u_1 (SFS-EN 50160 2010, 22)

Taulukon 1 mukaan esimerkiksi kolmas ja seitsemäs yliaalto saavat olla enintään 5,0 % nimellijännitteestä viikon pituisilla mittauksilla kymmenen minuutin välein otettavista tehollisista keskiarvoista. Mittaukseni ovat vuorokauden mit-

taisia, joten suoraan standardin määrittämiä arvoja ei voi katsoa, mutta mielestäni tässä työssä onkin tärkeämpää vertailla tehtyjä mittauksia ennen led-valaisimia ja led-valaisimien sytyttämisen jälkeen. Toki saatuja arvoja on hyvä verrata standardin arvoihin.

4 MITTAUSTEN SUORITTAMINEN

Tutkin led-valaistuksen häiriöitä Stora Enson kartonkitehtaalla konosalin jälkikäsitellyssä. Tulevien remonttien takia konesalissa tuli ajankohtaiseksi uusia yleisvalaistusta. Vanhat valaisimet olivat katossa olevia 400 W monimetallivalaisimia, ja ne on tarkoitus korvata Greenledin 235 W sigma-tuoteperheen led-valonheittimillä. Uudet valonheittimet on tarkoitus sijoittaa salin reunoihin antamaan epäsuoraa valoa seinien ja katon kautta. Mittausvaiheessa uusia valaisimia oli kytkettynä 27 kappaletta, ja niitä tulee lopulliseen käyttöön vielä muutama lisää.

4.1 Käytetyt mittalaitteet, ohjelmat ja mittaukset

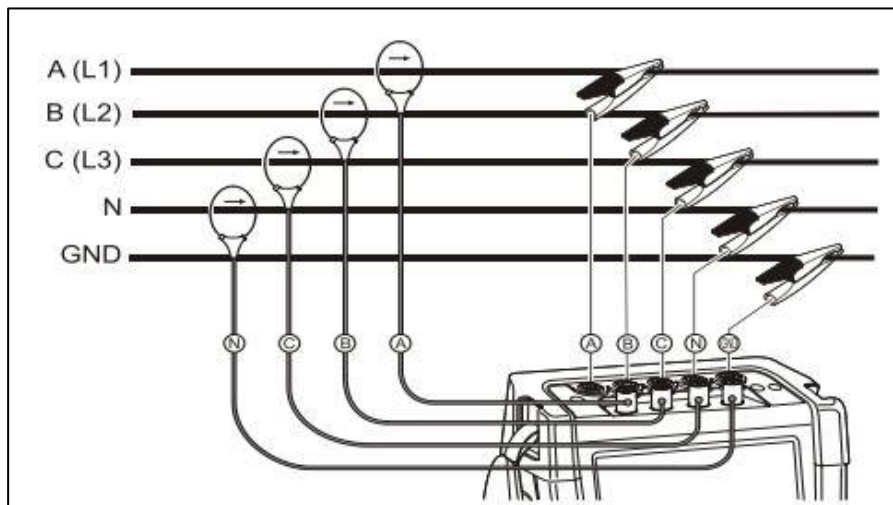
Käytössä mittauksissa oli Fluken 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysaattori. Fluke 435 on monipuolinen mittalaite, jolla pystyy mittaamaan muun muassa jännitettä, virtaa, taajuutta, jännitekuoppia ja -kohoumia, tehoa, energiaa, epäsymmetriaa, käynnistysvirtaa, välkyntää, yliaaltoja sekä tallentaa tapahtumien aaltomuotoja (Fluke 2017a; Fluke 2012, 20).

Mittauksissa käytettiin Logger-toimintoa, joka on tiedonkeruutoiminto, jossa on mahdollista tallentaa eri lukemia samanaikaisesti käyttäjän määrittelemän aikavälin ajan. Logger-toiminto tallentaa määritellyin aikaväleihin asetetut minimi-, maksimi- ja keskiarvot. Mittarin lyhyin mahdollinen tallennusaika on 0,25 s ja pisin 2 h. Mittausten minimipituus on yksi tunti ja maksimipituuden määrittelee käytettävissä oleva muistikapasiteetti. Lisäksi mittarin voi asettaa mittaamaan välittömästi tai määritellä ajastetun aloituksen. (Fluke 2012, 103.)

Tulosten analysointi tapahtuu Fluken omalla Power Log -ohjelmalla, joka tulee analysaattorin mukana. Ohjelma kerää tiedot ja piirtää erilaisia kuvaajia ja diagrammeja tuloksista. Ohjelman kautta on mahdollista tulostaa raportteja ja viedä tietoja esimerkiksi Excelliin.

4.2 Ennen mittauksien aloittamista

Analysaattorin kytkentä suoritettiin joustavien virtapihtien ja niin sanottujen hauenleukojen avulla kolmivaiheisena kytkentänä (kuva 5). Virtapihtilenkit asetettiin ensin nuolen osoittamaan suuntaan virran kulkusuunnan mukaan eri vaiheiden ja nollajohtimen ympärille. Sen jälkeen hauenleuat asetettiin ensin maajohtimeen ja sitten jännitteisiin osiin kahvarokkeiden alle, jottei johtimen eristeitä tarvinnut rikkoa.



Kuva 5. Analysaattorin kytkentä kolmivaiheisena (Fluke 2012, 36)

Ennen mittausten aloittamista analysaattoriin asetettiin nimellisjännite, -taajuus sekä kytkentätyypiksi 3-vaiheinen tähtikytkentä. Ennen mittausten aloittamista on hyvä muistaa tarkistaa mittarin oskilloskooppi- ja vektorinäytöiltä, että kytkennät ovat suoritettu oikein. Kuvassa 6 on esimerkki analysaattorin vektorinäytöstä, josta näkee, että virtapihtien muodostamat nuolet ovat suhteessa oikein päin verrattuna jännitteen muodostamiin nuoliin. (Fluke 2012, 37.)



Kuva 6. Esimerkkikuva analysaattorin vektorinäytöstä (Fluke 2012, 37)

Kuvan 6 vektorinäytön esimerkissä on 60 hertsin 3-vaiheinen 120 voltin järjestelmä, jossa pidemmät nuolet näyttävät jännitteen suunnan ja lyhyemmät nuolet kertovat virran suunnan. Kuvassa 6 nähdään oikea vaihejärjestys, koska A, B ja C (värit: musta, punainen ja harmaa) kulkevat myötäpäiväisessä järjestyksessä.

4.3 Mittaukset

Mittaukset suoritettiin heinäkuun alussa 2017. Mittauksissa käytettiin analysaattorin Logger-toimintoa. Toiminnolla voidaan määrittää halutut kerättävät suureet, mittauksen kesto ja mittausten tallennusväli. Mittausten tallennusväliksi aseteltiin yksi sekunti ja mittausajaksi 24 tuntia. Vertailumittaus tehtiin ensin ilman led-valaisimia, jonka jälkeen toinen mittaus tehtiin vuorokauden ajan led-valaisimien kanssa. Mittari määriteltiin keräämään yliaaltoja, kokonaissärökerrointa, virtaa, jännitettä, taajuutta, välkyntää, energiaa sekä tehoa. Standardin SFS-EN 50160 (2010) mukaiset kokonaissärökertoimen raja-arvot ovat viikon ajalta, joten tehdyissä mittauksissa ei standardin määritelmä täyty. Vuorokauden mittauksella saamme kuitenkin suuntaa antavaa tietoa, mutta ennen kaikkea olennaisinta on vertailla mittauksia ennen ja jälkeen led-valaisimia.

Kerätyistä suureista poimittiin virrat niin sanottuina tehollisina arvoina. A_{rms} -arvo, eli neliöllinen keskiarvo (Root-Mean-Square), antaa virran tehollisen arvon. Toisin sanoen arvo kertoo virran arvon, jolla kuorma käyttäisi saman tehon kuin vastaavalla tasavirralla. RMS-arvo on tarkin suure, etenkin silloin, kun virta poikkeaa siniaallosta. (Fluke 2017b.)

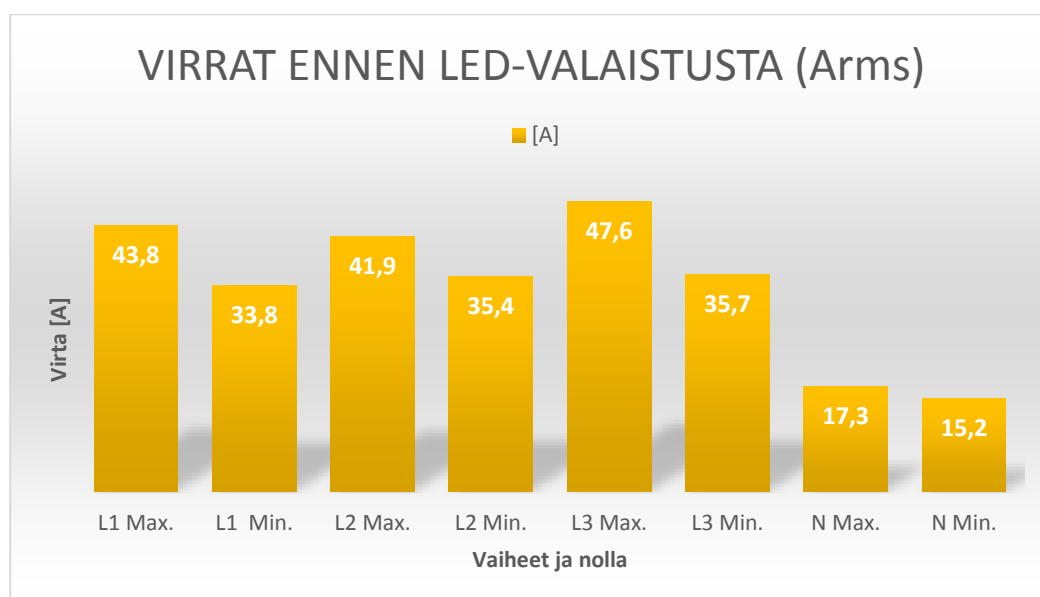
Ennako-oletuksena oli, että led-valaistus aiheuttaisi vertailumittaukseen verrattuna suurempia yliaaltoja. Lisäksi olettamuksena oli, että kokonaissärökerroin muuttuu vertailumittaukseen nähden suuremmaksi.

5 TULOKSET JA ANALYSOINTI

5.1 Ennen led-valaistusta

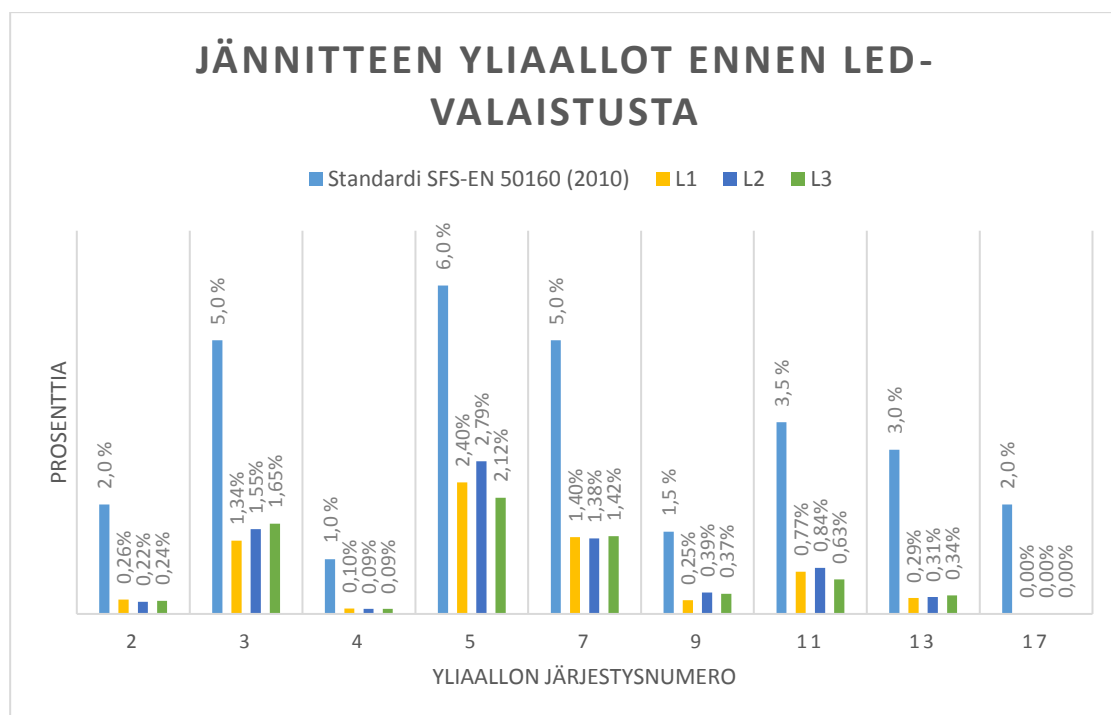
Mittari kytkettiin ryhmäkeskuksen syöttökaapeliin, ja mittaus oli vuorokauden pituinen ennen led-valaisimien päälle laittoa. Kyseessä on valaistuskeskus, joka syöttää alueen valaistusta, muutamaa kameraa ja yhden toimiston sähköjä, jossa on muutama tietokone. Mittaustuloksiin tutustuminen alkoi katsomalla ensin, että virrat ja jännitteet näyttivät suurin piirtein realistisia lukemia, jotta voitiin todeta mittarin ja mittaustulosten olleen kunnossa. Jännitteiden vaihtelut olivat vuorokauden aikana jokaisella vaiheella hyvin samanlaisia. Vaihejännite oli suurimmillaan hieman alle 235 voltia ja alhaisimmillaan hieman yli 221 voltia.

Mittaustuloksista poimittiin vaihejohtimen sekä nolajohtimen maksimi- ja minimiteholliset virrat (A_{rms}). Virrat vaihtelivat vuorokauden aikana suurimmillaan alle viisi ampeeria eri vaiheiden välillä (kuva 7). Vaihejohtimien maksimivirroissa oli hieman hajontaa, mutta vuorokauden aikaiset minimivirrat vaihejohtimissa olivat hyvin lähellä samaa kokoluokkaa.



Kuva 7. Mitatut virrat ennen led-valaistusta

Yliaaltoja tutkiessa keräsin vuorokauden ajan mittauksista eri yliaaltojen maksimiarvoja, koska se kertoo suurimman yliaaltolukeman mittausten aikana. Standardin SFS-EN 50160 (2010) mukaan yliaallot tulisi ottaa 95 % keskiarvon arvon mukaan, mutta koska mittauksissa ei tällä kertaa täyty standardin määritelmät muiltakaan osin, vertaan huippuarvoa standardin arvoon. Tuloksista käy hyvin nopeasti selville, että mikään maksimiyliaaltolukema ei ylitä standardin määrittämää lukemaa (kuva 8).

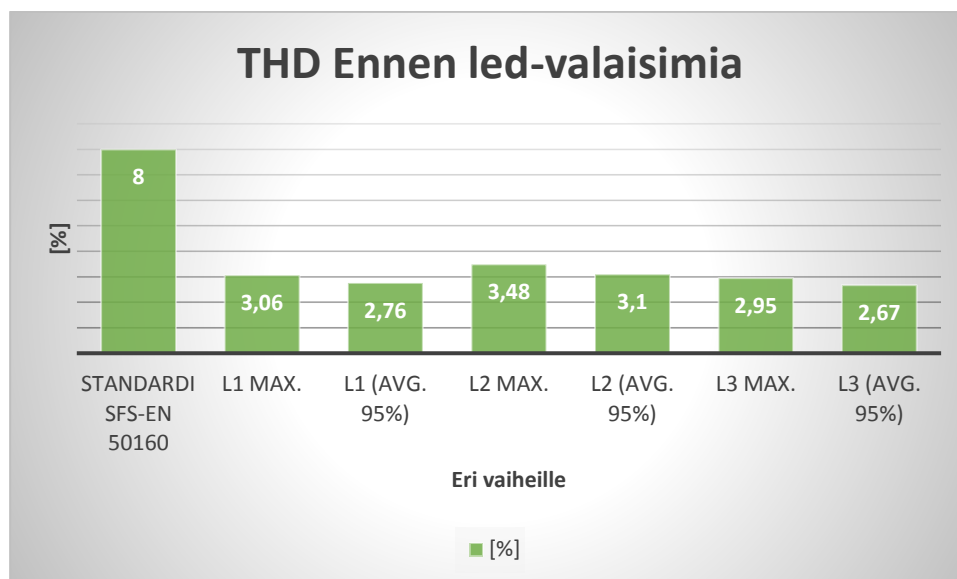


Kuva 8. Jännitteen yliaallot ennen led-valaistusta verrattuna standardiin SFS-EN 50160.

Kuvasta 8 näkee hyvin, että suurimmat yliaallot ovat jokaisella vaiheella viidennellä yliaallolla. Viidennenkin yliaallon maksimiarvot alittavat kuitenkin reilusti standardin määrittämän raja-arvon. Kuvan kaavioon keräsin ne yliaallot, joille standardi SFS-EN 50160 antaa yli yhden prosentin raja-arvot, joita löytyi mittauksista. Viimeinen yliaalto, jolle mittari antoi lukemia, oli yliaalto numero 15. Silläkin arvot olivat kuitenkin vain prosentin kymmenesosa.

Myös kokonaissärökerrointa (THD) tutkiessa tulokset olivat saman suuntaisia kuin yliaalloissa. Eli myös kokonaissärökerroin alitti reilusti standardin arvot kaikilla vaiheilla (kuva 9). Keräsin kokonaissärökertoimista jokaisen vaiheen

maksimisärön sekä 95 % keskiarvolukeman, joka kertoo tasaisemman keskiarvon, kun lyhyitä piikkejä tai kuoppia ei huomioida.



Kuva 9. Kokonaissärökerroin ennen led-valaistusta verrattuna standardiin SFS-EN 50160

Standardin SFS-EN 50160 (2010) mukainen kokonaissärökertoimen maksimiarvo on 8 %. Suurimmillaan mittausten aikana kokonaissärökerroin on ollut vaiheella 2, mutta sekin lukema on alle puolet standardin arvosta (kuva 9). Kokonaissärökerroin on siis kaiken kaikkiaan hyvissä lukemissa ennen led-valaistuksen päälle laittamista.

Jännitteen, virran, yliaaltojen ja kokonaissärökertoimen lisäksi keräsin mittaus-tuloksista k-kertoimen arvot. Muuntajan k-kertoimen arvoa ei minulla ole tiedossa, joten vertailen myöhemmin tässä työssä k-kertoimien arvoja keskenään ennen ja jälkeen led-valaistusta. Lisäksi poimin loisenergiat mittauksen ajalta, sillä olen kuullut, että led-valaistus tuottaisi loistehoa. Liitteen 3 kuvasta 1 näemme vuorokauden aikana muodostuneen loisenergian eri vaiheille ja kokonaismäärän yhteensä. Loisenergiää muodostui vuorokauden aikana melkein 163 kVARh (liite 3, kuva 1).

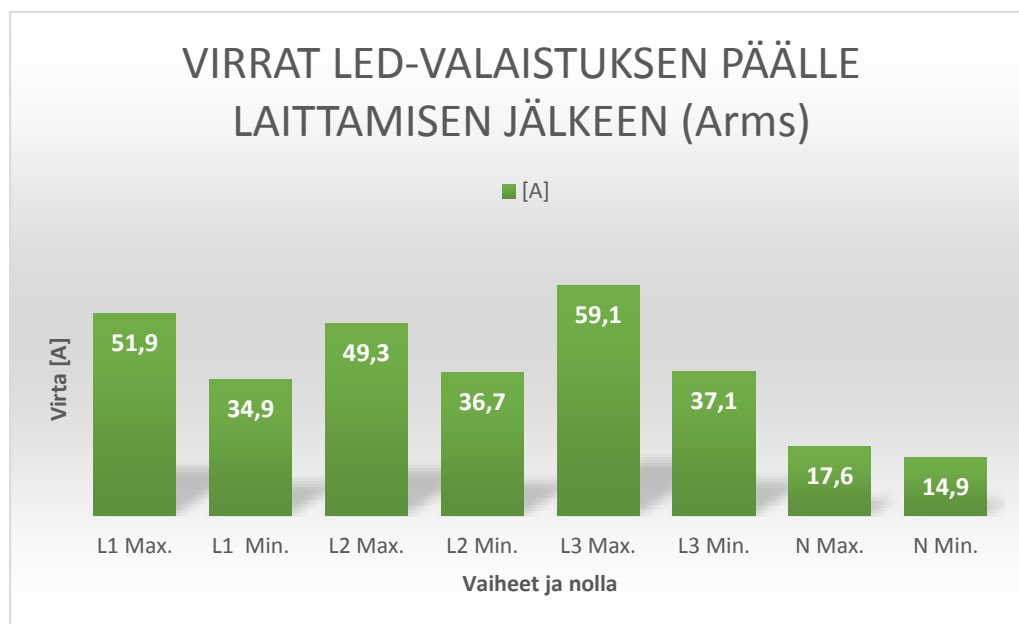
5.2 Led-valaisimet päällä

Ensimmäisen mittauksen valmistuttua mittarista tarkistettiin, että tiedot ovat tallentuneet ja uusi mittaus aloitettiin. Mittarin johtoihin ei tarvinnut koskea, sillä mittaukset suoritettiin samalla kytkennällä. Mittarin asetettiin mittamaan

samoja suureita kuin ensimmäisessä mittauksessa. Led-valaisimet kytkettiin päälle ryhmä kerrallaan noin puolen minuutin välein toisistaan.

Jännitelukemat näyttivät uudessa mittauksessa, ledit päällä, samansuuntaiselta kuin aikaisemmassa mittauksessa. Vaihejännitteiden vaihteluväli oli kuitenkin muutaman voltin korkeammalla, sillä suurimmillaan vaihejännite oli noin 238 voltia ja pienimmillään reilu 223 voltia (vrt. ennen led-valaistusta 235 V ja 221 V).

Virta-arvoissa oli odotettu muutos ylöspäin (kuva 10), sillä led-valaistuksen myötä keskuksen ottama teho kasvoi yli 6 kW. Led-valaisimet on jaettu tasaisesti eri vaiheille, joten jokaisen vaiheen kuorman tulisi nousta noin 2,1 kW. Teoreettisesti siis jokaisen vaiheen virran tulisi nousta noin 9,3 ampeeria ensimmäiseen mittaukseen verrattuna ($I = P / (U \cdot \cos\phi) = 2100 \text{ W} / (230 \text{ V} \cdot 0,98) = 9,3 \text{ A}$) (Mäkelä, Soininen, Tuomola & Öistämö 2014, 126).



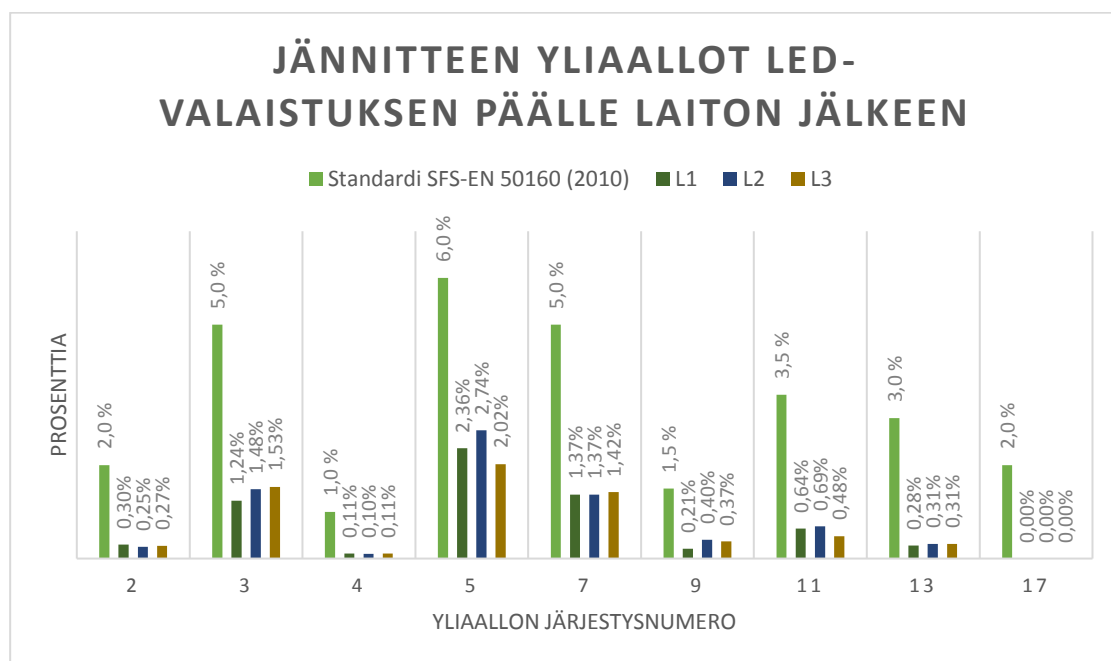
Kuva 10. Virrat led-valaistuksen päälle laitoin jälkeen

Kuvasta 10 näemme mitatut teholliset virrat toisessa mittauksessa, kun led-valaisimet ovat päällä. Vaiheiden maksimivirrat nousivat ensimmäisellä ja toisella vaiheella hieman vähemmän kuin pelkät led-valaistukset kuluttavat laskennallisesti. Kolmannella vaiheella maksimivirrannousu vertailumittaukseen oli kuitenkin noin 12 ampeeria eli vähän enemmän kuin ledien laskettu virrankulutus vaiheittain (9,3 A). Virtojen epätasainen nousu selittyy varmasti sillä, että

keskuksessa oli muitakin syöttöjä kuin vain uusi led-valaistus ja eri päivinä on ollut erilaista käyttöä.

Tuloksia tutkiessa nousi esiin nollavirrat. Nollavirta on vaihevirtojen vektorisumma. Vaihe-eron takia nollajohtimen virta ei ole vaihejohtimien virran suuruinen, mutta epäsymmetrinen kuorma ja yliaallot aiheuttavat nollajohtimeen virtaa (Harsia 2013). Liitteen 2 kuvasta näkyy hyvin, kuinka kuorman vaihtelut vaikuttavat nollajohtimen virtaan. Ajanhetkellä yksi, kun ensimmäisen vaiheen led-valaisimet laitetaan päälle, muodostuu nollajohtimeen virtapiikki. Samoin käy ajanhetkellä kaksi, kun toisen vaiheen valaisimet laitetaan päälle.

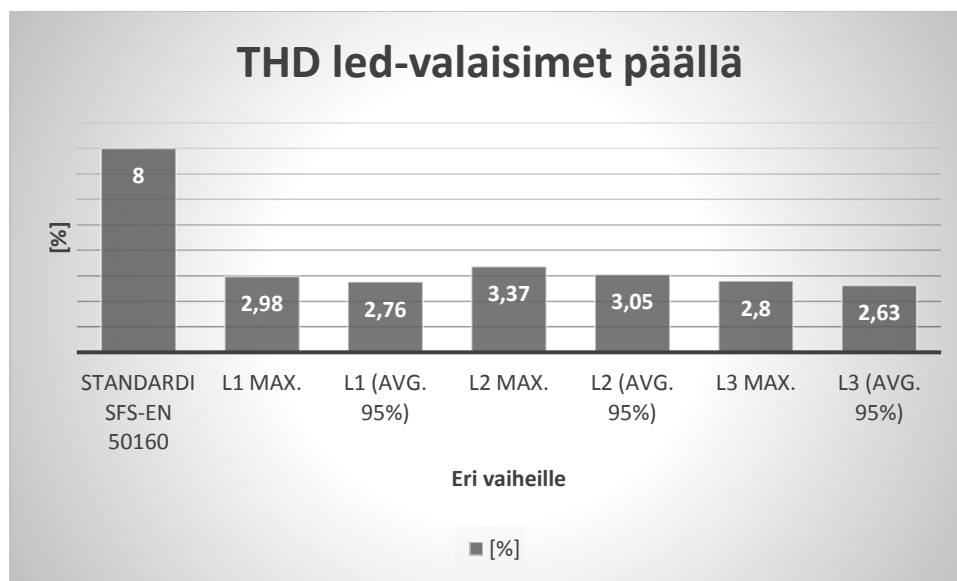
Yliaalloista keräsin jälleen samojen aaltojen maksimi-arvot kuin aikaisemmassakin mittauksesta (Kuva 11). Vertasin lukemia jälleen standardin SFS-EN 50160 arvoihin ja lisäksi katsoin, kuinka paljon eroja yliaalloilla ilmeni ensimmäiseen mittaukseen nähden.



Kuva 11. Jännitteen yliaallot led-valaistuksen päälle laiton jälkeen

Yliaaltolukemat jäivät reilusti standardin SFS EN 50160 (2010) alapuolelle (kuva 11). Mielenkiintoista oli huomata, että ainoastaan toisella yliaallolla ovat kaikkien vaiheiden yliaaltojen arvot nousseet ensimmäiseen mittaukseen verrattuna (vrt. kuva 8). Lisäksi viides yliaalto oli ensimmäisellä vaiheella suurempi kuin ensimmäisessä mittauksessa, mutta kaikki muut yliaallot olivat pienentyneet.

Kokonaissärökertoimelle oli käynyt samalla tavalla kuin suurimmalle osalle yli-
alaloista; eli se oli pienentynyt kaikilla vaiheilla. Kokonaissärökertoimet olivat
kuitenkin hyvin lähellä samaa kuin ensimmäisessä mittauksessa. Mikään toi-
sen mittauksen maksimikokonaissärökertomista ei saavuttanut edes puolta
standardin SFS-EN 50160 (2010) määrittelemästä kahdeksasta prosentista
(kuva 12).



Kuva 12. Kokonaissärökerroin led-valaistuksen päälle laitton jälkeen.

Keräsin toisesta mittauksesta myös k-kertoimet ja liitteestä 2 (kuva 2) löytyvät
loisenergiat. Kokonaisloisenergia oli nyt noin 179 kVArh, eli se oli noussut en-
simmäisestä mittauksesta. Kokonaisloisenergian nousua ei kuitenkaan selitä
led-valaistus, sillä ensimmäisen ja toisen vaiheen loisenergia laskivat, mutta
kolmannella vaiheella taas nousi reippaasti ensimmäiseen mittaukseen verrat-
tuna (liite 3).

5.3 Tulosten analysointi

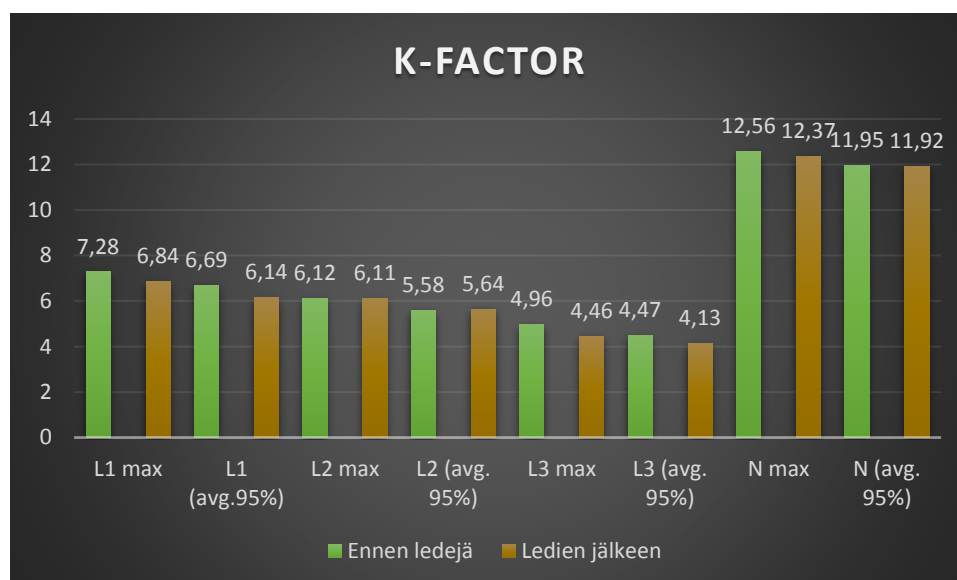
Mittaukset ennen led-valaistusta ja led-valaistuksen jälkeen antoivat monin ta-
voin eri tuloksia. Kaikkein selvimmät uudet led-valaisimet näkyivät maksimivir-
tojen nousuna eri vaiheille. Minimivirrat olivat kahden eri mittauksen aikana
melko saman suuruisia, vaikka uudet valaisimet lisäsivät syöttökeskuksen
kuormitusta. Tämä kertoo siitä, että keskuksessa on kuormanvaihteluita eri vii-
konpäivinä, joten mittaustulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia.

Mittaustulosten perusteella nämä led-valaisimet eivät aiheuta yliaaltoja sähköverkkoon. Ainoastaan toisen yliaallon arvot nousivat ensimmäisestä mittauksesta, joten on teoriassa mahdollista, että led-valaisimet aiheuttavat toista yliaalloa. Yliaaltojen muutokset voivat kuitenkin olla selitettävissä muiden keskuksessa olevien ryhmien kuormituksella.

Kokonaissärökertoimet pysyivät lähes samana molemmissa mittauksissa, vaikka kuormitus nousi jopa kymmenen ampeeria jollain vaiheella. Mittauksilla saatujen kokonaissärökertoimien arvojen perusteella led-valaisimet eivät aiheuttaneet keskukseseen enempää kokonaissäröä.

Liitteen 4 kuvassa 1 on kerättyä kokonaissärökertoimet ja yliaallot molemmista mittauksista samaan kuvaan. Kuvan kaavioista huomaa hyvin, kuinka samanlaisia arvoja molemmat mittaukset ovat antaneet.

Muuntajan ylimääräistä lämpenemistä aiheuttavat k-kertoimet olivat ennen led-valaistuksen päälle laittamista suurempia kuin led-valaistus päällä (kuva 13). Kuvassa 13 on k-kertoimien maksimiarvot ja 95 % keskiarvolukemat eri vaiheille sekä nollajohtimelle.

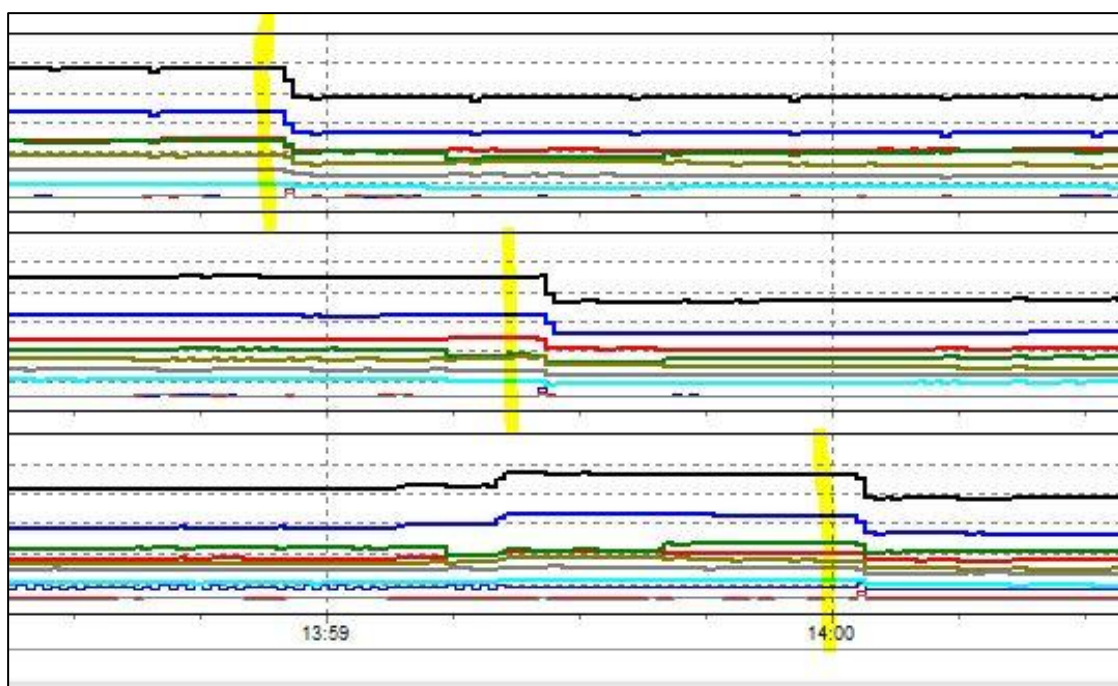


Kuva 13. K-kerroin ennen ledejä sekä ledien päälle laitton jälkeen

Chauvin Arnouxin (s.a.) mukaan piireissä, jossa sijaitsee tietokoneita ja paljon yksivaiheisia piirejä voi k-kerroin olla 12-20. Tällöin muuntajan k-kertoimen ar-

von ei tule olla alle 20. Keskuksessa, joka syöttää valaistusta, ei ole paljoa tietokoneita ja kuormat ovat suhteellisen tasan. Saadut mittaustulokset, joiden mukaan vaiheilla alle kymmenen olevat k-kertoimet ja nollajohtimessakin alle 15 ovat siis ilmeisesti hyviä.

Mielenkiintoisen mittaustulokseen törmäsin, kun tutkin ledien käynnistyshetkiä. Kuvasta 14 näemme, kuinka virran muodostamat yliaallot laskevat ledien käynnistyessä.



Kuva 14. Kuvankaappaus Power Log -ohjelmasta ledien käynnistyshetkellä

Kuvaan 14 on merkattu keltaiset pystyviivat hieman ennen ledien käynnistämistä eri vaiheille. Ylimpänä on ensimmäinen vaihe ja alimpana kolmas vaihe. Led-valaisimet sytytettiin noin 30 sekunnin välein kahden aikaan mittauspäivänä. Kuvassa 14 näkyy ylimpänä mustana kuvaajana kokonaissärökerroin, jonka jälkeen ylhäältä alaspäin kolmas-, seitsemäs- viides-, toinen- ja neljäsyliaalto. Jokaisen vaiheen kohdalla yliaaltokuvaaja laskee hieman ledien syttyessä.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

6.1 Tärkeimmät tulokset

Työn ensimmäisessä osuudessa tutustuttiin siihen, miten lämpö vaikuttaa ledien käyttöikään. Ledien suurin vihollinen on lämpö ja etenkin ympäristön lämpö on valmistajien vaikea hallita. Ilmoittamalla sallitut käyttöympäristön lämpötilarajat, valmistajat sekä maahantuojat pyrkivät siirtämään vastuun asiakkaalle valaisimen asettamisesta liian korkeaan lämpötilaan. Ympäristön lämpötila vaikuttaa suuresti ledien liitoslämpötilaan, joka taas vaikuttaa suoraan ledin käyttöikään ja kirkkauteen.

Usein suuntaviivana on pidetty, että ympäristön lämpötilan noustessa 10 astetta ledien käyttöikä puolittuu (Glamox Luxo Lightning 2013, 6). Glamox Luxo Lightning (2013, 6) kuitenkin lupaa omille valaisimilleen jopa alle 10 000 tunnin käyttöiän laskun kymmenen asteen ympäristön lämpötilan nousua vastaan.

Ledit ovat kehittyneet paljon, ja nykyään ledejä on saatavilla erilaisilla jäähdytyskeinoilla melko korkeisiin lämpötiloihin. Korkeissa ympäristön lämpötiloissa kuitenkin korostuu komponenttien laatu ja innovaatiot jäähdytysmenetelmistä. Kova kilpailu led-markkinoilla ajaa kehitystyötä kovaa vauhtia eteenpäin ja varmasti tulevaisuudessa ledejä on saatavilla vieläkin korkeampiin ympäristön lämpötiloihin.

Toisessa työn osiossa tutkittiin ledien aiheuttamia häiriöitä. Näistä otettiin erityiseen tarkasteluun yliaallot ja kokonaissärökerroin. Myös k-kerrointa ja loisenergiaa sivuttiin ohimennen.

Mittaustulosten perusteella voidaan väittää, että kyseiset led-valaisimet eivät aiheuta merkittävässä määrin yliaalloja, kokonaissäröä tai muuntajan kuumeenista aiheuttavaa k-kerrointa. Suurin osa mitattavista suureista laskivat led-valaisimien sytyttämisen jälkeen, vaikka maksimivirrat nousivat. Kokonaisloisenergia nousi toisessa mittauksessa, jossa oli mukana led-valaisimet. Uudet led-valaisimet eivät kuitenkaan selitä loisenergian nousua, sillä ensimmäisen ja toisen vaiheen loisenergiat laskivat ensimmäiseen mittaukseen nähden (liite 3, kuvat 1 ja 2).

6.2 Tulokset käytännössä

Eri valmistajien suosittelemat ympäristön lämpötilat vaihtelevat suuresti ja onkin suositeltavaa selvittää, minkälaiseen käyttöympäristöön valaisimia suunnitellaan. Saatujen ympäristön lämpötilarajojen ja olosuhteiden perusteella kannattaa lähteä etsimään sopivaa valaistusta myös ledien puolelta, sillä valaisimet kehittyvät jatkuvasti.

Mikäli erikoisen korkeissa olosuhteissa on mahdollista koekäyttää led-valaisimia, esimerkiksi muutaman vuoden ajan, näkee varmasti jo tuloksia kirkkaiden laskun suhteen. Tosin muutamassa vuodessa led-valaistus voi kehittyä niin paljon, että koejakson jälkeen on saatavilla jo parempiakin vaihtoehtoja.

Ledien aiheuttamien häiriöiden suhteen ei mielestäni ole tarpeellista ryhtyä toimenpiteisiin tässä kohteessa. Mitkään häiriöiden arvot eivät ylittäneet asetettuja rajoja, eikä tietääkseni alueella ilmentynyt valaistuksen testien aikana mitään häiriöiden aiheuttamia outouksia.

7 LOPPUPÄÄTELMÄT JA -EHDOTUKSET

7.1 Mittausten luotettavuus

Mittausten luotettavuuden kannalta mietittynä käytetty Fluken mittari oli varmasti pätevä. Mittarin kalibroinnit olivat ajan tasalla ja käytössä olevien tietojen perusteella mittari oli kaikin puolin kunnossa. Mittausten epäluotettavuutta kuitenkin lisäsi suhteellisen lyhyt mittausaika (vuorokausi) ja eri viikoppäivinä suoritettut mittaukset.

Keskuksessa voi olla erilaisia kuormituksia eri viikoppäivinä ja eri kuukausina. Tarkimmat tulokset saisi varmasti mittaamalla esimerkiksi viikon jaksot tai edes samoina viikoppäivinä, eri viikkoina.

Myös mittaukselle asetettu tallennusaika (yksi sekunti) toi omat haasteensa. Vuorokauden aikaisesta mittauksesta, jokaisena sekuntina tallennettu data, muodostui yhteensä 86 400 tallennusta jokaisesta tallennettavasta suureesta.

Suuri mittausdatan määrä oli tuloksia tutkiessa melko työlästä ja Fluken tulostenkäsittelyohjelma Power Log olikin vähän väliä jumissa. Standardin SFS-EN 50160 (2010) mukaan esimerkiksi yliaallon rajat annetaan 10 minuutin mittausten keskiarvosta, joten sekunnin pituinen mittausten tallennusväli oli turhan tiheä.

Led-valaisimien ja lämmön yhtäläisyyksiä tutkiessa löysin mielestäni luotettavia artikkeleja sekä tutkimuksia. Monet lähteet olivat kuitenkin vuosikymmenen alkupuolelta tai vieläkin vanhempia, joten tulokset voivat olla jo kehittyneempiä tai kehitystyö on kesken.

7.2 Yliaaltojen kompensointi

Mikäli led-valaisimet aiheuttavat häiriöitä siinä määrin, että tulisi ruveta toimenpiteisiin, on yliaalloille olemassa muutamia erilaisia vaihtoehtoja. Suotimet ovat ehkä yleisin ratkaisu, ja niitä löytyy sekä aktiivisia että passiivisia. Muita kompensointiin toimivia laitteita ovat esimerkiksi kondensaattoriparistot, estokelalla tai ilman.

Kondensaattoriparistoilla suoritettu yliaaltojen kompensointi on parhaimmillaan silloin, kun yliaaltoja tuottavan kuorman osuus kokonaiskuormasta on pieni. Jos yliaaltoja tuottavan kuorman osuus kokonaiskuormasta kasvaa on yliaaltojen kompensointiin valittava estokelalla varustettu kondensaattori tai suodin. (Korpinen s.a., 25.)

Yhdelle taajuudelle viritetty passiivisuodin on hyvä ratkaisu, kun kaivataan edullista suodatusta järjestelmässä, jossa muodostuu paljon eri yliaaltoja. Suodin tulisi mitoittaa pienimmälle yliaaltokomponentille. Yhdelle taajuudelle viritetyn passiivisen suotimen ominaisuuksiin kuuluu se, että viritetyn taajuuden yläpuoliset aallot vaimenevat ja alapuoliset voivat vahvistua. Yhden taajuuden passiivisuodin on usein suosittu saneerauskohteissa. Suodin tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle yliaaltoja muodostavia kuormia. (ABB 2001, 24.)

Toinen passiiviratkaisu on usealle taajuudelle viritetty passiivisuodin. Tällaisessa suotimessa on useita haaroja, jotka ovat viritettynä järjestelmän pienimmille merkittäville yliaalloille. Usealle taajuudelle viritetty suodin vaimentaa aaltoja paremmin kuin yhden taajuuden suodin. Useille taajuuksille viritettyjä suotimia käytetään suurissa tasavirtakäytöissä, joissa on erillinen muuntaja. Passiivisuodatin voi kuitenkin luoda uusia resonansseja, jotka saattavat aiheuttaa muita yliaalto-ongelmia. (ABB 2001, 24-25.)

Kolmas ja kallein suodintratkaisu on aktiivinen suodin. Nämä suotimet säätävät yliaaltosäröjä aktiivisesti niiden muodostuessa. Aktiivisuotimen toiminta perustuu vastakkaisuuntaisen yliaaltokomponentin luomiseen, jolla suodin kompensoi kyseisen yliaallon. Nämä sopivat hyvin pieniin ryhmäkäyttöihin, mutta ovat melko kalliita verrattuna passiivisiin suotimiin. (ABB 2001, 25.)

Estokelapariustossa on kondensaattoriyksikkö, kuristin sekä kontaktori. Kondensaattori ja kuristin ovat viritetty siten, että niiden viritystaajuus on pienempi kuin pienin kompensoitava yliaalto. Viritystaajuuden alapuolinen osio on kapasitiivista, kun taas yläpuolinen osa on induktiivista. Estokelapariustot toimivat kuitenkin paremmin verkoissa, joissa on paljon loistehon kulutusta kuin pelkästään yliaaltojen suodattamiseen. (Korpinen s.a., 25.)

Suoraan yliaaltojen suodattamiseen suotimet siis toimivat parhaiten. Oikeanlaisen kompensointimenetelmän valinta täytyy kuitenkin aina miettiä tapauskohtaisesti. Verkossa esiintyvät yliaaltojen määrä sekä loisteho vaikuttavat tehtäviin valintoihin. Lisäksi täytyy miettiä kustannuksia sekä kuorman laatua.

LÄHTEET

ABB TTT-käsikirja 2000-07. 2000. Suomalaiset ABB-Yhtiöt. Luku 4: Sähkön laatu. Saatavissa: http://www.oamk.fi/~kurki/automaatio-labrat/TTT/04_0_S%84hk%94n%20laatu.pdf [Viitattu 29.9.2017]

ABB. 2001. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opas. Tekninen opas. Saatavissa: https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekninen_opas_nro_6.pdf [Viitattu 5.11.2017]

Alanen, R. Hätönen, P. 2006. Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta, 16. State of art -selvitys. Espoo. VTT. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2006/w52.pdf> [Viitattu 28.9.2017]

Chauvin-Arnoux. s.a. Muuntajien k-kerroin. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI_Vad-%C3%A4r-k-faktor.pdf [Viitattu 29.10.2017]

Floroiu, V. 2015. High Temperature, the enemy of LED performance: what you need to know. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/high-temperature-enemy-led-performance-what-you-need-know-floroiu> [Viitattu 17.10.2017]

Floroiu, V. 2016. The basics of LED heat management and why it is so important. WWW-artikkeli. Saatavissa: <https://www.linkedin.com/pulse/basics-led-heat-management-why-so-important-victor-adrian-floroiu?trk=mp-reader-card> [Viitattu 19.10.2017]

Frater, L., Heffernan B. & Watson N. 2008 Led Lightning for Industrial, Commercial and Institutional Premises. EEA Conference & Exhibition in Christchurch 20.-21.6.2008, Abstracts. Saatavissa: http://www.epe-centre.ac.nz/docs/research/LED_Frater-Heffernan-Watson_EEA2008_revA.pdf [Viitattu 23.10.2017]

Fluke. 2017a. Fluke 435 II -sarjan sähkönlaatu- ja energia-analysaattori. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/fifi/sahkonlaatuty-okalut/kolmivaiheinen/fluke-435-series-ii.htm?pid=73939> [Viitattu 30.9.2017]

Fluke. 2017b. Sähkösanasto. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.fluke.com/fluke/fifi/sovellukset/sahko/sahkosanasto> [Viitattu 8.11.2017]

Fluke. 2012. Fluke 434II/435II/437II 3-vaiheinen energia- ja sähkönlaatuanalyysaattori. Käyttöohje. Saatavissa: http://assets.fluke.com/manuals/F430-II_um-fin0100.pdf [Viitattu 30.9.2017]

Glamox Luxo Lightning. 2013. Kymmenen asiaa, jotka sinun tulee tietää ledeistä. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://glamox.com/upload/2013/09/26/fi_singlepages-2.pdf [Viitattu 19.10.2017]

Harsia P. 2013. Nollajohtimen mitoitus. WWW-dokumentti. Saatavilla: <http://tate.blogs.tamk.fi/sahkoinen-talotekniikka/johdon-mitoitus/ylivirtasuojaus/nollajohtimen-mitoitus/> [Viitattu: 8.11.2017]

Heliospectra. 2015. Busting six myths about led grow lights -Heat (Running Temperature). WWW-Artikkeli. Päivitetty 17.3.2015. Saatavissa: <https://www.heliospectra.com/blog/busting-six-myths-about-led-grow-lights-heat-running-temperature> [Viitattu 2.19.2017]

Korpinen L. s.a. Yliaalto-opus. PDF-dokumentti. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf> [Viitattu: 8.11.2017]

Lightning Research Center. 2003. How are LEDs affected by heat? WWW-Artikkeli. Ei päivitystietoa. Saatavissa: <http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightningswers/led/heat.asp> [Viitattu 16.10.2017]

Lunera. 2017. Total Harmonic Distortion and Lunera ballast led technology. Application note. Saatavilla: <https://www.lunera.com/wp-content/uploads/2017/09/Lunera-MH-LED-App-Note-Total-Harmonic-Distortion-and-Ballast-LED-Technology-08112016B.pdf> [Viitattu 26.10.2017]

Partanen P. 2015. LED-tutkijan loistava tulevaisuus. *TEK*. 7.4.2015. Verkko-lehti. Saatavissa: <https://lehti.tek.fi/tekniikka/led-tutkijan-loistava-tulevaisuus> [Viitattu 26.10.2017]

Rantanen, K. 2006. Palkitut ledit syntyivät sisulla ja tuurilla. WWW-Artikkeli. Päivitetty 17.8.2006. Saatavissa: https://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/palkitut_ledit_syntyivat_sisulla_ja_tuurilla [viitattu 28.9.2017]

Rauhala, T. 2011 Sähkön laadun seuranta. *Fingrid* 24-26 Saatavissa: http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/Ajankohtaista%20liitteet/Yrityslahdet/2011/fingrid_1_2011.pdf [Viitattu 29.9.2017]

SFS-EN 50160. 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. Painos.

Stora Enso. 2017. About us. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://renewable-packaging.storaenso.com/about-us/mills/ingerois-mill/finnish> [viitattu 28.9.2018]

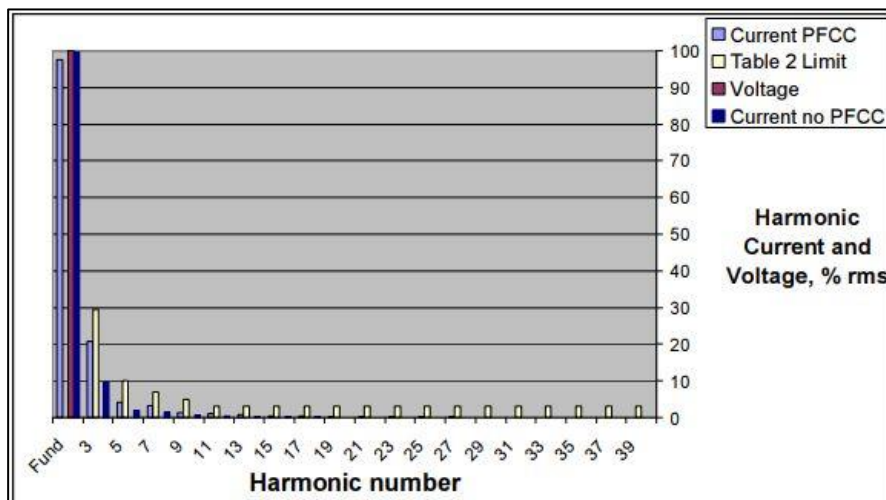
Mäkelä M., Soininen L., Tuomola S., Öistämö J. 2014. Tekniikan kaavasto: Matematiikan, fysiikan, kemian ja lujuusopin peruskaavoja sekä SI-järjestelmä. 11. painos. Tampere. Amk-kustannus Oy Tammertekniikka.

Trilux. 2017. Mirona FIT-TP TB LED10000-840 ETDD -valaisin esite. Saatavissa: <https://www.trilux.com/products/in/Mirona-Fit-TP-TB-LED10000-840-ETDD/?retainFilter=true> [Viitattu 22.10.2017]

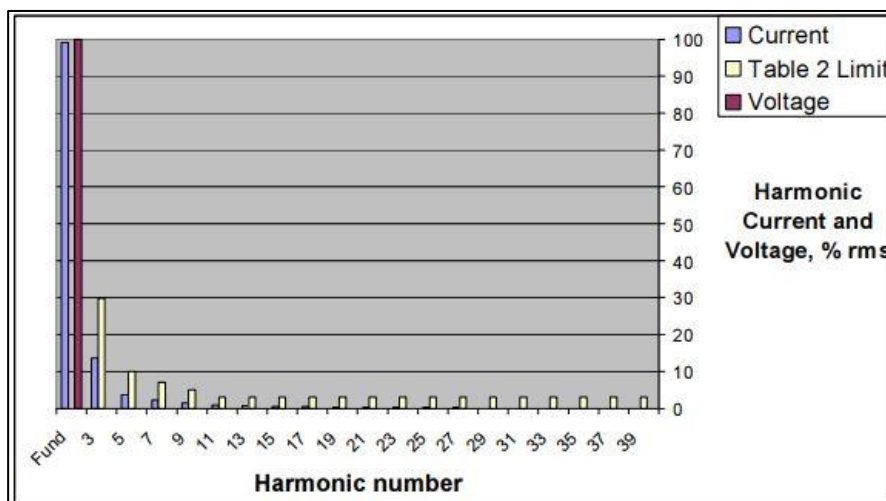
Whitaker T. 2010. Fact or Fiction – LEDs don't produce heat. WWW-Artikkeli. Päivitetty: 10.5.2005. Saatavissa: <http://www.ledsmagazine.com/articles/2005/05/fact-or-fiction-leds-don-t-produce-heat.html> [Viitattu 3.10.2017]

Xitron Technologies. 2017. K-Factor Defined. Application note AN102. Saatavissa: <http://www.xitrontech.com/assets/002/5787.pdf> [Viitattu: 27.10.2017]

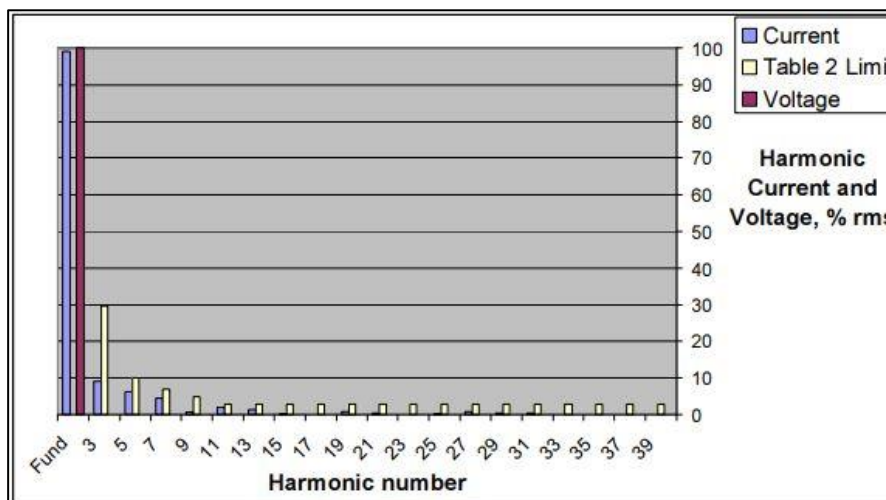
Fraterin, Heffernanin ja Watsonin (2008) tutkimuksen tulokset eri valonlähteiden yliaaltojen osalta.



Kuva 1. Loisteputken (42W) aiheuttamat yliaallot sinilähteellä (Frater ym. 2008).

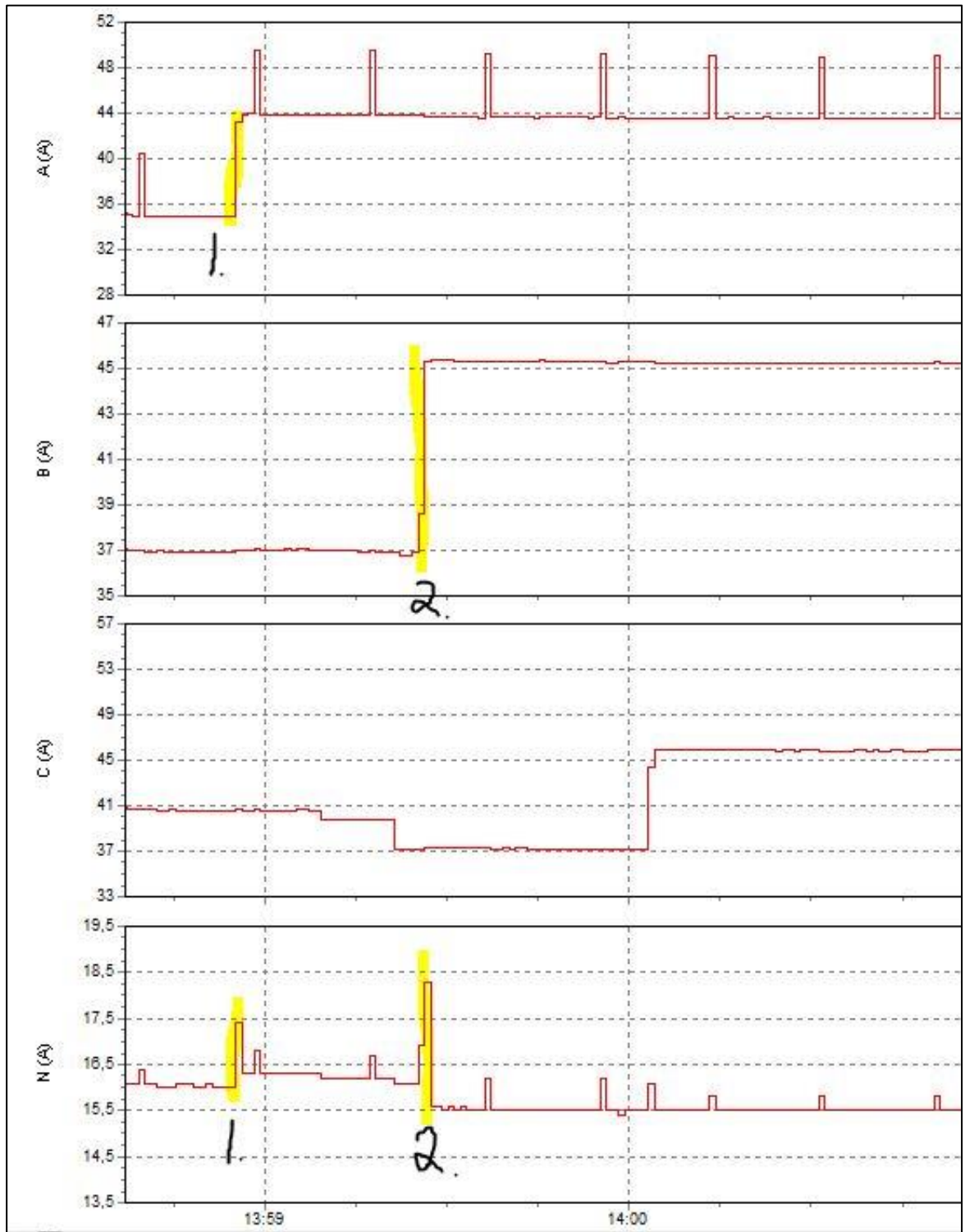


Kuva 2. Led-putken (26W) aiheuttamat yliaallot sinilähteellä (Frater ym. 2008).



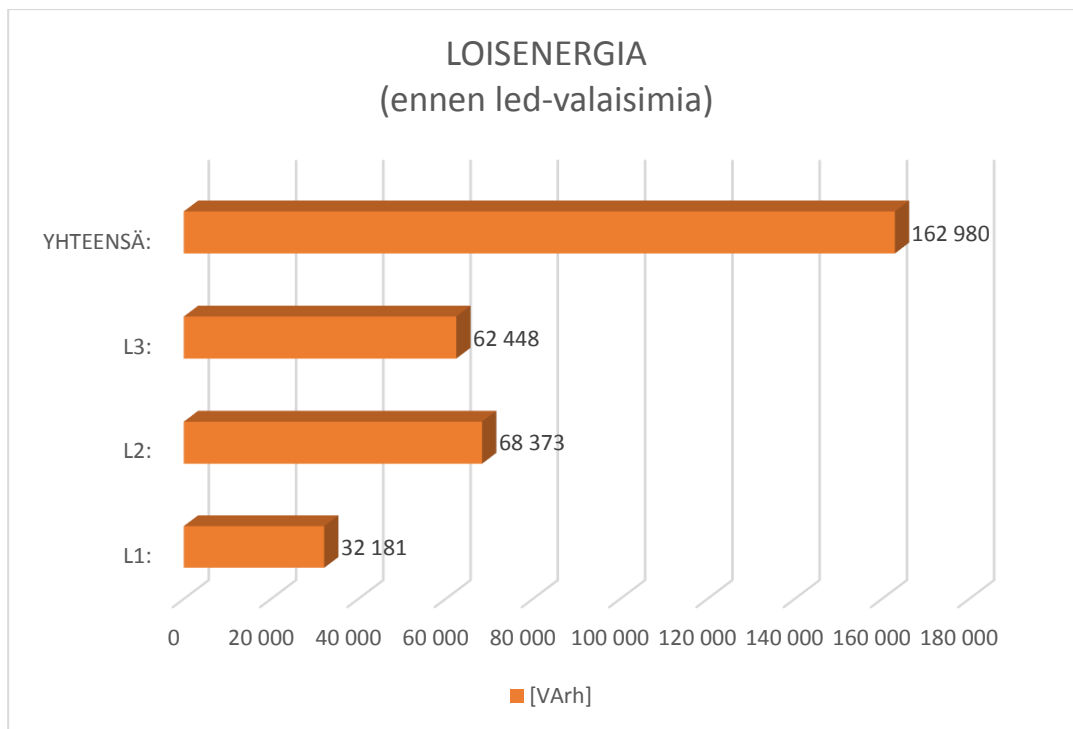
Kuva 3. Uuden led-valaisimen (35W) aiheuttamat yliaallot sinilähteellä (Frater ym. 2008).

Epäsymmetrisen kuormituksen vaikutus nollavirtaan. Kuvassa ylhäältä alaspäin vaihe yksi, kaksi ja kolme sekä alimpana nollajohdin.

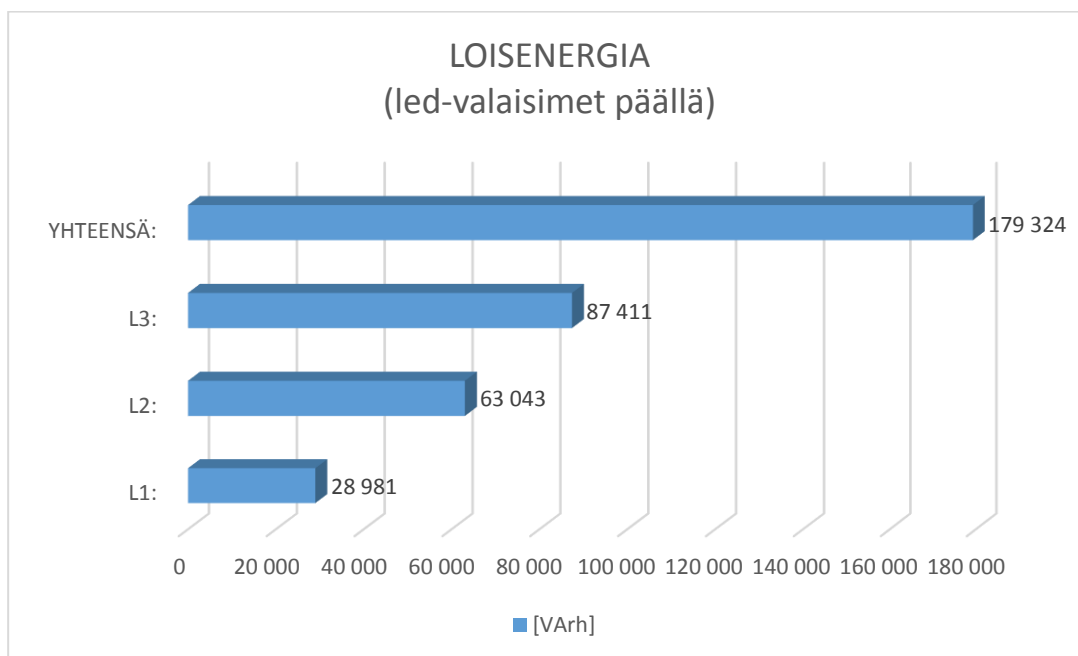


Kuva 1. Kuvankaappaus PowerLog -ohjelmasta. Epäsymmetrian vaikutus nollavirtaan.

Loisenergiämäärät mittausten ajalta.

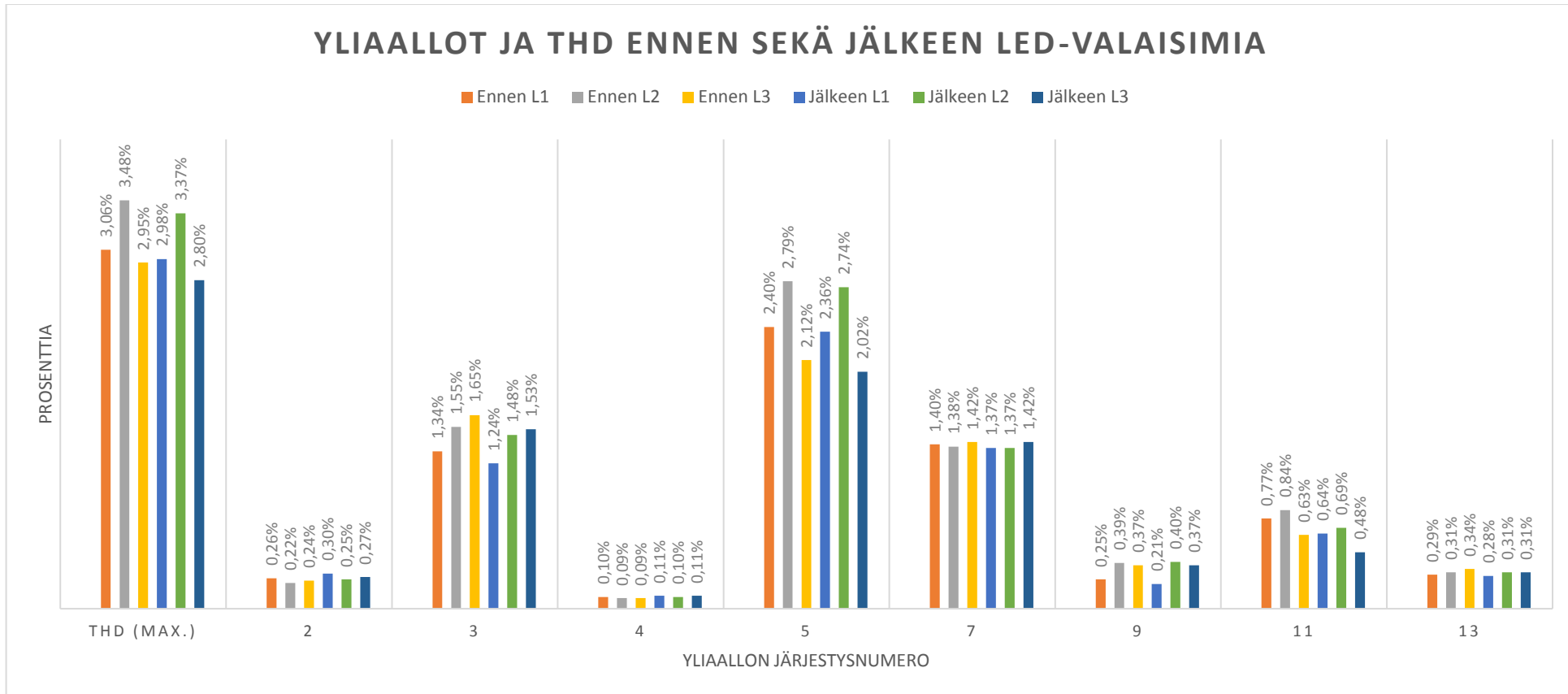


Kuva 1. Loisenergia ennen led-valaisimia vuorokauden ajalta.



Kuva 2. Loisenergia led-valaisimien päälle laittamisen jälkeen vuorokauden ajalta

Kokonaissärökerroin ja yliaallot ennen led-valaistusta sekä led-valaistuksen päälle laittamisen jälkeen eri vaiheilla.



Kuva 1. Loisenergia ennen led-valaisimia vuorokauden ajalta.