

**LED-VALAISTUKSEN VAIKUTUKSET KIINTEISTÖN
SÄHKÖVERKOSSA**
**Impacts caused by LED-lighting in a property electricity
network**
Tuukka Tähti

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
LUT School of Energy Systems
Sähkötekniikka

Tuukka Tähti

LED-valaistuksen vaikutukset kiinteistön sähköverkossa

2020

Kandidaatintyö

30 sivua, 7 kuvaa ja 3 taulukkoa

Tarkastaja: TkT Jukka Lassila

Ohjaaja: Insinööri Christian Gustafsson

LED-valaistus on yleistynyt viime vuosina niin yksityisasunnoissa kuin julkisissa kiinteistöissä ja teollisuudessa. Ledeihin siirtymiseen kannustaa ledien parempi energiatehokkuus ja pidempi käyttöikä korvattaviin valaisimiin nähden. LED-valaistus ei kuitenkaan ole täysin ongelmatonta, sillä valaisimien sähköinen rakenne ja niissä käytetyt komponentit synnyttävät niitä syöttävään verkkoon sähkönlaatua heikentäviä ilmiöitä.

Työssä selvitetään, mitä vaikutuksia LED-valaistus synnyttää kiinteistön sähköverkkoon ja millä menetelmin vaikutuksia voidaan vähentää tai rajata. Työ toteutetaan kirjallisuuskatsauksena ja siinä hyödynnetään sähköalan kirjallisuutta sekä alan verkkojulkaisuja.

LED-valaistuksen vaikutuksia sähköverkossa voidaan pitää harmonisia yliaaltoja, kapasitiivista loistehoa sekä virtatransientteja. Ilmiöt heikentävät sähkön laatua, synnyttävät häviöitä, kuormittavat verkkoa ja voivat aiheuttaa sulakkeiden laukeamisia sekä vikaannuttaa verkossa olevia laitteita. Ongelmien vähentämiseksi on olemassa useita teknisiä ratkaisuja kuten yliaaltosuodattimia ja nollapistekytkentäreleitä. Näiden lisäksi vaikutuksia voidaan rajata suunnittelu- ja toteutusvaiheen ratkaisuilla, joilla voidaan rajata käynnistysvirtapiikkien suuruuksia ja minimoida loistehon suuruus.

Työssä kartoitettiin erilaisia ratkaisuja LED-valaistuksen aiheuttamien häiriöiden vähentämiseksi ja opinnäytetyö toimii taustamateriaalina valaistusuudistuksen suunnitteluun. LED-valaistuksen aiheuttamat ongelmat voivat olla hyvin vaihtelevia eri kohteissa, joten yleispätevää ratkaisua häiriöiden poistamiseen ei ole vaan kohteet vaativat tapauskohtaista tarkastelua. Valaistussaneerausta tehdessä on siis hyvä tietää mitä haittoja uusista valaisimista voi syntyä sähköverkkoon ja miten niitä tarvittaessa voidaan vähentää erilaisilla ratkaisuilla.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
LUT School of Energy Systems
Electrical Engineering

Tuukka Tähti

Impacts caused by LED-lighting in a property electricity network

2020

Bachelor's Thesis.

30 pages, 7 figures and 3 tables

Examiner: D.Sc. Jukka Lassila

Supervisor: Engineer Christian Gustafsson

The usage of LED-lighting has spread to private, public and industrial properties in few years. Better energy efficiency and longer lifespan of LEDs compared to older lighting technologies encourages to update lamps to LEDs. Despite the advantages of LEDs, they also have some negative effects to the electric network of the property where they are installed. Because of LED luminaires electrical structure and the components used in them having their specific features impairs LEDs the quality of electricity.

This bachelor's thesis sorts out what effects LED lighting creates to the electrical network and what solutions there are to cut and delimit the effects. This bachelor's thesis is carried out as a literature review where literature of electrical field is used.

LED lighting causes harmonics, capacitive reactive power and current transients to the electrical network. These phenomena impair the quality of the electricity, generate losses, loads the network, can trigger fuses and cause malfunctions of devices in the network. There are several technical solutions to reduce the problems such as harmonic filters and switching relays which can limit harmonics and current transients. Also design and installation solutions can reduce the effects of current transients and reactive power.

This bachelor's thesis surveys different solutions to limit the interferences caused by LED-lighting in an electrical network and works as a background material for designing a lighting renovation. The problems may vary in different surroundings so there isn't a universal solution to fix the issues. However, when planning a lighting renovation, it is good to know what issues it may generate and how to limit and reduce them with different solutions.

SISÄLLYSLUETTELO

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

1.	Johdanto	6
2.	Sähkön laatu	8
3.	LED-valaistuksen vaikutukset sähköverkossa.....	9
3.1	Yliaallot	10
3.1.1	Yliaaltojen aiheuttamat haittavaikutukset sähköverkossa	12
3.2	Loisteho	14
3.2.1	Loistehon aiheuttamat haittavaikutukset	15
3.3	Kytkevävirtasäykset.....	17
3.3.1	Käynnistysvirtapiikkien aiheuttamat haittavaikutukset sähköverkossa	18
4.	Yleisiä ratkaisuja sähkön laadun parantamiseksi	20
4.1	Loistehon vähentäminen.....	20
4.2	Passiivinen yliaaltojen suodatus	22
4.3	Aktiivinen yliaaltojen suodatus	23
4.4	Kytkevätransienttien minimointi	24
5.	Mahdollisia ratkaisuja case-ympäristössä	26
5.1	Case-ympäristön kuvaus.....	26
5.2	Ongelmat	26
5.3	Toimenpiteitä vaikutusten vähentämiseksi.....	27
6.	Yhteenveto	29
	Lähteet	30

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

CE	Conformité Européenne
EN	European Standard
LED	Light-Emitting Diode
SFS	Suomen standardisoimisliitto SFS ry
THD	Total Harmonic Distortion
$\cos \varphi$	tehokerroin
D	säröteho
f	taajuus
h	harmonisen yliaallon järjestysluku
P	pätöteho
Q	loisteho
S	näennäisteho
U	jännite
U_h	harmonisen yliaallon suhteellinen amplitudi
Z	impedanssi

1. JOHDANTO

LED-tekniikan kehitys ja paine energiatehokkaampiin valaistusratkaisuihin ovat viime vuosina ajaneet valaisinmarkkinat murrokseen. LED-valaisimet ovat korvaamassa perinteisemmät valaisintyypit niin asuinkiinteistöissä, kuin toimistoissa ja teollisuudessa.

LED-valaistuksen etuina perinteisempiin valaisimiin, kuten esimerkiksi loisteputkivalaisimiin nähden, ovat parempi hyötysuhde, valon laatu, sekä pidempi käyttöikä. LED-valaistuksessa on edustaan huolimatta haittoja, joita päivittäinen käyttäjä ei huomaa. Valtaosa LED-valaisimista eivät kuulu yliaaltohäiriötä rajoittava standardin EN 61000-3-2 piiriin, sillä ledien nimellisteho on usein alle 25 W, joka on standardin piirissä olevien valaisimien tehon alaraja. Ledien rakenteeseen kuuluva tasasuuntaussilta ja standardien asettamien rajojen puute aiheuttava sen, että valtaosa markkinoilla olevista LED-valaisimista syöttävät verkkoon häiriötä, joilla on syöttävään verkkoon sähkön laatua heikentäviä ominaisuuksia. Etenkin suurien valaisinryhmien ja valaisinkeskusten kohdalla häiriöt rasittavat verkkoa ja aiheuttavat sähkön siirtohäviötä, heikentävät yleisesti sähkön laatua ja voivat jopa aiheuttaa sähköpalon riskin, mikäli valaisimien vaikutuksia sähköverkkoon ei oteta huomioon ja tehdä tarvittavia toimia häiriöiden torjumiseksi (Ruuth. 2018).

Fortum Power and Heat Oy on toteuttamassa valaistusuudistusta Loviisan ydinvoimalaitoksella. Uudistuksessa merkittävä osa laitoksen loisteputkivalaisimien loisteputkista korvataan LED-putkilla, ja täten vähennetään laitoksen valaistuksen energiankulutusta ja parannetaan laitoksella yleisvalaistuksen laatua. Valaisinuudistus aiheuttaa tarpeen uusien valaisimien synnyttämien häiriöiden suodattamiselle.

Tämän työn tavoitteena on tehdä selvitys LED-valaistuksen aiheuttamista vaikutuksista teollisuusverkon sähkön laatuun ja selvittää ratkaisuja vaikutusten torjumiseen. Työssä keskitytään vertailemaan magneettikuristimilla toimivia loisteputkivalaisimia perinteisillä loisteputkilla ja LED-putkilla. Selvitys tuotetaan voimalaitoksen sähkösuunnitteluorganisaatiolle taustamateriaaliksi voimalaitokselle suunniteltaviin valaisinkeskusmuutoksiin.

Selvitystä tehdään seuraavien tutkimuskysymysten pohjalta:

- Mitä häiriöitä LED-valaisimet synnyttävät?
- Mitä haittaa syntyneistä häiriöistä on?
- Millaisia ratkaisuja on olemassa häiriöiden vähentämiseksi?

Selvitys toteutetaan pääsääntöisesti kirjallisuuskatsauksena, johon aineistoa etsitään sähköalan kirjallisuudesta, sekä tieteellisistä verkkojulkaisuista.

2. SÄHKÖN LAATU

Sähkölle, kuten lähes kaikelle mitattaville suureille voidaan asettaa laatuvaatimuksia. Vaatimukset määrittävät numeeriset raja-arvot, joiden sisällä sähkön eri ominaisuuksien tulee pysyä. Raja-arvot on asetettu, sillä sähköverkkoon liitetyt laitteet on suunniteltu toimimaan sähköverkon nimellistaajuuden, oikean jännitetason ja puhtaan siniaaltoisen jännitteen avulla (Korpinen. 2008). Huonolaatuinen sähkö voi aiheuttaa verkkoon kytkettyjen laitteiden ylimääräistä kuormittumista ja vikaantumisia. Laitteiden herkkyys sähkön laatuvirheille voi vaihdella tyyppikohtaisesti ja satunnaisia hajoamisia ei välttämättä osata yhdistää syöttävän verkon jännitteen vajaavaisuuksiin, vaikka kyseinen mahdollisuus on hyvä ottaa huomioon vikaantumisten syiden selvityksessä.

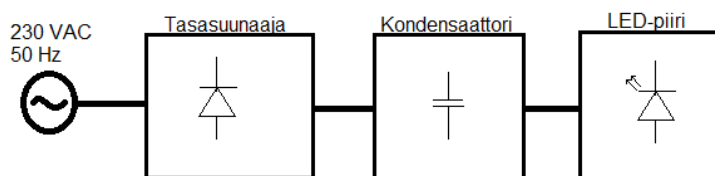
Eurooppalainen standardi SFS-EN 50160 määrittää rajat jännitteen ominaisuuksille. Standardissa otetaan kantaa jännitteen taajuuteen, suuruuteen, aaltomuotoon ja kolmivaiheisen jännitteen symmetrisyyteen (SFS. 2011). Jännitteen käyrämuotoon vaikuttaviin tekijöihin lukeutuu hitaat ja nopeat jännitevaihtelut, jännitepiikit ja yliaallot. Standardin SFS-EN 50160 asettamat rajat sähköverkon liittymäpisteen jännitteen laadulle riippuvat sähköverkko-liittymän koosta, eli onko kohde liitetty pien-, keski- vai suurjänniteverkkoon. Jännitteen raja-arvot mitataan sähkönkäyttäjän liittymäpisteessä sähköverkkoon (Sähköinfo. 2018). Mikäli sähkönkäyttäjän oma verkko on huomattavan suuri, on sähkön laadun tarkkailu verkon sisällä suotavaa, sillä verkossa esiintyvät häiriöt voivat aiheuttaa ongelmia myös käyttäjän oman verkon sisällä.

3. LED-VALAISTUKSEN VAIKUTUKSET SÄHKÖVERKOSSA

LED-valaisimet ovat yleistyneet valaisinmarkkinoilla eri sovelluksissa hyvien teknisten ominaisuuksiensa ja viime vuosina laskeneiden yksikköhintojen ansiosta (Motiva. 2019). Markkinoille on tuotu kahdella eri lähestymistavalla suunniteltuja LED-valaisimia, niin sanottuja jälkiasennus-malleja, jotka on pyritty saamaan muistuttamaan ulkoisesti vanhempiin teknologioihin perustuvia valaisimia, sekä uusia valaisinmalleja, jotka hyödyntävät LED-tekniikan luomat mahdollisuudet valaisinsuunnittelussa (Rossi. 2019). Uusissa LED-valaisimissa LED-paneelit ovat yleensä kiinteitä valaisimen osia ja tästä johtuen paneelin tullessa käyttöikänsä päähän, koko valaisin vaihdetaan. Jälkiasennettavat LED-valonlähteet ovat vaihdettavissa vanhoihin valaisinrunkoihin ja niitä on saatavilla hehkulamppujen ja loisteputkien korvaajiksi.

Kohteessa, jossa toteutetaan valaistussaneeraus, päädytään todennäköisesti vanhojen valaisimien korvaamiseen LED-valaisimilla. Ledien valintaa voidaan perustella muun muassa pienemmällä energiankulutuksella ja valaisimien pidemmällä eliniällä. Hyötyjen lisäksi on saneerauksessa otettava kuitenkin myös huomioon LED-valonlähteiden aiheuttamat haitat kiinteistön sähköverkossa.

LED on puolijohdekomponentti, joka säteilee näkyvää valoa, kun ledin anodilta johdetaan sähkövirtaa katodille. Ledin säteilemän valon väri riippuu käytetyistä puolijohdekomponenteista (Rossi. 2019). LED-valaisimen rakenne koostuu yksinkertaistettaessa vaihtosähköä tasasähköksi muuttavasta tasasuuntaussillasta, pulssimaista tasajännitettä tasaavasta kondensaattorista, sekä valoa tuottavasta puolijohdekomponentista.



Kuva 3.1 Yksinkertaistettu kuva LED-valaisimesta. LED-valaisimen rakenteessa etenkin tasasuuntaussilta ja kondensaattorit tuottavat häiriöitä sähköverkkoon.

LED-valaisimen rakenne sisältää komponentteja, jotka aiheuttavat kukin tyypilleen ominaisia sähköisiä ilmiöitä, joita voidaan pitää haitallisina sitä syöttävän verkon sähkön laatua

ajatellen. Tasasuuntauksessa käytettävä tasasuuntaussilta rajoittaa laitteen ottamaa virtaa, ja täten rikkoo syöttävän verkon siniaallon muotoa. Rikkoutunut siniaaltomuoto voidaan kuvata yliaaltojen avulla. Tasasuunnattua pulssimaista tasajännitettä tasoittava kondensaattori taas tuottaa kapasitiivista loistehoa ja laitteeseen kytkettäessä virta, aiheuttaa kondensaattorin latautuminen kytkentätransientin eli kytkentävirtapiikin.

3.1 Yliaallot

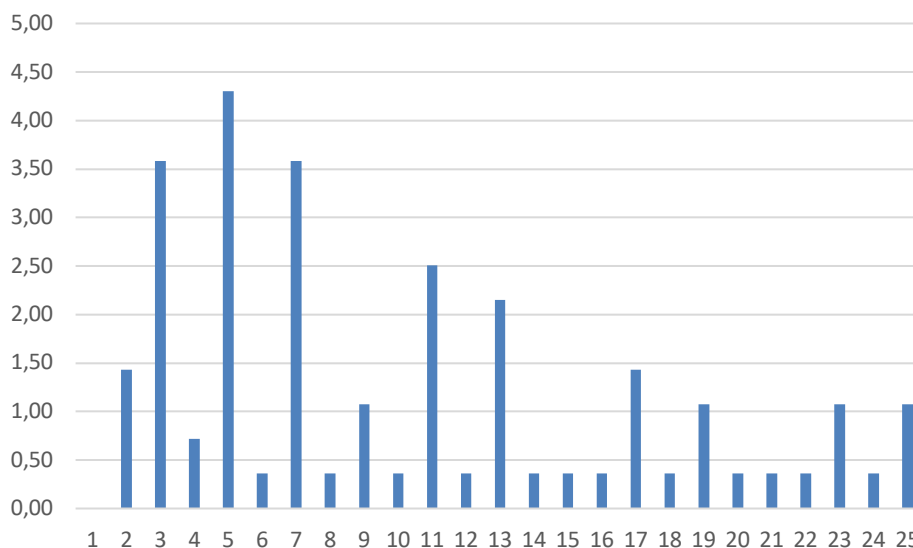
Yliaallot ovat melko tuore ja nopeasti yleistyvä ilmiö sähköverkossa. Yliaaltojen yleistymisen taustalla on pääasiassa tehoelektroniikan yleistyminen niin kuluttaja-, kuin teollisuuskäytössä. Valaistuksesta puhuttaessa yliaaltojen yleistymistä on edistänyt pienloisteputkivalaisimet ja etenkin niiden jälkeen markkinoilla yleistyneet LED-valaisimet. Edellä mainituissa lampputyypeissä yliaaltoja synnyttävät virran kulkua rajoittavat elektroniset liitännälaitteet, erityisesti niissä käytettävät tasasuuntaussillat.

Yliaallot voidaan jakaa kahteen ryhmään, harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin. Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kokonaislukujen kerrannaisia, eli jos perustaajuutena on 50 Hz, on esimerkiksi kolmas yliaalto 150 Hz taajuudella etenevä. Epäharmonisten yliaaltojen kertaluvut eivät ole kokonaislukuja ja niiden merkitys, sekä vaikutukset ovat huomattavasti pienempiä harmonisiin yliaaltoihin nähden. (Korpinen. 2008) Tässä tutkielmassa keskitytään pääasiassa harmonisiin yliaaltoihin.

Siniaaltomuotoisesta virran käyrästä poikkeava virran muoto voidaan olettaa koostuvan useasta eri taajuuksilla olevista sinimuotoisista aalloista. Tähän oletukseen perustuen yliaaltoja voidaan laskea ja mallintaa Fourier-analyysin avulla. Signaalit voidaan yhdistää Fourier-sarjaksi, jonka avulla signaalista voidaan eritellä kunkin kertaluvun yliaaltojen suuruusluokka. (Korpinen. 2008)

Yliaallot syntyvät, kun sähköverkosta tehoa ottava laite rajoittaa virran kulkua. Tämä johtaa siihen, että laite rikkoo sitä syöttävän virran sinikäyrän ja täten toimii yksinkertaistettaessa yliaaltolähteenä. Tasasuuntaajat ovat esimerkiksi yleisiä yliaaltolähteitä. Tavanomaisesti harmonisia yliaaltoja syntyy eri kertaluvuilla eri määriä.

Yliaaltojen jakauma voidaan esittää spektriesityksellä, jossa kunkin kertaluvun yliaaltokomponentti ilmoitetaan suhteellislukuna perustaajuuteen nähden (Korpinen. 2008).



Kuva 3.2 Harmoniset yliaallot voidaan esittää viivaspektriesityksenä, jossa yliaaltojen määrät ilmoitetaan prosentuaalisina arvoina perustaajuuteen nähden. Perustaajuus on jätetty pois kuvaajasta.

Harmonisten yliaaltojen kokonaismäärä voidaan laskea kaavalla:

$$THD = \sqrt{\sum_h^{40} (U_h)^2} \quad (3.1)$$

missä THD on harmoninen särö, h harmonisen yliaallon järjestysluku ja U_h yksittäisen harmonisen yliaallon suhteellinen amplitudi perustaajuiseen jännitteeseen nähden (ABB).

Standardi SFS-EN 50160, Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet, on asettanut sähköverkossa esiintyville harmonisille yliaalloille rajat, joiden sisällä yliaaltojen suhteellislukujen tulee pysyä sähköverkon asiakkaan liitännäkodassa (Suomen standardoimisliitto SFS. 2011). Taulukkoa 3.1 ja sen pohjalta tehtyä yliaaltojen jakauman spektriä esittävää kuvaa tarkasteltaessa voidaan huomata, että pienimpien parittomien kertalukujen yliaaltojen osuus yliaalloista on suurin. Pienten kertalukujen yliaalloilla on pidempi aallonpituus, ja tämän myötä niissä on suurin vaikutus perustaajuuden siniaallon muotoon. Yli kertaluvun 25 yliaaltojen vaikutukset ovat suhteessa jo marginaaliset, joten niitä ei huomioida standardissa (SFS. 2011).

Taulukko 3.1 Standardin SFS-EN 50160 asettamat rajat sallituille harmonisille yliaalloille verkon liittymiskohdassa (SFS. 2011)

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 %				

Harmoniset yliaallot voidaan jakaa järjestyslukunsa mukaan eri komponentteihin. Komponentit voidaan jakaa kolmeen ryhmään pyörimissuuntansa perusteella. Pyörimissuunta riippuu yliaallon taajuudesta.

Taulukko 3.2 Harmonisten yliaaltokomponenttien jakauma järjestysluvun mukaan (Korpinen. 2008)

Järjestysluku h	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus f (Hz)	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komponentti	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Taulukossa 3.2 esitettyjen komponenttien jakauma perustuu eri taajuuksilla olevien virtojen pyörimisnopeuksien vaihe-eroihin. Jokaisen järjestysluvun välillä on 120° vaihekulma. Tästä seuraa taulukossa esiintyvä systemaattinen jakauma komponenttien välillä. ”+”-merkkiset komponentit pyörivät perustaajuuden kanssa samaan suuntaan, ”-” -merkkiset komponentit pyörivät vastakkaiseen suuntaan ja ”0” -merkkiset komponentit eivät pyöri perustaajuuteen nähden ollenkaan. (Korpinen. 2008)

3.1.1 Yliaaltojen aiheuttamat hättävaikeudet sähköverkossa

Yliaallot ovat jännitekäyrän poikkeamia ideaalisesta siniaaltomuodosta ja vaikuttavat moninaisesti jännite- sekä virtavaihteluiden muodossa sähköverkkoon ja siinä oleviin laitteisiin. Kolmivaihejärjestelmässä oletuksena on, että järjestelmän kaikki kolme vaihetta olisivat symmetrisesti kuormitettu, jolloin nollajohtimessa ei kulje lainkaan virtaa. Tästä syystä pienjänniteverkon kolmivaihejärjestelmän yli 16 mm² nimellispoikkipinta-alan omaavissa kuparikaapeleissa ja yli 25 mm² alumiinikaapeleissa voi nollajohdin olla puolet vaihejohtimen pinta-alasta, sillä ideaalisesti siinä ei kulkisi ollenkaan virtaa ja täten poikkipintaa voidaan

pienentää materiaalikustannuksissa säästämiseksi. Kolmella jaolliset parittomat harmoniset yliaallot kuormittavat nollajohdinta summautumalla keskenään. Tämä mahdollistaa sen, että nollajohtimessa voi kulkea jopa suurempi virta kuin yksittäisessä vaihejohtimessa. Tämän lisäksi kaapeleiden reaktiivinen osa on induktiivinen, joten yliaaltojen suurempi taajuus kasvattaa kaapelin vaihtovirtaimpedanssia. (Sähköinfo. 2018)

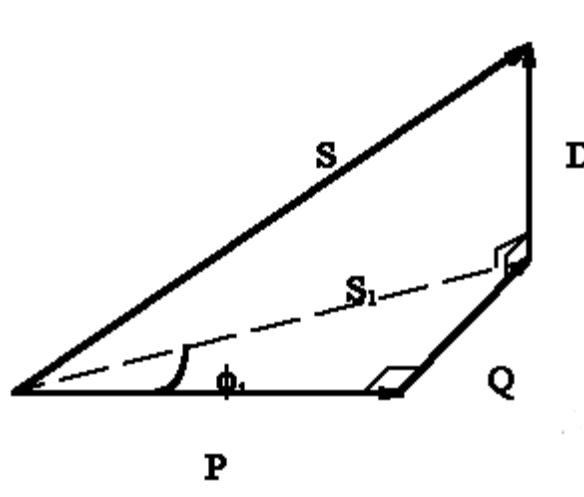
Edellä mainitut tekijät voivat aiheuttaa nollajohtimen ylikuormittumista ja johtimen lämpenemistä. Johtimen ylikuormittuminen vanhentaa kaapelin eristeitä nopeammin ja pahimmillaan valaistussaneerauskohteessa valaisinkeskusta syöttävän kaapelin nollajohdin voi olla valmiiksi iän haurastuttama ja alimitoitettu edellä mainitulle skenaariolle ja täten aiheuttaa paloturvallisuusriskin (Ruuth. 2018).

Kaapeleiden kuormittumisen lisäksi yliaallot aiheuttavat haittoja verkkoon kytketyissä laitteissa kuten vaihtosähkökoneissa ja muuntajissa. Harmoniset yliaallot aiheuttavat sähkömoottoreissa värähtelyä, lämpö- ja momenttihäviöitä. Haitat syntyvät taulukossa 3.2 esitettyjen yliaaltokomponenttien ominaisuuksien takia. Positiivisiksi luokitellut yliaallot pyörivät samaan suuntaan perustaajuutta nopeammin perustaajuuden kanssa ja aiheuttavat ylimääräistä lämpenemistä moottorissa. Negatiivisiksi luokitellut yliaallot pyörivät perustaajuuteen nähden päinvastaiseen suuntaan, ja täten tuottavat vastakkaista momenttia, joka pienentää moottorin kokonaismomenttia ja rasittaa samalla moottoria. Samaan tahtiin perustaajuuden kanssa pyörivät 0-yliaallot koostuvat kolmella jaollisista yliaalloista, joten ne summautuvat keskenään moottoria syöttävän keskuksen nollajohtimeen aiheuttaen johtimen kuormitusta. Yliaallot aiheuttavat kuormitushäviöitä yhtälön

$$S = \sqrt{P^2 * Q^2 * D^2} \quad (3.2)$$

mukaan missä S on näennäisteho, P pätöteho, Q loisteho ja D yliaaltojen aiheuttama säröteho. (Sähköinfo. 2018)

Säröteho on yliaaltokomponenteista koostuva teho, joka lisää kuorman näennäistehoa. Säröteho käyttäytyy näennäistehon laskennassa loistehon kaltaisesti ja omaa samat haittavai-
kutukset verkolle kuin loisteho. (Sähköinfo. 2018)

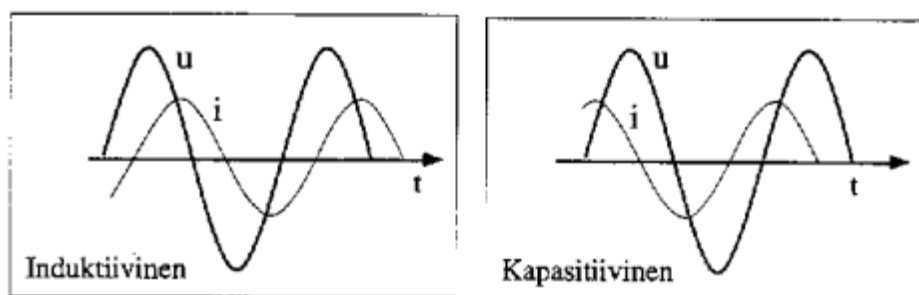


Kuva 3.3 Säröteho kasvattaa siirrettävää näennäistehoa (Korpinen. 2008).

3.2 Loisteho

Loisteho on nimensä mukaisesti pääsääntöisesti ei-haluttu ilmiö sähkönsiirrossa. Loisteho on ylimääräistä kuormaa siirtojohtoissa, jonka siirtäminen pitkiä matkoja on turhaa, sillä sen tuottaminen kulutuskohteen lähellä eli kompensointi on teknisesti suhteellisen helppo toteuttaa.

Loisteho voidaan jakaa induktiiviseksi- ja kapasitiiviseksi loistehoksi. Kelat synnyttävät induktiivista loistehoa rajoittamalla virran kulkua suhteessa jännitteeseen, kun taas kondensaattorit toimivat päinvastoin kelaan nähden rajoittaen jännitteen kulkua suhteessa virtaan (Ahoranta. 2008). Tyypillisiä loistehon kulutuskohteita ovat sähkömoottorit, jotka tuottavat induktiivista loistehoa. Tasasuuntauspiirin sisältävät laitteet tuottavat kapasitiivista loistehoa, sillä laitteet sisältävät tyypillisesti kondensaattoreita.



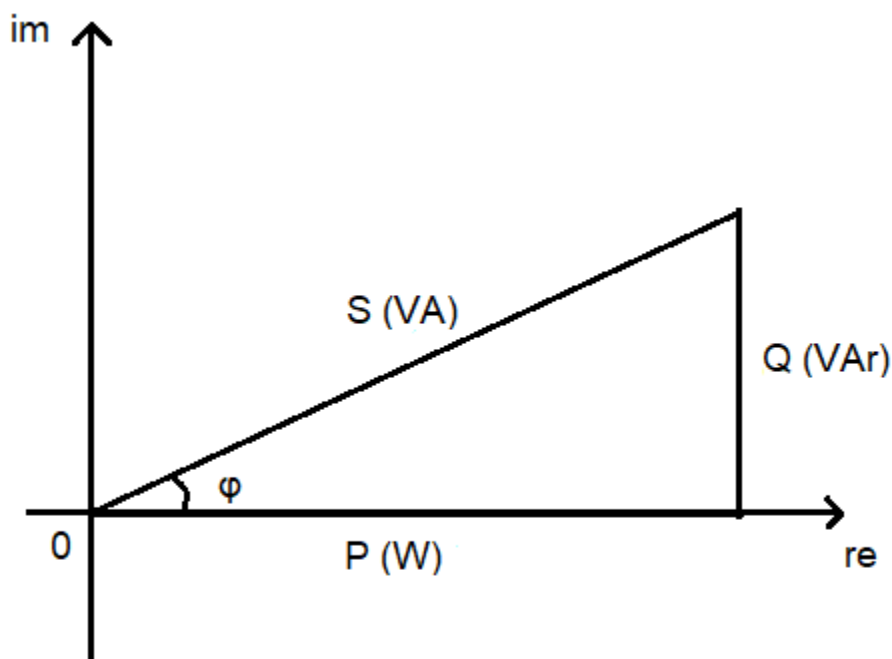
Kuva 3.4 Loistehon tyyppi vaikuttaa virran ja jännitteen väliseen vaihe-eroon. (Nieminen. N.d)

Loisteho käyttäytyy sähkön siirron kannalta samoin kuin pätöteho, eli se kasvattaa siirrettävää virtaa mutta loistehoa itsessään ei voida hyödyntää kulutuskohteessa. Loistehon määrä voidaan ilmoittaa sähkön tehokertoimen avulla, joka kuvaa pätö- ja näennäistehon suhdetta keskenään. Sähkön siirron kannalta tehokertoimen tulisi olla mahdollisimman lähellä yhtä, jolloin siirrettävä teho sisältäisi mahdollisimman vähän loistehoa. Tehokerroin saadaan seuraavasta yhtälöstä:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.3)$$

missä $\cos \varphi$ on tehokerroin, P pätöteho ja S näennäisteho.

Loistehon vaikutus näennäistehoon ja sitä kautta vaihevirtaan voidaan kuvata vaihtosähkön tehokolmion avulla.



Kuva 3.5 Vaihtosähkön tehokolmio. Näennäisteho, joka määrittää vaihevirran ja täten komponenttien mitoituksen koostuu pätö- ja loistehokomponenteista.

3.2.1 Loistehon aiheuttamat haittavaikutukset

Sähkövoimakoneet tarvitsevat loistehoa toimiakseen, mutta muuten loistehoa voidaan pitää kielteisenä ilmiönä sähköverkossa ja etenkin sähkön siirron kannalta. Loisteho kasvattaa siirrettävää näennäistehoa, jonka mukaan verkon komponentit ja siirtojohdot mitoitetaan.

Sähkön siirtohäviöt muodostuvat siirtoverkon impedanssin ja siirrettävän tehon virran mukaan. Kolmivaiheisen siirtojohtoon häviöt voidaan laskea yhtälöllä:

$$P_{häviö} = 3 * I^2 * Z \quad (3.4)$$

missä $P_{häviö}$ on johtimessa tapahtuvat häviöt, I johtimen kuormitusvirta ja Z johtimen impedanssi.

Pienentämällä siirrettävän tehon virtaa, pienenevät siirtohäviöt suhteessa virran toiseen potenssiin. Täten siirrettävän virran minimointi on kannattavaa jo siirtohäviöiden näkökannalta. Loistehon aiheuttama vaihevirran kasvu tulee huomioida komponenttien mitoituksessa, tämä voi johtaa siihen, että kohteen kaapeloinnin poikkipintaa voidaan joutua kasvattamaan tai jopa kohteen liittymän kokoa joudutaan kasvattamaan, jolloin liittymämaksut kasvavat.

Loistehon määrän rajoittamiseksi sähkönsiirtoverkossa, perii Fingrid loistehomaksua jakeluverkkoyhtiöiltä ja suoraan kantaverkkoon liittyviltä suurilta asiakkailta sallittujen rajojen ylittävästä loistehosta (Sähköinfo. 2018). Jakeluverkkoyhtiöt siirtävät loistehomaksua suurien sähköliittymien omaaville asiakkaille. Loistehomaksulla kannustetaan sähköliittymän omistajia rajoittamaan omaa loistehon kulutusta ja kompensoimalla kulutuksensa oman liittymän sisällä.

Taulukko 3.3 Kantaverkkopalvelun yksikköhinnat vuodelle 2019 (Fingrid. 2019)

Yksikköhinnat	v. 2019
Kulutusmaksu, talviarkipäivä *)	8,80 €/MWh
Kulutusmaksu, muu aika	2,50 €/MWh
Kantaverkosta otto	0,90 €/MWh
Kantaverkkoon anto	0,60 €/MWh
Voimalaitosten nettosähköteho	1900 €/MWh vuodessa 158,33 €/MWh kuukaudessa
Lyhyen käyttöajan voimalaitosten energiamaksu	3,20 €/MWh
Loistehomaksu	1000 €/MVar kuukaudessa
Loistehomaksu, otto	5,00 €/MVarh
Loistehomaksu, anto	5,00 €/MVarh

Hinnat ilman arvonlisäveroa

*) Talvijakson pituus 900 h vuodessa, joulukuu – helmikuu ma – pe klo 7.00 – 21.00

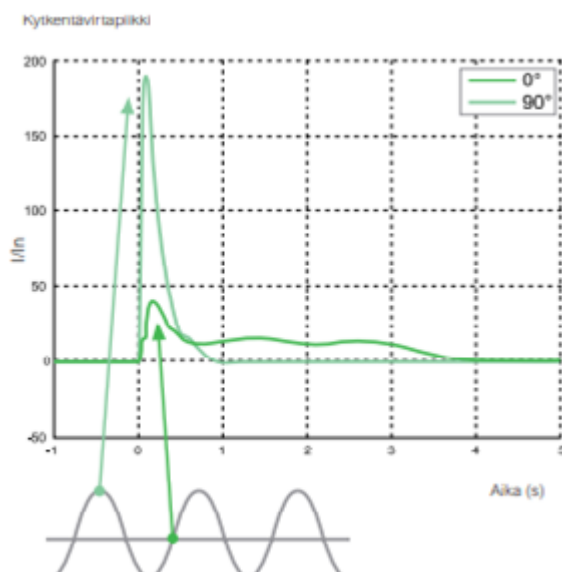
Taulukosta 3.3 voidaan huomata, että loistehon siirrosta veloitetaan moninkertaisesti pätötehon siirtoon verrattuna.

Valaistus on toiminut loisteholähteenä jo ennen LED-valaistuksen yleistymistä. Esimerkiksi loisteputkilamput synnyttävät loistehoa, sillä valaisimien virtaa rajoittavat magneettiset kuristimet sisältävät keloja ja täten ovat induktiivista kuormaa. Induktiiviset kuormat on voitu kompensoida valaisimessa erillisellä häiriönpoistokondensaattorilla. Täten valaisimen tehokerroin on saatu pidettyä korkeana.

Mikäli valaisimien loisteputket korvataan LED-putkilla ja mikäli valaisimen magneettikuristin ohitetaan, vaihtuu aiemmin induktiivinen kuorma lievästi kapasitiiviseksi. Jos tällöin induktiivista kuormaa kompensoivia kondensaattoreita ei poisteta, voi aikaisemmin induktiivinen loisteho muuttua kapasitiiviseksi loistehoksi ja täten pienentää uusien valaisinkonaisuuksien tehokerrointa (Ruuth. 2018). Eli mikäli valaisimen magneettikuristin ohitetaan, tulee valaisimessa mahdollisesti oleva kondensaattori myös poistaa.

3.3 Kytkentävirtasysäykset

Käynnistysvirtapiikkien aiheuttamat ongelmat ja rajoitteet ovat sähkötekniikan alalla yleensä liittyneet sähkövoimakoneisiin ja suurien kuormien liikkeelle saamiseen, mutta ne ovat myös ilmiö, joita muun muassa elektronisen liitännälaitteen omaavat valaisimet aiheuttavat. LED-valaisimet tarvitsevat tasajännitettä toimiakseen. Täten valaisimeen syötettävä vaihtosähkö tasasuunnataan valaisimen liitännälaitteessa. Tasasuuntaussillan lisäksi liitännälaitteessa on pulssimaista tasajännitettä tasaava kondensaattori, joka on syynä käynnistysvirtapiikin syntymiseen. Kun valaisin kytketään päälle, aiheuttaa kondensaattorin latautuminen virtapiikin, joka erottuu selvästi valaisimen ilmoitettuun nimellisvirtaan verrattuna.



Kuva 3.6 Kytentävirtapiikin suurus riippuu virran sen hetkisestä suuruudesta. (Schneider. 2019)

Valaisimen nimellisteho ei suoranaisesti ole virtapiikin suuruuden määrittävä tekijä, vaan valaisimen liitälaitteen rakenne ja kondensaattorin koko vaikuttavat virtapiikin kokoon. Virtapiikki voi olla jopa 250-kertainen nimellisvirtaan nähden ja kestää tyypillisesti mikrosekunteja (Schneider. 2019). Virtapiikin koko riippuu, missä kohtaa siniaaltoa laitteen käynnistys tapahtuu. Virran siniaallon nollakohdassa tapahtuva käynnistys synnyttää huomattavasti pienemmän piikin, kuin aallon huippukohdassa tapahtuva kytkentä (Schneider. 2019).

3.3.1 Käynnistysvirtapiikkien aiheuttamat haittavaikutukset sähköverkossa

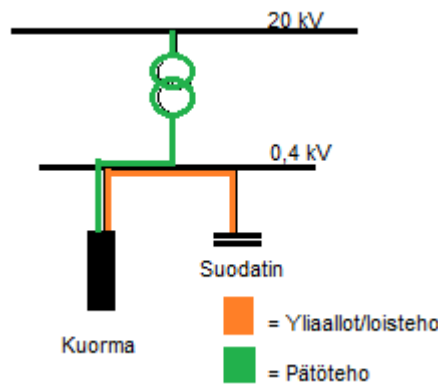
LED-valaisimet ovat nimellisvirroiltaan tyypillisesti melko pieniä ja tämän seurauksena yksittäisen valaisimen tuottama käynnistysvirtapiikki ei aiheuta haittoja kiinteistöjen sähköverkkoihin. Ongelmia syntyy, kun valaisinryhmien koot kasvavat ja puhutaan suurista valaisinryhmistä, joita voi esiintyä esimerkiksi teollisuudessa tai suurissa kiinteistöissä.

Mikäli suuria määriä valaisimia kytketään samaan aikaan päälle, voi näiden kytentävirtojen summa aiheuttaa johdonsuojakatkaisijoiden laukeamisen (Schneider. 2019). Esimerkiksi kiinteistöissä tapahtuneen sähkökatkoksen jälkeen sähköjen palauttaminen voi aiheuttaa kyseisen ilmiön. Syystä johtuen valaisinryhmän sulakekokoa voidaan joutua kasvattamaan, mikäli valaisinryhmässä olevien valaisimien lukumäärä halutaan pitää ennallaan valaistussuhteiden edeltävään ryhmäkokoan nähden.

Monet valaisinvalmistajat ovat omien mittauksien perusteella luoneet taulukot, joiden perusteella sulakekoot voidaan mitoittaa valaisinten lukumäärien mukaan tai päinvastoin. Sulakekoko kasvatessa tulee ottaa huomion ryhmien oikosulkuvirtojen kestoisuus. Kasvanut sulakekoko voi vaikuttaa siihen, että kaapelin oikosulkusuojaukseen ei enää ole riittävän herkkä ja palosuojaukseen vaarantuu. Tässä tapauksessa vaihtoehtoina on kaapelin poikki-pinnan kasvattaminen tai vaihtoehtoisesti valaisinten lukumäärän rajoittaminen ryhmässä, jotta sulakekoko ei tarvitse kasvaa entisestään.

4. YLEISIÄ RATKAISUJA SÄHKÖN LAADUN PARANTAMISEKSI

Loistehon ja harmonisten yliaaltojen haittavaikutukset heikentävät sähkön laatua ja kuormittavat sähkönjakeluverkkoa ja siinä olevia laitteita, sekä aiheuttavat häviöitä johdoissa ja muuntajissa. Näiden lisäksi kytkentävirtapiikit voivat aiheuttaa sulakkeiden tarpeettomia laukeamisia. Loistehon ja yliaaltojen haittavaikutuksia vastaan on kehitetty erilaisia ratkaisuja, joilla vaikutuksia voidaan vähentää tai jopa kokonaan poistaa. Osa yliaaltojen suodattamiseen käytetyistä ratkaisuista pohjautuu induktanssien ja kapasitanssien välisiin resonanssi-ilmiöihin. Menetelmä on jo pitkään käytetty, mutta puolijohdetekniikkaan pohjautuvat aktiiviset yliaaltosuodattimet ovat yleistymässä markkinoilla muun muassa joustavuutensa ansiosta. Kytkevävirtapiikkien vaikutuksia voidaan myös minimoida suunnitteluvaiheen valinnoilla sekä keskuksiin asennettavilla lisälaitteilla.



Kuva 4.1 Ideaalisesti häiriöiden leviäminen voidaan estää kuorman rinnalle kytkettävillä kompensointi- ja suodatinlaitteilla. Todellisuudessa kuorman kaikkien häiriöiden suodattaminen on haasteellista. (Sähköinfo. 2018, muokattu)

4.1 Loistehon vähentäminen

Induktiivista loistehoa voidaan vähentää verkossa asentamalla induktiivisen kuorman rinnalle kompensointiparisto, joka tuottaa esimerkiksi moottorin kuluttaman loistehon paikallisesti. Mikäli verkossa esiintyy yliaaltoja, on kuitenkin olemassa riski, että kondensaattorin kapasitanssi ja muuntajan induktanssi synnyttäisivät sopivalla yliaaltotaajuudella resonanssiin. Täten nykyään yliaaltolähteiden yleistyttyä pelkällä kondensaattorilla toteutettavien kompensointilaitteistojen potentiaaliset käyttökohteet ovat harvassa. (Sähköinfo. 2018)

Estokelaparisto toimii samankaltaisesti kuin rinnakkaiskompensointiparisto, sillä erolla että siinä kompensoinnista vastaavan kondensaattorin kanssa sarjaan kytketään kuristin. Kon-

densaattorin ja kelan välille asetetaan tyypillisesti resonanssitaajuudeksi 189 Hz. Tällä pois-suljetaan resonanssitapaukset harmonisilla yliaalloilla. Estokelaparisto resonanssiipiirillään suodattaa tämän lisäksi 10 - 30 % keskuksen yliaalloista. (Sähköinfo. 2018)

LED-valaisimien ottama teho sisältää kompleksisen komponentin, mutta sen ollessa jo valmiiksi kapasitiivista, ei ainoastaan LED-putkista syntyvän kuorman kompensoinnissa voida hyödyntää kompensointiparistoja. Tämän lisäksi LED-valaisimet ovat itsessään yliaaltolähteitä, joten mikäli kohteessa on käytössä kompensointiparisto ilman estokelaa, voi yliaallot synnyttää resonanssiipiirin.

Loisteputkivalaisimen, joka sisältää kompensointikondensaattorin, tyypillinen induktiivinen tehokerroin on 0,9 (ABB). Vastaavasti loisteputkivalaisimeen asennettavat LED-putket omaavat tyypillisesti kapasitiivisen tehokertoimen 0,9 (Sylvania. 2020). Uudet LED-putket voivat täten kompensoida valaisimen induktiivisen loistehon ja nostaa valaisimen tehokertoimen hyvin lähelle arvoa 1, mikäli ne sisältävät magneettikuristimen lisäksi kompensointikondensaattorin. Vastaavasti kompensoimattoman loisteputkivalaisimen tehokerroin paranee, mutta sen ollessa tyypillisesti 0,5, jää tehokerroin LED-putkillakin pieneksi. Uusi tehokerroin voidaan arvioida yhtälöllä:

$$\cos\varphi = \frac{P_{valaisin}}{\sqrt{P_{valaisin}^2 + (Q_{ind} - Q_{kap})^2}} \quad (4.1)$$

missä $P_{valaisin}$ on valaisimen LED-putkien pätöteho, Q_{ind} valaisinrunгон induktiivisen loistehon määrä, mikä on saatu laskettua valaisinrunгон ilmoitetusta tehokertoimesta ja Q_{kap} on LED-putken kapasitiivinen loisteho, mikä on yhtä lailla saatu laskettua LED-putkien ilmoitetusta tehokertoimesta.

Mikäli valaisinsaneerauksessa loisteputket korvataan LED-putkilla vanhoissa valaisinrungoissa, tulee rungoissa oleva sytytin vaihtaa niin sanottuun LED-sytyttimeen, joka on käytännössä oikosulkupala, jossa voi olla samalla myös sulake. Jos magneettikuristin ohitetaan valaisinmuutoksessa, valaisimien rungoissa mahdollisesti olevat kompensointikondensaattorit tulee myös poistaa, jotta valaisimen tehokerroin ei laske liian kapasitiivisen loistehon takia.

Pelkkä loisteputken vaihtaminen LED-putkeksi ja sytyttimen vaihto on rinnastettavissa yläpitytyöhön, jolloin valaisimen CE-merkinnät pysyvät voimassa ja valaisin on muutettavissa takaisin loisteputkikäyttöön vaihtamalla alkuperäinen sytytin takaisin (Tukes. 2014). Mikäli valaisimessa oleva magneettikuristin tai kompensointikondensaattori poistetaan valaisimesta tai valaisimen johdotusta muutetaan, katsotaan valaisimen rakenteen muuttuneen niin, että valaisimen CE- ja muut merkinnät lakkaavat pätemästä ja vastuu valaisimen turvallisuudesta siirtyy valmistajalta muutoksen tekijälle. Muutoksen läpikäyneet valaisimet tulee merkitä selvästi, että ne on muunnettu LED-käyttöön. Mikäli valaisimen muutoksen tekijä ei luovuta valaisinta eteenpäin, ei tarvitse valaisinta CE-hyväksyttää, mutta niiden tulee olla siitä huolimatta Suomen sähköturvallisuuslainsäädännön mukaisia. (Tukes. 2014)

Mikäli valaisimien magneettikuristimia ei poisteta, eikä valaisimissa ole kompensointikondensaattoreita, tarvitaan tehokertoimen parantamiseksi siis lisäksi ulkoista kompensointia, mikäli tehokerroin halutaan nostaa lähelle arvoa 1. Kompensointiratkaisun valinnassa tulee kuitenkin huomioida yliaallot.

4.2 Passiivinen yliaaltojen suodatus

Mikäli verkossa esiintyy paljon yliaaltoja, on passiiviset yliaaltosuodattimet soveltuvampi ratkaisu sähkön laadun parantamiseen kuin pelkät estokelaparistot. Passiivisten yliaaltosuodattimien toimintaperiaate pohjautuu keloihin ja kondensaattoreihin, ja niiden välisiin resonanssipiireihin, kuten estokelaparistossa. Yliaaltosuodattimet kykenevät suorittamaan induktiivisen loistehon kompensoinnin ja tämän lisäksi niiden toiminnan painoarvona on harmonisten yliaaltojen suodatus. Passiivisesta yliaaltosuodattimesta käytetään myös yleisesti nimitystä yliaaltosuodatin.

Yliaaltosuodatin perustuu kondensaattorin ja kelan sarjaresonanssiin. Yleisesti yliaaltosuodatin koostuu kolmesta sarjaresonanssipiiristä. Piirien kelat mitoitetaan niin, että 50 Hz 5., 7. ja 11. yliaallolla syntyy pieni-impedanssiset resonanssipiirit, jolloin yliaallon ohjautuvat laitteistoon sen sijasta, että ne päätyisivät syöttävään verkkoon. (Sähköinfo. 2018) Taulukosta 3.1 voidaan huomata, että juuri yllä mainittuja yliaaltoja saa esiintyä eniten verkossa eli voidaan olettaa niiden olevan yleisimmät verkossa esiintyvät parittomat kolmella jaottomat yliaallot. Tästä syystä suodattimien yliaaltotaajuuksiksi on valittu yleensä juuri nämä kertaluvut.

Yliaaltosuodatin kykenee suodattamaan 80 - 90 % verkossa esiintyvistä yliaalloista (Sähköinfo. 2018). Suodatusastetta voisi teoreettisesti nostaa lisäämällä suodatuspiirejä useammalle yliaaltotaajuudelle, mutta teknistaloudellisesti se ei välttämättä ole perusteltavissa saatuihin hyötyihin nähden. Yliaaltosuodatinta valittaessa, on verkon tila tiedettävä tarkkaan, sillä laite on mitoitettava tiedetyn kuorman perusteella (Sähköinfo. 2018).

Kolmella jaolliset parittomat yliaallot voivat olla erityisen haitallisia keskuksia syöttäville kaapeleille nollavirtojen summautumisen tähden. Näiden yliaaltojen suodattaminen toteutuu poikkeavasti muiden yliaaltojen suodattamiseen nähden. Kyseisiä yliaaltoja voidaan rajoittaa estopiirillä, joka koostuu rinnan kytketyistä kondensaattorista ja kelasta. Piiri asennetaan sarjaan nollajohtimen kanssa ja viritetään siten, että 150 Hz taajuudella piirin muodostama suuri impedanssi estää kolmannen yliaallon kulkemisen nollajohtimeen. (Sähköinfo. 2018)

Kolmatta yliaaltoa voidaan myös suodattaa samalla periaatteella kuten muita parittomia yliaaltoja, asentamalla kuorman kanssa rinnan 150 Hz taajuudella toimiva resonanssiipiiri, johon valtaosa kolmansista yliaalloista ohjautuu eikä täten päädy keskusta syöttävään verkkoon (Sähköinfo. 2018).

Passiivisia yliaaltosuodattimia on yleisesti käytetty induktiivisen kuorman kompensoinnin yhteydessä. Täten LED-valasimien synnyttämä kapasitiivinen kuorma ei ole ideaalinen suodatus ja kompensointikohde passiivisille suodattimille. Myös valaisinkuormalle tyypillinen kuorman vaihtelu asettaisi haasteita passiiviselle suodatukselle. Suodatusratkaisua voisi harkita kohteessa, jossa keskuksessa, johon suodatin asennetaan, on huomattavasti induktiivista kuormaa yliaaltolähteiden lisäksi. Suodatin kompensoisi loistehon ja suodattaisi valtaosan yliaalloista.

4.3 Aktiivinen yliaaltojen suodatus

Aktiiviset yliaaltosuodattimet ovat viime vuosina yleistyneet ja tarjoavat teknisiä etuja passiivisiin suodattimiin nähden. Aktiivisten suodattimien toimintaperiaate poikkeaa täysin keiloihin ja kondensaattoreihin perustuvista passiivisista suodattimista. Aktiivisuodattimen toiminta perustuu puolijohdetekniikkaan, joka mahdollistaa suodattimen joustavan käytön eri

kuormilla (Sähköinfo. 2018). Aktiivinen yliaaltosuodatin kykenee suodattamaan käytännössä kaikki yliaallot, sekä kompensoimaan loistehoa (Sähköinfo. 2018).

Suodattimen tasajännitekondensaattorit latautuvat syöttävän verkon virralla. Kondensaattorit toimivat energialähteenä laitteen invertterille. Laite mittaa jatkuvasti syöttävän verkon yliaaltokomponenttien virtoja ja syöttää identtistä signaalia verkkoon 180° vaihesiirrolla, jolloin yliaaltokomponentit kumoavat toisensa. Laite pystyy siis mukautumaan verkon kuormien muutoksiin jatkuvasti. Mikäli kuorman suuruus ylittää suodattimen nimellistehon, jatkaa suodatin toimintaansa omalla huipputehollaan ja jättää siitä yli jäävän kuorman huomiomatta. Laitteet ovat modulaarisia, eli tehotarpeen kasvaessa niitä voidaan yksinkertaisesti asentaa lisää rinnan toisiinsa nähden. Laitteet ovat myös fyysisiltä mitoiltaan yleensä pienikokoisempia kuin passiiviset suodatuslaitteet (Sähköinfo. 2018). Aktiivisuodattimet ovat kuitenkin hankintahinnaltaan kalliimpia passiivisuodattimiin nähden.

LED-valaistuksen aiheuttamien yliaaltojen ja loistehon suodattamiseksi aktiivista yliaaltosuodatinta voidaan pitää käyttökelpoisena ratkaisuna. Valainkeskuksen perään asennetaan luultavasti vuosien aikana eri valmistajien LED-putkia, joiden tuottamat häiriöt voivat poiketa keskenään huomattavasti. Täten olisi hyvä, että suodatinlaite kykenee toimimaan muuttuvien häiriöiden ja kuormien kanssa. Aktiivinen suodatin on joustavuutensa myötä myös helpompi mitoittaa kohteeseen, sillä sen mitoittaminen ei vaadi yhtä paljon alkuarvoja kuin passiivinen yliaaltosuodatin ja suodatustehontarpeen kasvaessa suodattimien määrää voidaan kasvattaa tarvittaessa.

4.4 Kytkentätransienttien minimointi

Kytkentävirtapiikkien haittavaikutuksien poistaminen kokonaisuudessaan on niiden vaikutuksien aiheuttajien sähkötekniisten ominaisuuksien johdosta haastavaa. Ongelmaan on tästä huolimatta olemassa ratkaisuja ja toimintatapoja, joilla haittavaikutuksia voidaan vähentää.

Käynnistyksistä aiheutuvat virtapiikit halutaan pitää mahdollisimman vähäisinä, joten tämä on hyvä huomioida valaistuksen ohjauksen valinnassa. Mikäli valitun tilan valaistus on liiketunnistimen perässä, tulee valaistusryhmä oletettavasti kytkeytymään pois, sekä päälle useammin kuin esimerkiksi katkaisijan perässä oleva valaistus. Mikäli kohde on teollisuus-

rakennus, on myös mahdollista, että valaistus on päällä ympäri vuorokauden, jolloin kytkentävirtapiikkejä pääsee syntymään vain harvoissa erikoistapauksissa, kuten sähkökatkon jälkeisessä sähköjen palautuksessa.

Vaikka valaistus olisi kohteessa normaalitilanteessa aina päällä, tulee välillä vastaan tilanteita, jolloin ryhmä joudutaan kytkemään päälle. Mikäli ryhmässä on enemmän valaisimia sulaketta kohden, kuin mitä valaisinvalmistajan taulukko on taannut, voi ryhmän sulake lauaeta. Sen estämiseksi on olemassa teknisiä ratkaisuja, joilla voidaan vähentää käynnistysvirtapiikistä syntyvää virtatransienttia.

Virtatransienteja pienentävät laitteet perustuvat siihen, että virran kytkeminen päälle toteutetaan virran siniaallon nollakohdassa. Tällöin kondensaattorin lataava lyhyt virtapiikki on huomattavasti pienempi kuin esimerkiksi siniaallon huippukohdassa tapahtuvassa kytkemisessä. Kyseinen ratkaisu toimisi suurissa valaisinryhmissä, joiden ohjaus perustuu keskuksessa olevaan releohjaukseen, sillä asennettava lisälaitte ohjaisi relettä (Schneider. 2019).

5. MAHDOLLISIA RATKAISUJA CASE-YMPÄRISTÖSSÄ

Kandidaatintyön muodossa toteutetun selvityksen pohjalta suunnitellaan valaistussaneerauskohteeseen esimerkkiratkaisu, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa apuna muiden vastaavien kohteiden suunnittelussa. Kohteiden olosuhteet voivat vaihdella merkittävästi toisistaan, joten ratkaisua ei voida pitää yleispätevänä.

5.1 Case-ympäristön kuvaus

Loviisan ydinvoimalaitos on otettu käyttöön asteittain 1970-luvun loppupuolella. Loviisa 1 otettiin käyttöön vuonna 1977 ja Loviisa 2 vuonna 1980. Voimalaitos on kokenut vuosien aikana mittavia päivityksiä, mutta osa infrastruktuurista on vielä alkuperäisessä tilassa. Case-ympäristö on monipuolinen ja sisältää konttoriolosuhteita ja tyypillistä teollisuusympäristöä, jossa on runsaasti vaihtelevia kuormia ja pyöriviä moottorikuormia.

5.2 Ongelmat

Laitoksella oleviin loisteputkivalaisimiin aiotaan vaihtaa loisteputket korvaavat ”retrofit” LED-putket. Vaihtotyön laajuudesta johtuen, kaikki loisteputkivalaisimet eivät ole samaa mallia tai edes samalta aikakaudelta. Täten valaisimien ominaisuuksissa ilmenee eroavaisuuksia, osa sisältää magneettikuristimen ja on myös kompensoitu, kun taas osa valaisimista on kompensoimattomia. Mikäli valaisimien runkoihin ei tehdä suurempia muutoksia kuin sytyttimen vaihto, jää kompensoimattomien valaisimien tehokerroin vaihtotyön jälkeenkin melko huonoksi ja tällöin suurin mahdollinen energiansäästö jää tavoittamatta. Voidaan kuitenkin todeta, että LED-putkiin siirtyminen parantaa kohdevalaisinkeskuksen tehokerrointa.

Mikäli valaisinrunkojen magneettikuristimet ohitetaan, on mahdollisuus että, valaisimen tehokerroin jää edelleen pieneksi siinä tapauksessa, että kompensointikondensaattorit jätetään runkoon. Tällöin valaisimen kapasitiivisen loistehon kulutus kasvaa, kun loisteputkien tilalle asennetaan lievästi kapasitiiviset LED-putket. Täten valaisinsaneerauksessa halutut mahdollisimman suuret energiansäästöt voivat jäädä saavuttamatta, sillä valaisimien näennäisteho ei välttämättä pienene, vaikka niiden kuluttama pätöteho pienenee (Ruuth. 2018).

Korvaavat LED-putket ovat teholtaan alle 25 W ja täten eivät kuulu standardin EN 61000-3-2 piiriin. Standardin asettamien rajoitusten puute lamppujen synnyttämiin yliaaltoihin ja loisteputken fyysisten mittojen aiheuttamien rajoitteiden vuoksi lamput synnyttävät yliaalloja verkkoon. LED-valaisimien synnyttämät harmoniset yliaallot voivat aiheuttaa ongelmia kohteen sähköverkossa. Yliaallot heikentävät sähkön laatua, synnyttävät häviöitä ja voivat aiheuttaa verkossa olevien laitteiden rikkoontumisia. Erityisesti kolmella jaolliset yliaallot voivat aiheuttaa ongelmia kohteen kaapelointien kannalta, sillä ne kertaantuvat keskenään eivätkä kumoudu. Etenkin jos kohde on vanha ja sen syöttökaapelin nollajohto omaa pienemmän poikkipinnan kuin vaihejohtimet, on olemassa riski, että valaisinkeskusta syöttävän kaapelin nollajohdin lämpenee liian suuresta virrasta.

Kytkevätvirtapiikit voivat aiheuttaa sulakkeiden laukeamisia, mikäli valaisinryhmässä on suhteessa liikaa kuormaa uusien LED-putkien synnyttämiin käynnistysvirtapiikkeihin nähden.

5.3 Toimenpiteitä vaikutusten vähentämiseksi

Valaisinkeskukset joihin muutoksia tullaan tekemään voivat poiketa merkittävästi toisistaan, joten jokaisen kohdalla tehdyt toimet valaistuksen aiheuttamia haittoja vastaan ovat tapauskohtaisia.

Pilottikohteena käytettävän keskuksen kohdalla aloitetaan työ kartoittamalla kunkin valaisinryhmän kuorma ja tekemällä valaisinkeskukselle sähkönlaatumittaus vanhojen loisteputkivalaisimien ollessa kuormana. Mittauksen jälkeen voidaan vaihtaa loisteputkien tilalle korvaavat LED-putket. Vaihtotyötä tehdessä, tulee putkien lisäksi vaihtaa valaisinrungoissa olevat sytyttimet LED-sytyttimiksi ja mikäli muutostyöllä haetaan mahdollisimman suurta energiansäästöä, tulee valaisimissa olevat magneettikuristimet ja mahdolliset kompensointikondensaattorit poistaa. Magneettikuristimien ja kompensointikondensaattorien poistosta saatavat energiansäästöt selvitetään erillisellä laboratoriomittauksella, jotta saatuja säästöjä voidaan verrata mahdollisiin vaihtotyöstä aiheutuviin työkustannuksiin. Laskennallisesti voidaan arvioida, että putkien vaihdolla on loistehoa vähentävä vaikutus riippumatta siitä, onko vaihtotyön kohteena toimiva valaisin kompensoitu tai kompensoimaton. Mikäli valaisimiin tehdään muita muutostöitä kuin putkien ja sytyttimien vaihto, tulee työn yhteydessä

huolehtia valaisimen asianmukaisista merkinnöistä, joihin tehty muutostyö tekijän velvoittaa (Tukes. 2014).

Vaihtotyön jälkeen toteutetaan valaisinkeskukselle uusi sähkönlaatumittaus, jota voidaan verrata aiemmin suoritettujen mittauksen tuloksiin. Kartoitetun tilanteen pohjalta (laskennallinen kuorma ja mittaukset) voidaan valita tarvittavat toimet yliaaltojen suodatuksen ja mitoittaa suodatin. Mikäli LED-putkien valmistaja on tarjonnut taulukot sulakkeiden kuormittavuutta valaisimien lukumäärällä varten, voidaan sitä käyttää perusteena käynnistysvirtapiikkien aiheuttamien ongelmien arviointiin. Mikäli taulukon mukaan sulake ylikuormittuu kuormasta, voidaan tarvittaessa sulakkeen tyyppiä vaihtaa hitaammalla laukaisukäyrällä olevaan tai releohjattuihin ryhmiin lisätä kytkentävirtapiikkejä tasaava nollapistekytkentä-rele. Muutostöiden jälkeen toteutetaan vielä kolmas sähkönlaatumittaus. Mittaustuloksia voidaan verrata standardin SFS-EN 50160 asettamiin rajoihin.

6. YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli toteuttaa selvitys LED-valaistuksen siirtymisessä huomioon otettavista vaikutuksista, joita uusi valaistustekniikka aiheuttaa verrattuna korvattavaan loisteputkitekniikkaan pohjautuvaan valaistukseen. Tämän lisäksi työssä aloitettiin teknisten ratkaisujen kartoitus valaistusmuutoksen synnyttämien haittavaikutusten vähentämiseksi.

Työssä selvitetty vaikutukset voidaan jakaa kolmeen osaan: loistehoon, yliaaltoihin ja kytkentävirtapiikkeihin. Mikään näistä ei ole uusi ilmiö sähköverkoissa, mutta suurissa kiinteistöissä valaisimien suuri lukumäärä tarkoittaa sitä, että ilmiöihin on kiinnitettävä huomiota ja niiden aiheuttamat haittavaikutukset on syytä ottaa huomioon valaistussaneerausta tehdessä.

Työ toteutettiin kirjallisuuskatsauksena, joten käytännön muutostöihin työssä ei päästy syventymään enempää. Työssä tehdyn taustatutkimuksen pohjalta jatketaan tietojen soveltamista käytännön sovelluksissa.

Työssä käsitellyt aiheet tulevat osaksi kiinteistöjen sähkösuunnittelua tulevaisuudessa, sillä kapasitiivinen loisteho on yleistymässä sähkönjakeluverkossa ja yliaaltolähteiden määrä on myös kasvamaan päin. Tämä, LED-valaistuksen yleistyminen ja standardisoinnin puute pienitehoisille LED-valonlähteille synnyttävät tarpeen tulevaisuudessa työssä esitettyjen vaikutusten huomioimiselle, jotta sähkönlaatu pysyy sähköverkossa standardien asettamien rajojen sisällä.

LÄHTEET

ABB:n TTT-käsikirja 2000-07

Ahoranta, J. 2008. Sähkötekniikka. Yhdeksäs painos. Helsinki: WSOY.

Fingrid. 2019. Kantaverkkopalvelun yksikköhinnat 2019. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.12.2019]. Saatavissa. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kaytto-varma-sahkonsiirto/kantaverkkopalvelun-yksikkohinnat-2019.pdf>

Korpinen, L. 2008. Yliaalto-opus. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.9.2019]. Saatavissa <http://leenakorpinen.com/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

Motiva. 2019. Lamput ja valaistus. [verkkodokumentti]. [viitattu 13.1.2020]. Saatavissa. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/hyva_arki_kotona/lamput_ja_valaistus

Nieminen, AJ. N.d. Vaihe-ero ja resonanssi. [verkkodokumentti]. [viitattu 16.1.2020]. Saatavissa <http://www.kotiposti.net/ajnieminen/sa18.pdf>

Rossi, M. k. 2019. Circadian Lighting Design in the LED Era. 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing. <https://wilma.finna.fi/lut/Record/wilma.185683>

Ruuth, K. 2018. LED-valaistuksen paloturvallisuus sekä eri valaisinratkaisuiden verkko-vaikutukset. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tampere.

Schneider. 2019. Technical guide: How to control and protect LED Lighting Circuits. Rueil Malmaison Cedex: Schneider Electric.

Suomen standardisoimisliitto SFS. 2011. SFS-EN 50160 Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. Neljäs painos.

Sylvania. 2020. TOLEDO SUPERIA T8 V5 5FT 4100LM 840 Product Data. [verkkodokumentti]. [viitattu 10.2.2020]. Saatavissa. <https://www.sylvania-lighting.com/product/en-int/products/0028395/>

Sähköinfo. 2018. Yliaallot ja kompensointi. Toinen uudistettu painos. Espoo: STUL ry.

Tukes. 2014. LED-valoputket loisteputkien korvaajina. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <https://docplayer.fi/862628-Led-valoputket-loisteputkien-korvaajina.html>