

Jaakko Kontio

**TUTKIMUS SÄHKÖAUTON LATAUSPISTEIDEN
VAIKUTUKSESTA KIINTEISTÖN LOISTEHON
KOMPENSOINNIN TARPEESEEN**

**Opinnäytetyö
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka
Toukokuu 2024**



Centria-ammattikorkeakoulu	Aika Toukokuu 2024	Tekijä Jaakko Kontio
Koulutus Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
Työn nimi TUTKIMUS SÄHKÖAUTON LATAUSPISTEIDEN VAIKUTUKSESTA KIINTEISTÖN LOISTEHON KOMPENSOINNIN TARPEESEEN		
Työn ohjaaja Kari Saaranen		Sivumäärä 62

Tämä opinnäytetyö tehtiin Kokkolan Halpa-Halli Oy:lle antamaan tietoa uusien kiinteistöjen suunnittelua ja olemassa olevien saneerausta ja ylläpitoa varten. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia kiinteistöihin jo rakennettujen sähköautojen latauspisteiden vaikutusta loistehon kompensoinnin kokonaistarpeeseen sekä latauspisteiden aiheuttamia yliaalloja kiinteistön sähköverkkoon.

Nykyisellään loistehon kompensointitarve on pienentynyt muun muassa led-valaistuksen ja taajuusmuuttajien myötä, mutta kompensoinnin laiteusintojen ja uudiskohteiden suunnittelun kannalta on tärkeää tunnistaa, kuinka suuri on sähköautojen latauspisteiden aiheuttama kompensointitarve ja yliaaltopitoisuus. Tavoitteena oli tuottaa ja analysoida jo rakennetusta latausinfrastruktuurista mittauksiin perustuvaa tietoa, sekä vaihtojännitettä että tasajännitettä syöttävistä latauspisteistä ja eri latausratkaisujen vaikutuksesta niihin.

Vaihtojännitteisestä latauspisteestä tutkittiin eri valmistajien autojen mittaustuloksia. Tavoitteena oli myös mitata vaihtojännitteisten latureiden yhteisvaikutuksia, mutta tämä osoittautui liian haastavaksi järjestää opinnäytetyötä yksin toteuttaessa. Tasajännitteisestä latauspisteestä mitattiin vain yhtä autoa, koska kiinnostavaa mittaustuloksellisesti tasajännitelatauksessa oli vain itse latauspiste.

Asiasanat

Kompensointi, Lataus, Sähköauto, Yliaallot

ABSTRACT

Centria University of Applied Sciences	Date May 2024	Author Jaakko Kontio
Degree programme Electrical and Automation Engineering		
Name of thesis STUDY ON THE IMPACT OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING POINTS ON THE NEED TO COMPENSATE FOR REACTIVE POWER IN A PROPERTY		
Centria supervisor Kari Saaranen	Pages 62	
<p>This thesis was written for Kokkolan Halpa-Halli Oy to provide information for the planning of new properties and the renovation and maintenance of existing ones. The aim of the thesis was to study the impact of electric vehicle charging points already built in properties on the total need for reactive power compensation, as well as the harmonics caused by charging points in the property's electricity network.</p> <p>At present, the need for reactive power compensation has decreased, for example due to LED lighting and frequency converters, but it is important to identify the need for compensation and harmonic concentration caused by electric vehicle charging points when planning device rebuilds and new buildings. The aim was to produce and analyse measurement-based information on the charging infrastructure already built, both on charging points supplying alternating voltage and DC voltage, and on the impact of different charging solutions on them.</p> <p>The AC charging point was used to study the measurement results of cars from different manufacturers. The aim was also to measure the combined effects of alternating voltage chargers, but this proved too challenging to arrange when writing the thesis alone. Only one car was measured from a DC charging point, because the only interesting thing about DC charging was the charging point itself.</p>		
Key words Charging, Electric vehicle, Harmonics, Power Compensation,		

KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY

AC

Alternating current, vaihtovirta

CHAdEMo

Pistoketyypin 4 pikalatauspistoke DC-lataukseen

CCS

Combined Charging system (Combo), pistoketyypin 4 pikalatauspistoke DC-lataukseen

DC

Direct current, tasavirta

DPF

Tehokerroin (Displacement power factor), joka on perustaajuisen pätötehon ja näennäistehon suhde.

HETKELLISARVO

Suureen arvo tietyllä ajanhetkellä. Ilmaistaan sähkötekniikassa pienellä kirjaimella, kuten jännitteen tapauksessa u

HUIPPUARVO

Suureen käyrämuodon korkein tai matalin arvo eli amplitudi. Merkitään suureen korostusmerkillä, niin sanotulla hatulla, kuten jännitteen tapauksessa \hat{u}

KOMMUTOINTI

Hetki tasasuuntauksessa, jolloin virta siirtyy komponentilta toiselle.

KOMPENSOINTI

Induktiivista loistehoa tasaavan kapasitiivisen loistehon tuottaminen kondensaattoreilla.

KULMATAAJUUS

Ilmaisee, kuinka suuren kulman jokin sinisignaalin syntymistä kuvaava vektori pyörähtää aikayksikössä. Tunnus ω

LATAUSHYBRIDI

Lataushybridi eli plug-in- hybridi (PHEV, plug-in electric vehicle) on bensiini- tai dieselsähkömoottorilla varustettu auto, jossa on lisäksi ajosähkömoottori ja sähköverkosta ladattava akusto.

LATAUSPISTE

Sähköajoneuvon lataamiseen tarkoitettu syöttölaitteisto, jota kutsutaan myös latausasemaksi. Voidaan jaotella AC-latausasemiin, jotka syöttävät auton omaa latausjärjestelmää ja DC-latauspisteisiin, jotka lataavat itse auton akustoa.

LOISTEHO

Toisin kuin pätöteho, loisteho värähtelee edestakaisin kuormituksen ja sähkölähteen välillä. Ei osallistu kulutusköseen pysyvään työsuoritukseen, yksikkö vari (volttiampeeri reaktiivinen) [var]

NÄENNÄISTEHO

Kokonaisteho, joka sisältää pätötehon ja loistehon, yksikkö voltiampeeri [VA]

OHJATTU TASASUUNTAUS

Ohjattavilla puolijohdekomponenteilla toteutettu tasasuuntaus, jolla vaihtojännitteestä tasasuunnattavaa jännitettä voidaan leikata, jolloin tasasuunnatun jännitteen suuruutta voidaan säätää.

PF

Tehokerroin (Power factor), pätötehon ja loistehon välinen suhde, joka ottaa huomioon myös harmoniset yliaallot

PÄTÖTEHO

Teho, joka voidaan käyttää hyödyksi eli kulutetun tehon varsinainen työtä tekevä osa, yksikkö watti [W]

REAKTANSSI

Tunnuksena X, suure, jolla ilmaistaan vaihtovirtapiirin impedanssin induktiivista tai kapasitiivista osuutta, yksikkönä Ω (ohmi)

RINNAKKAISRESONANSSI

Virtaresonanssi, tilanne, jossa induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret. Käytetään hyödyksi yliaaltovirtojen poistamisessa.

RLC

Resistanssin (vastus), induktanssin (kela) ja kapasitanssin (kondensaattori) yhdistävä kytkentä

SARJARESONANSSI

Jänniteresonanssi, tilanne, jossa induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret. Resistanssin ollessa suuri jännite voi nousta komponenteille vaarallisen suureksi. Käytetään hyödyksi yliaaltojen suodatuksessa eli niin sanotuissa imupiiireissä.

TASASUUNTAUS

Kytkentä, joka muuttaa vaihtojännitteen tasajännitteeksi

TEHOLLISARVO

Suureen neliöllinen keskiarvo. Ilmaistaan sähkötekniikassa suurella kirjaimella, kuten jännitteen tapauksessa U

THD

Harmoninen kokonaissärö, yliaaltojen määrä suhteessa perustaajuiseen komponenttiin

TYPE 2

Niin kutsuttu Mennekes-pistoke, pistoketyypin 2 latauspistoke AC-lataukseen

TÄYSSÄHKÖAUTO

Auto, jonka voimanlähteenä käytetään sähkömoottoria ja sen käyttövoimana sähköverkosta ladattavaa akustoa.

VAIHESIIRTOKULMA

Kuvaa sinimuotoisten signaalien keskinäistä vaihe-eroa, kuten esimerkiksi virran ja jännitteen välistä vaihe-eroa. Tunnus φ

YLIAALTO

Sähköverkon epälineaaristen kuormitusvirtojen aiheuttama, jännitettä säröyttävä, perusaallosta poikkeava aaltomuoto.

**TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY
SISÄLLYS**

1 JOHDANTO	1
2 VAIHTOVIRTAPIIRIEN TEORIAA	3
2.1 Kapasitanssi ja induktanssi vaihtosähköpiirissä.....	3
2.2 Resistanssin ja induktanssin sarjakytkentä vaihtosähköpiirissä.....	7
2.3 Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin sarjakytkentä vaihtosähköpiirissä	9
2.4 Sarjaresonanssi.....	11
2.5 Resistanssin ja induktanssin rinnankytkentä er	13
2.6 Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin rinnankytkentä vaihtosähköpiirissä.....	14
2.7 Rinnakkaisresonanssi	15
2.8 Vaihtosähkön teho.....	17
2.9 Kolmivaiheiset järjestelmät.....	22
3 TASASUUNTAUS	24
3.1 Kolmivaiheinen tasasuuntaus	25
3.2 Ohjatut tasasuuntaajat	26
4 YLIAALLOT.....	29
4.1 Harmonisten yliaaltojen luokittelu	31
4.2 Standardin mukaiset arvot yliaalloille	33
4.3 Yliaaltovirtojen suositus	35
4.4 Yliaaltojen mittaus	36
5 LOISTEHON KOMPENSOINTI.....	38
5.1 Kompensointilaitteiden resonanssit.....	40
5.2 Laiteratkaisut loistehon kompensointiin ja yliaaltojen suodatukseen	42
6 SÄHKÖAUTOJEN LATAUS.....	45
7 MITTAUSJÄRJESTELYT JA KÄYTETTÄVÄ MITTALAITTEISTO	48
7.1 Fluke 1735 Power Logger	48
7.2 AC-latausasemien mittausjärjestely	49
7.3 DC-latausaseman mittausjärjestely.....	52
8 MITTAUSTULOKSIEN KÄSITTELY.....	55
9 JOHTOPÄÄTÖKSET	59
LÄHTEET	61

1 JOHDANTO

Liikennekäytössä olevien ladattavien autojen määrä 3.4.2024 Suomessa oli 239 124 kpl, joista täyssähköisiä henkilöautoja oli 90 848 kpl ja täyssähköisiä pakettiautoja 3 467 kpl, lataushybridi-henkilöautojen 143 769 ja lataushybridi-pakettiautoja 310 kpl. Loput olivat täyssähköisiä sekä lataushybridi-kuorma- ja linja-autoja. (Autoalan Tiedotuskeskus 2024).

Vuoden 2023 viimeisen vuosineljänneksen lopussa Suomessa julkisten peruslatauspisteiden eli ≤ 22 kW:n määrä oli 9 293 kpl, suuritehoisten eli >22 kW:n kokonaismäärä oli 2 808 kpl. Suuritehoisista latauspisteistä alle 150 kW:n latauspisteitä oli 949 kpl, ja tätä suurempia oli 1859 kpl. (Sähköinen liikenne Ry 2024.)

Sähköajoneuvojen ja latauspisteiden määrän kasvaessa haastaa se luonnollisesti nykyisen sähköverkon kapasiteetin riittävyden. Sähköverkon kuormitettavuuden lisäksi ongelmaksi sähköajoneuvon latauksessa voivat muodostua lataustekniikan aiheuttamat yliaallot, joita on tutkittu esimerkiksi Genovan yliopiston professorin Andrea Mariscottin tutkimuksessa vuonna 2022 (Mariscotti 2022).

Myös Suomessa, Siikalatvan Pulkkilassa, uutisoitiin erikoisesta ongelmasta, kun viereiselle ABC-huoltoasemalle rakennetun latauspisteiden kuormitus aiheutti lähellä asuvan perheen induktioliedelle toimintahäiriöitä lähes vuoden ajan. Ongelma ratkesi, kun verkkoyhtiö Elenia jakoi ongelmista kärsineen asiakkaan eri muuntopiiriin latausaseman kanssa. (Kaleva 2024.)

Tässä opinnäytetyössä käsitellään sähköajoneuvojen latausasemia, joiden sähkönsyöttöä varten ei ole erillistä muuntamoaa, vaan niiden sähkönjakelu tapahtuu myymäläkiinteistöjen sähköliittymistä. Tällöin latauspisteiden mahdollinen vaikutus muun kiinteistön sähköverkkoon ja laitteisiin olisi hyvä tuntea ja tiedostaa, varsinkin suunnitellessa uusia kiinteistöjä tai kun suunnitellaan nykyisten loistehon kompensointiparistojen modernisointia.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli tuottaa Kokkolan Halpa-Halli Oy:lle tietoa latauspisteiden vaikutuksesta loistehon kompensointiin sekä yliaaltojen suodattamiseen yrityksen kiinteistöissä. Mittaukset suoritettiin Kokkolan sekä Alahärmän myymälöihin rakennettuja julkisia latauspisteitä hyödyntäen. Mittauksissa tutkittiin eri autovalmistajien autojen omien latausjärjestelmien kuluttamaa tehoa ja tuottamia yliaaltoja sekä DC-latausaseman vastaavia ominaisuuksia. Teholatausasemaa käytettäessä auton omaa

latausjärjestelmää ei käytetä, jolloin käytetty auto ei ole merkityksellinen mittauksen kannalta.

Tarkoituksena oli mitata myös eri autovalmistajien auton omien latausjärjestelmien yhteisvaikutusta, mutta se havaittiin liian vaikeaksi toteuttaa, koska osassa tilaajan kiinteistöissä latauspisteiden sähkökeskuksen kahvavarokelohkot olivat mittauksen kannalta liian kaukana toisistaan ja osassa taas latauspisteiden käyttöasteen ollessa suuri ei luotettavia mittauksia olisi saatu suoritettua ladattavien autojen vaihtuessa jatkuvasti.

Kohteissa, joissa mittaus olisi voitu edellä mainittujen puolesta toteuttaa, olisi ladattavien autojen järjestäminen kohteeseen ollut työtä yksin suorittaessa mahdotonta eikä kohteessa sopivan mittaustilaisuuden odottelu ollut käytettävissä olevan ajan puitteissa mahdollista, joten päätimme tilaajan kanssa yhdessä rajata tämän aihealueen pois tutkimuksesta. Saatavilla olevista aiemmista tutkimustuloksista voidaan kuitenkin nähdä useiden autojen yhteisvaikutuksen voivan olla yliaaltojen osalta suurempi kuin IEC-standardin mukaisesti tulisi olla.

Opinnäytetyön mittaukset on rajattu käsittelemään latauspisteiden vaikutuksia kiinteistön sähköverkkoon mittauksien ottaessa huomioon vain latauspisteiden aiheuttamat vaikutukset, vaikkakin kiinteistön muiden laitteiden yhteisvaikutus latauspisteiden kanssa voi olla merkittävämpi kokonaisuuden kannalta.

2 VAIHTOVIRTAPIIRIEN TEORIAA

Kuormittaessa vaihtosähköpiiriä puhtaan resistiivisellä kuormituksella resistanssiin R vaikuttavan sinimuotoisen jännitteen hetkellisarvon u ja virran hetkellisarvon i voidaan jännitteen todeta vaihtelevan samanvaiheisena, eli jännite ja virta saavuttavat huippu- ja nollakohdat ajan suhteen samalla hetkellä. Sinimuotoisen jännitteen ja sinimuotoisen virran vaihtelun ollessa ajan suhteen epätahdissa kutsutaan sitä vaihe-eroksi. Vaihe-eroa ilmaistaan vaihesiirtokulmalla φ . Vaihesiirtokulmaa voidaan tarkastella myös osoitinpiirroksessa, jossa jännite ja virta esitetään tehollisarvo-osoittimilla ja osoittimien välillä on vaihesiirtokulma φ suuruinen vaihe-ero. (Ahoranta 2021, 126-127, 131.)

2.1 Kapasitanssi ja induktanssi vaihtosähköpiirissä

Kun vaihtovirtapiiriin lisätään ideaalinen kondensaattori, sinimuotoisen jännitteen u vaikuttaessa kondensaattorin kapasitanssiin C havaitaan, että jännite ja kondensaattorin hetkellinen sähkövaraus q vaihtelevat samanaikaisesti kaavan 1 mukaisesti (Aura & Tonteri 2005, 172).

$$q = C\hat{u} \sin \omega t = C\hat{u} \sin \alpha = \hat{q} \sin \alpha \quad (1)$$

missä \hat{u} on jännitteen huippuarvo, ω on kulmataajuus, q on sähkövaraus, C on kondensaattorin kapasitanssi, \hat{q} on sähkövarauksen huippuarvo ja t on aika. Kulma α on kulmataajuuden ω ja ajan t tulo.

Varauksen vaihdellessa tällä tavoin kondensaattorin kapasitanssin määritelmän mukaisesti kapasitanssi C saadaan sähkövarauksen muutoksesta suhteessa sähkövarauksen muutosta vastaavaan jännitteen muutoksen, ja kun lisäksi huomioidaan, että sähkövarauksen muutos on yhtä kuin idt , voidaan virralle muodostaa kaavan 2 mukainen yhtälö. (Aura & Tonteri 2005, 172.)

$$i = C \frac{du}{dt} = C \frac{d(\hat{u} \sin \omega t)}{dt} = \omega C \hat{u} \cos \omega t = \omega C \hat{u} \sin(\omega t + 90^\circ) = \omega C \hat{u} \sin(\alpha + 90^\circ) \quad (2)$$

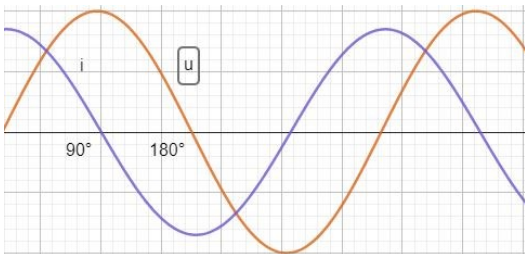
missä dq on sähkövarauksen muutos ja du sähkövarauksen muutosta vastaava jännitteen muutos, i on virran hetkellisarvo ja dt on ajan muutos. Tästä voidaan tehdä päätelmä, että kun kondensaattorin jännite vaihtelee sinimuotoisesti, virtapiiriin syntyy sinimuotoinen virta, joka on 90° jännitettä edellä eli vaihesiirtokulma φ on -90° .

Tällöin kaavasta 2 voidaan päätellä virran huippuarvon \hat{i} olevan kulmanopeuden ω , kapasitanssin C ja jännitteen huippuarvon \hat{u} tulo, ja kun tiedetään tehollisarvon olevan huippuarvon neliöllinen keskiarvo, saadaan virran tehollisarvo laskettua kaavan 3 mukaisella yhtälöllä. (Aura & Tonteri 2005, 173.)

$$I = \omega C U = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} \quad (3)$$

missä I on virran tehollisarvo ja U on jännitteen tehollisarvo. Kaavassa 3 esiintyy kulmataajuuden ja kapasitanssin käänteisarvo $\frac{1}{\omega C}$, ja kun tiedetään kulmataajuuden olevan $2\pi f$, voidaan käänteisarvo kirjoittaa muodossa $\frac{1}{2\pi f C}$, joka on myös suure X_c , eli Ohmin lain mukaan kondensaattorin kapasitiivinen vastus eli kapasitiivinen reaktanssi. Kapasitiivisen reaktanssin yksikkö on Ω eli ohmi, vastuksen yksikkö. Kondensaattorin Ohmin lain mukainen yhtälö saadaan kaavan 4 mukaisesti. (Aura & Tonteri 2005, 174.) Kuviossa 1 on esitetty jännitteen ja virran sinimuodot kapasitiivisen kuormituksen tapauksessa.

$$U = I X_c = I \frac{1}{\omega C} \quad (4)$$



KUVIO 1. Ihanteellisen kondensaattorin sinimuotoinen jännite ja virta (mukaihen Ahoranta 2021, 140)

Vaihtosähköpiiriin sarjaan kytkettyjen ihanteellisten kondensaattoreiden tapauksessa, jokaisen kondensaattorin jännite on 90° virtapiirin virtaa jäljessä, jolloin Kirchoffin jännitelaista johtuen voidaan määrittää sarjakytkennän kokonaiskapasitanssille kaavan 5 mukainen yhtälö (Aura & Tonteri 2005, 175).

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C_1} + \frac{1}{\omega C_2} + \dots + \frac{1}{\omega C_n} \quad (5)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}$$

Vaihtosähköpiiriin rinnan kytkettyjen ihanteellisten kondensaattoreiden tapauksessa jokaiseen kondensaattoriin vaikuttaa sama sinimuotoinen jännite, eli kondensaattoriin virta on 90° virtapiiriin jännitettä edellä, jolloin Kirchoffin virtalaista johtaen voidaan määrittää rinnankytkennän kokonaiskapasitanssille kaavan 6 mukainen yhtälö (Aura & Tonteri 2005, 176).

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (6)$$

Ihanteellisen käämin tapauksessa oletetaan käämin resistanssin olevan 0Ω , eli siinä ei synny virtalämpöä. Sinimuotoisen jännitteen synnyttäessä käämiin sinimuotoisen virran kaavan 7 mukaisesti indusoituu käämiin itseinduktion sähkömotorinen voima eli vastasähkömotorinen voima. (Aura & Tonteri 2005, 168.)

$$i = \hat{i} \sin \omega t = \hat{i} \sin \alpha \quad (7)$$

Vastasähkömotorinen voima saadaan kaavasta 8:

$$\begin{aligned} e &= -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(\hat{i} \sin \omega t)}{dt} \\ &= -\omega L \hat{i} \cos \omega t = \hat{e} \cos \omega t \\ &= \hat{e} \sin(\omega t - 90^\circ) = \hat{e} \sin(\alpha - 90^\circ) \end{aligned} \quad (8)$$

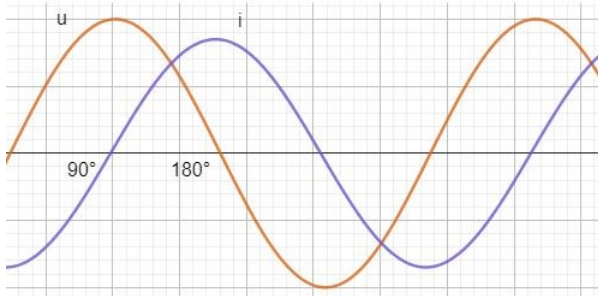
missä L on käämin induktanssi, di on virran muutos, dt on ajan muutos, e vastasähkömotorinen voima ja \hat{e} sen huippuarvo. Kirchoffin jännitelakia soveltamalla saadaan ihanteelliselle käämille kaavan 9 mukainen yhtälö:

$$\begin{aligned} u &= -e = \omega L \hat{i} \cos \alpha = \hat{e} \cos \alpha \\ &= -\hat{e} \sin(\alpha - 90^\circ) = \hat{e} \sin(\alpha + 90^\circ) \end{aligned} \quad (9)$$

Kaavoista 7, 8 ja 9 saadaan tärkeä sääntö. Kun käämin läpi kulkee sinimuotoinen virta, ihanteellisen käämin läpi indusoituu vyyhteen sähkömotorinen voima, joka jää 90° virrasta jälkeen. Käämiin vaikuttava jännite on 90° virtaa edellä, eli vaihesiirtokulma φ on virtaosoittimesta jänniteosoittimeen laskettaessa $+90^\circ$. (Aura & Tonteri 2005, 168.) Sähkömotorista voimaa kutsutaan vastasähkömotoriseksi voimaksi, koska indusoitunut sähkömotorinen voima ja käämiin vaikuttava jännite ovat toisiinsa nähden 180° :n kulmassa. Virran käämiin synnyttämän magneettivuon φ yhtälö saadaan kaavasta 10. (Aura & Tonteri 2005, 168.)

$$\varphi = \frac{iN}{R_m} = \frac{\hat{i}N}{R_m} \sin \omega t = \hat{\varphi} \sin \omega t \quad (10)$$

missä N on käämin johdinkierrelukumäärä ja R_m käämin magneettinen vastus eli reluktanssi. Yhtälöstä voidaan nähdä ihanteellisen käämin magneettivuon olevan käämin virran kanssa samanvaiheinen. Kuviossa 2 on esitetty ihanteellisen käämin jännitteen ja virran sinimuodot.



KUVIO 2. Ihanteellisen käämin jännitteen ja virran sinimuodot (mukaiillen Ahoranta 2021, 146)

Sähkömotorisen voiman ja jännitteen huippuarvoille pätee $\hat{u} = \hat{e} = \omega L \hat{i}$, ja kun tiedetään tehollisarvon olevan huippuarvon neliöllinen keskiarvo, saadaan virran tehollisarvo laskettua kaavan 11 mukaisesti:

$$U = E = \omega L I \quad (11)$$

missä I on virran tehollisarvo ja U on jännitteen tehollisarvo. Kaavassa 11 esiintyy kulmanopeuden ja induktanssin tulo ωL , joka voidaan ilmoittaa myös muodossa $2\pi f L$, on myös suure X_L , joka on Ohmin lain mukaan käämin induktiivinen vastus eli induktiivinen reaktanssi. Induktiivisen reaktanssin yksikkö on Ω eli ohmi, vastuksen yksikkö. Ihanteellisen käämin Ohmin lain mukainen yhtälö saadaan kaavan 12 mukaisesti. (Aura & Tonteri 2005, 169.)

$$U = E = I X_L = I \omega L \quad (12)$$

Vaihtosähköpiiriin sarjaan kytkettyjen ihanteellisten induktanssien tapauksessa jokaisen käämin läpi kulkee sama sinimuotoinen vaihtovirta, ja jännite on 90° virtapiirin virtaa edellä, ja kaikki jänniteosoitimet ovat tällöin samanvaiheisia. Kirchoffin jännitelaista voidaan johtaa sarjakytkenän induktanssin olevan kaavan 13 mukainen (Aura & Tonteri 2005, 170).

$$\omega L = \omega L_1 + \omega L_2 + \dots + \omega L_n \quad (13)$$

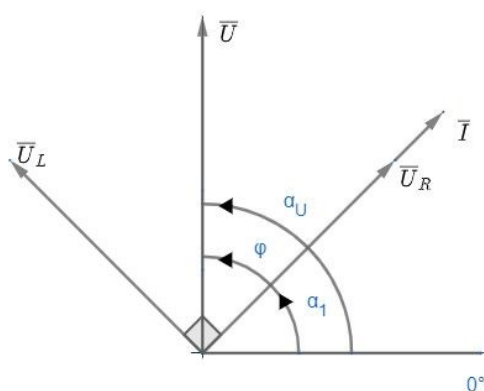
$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_n = \sum_{i=1}^n L_i$$

Vaihtosähköpiiriin rinnan kytkettyjen ihanteellisten käämien tapauksessa jokaiseen käämiin vaikuttaa sama sinimuotoinen jännite, eli käämin virta on 90° virtapiirin jännitettä jäljessä, ja kaikki virtaosoittimet ovat tällöin samanvaiheisia. Kirchoffin virtalaista voidaan rinnankytkennän induktanssille määrittää kaavan 14 mukainen yhtälö (Aura & Tonteri 2005, 171).

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{L_i} \quad (14)$$

2.2 Resistanssin ja induktanssin sarjakytkentä vaihtosähköpiirissä

Resistanssin ja induktanssin sarjakytkennän voidaan ajatella koostuvan ihanteellisen käämin induktanssin L ja erillisen resistanssin R sarjakytkennästä, tai se voidaan käsittää myös todellisen käämin kytkennäksi, jossa resistanssi R on käämin johtimen resistanssi ja L on käämin induktanssi. Resistanssin R yli vaikuttava jännite on $U_R = I \cdot R$ ja induktanssin L yli vaikuttava jännite on $U_L = I \cdot X_L$. Sarjakytkentää vaihtosähköpiirissä ratkaistaessa kannattaa aloittaa piirtämällä osoitinpiirros, ellei ratkaisemiseen käytetä osoitin- eli kompleksilaskentaa (Aura & Tonteri 2005, 177).



KUVIO 3. Resistanssin ja induktanssin sarjakytkennän osoitinpiirros (mukaihen Aura & Tonteri 2005, 177)

Kuviossa 3 perusosoittimeksi on valittu virta, koska sarjaan kytketyille komponenteille resistanssi ja reaktanssi, virta on yhteinen suure, joka kulkee molempien läpi. Virtaosoitin \bar{I} on piirretty mielivaltaiseen vaihekulmaan α_1 , ja koska resistanssi on virran suhteen samanvaiheinen, jänniteosoitin \bar{U}_R on piirretty virran kanssa saman suuntaiseksi. Jänniteosoitin \bar{U}_L on piirretty 90° virtaosoittimesta edelle, koska induktiiviseen reaktanssiin vaikuttava jännite on aina 90° virtaa edellä. Kirchoffin jännitelain

mukaan sarjakytken liitinjännite \bar{U} on resistiivisen jännitteen \bar{U}_R ja induktiivisen jännitteen \bar{U}_L summa kaavan 15 mukaisesti, eli ne on laskettava geometrisesti yhteen. (Aura & Tonteri 2005, 178.)

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L \quad (15)$$

Kuvion 3 vektoreiden \bar{U}_R ja \bar{U}_L väliin syntyvän suorakulmion lävistäjä on liitinjännite \bar{U} . Jos suureet piirrettäisiin mittakaavaan ja oikeellisesti, voitaisiin osoitinpiirrokselta mitata tuntemattomat arvot graafisena ratkaisuna. Yleensä osoitinpiirrosta käytetään vain havainnollistamaan tilannetta eikä sitä piirretä mittatarkasti vaan ainoastaan muodoltaan oikein. Kuvion 3 osoitinpiirroksen perusteella voidaan geometrisesti laskea Pythagoraan väittämän mukaisesti jännitteen U olevan $\sqrt{U_R^2 + U_L^2}$, johon sijoittamalla Ohmin lain mukaisesti virta I , resistanssi R ja induktanssi X_L saadaan kaavan 16 mukainen yhtälö (Aura & Tonteri 2005, 178.)

$$U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L)^2} = I \cdot \sqrt{R^2 + X_L^2} = IZ \quad (16)$$

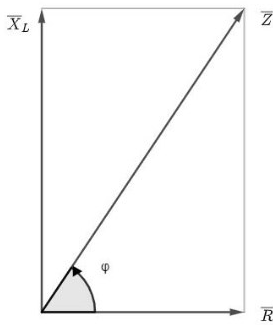
missä Z on sarjakytken kokonaisvastus eli impedanssi. Sarjaan kytketyn resistanssin R ja induktiivisen reaktanssin X_L impedanssi Z on kaavan 17 mukainen:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} \quad (17)$$

Kun merkitään jänniteosoittimen vaihekulmaa tunnuksella α_U ja virtaosoittimen vaihekulmaa tunnuksella α_I , saadaan virta- ja jänniteosoittimen välinen vaihesiirtokulma φ vähentämällä jänniteosoittimen vaihekulmasta virtaosoittimen vaihekulma vähentämällä jänniteosoittimen vaihekulmasta α_U virtaosoittimen α_I . Osoitinpiirroksen suorakulmaisesta kolmiosta saadaan vaihesiirtokulman kosinille arvo kaavan 18 mukaisesti:

$$\cos\varphi = \frac{U_R}{U} = \frac{IR}{IZ} = \frac{R}{Z} \quad (18)$$

Koska $\cos\varphi$ on tekijänä vaihtosähköpätötehon lausekkeessa, nimitetään sitä tehokertoimeksi. Tehokerrointa käsitellään sähkötehon teoriassa lisää. Kaavan 17 yhtälöstä voidaan nähdä resistanssin \bar{R} ja induktiivisen reaktanssin \bar{X}_L olevan suorakulmaisen kolmion lyhyet sivut eli kateetit, jolloin voidaan piirtää kuvion 4 mukainen vastuskolmio. (Aura & Tonteri 2005, 179.)



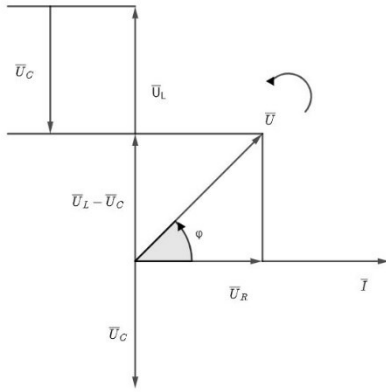
KUVIO 4. Resistanssin ja induktanssin sarjakytkennän vastuskolmio (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 179)

Toisin kuin muiden vaihtosähkösuureiden hetkellisarvot, vastusosoittimien arvot ovat vakioita eivätkä ne vaihtelee sinimuotoisesti, siksi niitä voidaan nimittää apuosoittimiksi. Resistanssin \bar{R} osoitin on aina piirrettävä kulmaan 0° ja induktiivinen reaktanssiosoitin kulmaan $+90^\circ$, jolloin impedanssiosoitin \bar{Z} tulee kulmaan φ , joka on sama kuin sarjakytkennän vaihesiirtokulma. Tällöin kytkennän impedanssi \bar{Z} on $\bar{R} + \bar{X}_L$. (Aura & Tonteri 2005, 179.)

2.3 Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin sarjakytkentä vaihtosähköpiirissä

Ihanteellisen resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin (RLC) sarjakytkennässä kytkennän virran ollessa I , on resistanssin yli vaikuttava jännite U_R virran ja resistanssin tulo, kelan yli vaikuttava jännite U_L virran ja induktiivisen reaktanssin tulo, ja kapasitanssin yli vaikuttava jännite U_C virran ja kapasitiivisen reaktanssin tulo (Aura & Tonteri 2005, 181).

Osoitinpiirroksessa kytkennän ollessa sarjakytkentä on virtaosoitin kaikille komponenteille yhteinen. Virtaosoitin piirretään mielivaltaiseen asemakulmaan ja resistiivinen jänniteosoitin \bar{U}_R virtaosoittimen kanssa samansuuntaiseksi. Induktiivinen jänniteosoitin \bar{U}_L piirretään 90° virtaosoittimesta edelle ja kapasitiivinen jänniteosoitin \bar{U}_C 90° virtaosoitinta jälkeen. Kuviossa 5 on esitetty kytkennän osoitinpiirros. (Aura & Tonteri 2005, 181-182.)



KUVIO 5. RLC-sarjakytkennän osoitinpiirros (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 182)

Kirchhoffin jännitelain perusteella saadaan liitinjännitteen jänniteosoitin \bar{U} (KAAVA 19).

$$\bar{U} = \bar{U}_R + \bar{U}_L + \bar{U}_C \quad (19)$$

Osoitinpiirroksen perusteella voidaan kirjoittaa yhtälö suorakulmaisesta kolmiosta liitinjännitteelle, jonka sivujen pituudet ovat U_R , $(U_L - U_C)$ ja U , ja sijoittamalla siihen osajännitteiden arvot saadaan kaavan 20 mukainen yhtälö:

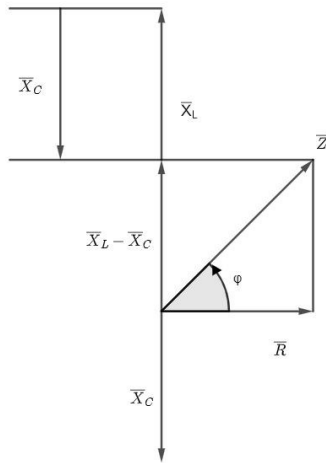
$$U = \sqrt{(IR)^2 + (IX_L - IX_C)^2} \quad (20)$$

$$I = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = IZ$$

Kaavan 20 mukainen yhtälö on vaihtosähkötekniikan täydellinen Ohmin laki. Täydellisen sarjakytkennän, jonka kaikki vaihtosähkötekniikan eri vastuskomponentit ovat sarjassa, impedanssi Z saadaan kaavan 21 mukaisella yhtälöllä. (Aura & Tonteri 2005, 182.)

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (21)$$

Kuviossa 6 on esitetty RLC-sarjakytkennän vastuskolmio. Tehokerroin $\cos \varphi$ saadaan kaavan 41 mukaisesta yhtälöstä, kuten kaikissa vaihtosähkötekniikan sarjakytkennöissä. Kun reaktiivinen induktanssi X_L on yhtä suuri kuin reaktiivinen kapasitanssi X_C , eli impedanssi Z on yhtä suuri kuin resistanssi R , niin voidaan nähdä tehokerroimen $\cos \varphi$ olevan 1, jolloin sähkölähteen kannalta tarkasteltuna virtapiiri vastaa täysin resistiivistä virtapiiriä. Jos X_L on suurempi kuin X_C , niin virtapiiri on induktiivinen ja vaihesiirtokulma φ on suurempi kuin 0° , ja jos taas X_C on suurempi X_L , virtapiiri on kapasitiivinen ja vaihesiirtokulma φ on pienempi kuin 0° . (Aura & Tonteri 2005, 183.)

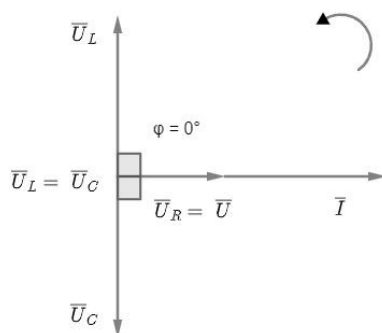


KUVIO 6. RLC-sarjakytkennän vastusosoitinpiirros (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 183)

2.4 Sarjaresonanssi

Kun RLC-sarjakytkennässä induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret, syntyy sarja- eli jänniteresonanssi. Kun RLC-sarjakytkentä täyttää tämän ehdon, on sen osoitinpiirros kuvion 7 mukainen. Kuviosta 7 voidaan havaita jännitteen ja virran olevan samanvaiheisia, eli kyseessä on resonanssitilanne. Resonanssin taajuus saadaan kaavasta 22. (Aura & Tonteri 2005, 184.)

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (22)$$



KUVIO 7. Sarjaresonanssitilanteen osoitinpiirros (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 184)

Sarjaresonanssissa siis kapasitiivinen jännite U_C ja induktiivinen jännite U_L ovat yhtä suuria, jolloin ne kumoavat toisensa. Tässä tilanteessa kondensaattorin ja käämin jännitteet voivat olla huomattavasti korkeampia kuin kytkennän liitinjännite U , jolloin jännitteistä voi tulla kondensaattorille ja käämille

vaarallisia. Vaarallinen tilanteesta tulee silloin, kun resistanssi R on pieni, eli virtapiiriin virta on suuri, ja myös X_C ja X_L ovat suuret. Yleisessä tapauksessa virran arvo on kaavan 23 yhtälön mukainen. Resonanssitapauksessa impedanssi taas on resistiivinen, saavuttaen minimiarvonsa, kun impedanssi Z_{min} on yhtä suuri kuin resistanssi R , jolloin virta saavuttaa kaavan 24 mukaisesti maksimiarvonsa I_{max} . (Aura & Tonteri 2005, 184.)

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})^2}} = \frac{U}{Z} \quad (23)$$

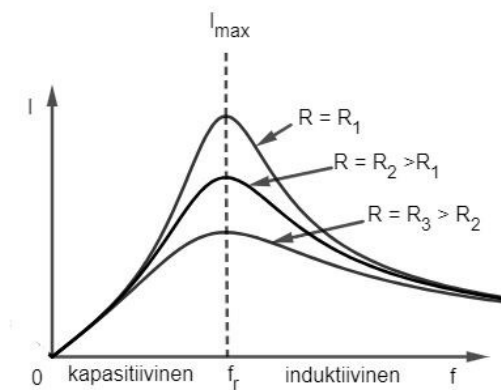
$$I_{max} = \frac{U}{R} = \frac{U}{Z_{min}} \quad (24)$$

Virtakäyrä $I=f(f)$ on sitä jyrkempi ja terävämpi, mitä pienempi on resistanssi R , kuten kuviossa 8 on esitetty taajuuden funktiona kolmelle eri resistanssin arvolle. Sarjakytkennän osajännitteille saadaan kaavan 25 mukaiset yhtälöt:

$$U_R = \frac{R}{Z} U = IR \quad (25)$$

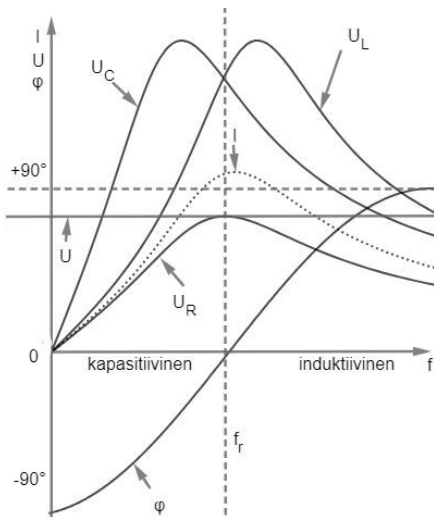
$$U_L = \frac{X_L}{Z} U = IX_L$$

$$U_C = \frac{X_C}{Z} U = IX_C$$



KUVIO 8. Sarjakytkennän virtakäyrät (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 185)

Vaihesiirtokulma $\cos \varphi$ on kaavan 18 mukaisesti $\frac{R}{Z}$. Kuviossa 9 on esitetty edellä mainittujen yhtälöiden kuvaajat taajuuden funktiona, joista voidaan nähdä induktiivisen ja kapasitiivisen jännitteen olevan liitinjännitettä suuremmat resonanssitilanteessa ja sen lähellä. Voidaan myös päätellä, että resistanssia kasvattamalla voidaan rajoittaa resonanssitilan virtaa ja induktiivisen sekä kapasitiivisen jännitteen suuruutta.



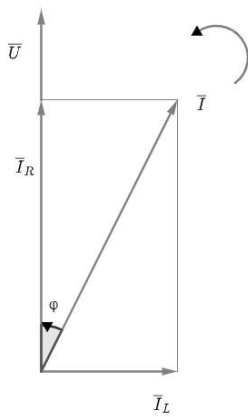
KUVIO 9. Täydellisen sarjakytken suuret taajuuden funktiona (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 185)

Tarkastellessa vastussuureiden muuttumista taajuuden funktiona havaitaan induktiivisen reaktanssin suurenevan suoraviivaisesti taajuuden kasvaessa, eli käämi aiheuttaa vaihtovirralla sitä suuremman vastuksen, mitä suurempi on virran taajuus. Tästä syystä käämiä nimitetään myös kuristimeksi. Kapasitiivinen reaktanssi taas suurenee taajuuden pienentyessä, ja kondensaattori katkaisee virtapiirin kokonaan, kun taajuus on nolla, eli virta on tasavirtaa. Resistanssi taas on taajuudesta riippumaton vakio, eli sama kuin tasasähköresistanssi, jos ei huomioida virran ahtautumista. Vaihtosähköresistanssi suurenee todellisuudessa taajuuden ja johtimen poikkipinta-alan kasvaessa. Virran ahtautumisen aiheuttavat induktiovirrat, jotka johtimessa kulkevat virtapiirin virran suuntaan pintakerroksessa ja virtapiirin vastaisesti keskiosassa. Virran ahtautumisella on merkitystä 50 Hz:n taajuudella kuitenkin vain suurilla johtimien poikkipinnoilla. (Aura & Tonteri 2005, 186.)

Sarjaresonanssiipiirejä nimitetään myös imupiireiksi. Imupiireillä voidaan nimensä mukaisesti imeä yliaaltoja synnyttävän laitteen aiheuttamia yliaaltovirtoja, jolloin estetään yliaaltovirtojen kulkeutuminen verkkoon. (Ahoranta 2021, 175.)

2.5 Resistanssin ja induktanssin rinnankytkentä vaihtosähköpiirissä

Ihanteellisen vastuksen ja käämin rinnankytkennässä vaikuttaa molempiin sama jännite U , jolloin resistanssiin R vaikuttava osavirta I_R on jännite jaettuna resistanssilla, ja induktiiviseen reaktanssiin X_L vaikuttava osavirta I_R on jännite jaettuna induktiivisella reaktanssilla. (Aura & Tonteri 2005, 187). Kuviossa 10 on esitetty resistanssin ja induktanssin rinnankytkennän osoitinpiirros.



KUVIO 10. Resistanssin ja induktanssin rinnankytkennän osoitinpiirros (mukailten Aura & Tonteri 2005, 188)

Kuten kuviossa 10, on rinnankytkennän vaihtosähköpiiriä ratkaistaessa parasta aloittaa jänniteosoittimesta, koska jännite on yhteinen rinnankytkennässä molemmille komponenteille. Perusosoitin eli jänniteosoitin piirretään mielivaltaiseen asentoon, minkä jälkeen virtaosoittimet piirretään jänniteosoittimen suhteen oikeisiin asemakulmiin. Vastuksen virtaosoitin \bar{I}_R piirretään jänniteosoittimen \bar{U} kanssa samaan suuntaan, koska ne ovat samanvaiheisia. Käämin virtaosoitin \bar{I}_L piirretään 90° jälkeen jänniteosoittimesta \bar{U} . Kirchhoffin virtalain mukaisesti vastuksen ja käämin rinnankytkennälle virroille saadaan kaavan 26 mukainen yhtälö, eli ne on laskettava geometrisesti yhteen. (Aura & Tonteri 2005, 188.)

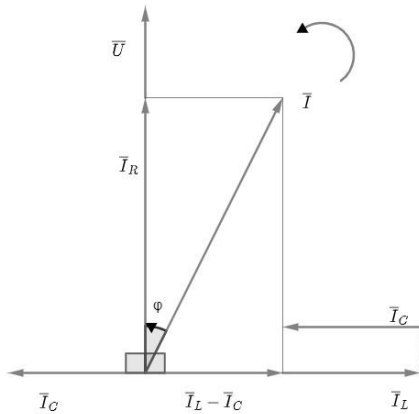
$$\bar{I} = \bar{I}_R + \bar{I}_L \quad (26)$$

Kuvion 10 mukaisesti, \bar{I}_R ja \bar{I}_L väliin syntyvän suorakulmion lävistäjästä saadaan kytkennän kokonaisvirta \bar{I} . Mikäli osoitinpiirros on mittatarkka, voidaan siitä laskea kytkennän virran I arvo geometrisesti Pythagoraan väittämän mukaisesti. Vaihesiirtokulma $\cos \varphi$ eli tehokerroin on tällöin $\frac{I_R}{I}$ ja kytkennän impedanssi Z on $\frac{U}{I}$. (Aura & Tonteri 2005, 188.)

2.6 Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin rinnankytkentä vaihtosähköpiirissä

RLC-piirin rinnankytkennän tapauksessa, kun komponentit ovat ihanteellisia ja jännitteen U ollessa kaikille komponenteille sama, kytkentään vaikuttavat osavirrat. Näistä resistanssiin vaikuttava osavirta I_R on jännite jaettuna resistanssilla, kelaan vaikuttava osavirta I_L on jännite jaettuna induktiivisella

reaktanssilla, ja kapasitanssiin vaikuttava osavirta I_C on jännite jaettuna kapasitiivisella induktanssilla. (Aura & Tonteri 2005, 189). Kuviossa 11 on esitetty RLC-rinnankytkennän osoitinpiirros.



KUVIO 11. RLC-rinnankytkennän osoitinpiirros (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 189)

Kuten kuvion 7 resistanssin ja induktanssin tapauksessakin, osoitinpiirros aloitetaan piirtämällä vastuksen virtaosoitin \bar{I}_R jänniteosoittimen \bar{U} kanssa samaan suuntaan jännitteen ollessa kaikille komponenteille yhteinen osoitin ja vastuksen virran \bar{I}_R ollessa jännitteen kanssa samanvaiheinen. Käämin virtaosoitin \bar{I}_L piirretään 90° jälkeen jänniteosoittimesta \bar{U} , ja kondensaattorin virtaosoitin \bar{I}_C 90° jänniteosoitinta \bar{U} edelle. Kirchhoffin virtalain mukaisesti virran \bar{I} osoitin saadaan summaamalla osavirrat \bar{I}_R , \bar{I}_L ja \bar{I}_C (Aura & Tonteri 2005, 190.) Kuvion 11 osoitinpiirroksen mukaisesti kytkennän virralle I voidaan kirjoittaa yhtälö suorakulmaisesta kolmiosta, jonka sivujen pituudet ovat I_R , $(I_R - I_C)$ ja I , ja kun tähän yhtälöön sijoitetaan osavirtojen arvot, saadaan virralle kaavan 27 mukainen yhtälö:

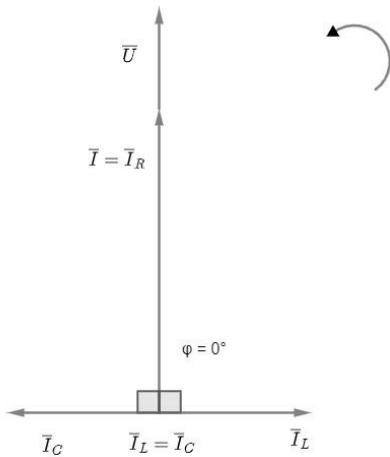
$$I = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + \left(\frac{U}{X_L} + \frac{U}{X_C}\right)^2} = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{X_L} + \frac{1}{X_C}\right)^2} \quad (27)$$

Tehokertoimelle $\cos \varphi$ saadaan kaavan 28 mukaisesta yhtälöstä:

$$\cos \varphi = \frac{I_R}{I} = \frac{1}{\sqrt{1 + R^2 \left(\frac{1}{X_L} - \frac{1}{X_C}\right)^2}} \quad (28)$$

2.7 Rinnakkaisresonanssi

Kun RLC-rinnankytkennässä induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret, syntyy rinnakkais- eli virtaresonanssi, kuten sarjaresonanssin tapauksessakin. Kun induktiivinen reaktanssi X_L ja kapasitiivinen reaktanssi X_C ovat yhtä suuria, on osoitinpiirros kuvion 12 mukainen. (Aura & Tonteri 2005, 191.)



KUVIO 12. Rinnakkaisresonanssin osoitinpiirros (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 192)

Resonanssin taajuus f_r saadaan myös samalla kaavalla 22 kuin sarjaresonanssin tapauksessakin. Rinnakkaisresonanssin tapauksessa induktiivinen virta I_L ja kapasitiivinen virta I_C siis kumoavat toisensa, jolloin kytkennän ottama kokonaisvirta I on sama kuin resistiivinen virta I_R . Toisin kuin sarjaresonanssin tapauksessa, voidaan huomata, että rinnakkaisresonanssi ei muodostu vaaralliseksi millekään kytkennän komponentille. Yleisessä tapauksessa rinnankytkennän kokonaisvirran arvo on kaavan 29 mukainen. (Aura & Tonteri 2005, 191.)

$$I = U \sqrt{\frac{1}{R^2} + \left(\frac{1}{2\pi fL} - 2\pi fC\right)^2} \quad (29)$$

Resonanssitapauksessa kytkennän impedanssi on resistiivinen ja saavuttaa maksimi arvonsa, kun impedanssi Z_{max} on yhtä suuri kuin resistanssi R . Tällöin kytkennän virta saavuttaa minimiarvonsa I_{min} kaavan 30 yhtälön mukaisesti:

$$I_{min} = I_R = \frac{U}{R} = \frac{U}{Z_{max}} \quad (30)$$

Tästä voidaan päätellä kytkennän virran I olevan sitä pienempi, mitä suurempi on resistanssi R . Mikäli kytkennän resistanssi R on ääretön, eli kytkennässä ei ole vastusta, ei kytkentä ota virtaa sähkölähteestä ollenkaan ja käämi ja kondensaattori muodostavat niin sanotun värähtelypiirin, joka värähtelee

resonanssitaajuudella. Tällöin energia on vuoroin käämin magneettikentässä ja vuoroin kondensaattorin sähkökentässä. Kyseistä ilmiötä käytetään hyödyksi tietoliikennetekniikan virityspiireissä, mutta myös sähkövoimatekniikan loistehon kompensoinnissa, jossa rinnakkaisresonanssipiirit ovat viritetty 50 Hz taajuudelle. Rinnankytkennän osavirroille voidaan muodostaa kaavan 31 mukaiset yhtälöt, ja tehokerroin saadaan kaavasta 32. (Aura & Tonteri 2005, 192.)

$$I_R = \frac{U}{R} = \text{vakio} \quad (31)$$

$$I_L = \frac{U}{X_L} = \frac{U}{2\pi fL}$$

$$I_C = \frac{U}{X_C} = 2\pi fCU$$

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1+R^2\left(\frac{1}{2\pi fL}-2\pi fC\right)^2}} \quad (32)$$

Rinnakkaisresonanssiipiirejä voidaan käyttää myös yliaaltovirtojen poistamiseen. Rinnakkaisresonanssiipiirillä, joka on sijoitettu nollajohtimeen (THD- suodatin, Third Harmonic Filter), voidaan estää 3. yliaaltovirran pääsy verkkoon. (Ahoranta 2021, 175.)

2.8 Vaihtosähkön teho

Jos impedanssin Z läpi kulkevan sinimuotoisen vaihtovirran hetkellisarvo i on $\hat{i} \sin \alpha$ ja impedanssiin vaikuttavan jännitteen hetkellisarvo u on $\hat{u} \sin(\alpha + \varphi)$, jossa vaihesiirtokulma φ voi olla induktiivinen (positiivinen) ja kapasitiivinen (negatiivinen), on impedanssiin virtaavan tehon hetkellisarvo kaavan 33 mukainen (Aura & Tonteri 2005, 197).

$$\begin{aligned} p &= ui = \hat{u} \sin(\alpha + \varphi) \hat{i} \sin \alpha \\ &= \sqrt{2} U \sin(\alpha + \varphi) \cdot \sqrt{2} I \sin \alpha \\ &= UI 2 \sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \varphi) \end{aligned} \quad (33)$$

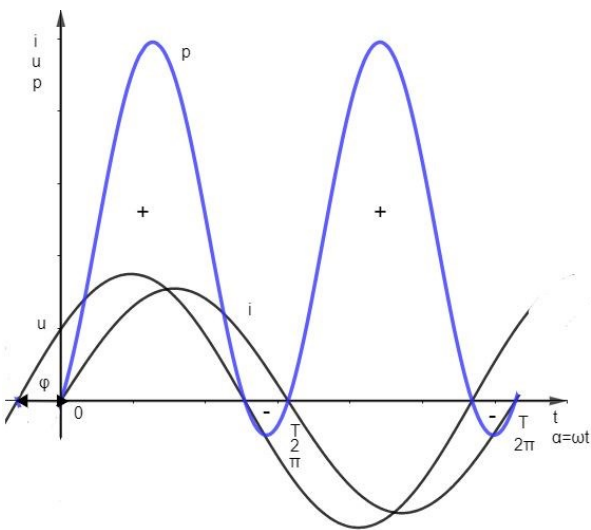
Kun tiedetään trigonometrian perusteella, että $2 \sin \alpha \cdot \sin \beta$ on yhtä kuin $\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)$, ja kun tätä lauseketta sovelletaan kaavan 33 yhtälöön, saadaan tehon lauseke kaavan 34 mukaiseen muotoon.

$$\begin{aligned} p &= UI [\cos(\alpha - \varphi) - \cos(\alpha + \varphi)] \\ &= UI [\cos(\alpha - \alpha - \varphi) - \cos(\alpha + \alpha + \varphi)] \end{aligned} \quad (34)$$

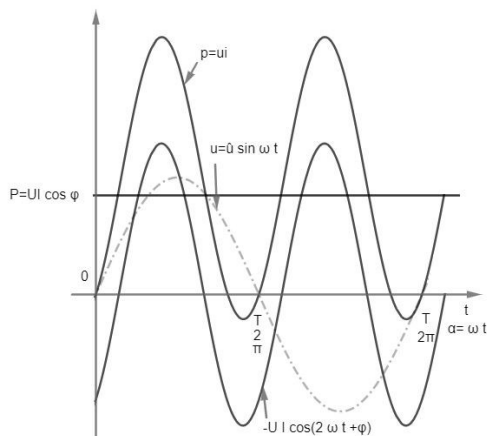
$$= UI[\cos(-\varphi) - \cos(2\alpha + \varphi)]$$

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

Hetkellisen tehon lausekkeessa on kaksi termiä, joista ensimmäinen $UI \cos \alpha$ on vakio, ja toinen, $UI(2\omega t + \varphi)$ vaihtelee kaksikertaisella taajuudella virtaan nähden. Kuviossa 13 on esitetty tehon, virran ja jännitteen kuvaajat. Kun teho p on positiivinen, energia virtaa generaattorista impedanssiin, ja kun teho p on negatiivinen, virtaa energia impedanssista generaattoriin. Hetkellisen tehon molemmat termit on esitetty kuviossa 14. (Aura & Tonteri 2005, 197). Kuviossa hetkellinen teho p on esitetty sinisenä käyränä.



KUVIO 13. Tehon, virran ja jännitteen kuvaajat (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 198)



KUVIO 14. Vaihtosähkön kaavojen 66 ja 67 termit esitettynä graafisessa muodossa (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 198)

Keskimääräinen teho yhden tai useamman jakson aikana saadaan kaavasta 35:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = UI \cos \varphi \quad (35)$$

missä U on vaihtojännitteen tehollisarvo, I vaihtojännitteen tehollisarvo, φ on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma, ja $\cos \varphi$ on vaihtosähkön tehokerroin. Tätä impedanssin resistanssissa lämmöksi muuttuvaa, vaihtosähkön keskimääräistä tehoa nimitetään pätötehoksi. Vaihtosähkötehosta pätöteho on se osuus, joka tulee sähkön kuluttajan hyödyksi. Kaavan 35 jännitteen ja virran tehollisarvojen tuloa kutsutaan näennäistehoksi S (KAAVA 36). (Aura & Tonteri 2005, 197-198.)

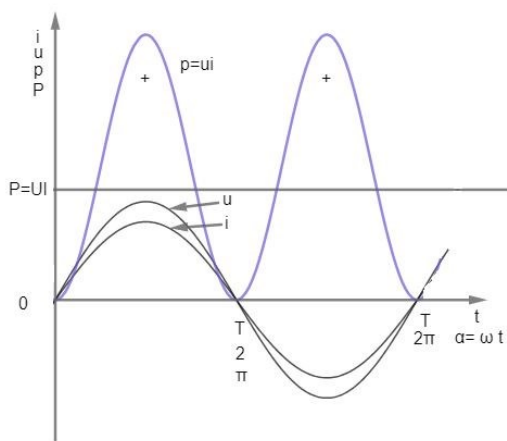
$$S = UI \quad (36)$$

Näennäistehoon sisältyy pysyvästi sähkölähteestä kojeeseen siirtyvä pätötehon, mutta myös sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä edestakaisin sykkivän tehon, loistehon Q , eli reaktiivisen tehon. Loisteho ei osallistu kulutuskojeen pysyvään työsuoritukseen, vaan heilahtelee jännitelähteen ja kulutuskojeen välissä edestakaisin loisena. (Aura & Tonteri 2005, 198.) Loisteho saadaan kaavasta 37:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (37)$$

missä $\sin \varphi$ on vaihtosähkön loistehokerroin. Vaihtosähkön näennäistehon S yksikkö on VA (volttiampeeri), pätötehon P yksikkö on VA $\cos \varphi$ eli W (Watti) ja loistehon Q yksikkö on VA $\sin \varphi$ eli VAR.

Kuormitusimpedanssin ollessa puhtaan resistiivistä vaihesiirtokulma φ on 0° , jolloin tehokerroin $\cos \varphi$ on 1. Hetkellinen teho p on tällöin $UI - UI \cos 2\omega t$ ja keskimääräinen teho P on UI . Energia virtaa tällöin jatkuvasti sähkölähteestä kulutuskojeeseen muuttuen resistanssissa lämmöksi. (Aura & Tonteri 2005, 199). Kuviossa 15 nähdään hetkellisen tehon vaihtelevan kaksinkertaisella taajuudella virran suhteen.

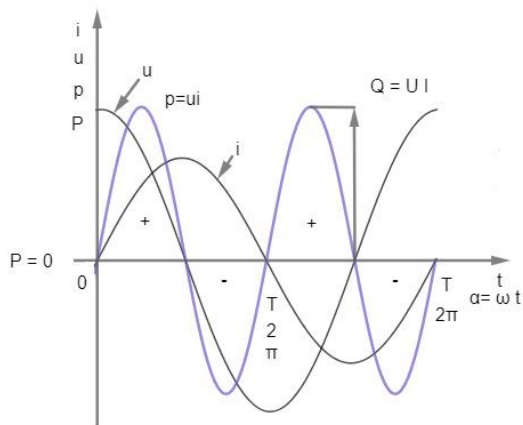


KUVIO 15. Puhtaan resistanssin tehon, jännitteen ja virran hetkellisarvojen kuvaajat

Kuormitusimpedanssin ollessa puhtaan induktiivista reaktanssia vaihesiirtokulma φ on $+90^\circ$ ja tehokerroin $\cos \varphi$ on 1, jolloin hetkellinen teho on kaavan 38 mukainen ja pätöteho P on 0:

$$\begin{aligned}
 p &= ui = \hat{u} \sin(\omega t + 90^\circ) \hat{i} \sin \omega t & (38) \\
 &= \hat{u} \hat{i} (\sin \omega t \cos 90^\circ + \cos \omega t \sin 90^\circ) \sin \omega t \\
 &= 2UI \sin \omega t \cos \omega t = UI \sin 2\omega t
 \end{aligned}$$

Kuviossa 16 nähdään puhtaan induktiivisen reaktanssin tehon, jännitteen ja virran hetkellisarvojen kuvaajat. Neljännesjakson aikana energia virtaa sähkölähteestä kulutuskojeeseen ja seuraavan neljännesjakson aikana sama energia virtaa takaisin kulutuskojeesta sähkölähteeseen. (Aura & Tonteri 2005, 200.)

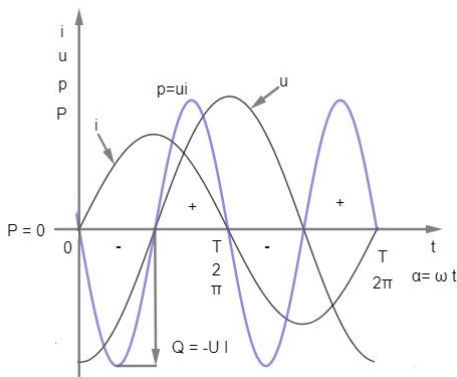


KUVIO 16. Puhtaan induktiivisen reaktanssin tehon, jännitteen ja virran hetkellisarvojen kuvaajat (mukaillen Aura & Tonteri 2005, 200)

Käämiin virtaava energia siis varastoituu käämin magneettikenttään, josta se virtaa takaisin sähkölähteen magneettikenttään seuraavan neljännesjakson aikana, ja koska ihanteellisen käämin tapauksessa energia ei muutu lämmöksi, pätöteho on tällöin nolla ja teho on pelkkää loistehoa. Loistehokertoimen ollessa 1 ($\sin 90^\circ$) käämin ottama induktiivinen loisteho on positiivista ja loisteho Q on UI . (Aura & Tonteri 2005, 201.)

Puhtaan kapasitiivisen reaktanssin tapauksessa vaihesiirtokulma on -90° ja tehokerroin $\cos \varphi$ on 0, jolloin hetkellinen teho p on $-UI \sin 2\omega t$, ja tässäkin tapauksessa keskimääräinen pätöteho P on 0. Myös kapasitiivisessa reaktanssissa energia virtaa edestakaisin sähkölähteen ja kulutuskojeen välillä

(KUVIO 17). Kondensaattoriin virtaava energia varastoituu kondensaattorin sähkökenttään ja seuraavan neljännesjakson aikana takaisin sähkölähteen magneettikenttään, ja myöskään ihanteellisen kondensaattorin tapauksessa energia ei muutu lämmöksi, jolloin pätöteho on 0. (Aura & Tonteri 2005, 202.)



KUVIO 17. Puhtaan kapasitiivisen reaktanssin tehon, jännitteen ja virran hetkellisarvojen kuvaajat (mukailen Aura & Tonteri 2005, 202)

Virtapiiriin voidaan tarkastella jakamalla virran I osoitin kahteen komponenttiin, pätökomponenttiin I_p ja loiskomponenttiin I_q . I_p on $I \cos \varphi$ ja I_q on $I \sin \varphi$. Pätökomponentti on samanvaiheinen jännitteen kanssa, eli se on puhtaan resistiivistä virtaa, kun taas loiskomponentti on kohtisuoraan jänniteosoitinta vastaan eli puhtaan induktiivista tai kapasitiivista virtaa. Induktiivisessa tapauksessa loisvirta on 90° jännitettä jäljessä, kapasitiivisessa taas jännitettä 90° edellä. (Aura & Tonteri 2005, 203.) Osoitinpiirroksen suorakulmaisesta kolmiosta voidaan siis laskea virta I pätövirran ja loisvirran neliöiden summan neliöjuuresta.

Näennäistehon ollessa $S = UI$ voidaan pätötehon yhtälö kirjoittaa muotoon $P = UI_p$ ja loistehon $Q = UI_q$. Silloin myös näennäisteholle, pätöteholle ja loisteholle voidaan muodostaa osoitinpiirroksen, ja näennäisteho S saadaan pätötehon ja loistehon neliöiden summan neliöjuuresta.

Tähän mennessä resistanssia, induktanssia ja kapasitanssia on käsitelty yksittäisinä komponentteina. Todellisuudessa kuitenkin komponentit eivät ole ideaalisia. Kelan induktanssiin liittyy myös kelan rakenteen rautalevyjen tai ferriittisydämien resistiivisiä rautahäviötä, joita voidaan kuvata rinnakkaisresistanssina, sekä johtimista aiheutuvia kuparihäviöitä, joita voidaan kuvata sarjaresistanssina. Kondensaattorin tapauksessa, mikäli kondensaattori ei ole ilmaeristeinen, käytetään kiinteää eristettä, jolla kondensaattori saadaan kestävämpään suurempaan jännitettään ja kapasitanssi kasvamaan hieman dielektrisen

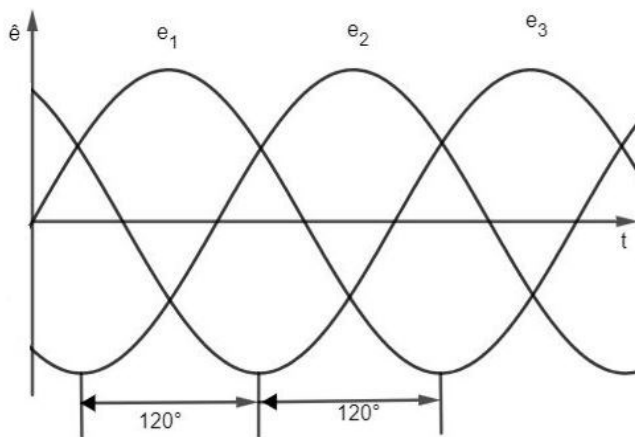
polarisaation vuoksi. Dielektrinen polarisaatio kuluttaa tehoa, jolloin aiheutuu häviöitä, joita voidaan kuvata rinnankytketyllä resistanssilla. (Voipio 1976, 146-149.)

2.9 Kolmivaiheiset järjestelmät

Yleisin sähköenergian kulutuksessa käytetty symmetrinen monivaihejärjestelmä on kolmivaihejärjestelmä. Kolmivaiheisuus syntyy kolmivaihegeneraattorissa, jonka staattorikäämityksessä vaihekäämien välillä on 120° vaihesiirto, jolloin roottorin mukana pyörivä magneettikenttä indusoi käämeihin samansuuruisen mutta vaihesiirrossa olevan jännitteen. Suomessa käytetyssä kolmivaihejärjestelmässä ensimmäisen vaiheen vaihekulma α_1 on 0° , toisen vaiheen vaihekulma α_2 on ensimmäistä jäljessä -120° ja kolmannen vaiheen vaihekulma α_3 on ensimmäistä -240° jäljessä. (Hietalahti 2013, 13.)

Kuviossa 18 on esitetty lähdejännitteiden e kuvaajat ajan suhteen. Hetkellisarvot lähdejännitteille saadaan kaavan 39 mukaisesta yhtälöstä:

$$\begin{aligned} e_1 &= \hat{e} \sin \omega t \\ e_2 &= \hat{e} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_3 &= \hat{e} \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \tag{39}$$



KUVIO 18. Kolmivaihejärjestelmän lähdejännitteiden kuvaajat ajan suhteen (mukaillen Hietalahti 2013, 13)

Myös kolmivaiheiset lähdejännitteet voidaan esittää osoitinpiirroksessa, jolloin ne piirretään vektori-muodossa edellä mainittujen vaihekulmien mukaisesti tehollisarvoina $E_1 \angle 0^\circ$, $E_2 \angle -120^\circ$ ja $E_3 \angle -240^\circ$, jotka vaikuttavat kunkin syöttöjohdon ja nollapisteen välillä. Kun vektorit lasketaan yhteen, voidaan havaita symmetrisen kolmivaihejärjestelmän lähdejännitteiden summan olevan nolla. (Hietalahti 2013, 14.)

Samoista lähdejännitteistä voidaan johtaa vaihe- ja nollajohtimen välillä vaikuttavat vaihejännitteet $\bar{U}_{v1} = U_v \angle 0^\circ$, $\bar{U}_{v2} = U_v \angle -120^\circ$ ja $\bar{U}_{v3} = U_v \angle -240^\circ$. Tunnuksina voidaan käyttää myös U_{L1-N} , U_{L2-N} ja U_{L3-N} . Koska symmetristen kuormitusten vaihekuormien virrat ja vaihesiirtokulmat ovat yhtä suuria, on nollajohtimessa kulkeva virta nolla. (Hietalahti 2013, 14-16.) Tähtikytkentäisen kuormituksen tapauksessa on vaihekuormaan vaikuttava jännite $\sqrt{3}$ -osa vaiheiden välisestä pääjännitteestä. (Ahoranta 2021, 275.) Kolmivaiheiset tehot saadaan laskettua silloin kaavan 40 mukaisesti:

$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (40)$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

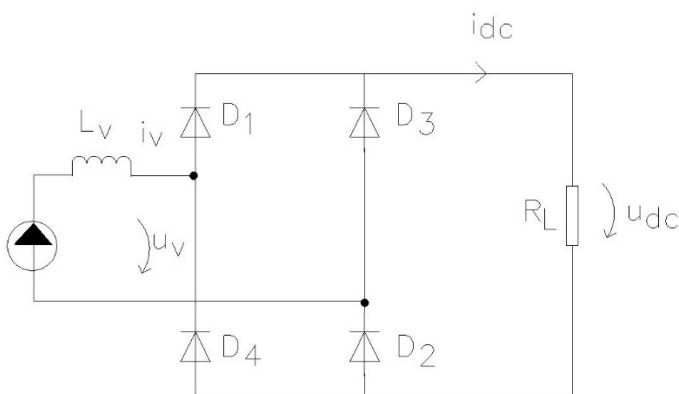
missä U on vaihejohtimien välinen pääjännite ja I vaihejohtimissa kulkeva päävirta.

Epäsymmetrisen kolmivaiheisen kuormituksen tapauksessa, vaihekuormien virrat ja vaihesiirtokulmat eivät olekaan yhtä suuria, jolloin nollajohtimessa kulkeva virta ei olekaan nolla. Epäsymmetrinen kuormitus kuormittaa sähköverkkoa sekä muuntajaa epäsymmetrisesti, minkä vuoksi on tärkeää suunnitella yksivaiheiset kuormitukset tasaisesti eri vaiheille. (Ahoranta 2021, 283.)

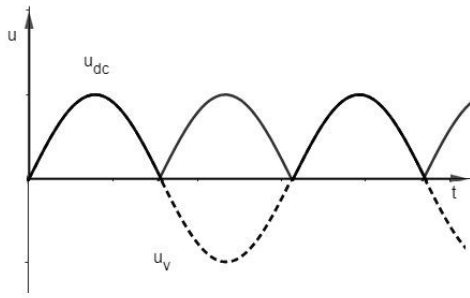
3 TASASUUNTAUS

Kun halutaan muuttaa vaihtojännite tasajännitteeksi, tarvitaan tasasuuntauskytkentöjä. Yksinkertaisimmillaan tasajännite voidaan toteuttaa, kun kuormitusvastuksen R_L kanssa kytketään sarjaan piidiodi, jolloin virta kulkee diodin läpi, kun diodin anodi on katodiin nähden positiivinen. Kun diodin anodi on katodiin nähden negatiivinen, virran kulku diodin läpi estyy, jolloin negatiivinen puolijakso vaihtojännitteen siniaallosta leikkautuu pois ja kuormitusvastuksen R_L virta ja sen yli vaikuttava jännite muodostuu siniaallon puolikkaista. Tätä kutsutaan puolialtotasasuuntaukseksi, koska se käyttää hyödykseen vain puolet siniaallosta (Hietalahti 2011, 35.)

Tehokkaampi tasasuuntauskytkentä saadaan tekemällä neljän diodin siltakytkentä eli kaksipulssisilta (KUVIO 19). Syöttöjännitteen U_L positiivisen jakson aikana diodit D_1 ja D_2 johtavat, ja negatiivisella puolijaksolla taas johtavat diodit D_3 ja D_4 . Kuten kytkentäkuvasta nähdään, kun syöttöjännite on positiivinen, virta kulkee diodin D_1 kautta kuormalle R_L ja palaa takaisin jännitelähteelle diodin D_2 kautta. Negatiivisen puolijakson aikana virta kulkee diodin D_3 kautta kuormalle ja palaa jännitelähteelle D_4 kautta, jolloin myös negatiivinen puolijakso kääntyy tasasuunnatussa siniaallossa positiiviseksi. Tämän seurauksena myös negatiivinen puolijakso käytetään hyödyksi suuntauksessa, jolloin kyseessä on kokoaltotasasuuntaus (KUVIO 20). (Hietalahti 2011, 38.)



KUVIO 19. Diodisilta, jossa toteutetaan kokoaltotasasuuntaus (mukaiillen Hietalahti 2011, 38)



KUVIO 20. Kokoaaltotasasuuntauksen jännitteiden aaltomuodot (mukaiillen Hietalahti 2011, 38)

Kuviossa 20 esitetty tapaus pätee vain resistiivisellä kuormituksella. Kuitenkin kuormituksessa yleensä on myös induktanssia, ja myös syöttöverkossa on induktiivisuutta, joka voidaan kuvata sarjaankytketyllä induktanssilla. Induktanssia voidaan myös siten käyttää tasoittamaan tasasuuntaajasta ulos tulevaa jännitettä. Induktanssiin varastoitunut energia saa diodin johtamaan, vaikka jännite on kääntynyt jo negatiiviseksi, jolloin virta piirissä menee nolleen, vasta kun energia induktanssista on purkautunut. (Hietalahti 2013, 178-179.)

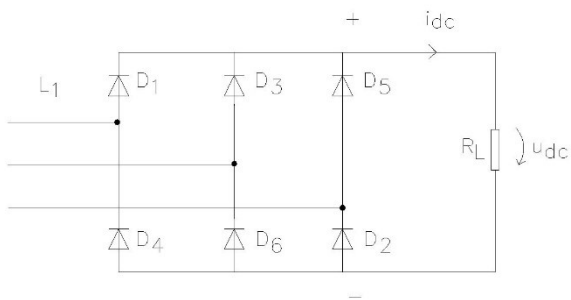
Kytettäessä suuri induktanssi sarjaan kuormituksen kanssa tasoittuu tasajännitepiirin virta, mutta verkkovirralla tämä aiheuttaa kanttimuotoisen 180° :tta leveän pulssimaisen virran, jonka haitallisia vaikutuksia käsitellään myöhemmin yliaalloissa. (Hietalahti 2013, 182)

Kun kuormitusresistanssin rinnalle kytketään kondensaattori tasasuunnatulle puolelle, tasoittaa se kuormituspiirin jännitteen vaihtelua purkamalla energiaa, kun vaihtojännitteen aaltomuoto alkaa laskea. Mitä suurempi kondensaattori on, sitä pienemmäksi muodostuu tasajännitteen vaihtelu. Haittapuolena kytkennässä on kondensaattorin energian varastoinnin aiheuttama virtapulssi, joka voi aiheuttaa häiriöitä sähköverkkoon. (Hietalahti 2013, 181.)

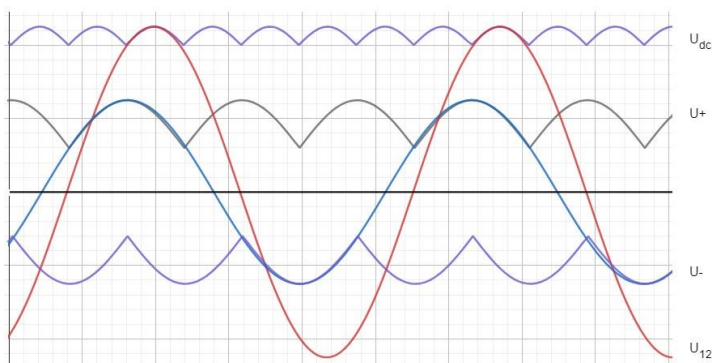
Kondensaattorin rinnankytkennän tapauksessa diodit johtavat vain, kun verkkojännite ylittää jänniteväliin tasajännitteen. jolloin vaihtovirtaa kulutetaan vain pienen osan jakson ajasta. Mikäli halutaan tehonsiirto samansuuruiseksi kuin induktiivisella kytkennällä, tulee virran amplitudi olla paljon suurempi, koska sama energia täytyy siirtää lyhyemmässä ajassa.

3.1 Kolmivaiheinen tasasuuntaus

Tarvittaessa suurta ja hyväläatuista tasasähkötehoa käytetään tasasuuntauksessa kolmivaiheista silta-kytkentää eli kuusipulssisiltaa. Tasasuuntaus rakennetaan kolmelle vaiheelle kytkettävästä diodiparista, jossa positiivisen puolen diodit ovat D_1 , D_3 ja D_5 ja negatiivisen puolen diodit ovat D_2 , D_4 ja D_6 (KUVIO 21). Numerointi ilmaisee diodien johtamisjärjestystä kolmivaiheisessa jännitteessä. (Hietalahti 2013, 184.) Kuusipulssisillan jännitteet esitetty kuviossa 22, jossa pääjännite on U_{12} , muodostuvat tasajännitteet U_+ ja U_- ja tasajännitekiskojen välinen jännite U_{dc} , joka on edellisten erotus. Myös kolmivaiheisen tasasuuntaajan jännitettä voidaan tasata kondensaattorin avulla. (Hietalahti 2013, 185.)



KUVIO 21. Kolmivaiheinen tasasuuntaussilta-kytkentä (mukaiillen Hietalahti 2013, 184)



KUVIO 22. Kolmivaiheisen tasasuuntaajan jännitteet (mukaiillen Hietalahti 2013, 184)

3.2 Ohjatut tasasuuntaajat

Yksinkertainen tasasuuntaaja voidaan muuttaa ohjatuksi tasasuuntaajaksi, kun diodin tilalle vaihdetaan sopiva ohjattava komponentti, kuten tyristori. Kuten yksinkertaisessa tasasuuntaajassa, tyristori toimii kuten diodi, mutta sen lisäksi että anodi on katodiin nähden positiivinen, tulee tyristorin hilalle antaa virtasysäys, jotta tyristori alkaa johtamaan. Jännitteen mennessä negatiiviseksi tyristori avautuu. Tyristorin vetämisaikaa muuttamalla jännitteen puolijakson suhteen, jolloin kuormituksen virta muodostuu

siniaallon puolikkaiden osista. Puolijakson alusta leikattavaa osuutta ilmaistaan ohjauskulmalla α , eli mitä suurempi ohjauskulman arvo on, sitä pienempi osuus puolijaksosta ohjataan kuormitukselle. Ohjauskulman ollessa 0° vastaa tilanne diodisiltaa, kun taas 90° asteen jälkeen jännite kääntyy negatiiviseksi ja tehon suunta muuttuu, mikäli kuormituksen tyyppi on aktiivinen kuormitus, kuten DC-sähkökone. (Hietalahti 2011, 45-47.)

Sama teho-ohjaus voidaan toteuttaa myös nopeasti ohjattavilla sytytettävillä ja sammutettavilla komponenteilla, kuten FET tai IGBT, jolloin kuormajännitettä voidaan viipaloida puolijakson johtoalueita ohjaamalla. Tällöin jännite muodostuu verkkojännitteestä saatavista lyhyistä jännitepulsseista. (Hietalahti 2011, 45.)

Kolmivaiheisen tasasuuntaajan tapauksessa diodit voidaan myös korvata ohjattavilla komponenteilla. Ohjauskulmalla määritetään johtamisvuorossa olevan komponentin päälle kytketymisen ajanhetki, jolloin komponentti johtaa niin kauan, että seuraava komponentti saa sytytyksen ja vuoron johtaa. Ohjaaminen tarkoittaa myös verkkovirran siirtymistä eri kohtaan suhteessa verkkojännitteeseen, jolloin verkon kannalta tarkasteltuna tasasuuntaus näkyy induktiivisena kuormituksena, eli verkosta otetaan ohjausloistehoa. Joissain käyttötilanteissa ohjauskulma ja suuntaajan verkosta ottama virta ja verkosta otettu loisteho kasvaa niin suureksi, että loistehon kulutusta täytyy kompensoida erillisillä loistehonkompensointilaitteistoilla. (Hietalahti 2011, 48-49)

Kolmivaihesilta voidaan toteuttaa myös puoliksi ohjattavana, jolloin vain positiivisen tai negatiivisen puolen diodit korvataan ohjattavilla komponenteilla, jolloin ohjauskulmaa voidaan säätää 180° :seen saakka. Tämän kytkennän etuna on pienempi verkosta otettu loisteho. Toinen vaihtoehto on sijoittaa niin sanottu nolladiodi rinnan ohjattavan sillan kanssa. Nolladiodilla ei ole vaikutusta toimintaan alle 60° :n ohjauskulmalla, mutta ohjauskulman ollessa $60-120^\circ$, pyrkii jännite kääntymään tasajännitepiirissä, jonka nolladiodi estää, ja näinä ajanhetkinä jännite on nolla. Ohjattavien komponenttien virta kkomutoi nolladiodille, jolloin se rajoittaa verkosta otettavaa loistehoa. (Hietalahti 2011, 50-53.)

Kommutointia voidaan kuvata verkon kannalta kaksivaiheiseksi oikosuluksi, koska virran siirtyessä ohjattavalta komponentilta järjestyksessä seuraavalle ovat molemmat komponentit yhtä aikaa johtavina, jolloin syntyy oikosulkuvirta, eli tässä tapauksessa kommutointivirta, joka sammuttaa ensimmäisen komponentin. (Aura & Tonteri 2005, 405)

Suuntaajan kommutointikulma voi kasvaa huomattavan suureksi suurilla tasavirroilla, jolloin suuntaaja ottaa verkosta myös kommutointiloistehoa. Tosin normaaleissa suuntaajissa tämä loisteho on merkityksetön. (Aura & Tonteri 2005, 411).

Kuormalaitteiden kannalta tasavirran tulisi olla mahdollisimman tasaista. Kuten jo aiemmin on mainittu, tasajännitettä voidaan vakavoidsa kytkemällä kuormituksen kanssa sarjaan induktanssin tai rinnan kapasitanssin. Lisäksi voidaan käyttää näiden yhdistelmää, LC-suodinta, jossa induktanssi pyrkii vastustamaan virran muutoksia ja kapasitanssi jännitteen muutoksia (Hietalahti 2011, 54).

Mitä suurempi on suuntauskytkennän pulssiluku, sitä pienempi on tarvittavan suodatuksen suuruus, jolloin esimerkiksi suunnitteleamalla suuntaaja 12-pulssisillalla tai 24-pulssisillalla virta on huomattavasti sinimuotoisempaa ja suodatuksen tarve pienempi. (Hietalahti 2011, 54, 71.) Käytettäessä hila-kommutoivia komponentteja voidaan ohjausloisteho säätää noltaan ja saada verkkovirran yliaaltojen määrä niin pieneksi, ettei verkon jännitemuoto huononnu (Aura & Tonteri 1996, 428).

4 YLIAALLOT

Kuormia, jotka ottavat sinimuotoista virtaa, kuten vastukset, kelat ja kondensaattorit, kutsutaan lineaarisiksi kuormiksi. Tällöin sinimuotoisesta jännitteestä otetaan sinimuotoista virtaa. Kun kuormituksen ottama virta on pulssimaista ja säröyttää verkkovirran, kutsutaan kuormitusta epälineaariseksi kuormitukseksi. Epälineaarisia kuormia ovat tasa- ja vaihtosuuntaajien lisäksi esimerkiksi valaisimet, joissa on elektroninen liitäntälaitte, tietokoneet ja kodinelektroniikkalaitteet. (Ahoranta 2021, 186.) Jännite säröytyy, koska epälineaariset virrat aiheuttavat jännitehäviöitä verkon impedansseissa.

Tasasuuntaajien lisäksi yliaaltoja sähköverkkoon tuottavat muuntajat. Muuntajan sydänmateriaalin magnetoitumiskäyrän epälineaarisuuden vuoksi muuntajan rautasydämen magnetoituvirta on epäsinimuotoinen (Aura & Tonteri 1996, 31). Magneettisesti kyllästyneen raudan magnetoimisvirta on epäsinimuotoinen, joten se voidaan jakaa sinimuotoisiin komponentteihin, jolloin se on parittomien sinimuotoisten virta-aaltojen summa. Näistä yliaalloista voimakkain on kolmas yliaalto. (Aura & Tonteri 1996, 50)

Fourierin sarjakehitelmän mukaisesti epäsinimuotoinen virta, toiselta nimeltään yleinen jaksollinen vaihtovirta, voidaan jakaa tasavirtakomponenttiin, perusaaltoon ja yliaaltoihin, joita kutsutaan yhteisesti harmonisiksi aalloiksi. Perusaallon jaksonaika ollessa T_1 ja taajuuden f yliaaltojen jaksonajat ja taajuudet ovat $T_2 = \frac{1}{2}T_1$, $T_3 = \frac{1}{3}T_1$, $T_4 = \frac{1}{4}T_1$ ja $f_2 = 2f_1$, $f_3 = 3f_1$, $f_4 = 4f_1 \dots f_n = nf_1$. Yliaaltoja kutsutaan taajuuden mukaan toiseksi, kolmanneksi jne. yliaalloiksi. Mielivaltaisen muotoisella vaihtovirralla voi olla äärettömän monta yliaaltoa, mutta yliaaltojen voimakkuus yleensä pienenee kertaluvun kasvaessa, jolloin suurempien kertalukujen yliaallot eivät ole kovin merkityksellisiä. (Aura & Tonteri 2005, 220-221.)

Fourierin sarjan termit voidaan kirjoittaa kaavan 41 mukaiseen muotoon suoraan ajan funktiona:

$$\begin{aligned} i &= I_0 + \sum \hat{i}_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \\ &= I_0 + \sum \hat{i}_{ns} \sin n\omega t + \sum \hat{i}_{nc} \sin n\omega t \end{aligned} \quad (41)$$

missä $\omega = \frac{2\pi}{T}$, $\hat{i}_n = I_n\sqrt{2}$, I_0 tasavirtakomponentti, \hat{i}_n n:nnen yliaallon virran huippuarvo, \hat{i}_{ns} siniaaltojen huippuarvo ja \hat{i}_{nc} kosiniaaltojen huippuarvo. Kaavan 41 termien laskemista nimitetään harmoniseksi analyysiksi, joka sisältää tasavirtakomponentin ja sini- ja kosiniaaltojen määräämisen. Edellä

mainitut saadaan selville suorittamalla integrointi, jolla laskettuun keskiarvoon jää ainoastaan etsityn komponentin osuus. Tarvittavat yhtälöt on esitetty kaavassa 42. (Voipio 1976, 151.)

$$I_0 = \frac{1}{T} \int_0^T i \, dt \quad (42)$$

$$\hat{i}_{ns} = \frac{2}{T} \int_0^T i \sin n\omega t \, dt$$

$$\hat{i}_{nc} = \frac{2}{T} \int_0^T i \cos n\omega t \, dt$$

Ensimmäinen yhtälöistä sisältää tavallisen keskiarvon laskemisen, ja toinen ja kolmas yhtälö voidaan perustella sillä, että n :nnen harmonisen sini- ja kosinilausekkeen neliöt ovat $\sin^2 n\omega t$. Jos käyrässä on mainittua harmonista aaltoa, integrointi antaa kertoimeksi $\frac{T}{2}$, ja erilaisten harmonisten keskiarvo sen sijaan on nolla eivätkä ne anna mitään kyseiseen integraalilausekkeeseen. Käyrän yleisen muodon perusteella voidaan nähdä, onko käyrässä merkittävästi tasakomponenttia vai onko moniaaltoista vaihtovirtaa. Jos virran käyrän esityksessä voidaan valita origo niin, että käyrä on symmetrinen suhteessa pystyakseliin, tulee tällöin käyrään pelkkiä kosinitermejä, ja taas jos voidaan valita käyrän esityksessä käyrän olevan symmetrinen origon suhteen, tulee käyrään pelkkiä sinitermejä. Useasti puoliaallot ovat toistensa peilikuvia, jolloin käyrässä on vain parittomia harmonisia ($n=1,3,5\dots$). (Voipio 1976, 152.)

Virran hetkellisarvo saadaan sarjakehitelmän neliöstä kaavaan 43 mukaisesti:

$$i^2 = [I_0 + \sum \hat{i}_n \sin(n\omega t + \varphi_n)][I_0 + \sum \hat{i}_n \sin(n\omega t + \varphi_n)] \quad (43)$$

Tällöin moniaaltoisen vaihtovirran tehollisarvo saadaan kaavan 44 mukaisesta yhtälöstä:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (44)$$

missä I on virran tehollisarvo, I_1 on perusaallon tehollisarvo, I_2 toisen aallon tehollisarvo ja I_n on n :nnen yliaallon tehollisarvo jne. Harmonisen amplitudi ei ole riippuvainen siitä, miten origo valitaan, toisin kuin sen nollavaihekulma. Käyrän ulkonäköön vaikuttavat tasavirtakomponentin ja eri harmonisten suuruussuhteiden lisäksi näiden nollavaihekulmien arvot. (Voipio 1976, 152.). Huippuarvo saadaan kaavasta 45 ja vaihekulma kaavasta 46:

$$\hat{i}_n = \sqrt{\hat{i}_{nc}^2 + \hat{i}_{ns}^2} \quad (45)$$

$$\varphi_n = \arctan \frac{\hat{i}_{nc}}{\hat{i}_{ns}} \quad (46)$$

Jännitettä voidaan tarkastella Fourierin sarjakehitelmällä muodossa, jossa jokainen taajuuskomponentti määritellään amplitudin ja nollavaihekulman avulla (KAAVA 47) (Männistö, Hietalahti, Seesvuori, Seesvuori, Wilén, Eronen, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry 2018, 26).

$$u = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \hat{u}_n \sin(n\omega t + \alpha_n) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n \sin(2\pi f t + \alpha_n) \quad (47)$$

missä U_0 on tasajännitteen huippuarvo, \hat{u}_n jännitteen amplitudi, α_n nollavaihekulma ja U_n harmonisen tehollisarvo. Kaavassa voidaan käsitellä myös epäharmonisia yliaaltoja, jolloin n saa muitakin arvoja kuin kokonaislukuja.

Epäharmonisten yliaaltojen taajuus on harmonisten yliaaltojen välissä, ja niitä voi esiintyä yksittäin tai laajakaistaisena spektrinä. Tietyissä tapauksissa ne voivat aiheuttaa jakeluverkossa välkyntää. Niiden taso on kasvamassa taajuusmuuttajien ja säätölaitteiden vuoksi, mutta standardi ei vielä aseta niille vaatimustasoja. (SFS-EN 50160 2022, 10, 15.)

4.1 Harmonisten yliaaltojen luokittelu

Yliaallot voidaan jakaa myös taulukon 1 mukaisesti symmetrisissä kolmivaihejärjestelmissä seuraavasti (esitetty 9 ensimmäistä yliaaltoa):

TAULUKKO 1. Harmonisten yliaaltojen luokitusmalli symmetrisellä kolmivaihekuormalla

n. harmoninen	1	2	3	4	5	6	7	8	9
taajuus	50	100	150	200	250	300	350	400	450
suunta	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Kuten jo aiemmin on käsitelty, kolmivaiheisuus syntyy kolmivaihegeneraattorissa, jonka staattorikämmityksessä vaihekäämien välillä on 120° :n vaihesiirto, jolloin roottorin mukana pyörivä magneettikenttä indusoi käämeihin samansuuruisen mutta vaihesiirrossa olevan jännitteen. Harmonisista aalloista positiiviset eli 4., 7., 10. jne. pyörivät kolmivaiheisen verkon perustaajuuden kanssa saman suuntaisesti eli eteenpäin. Vaikka ne niin sanotusti auttavat verkon magneettikenttää, niiden esiintyminen aiheuttaa epätoivottavaa lisälämpenemistä, esimerkiksi kondensaattoreissa, jakeluverkoissa ja muuntajissa (The Snell Group; Electronic tutorials).

Negatiiviset harmoniset aallot eli 2., 5., 7. jne. pyörivät perustaajuuden kanssa vastakkaiseen suuntaan aiheuttaen ongelmia moottoreissa heikentäen pyörimiseen tarvittavaa pyörivää magneettikenttää, vähentäen moottorin tuottamaa mekaanista momenttia. Esimerkiksi 2. harmonisen tapauksessa, kun perusaalto on nollakohdassa, on 2. harmoninen aalto huipussaan, jolloin kyseinen harmoninen on vastakkaisuuntainen verkon perusaallon kanssa. (The Snell Group; Electronic tutorials).

Kolmella jaolliset harmoniset, eli niin sanotut nollaharmoniset, eivät pyöri. Näistä kolmas harmoninen on vaikutukseltaan voimakkain ja haitallisin. Toisin kuin positiiviset ja negatiiviset harmoniset aallot, jotka usein kumoavat osin toistensa vaikutuksia, kolmella jaolliset summautuvat nollapisteeseen eli nollajohtimeen (Electronic tutorials). Nollajohtimen kautta ne voivat levitä myös rakennuksen rungon rakenteisiin aiheuttaen häiriöitä. Toisin kuin epäsymmetrisessä järjestelmässä ja myös muiden yliaaltojen suhteen, nollajohtimen virta on suurimmillaan yksittäisen vaihejohtimen virta. Kolmella jaollisten yliaaltojen virran summautuessa nollajohtimeen siinä kulkeva virta voi nousta korkeammaksi kuin vaihejohtimien virran tehollisarvo. Myös virran taajuuden kasvu pienentää johdon kuormitettavuutta, koska sen vaihtovirtaresistanssi kasvaa. (Männistö ym. 2018, 32.)

Suuritaajuisten yliaaltojen merkittävimpiä haittoja ovat häiriöt ääni-, radio- ja tv-taajuuksille, ja ne leviävät säteilemällä, jolloin niiden aiheuttajan selvittäminen on haastavaa. Yliaallot aiheuttavat myös epätarkkuuksia energianmittaukseen, tosin pätöteholla lisäysten ja vähennysten kokonaisvaikutus on pieni. (Männistö ym. 2018, 32.)

Yliaallot lisäävät sekä verkon että käyttäjien laitteiden häviöitä. Jännitteen yliaallot suurentavat muuntajan tyhjäkäyntihäviöitä. Tosin jakeluverkolla niiden vaikutus on yleensä niin pieni, ettei niitä tarvitse ottaa huomioon. Virran yliaallot taas suurentavat muuntajien kuormitushäviöitä, jolloin vaikutus voi olla jo niin merkittävä, että yliaallot täytyy ottaa huomioon muuntajan mitoituksessa. Myös moottorit voivat ylikuormittua ja niihin voi aiheutua värähtely- ja ääni-ilmiöitä yliaaltojen seurauksena. (Männistö ym. 2018, 31, 34-35.)

Yliaaltopitoisessa verkossa pätö- ja loistehon lisäksi esiintyy myös yliaaltojen muodostama säröteho D , ja koska se muodostuu yliaalloista, sitä ei ole mahdollista kompensoida perustaajuudelle mitoitetuilla kompensointilaitteilla. Säröteho D huomioiden näennäisteho S saadaan kaavan 48 mukaisesti. (Männistö ym. 2018, 36.) Kaavan sisältyy pätötehon P , näennäistehon S , särötehon D ja perustaajuuden loistehon Q_I lisäksi näennäisteho S_I , joka on perustaajuinen näennäisteho. Tällöin kaavan D ei sisällä

yliaaltopätötehoja, vaan yliaaltoloistehoja sekä eri taajuuksien virtojen ja jännitteiden tuloja eli loistehoa. (Männistö ym. 2018, 17.)

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (48)$$

Vaikka jännitteen särö pysyisikin yliaaltolähteen liittämiskohdassa hyväksyttävällä tasolla, voi verkon impedanssien paikkariippuvuuden vuoksi resonanssien seurauksena jännitteen särö ylittää sallitut rajat jossain muualla verkossa (Männistö ym. 2018, 35).

Suuntaajakäytöissä merkittäväksi voi nousta myös yliaallon tasakomponentti, joka vaikuttaa huomattavasti muuntajien kuormitettavuuteen, koska se voi nostaa ollessaan 2 % toision nimellisvirrasta muuntajan rautahäviöitä noin 10 %, joka onkin yleisesti hyväksyttävä raja tasakomponentille. (Männistö ym. 2018, 36).

Käytännön mittauksissa yliaaltoanalysaattorilla saadaan selville yleensä perustaajuinen tehollisarvo ja muiden harmonisten taajuuksien tehollisarvot suhteutettuna perusaaltoon, jolloin perusaaltosisältö u_{f1} selville kaavan 49 mukaisesti:

$$u_{f1} = \frac{U_1}{U} \quad (49)$$

missä U_1 on perustaajuinen jännitteen tehollisarvo ja U on koko jännitteen tehollisarvo. Yliaaltojen määrää suhteessa perustaajuiseen komponenttiin tai signaalin tehollisarvoon voidaan kuvata harmonisella kokonaissäröllä (THD, total harmonic distortion) kaavan 50 mukaisesti:

$$THD - F = \frac{\sqrt{h \sum_{2,3...}^{\infty} U_h^2}}{U_1} \quad (50)$$

$$THD - R = \frac{\sqrt{h \sum_{2,3...}^{\infty} U_h^2}}{U}$$

missä THD-F on harmoninen kokonaissärö suhteessa perustaajuiseen komponenttiin ja THD-R on harmoninen kokonaissärö suhteessa signaalin tehollisarvoon. Samoja laskentamalleja voidaan käyttää myös yliaaltovirroille. (Männistö ym. 2018, 30).

4.2 Standardin mukaiset arvot yliaalloille

Standardissa kokonaissärö on esitetty kaavan 51 mukaisesti (SFS-EN 50160 2022, 10):

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} \left(\frac{U_h}{U_n}\right)^2} \quad (51)$$

missä harmoninen yliaaltojännite U_h on yliaaltojännitteen suhde perustaajuiseen jännitteeseen U_1 ja h on harmonisen yliaallon järjestysluku, ja kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40. asti otetaan tarkasteluun mukaan.

Standardin yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön ominaisuudet määrittävät, että pienjänniteverkon liittämiskohdassa normaaleissa käyttöolosuhteissa kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin tehollisarvoista täytyy olla pienempi tai yhtä suuri kuin taulukossa 2 annettu arvo, ja lisäksi kokonaissärökertoimen THD tulee olla, mukaan lukien kaikki harmoniset yliaallot järjestysluvultaan 40. saakka, pienempi tai yhtä suuri kuin 8 %. (SFS-EN 50160 2022, 15.)

TAULUKKO 2. Standardin SFS-EN 50160 2022 Taulukon 1 mukaiset arvot harmonisten yliaaltojännitteiden sallituille arvoille pienjänniteverkon liittämiskohdassa

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset			
järjestysluku h	Suhteellinen jännite U_h	järjestysluku h	Suhteellinen jännite U_h	järjestysluku h	Suhteellinen jännite U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	1,0 %	6...24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,75 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Taulukon 2 arvot ovat prosentteina perusaaltoon U_1 nähden. Järjestysluvultaan yli 25. yliaalloille ei anneta arvoja niiden ollessa tavallisesti hyvin pieniä ja arvaamattomia resonanssitilanteen vuoksi. Yliaaltojen mittaaminen muualla kuin liittymispisteessä voi tulla kyseeseen, jos halutaan selvittää yleiseen jakeluverkon puolelle asti siirtyvien häiriöiden selvittelyssä, tai kun kiinteistön haltija haluaa saada tietoa omassa verkossaan kulkevista yliaalloista (Männistö ym. 2018, 42).

4.3 Yliaaltovirtojen suositus

Vaikka jännitteen käyrämuoto säilyisikin yliaaltolähteen omistajan liittymiskohdassa hyväksyttävänä, yhdistettynä muiden käyttäjien yliaaltojen kanssa voivat virrat säröyttää jossain muualla verkon jännitettä liikaa. Kun verkkoon syötettäville yliaaltovirralla asetetaan rajoituksia, verkon yliaaltovirtojen sietokapasiteetti saadaan jaettua sähkökäyttäjille tasapuolisesti. Lähtökohtana virtarajoituksille on edellä mainittu jännitteen standardi, joka on aina ensisijaisesti määräävä, ja virtarajoitusten tavoitteena on, että kyseisen standardi saadaan täytettyä tarkoituksenmukaisella tavalla, jos virtasuositus täytetään. (Männistö ym. 2018, 43.)

Verkon yliaaltovirtojen sietokapasiteetti jaetaan käyttäjille tasapuolisesti liittymien kokojen suhteessa. Sallitut yliaaltovirrat esitetään niin sanotulla referenssivirran perusteella, eli suhteutettuna sähkökäyttäjälle varattuun siirtokapasiteettiin. Sulakepohjaisessa liittymässä referenssivirta on tällöin pääsulakkeen nimellisvita. Tehopohjaisessa liittymässä, jossa pääsulakkeen kokoa ei ole suoraan määritelty, referenssivirta lasketaan liittymäsopimuksen päätötehostä lasketusta virrasta kaavan 52 mukaisesti. (Männistö ym. 2018, 43.)

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3}U_N} \quad (52)$$

missä P on liittymissopimuksen mukainen päätöteho eli tilausteho ja U_N on verkon nimellisjännite. Mikäli tilaustehoa ei ole määritelty, käytetään kaavassa päätötehona esimerkiksi 1,25-kertaista laskutustehoa kilowatteina, jolloin oletuksena on, että laskutusteho olisi keskimäärin noin 80 % liittymän koosta. Suosituksena sallituille yliaaltovirroille käytetään taulukon 3 mukaisia arvoja. Mikäli ne ylittyvät, tulee sähkökäyttäjän pienentää yliaaltovirtoja tai sopia sähköverkkoyhtiön kanssa suuremmasta siirtokapasiteetista (Männistö ym. 2018, 43.)

TAULUKKO 3. Pienjänniteverkkoon liittyneen sähkökäyttäjän suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittymiskohdassa

Referenssivirta	Suositeltava raja	
< 25 A	Saa käyttää laitestandardien mukaisia laitteita	
> 25-200 A	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta	
> 200 A	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta, mutta kuitenkin vähintään 20 A sallitaan. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	<11	7,0 %
	11-16	3,5 %
	17-22	2,5 %
23-24	1,0 %	
>34	0,5 %	

Ongelmien välttämiseksi kondensaattorien hankinnassa tulisi mahdollisista resonanssiipiiri-tilanteiden syntymisestä johtuvan yliaaltojen vahvistamisen vuoksi kondensaattorilaitteiston verkkoonliittämiskriteerit selvittää jakeluverkon haltijalta ainakin silloin, kun yhteenlaskettu kondensaattoriteho ylittää 15 % liittymän koosta. Jakeluverkon haltija voi asettaa myös kvar-pohjaisen rajoituksen. (Männistö ym. 2018, 46.)

4.4 Yliaaltojen mittaus

Mitatessa yliaaltopitoisuuksia verkosta mittausmenetelmän tulisi olla vastaava kuin mitatessa standardissa SFS-EN 50160 esitettyjä vaatimuksia jännitteelle, ja ensisijaisesti tulisi käyttää laitteita, jotka mittaavat standardin IEC 61000-4-30 luokan A ja SFS-EN 50160 mukaisesti kolmivaiheisia jännitteitä ja virtoja. Mittauslaitteissa voidaan yleensä määrittää mittausjakson pituus, jonka tulisi olla vähintään 10 minuuttia. Käytettäessä lyhyempää mittausjaksoa kuin 10 minuuttia voidaan kuitenkin mittausmenetelmän vähimmäisvaatimusten mukaisesti laskea 10 minuutin keskiarvolaskentana, jolloin standardin IEC 61000-4-30 mukaisesti saaduista tiedoista lasketaan neliöllisiä keskiarvoja 10 minuutin jaksoilta esimerkiksi taulukkolaskentaohjelmalla, mutta tällöin keskiarvon tulee muodostua vähintään kymmenestä mittaustuloksesta. (Männistö ym. 2018, 45.)

Mittausaika valitaan niin, että saadaan selville kyseisen kohteen riittävä särökäyttäytyminen eli suurin särövirran 10 minuutin keskiarvo. Seuranta-aika voi olla viikon, vuorokauden, tunnin tai tarvittaessa muunkin mittainen. (Männistö ym. 2018, 45.)

5 LOISTEHON KOMPENSOINTI

Kuten aiemmin on jo mainittu, loisteho ei osallistu kulutuskojeen pysyvään työsuoritukseen, vaan heilahtelee jännitelähteen ja kulutuskojeen välissä edestakaisin loisena. Tällöin se siis pienentää pätötehon siirtokykyä ja lisää johtojen ja muuntajien jännite-, teho- ja energiahäviöitä, joten sen siirtäminen sähköverkossa nostaa häviökustannuksia pelkän pätötehon siirtoon verrattuna. Tästä syystä verkkoyhtiöt veloittavat ilmaisosuuden ylittävistä loistehon kulutuksesta, jonka tarkoituksena onkin ohjata kuluttajia tuottamaan tarvittavan loisteho liittymispisteessä, jolloin keski- ja pienjännitejakeluverkon kompensointitarve vähenee. Joillakin jakeluyhtiöillä loistehon ilmaisosuus on vain 16 % pätötehosta (Männistö ym. 2018, 20, 79.)

Voimalaitosten generaattoreiden stabiiliin rinnankäyttöön vaaditaan suhteellisen suuri reaktiivinen häiriöreservi, minkä vuoksi generaattorit yleensä suunnitellaan nimellistehokertoimelle $\cos \varphi$ 0,85 – 0,9. Tätä pienempi nimellistehokertoimen mitoitus kasvattaisi generaattorin ja generaattorimuuntajan käänityksen poikkipintoja, lisäten sähköntuottajan pääomakustannuksia. Tuottaessaan loistehoa tahti- generaattoreiden staattori-resistanssin kuparihäviöt ja rautahäviöt lisääntyvät verrattuna vain pätötehon tuottamiseen. (Männistö ym. 2018, 20.)

Tehokerroin PF (Power factor) määritetään perinteisesti sähköisen pätötehon ja loistehon väliseksi suhteeksi, jota ei kuitenkaan tule sekoittaa $\cos \varphi$ - tehokertoimeen, jota käytetään sinimuotoisten signaalien kanssa, vaikkakin sinimuotoisessa tapauksessa tehokerroin PF määrittää myös virran ja jännitteen välisen vaihe-erokulman, jolloin PF on yhtä kuin $\cos \varphi$. Tämä on voimassa vain, jos harmoninen kokonaissärö jännitteelle on $THD_u \leq 2\%$. (Hietalahti 2011, 56.) Tehokerroin PF määritetään kaavan 53 mukaisesti:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (53)$$

Tehokerroin PF ottaa huomioon myös harmoniset yliaallot, eli lauseke voidaan myös esittää kaavan 54 mukaisesti (Männistö ym. 2018, 17):

$$\frac{P}{S} = \frac{\sum_n P_n}{S} = \frac{P_1 + \sum_{n \neq 1} P_n}{S} = PF \quad (54)$$

missä P_1 on perusaallon teho. Perusaallon tehokerroin DPF (Displacement power factor) taas on perus-

taajuuden pätötehon ja perustaajuuden näennäistehon suhde, eli kosini perustaajuuden jännitteen ja perustaajuuden virran vaihe-erosta. (Männistö ym. 2018, 16.) *DPF* ja perustaajuus tehon suureet voidaan esittää kaavan 55 mukaisesti:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} = DPF \quad (55)$$

$$\sin \varphi = \frac{Q_1}{S_1}$$

$$\tan \varphi = \frac{Q_1}{P_1}$$

missä alaindeksi 1 tarkoittaa perustaajuista yksikköä. Mittalaitteita valitessa on tärkeää ottaa huomioon mittalaitteen kyky erottaa perustaajuinen teho kokonaistehosta, kun mitataan yliaaltopitoisessa verkossa. (Männistö ym. 2018, 37.)

Toisaalta myös liiallinen loistehon kompensointi aiheuttaa verkkoyhtiöille hankaluuksia, kun kuormitus on pientä, koska tyhjäkäyvien johtojen kapasitanssit ovat kiinni verkossa tuottaen loistehoa. Tästä syystä loistehon tuottamista rajoitetaan hinnoittelulla voimakkaammin kuin loistehon kulutusta. Tämän vuoksi kompensointilaitteistojen tulee olla säädettyjä. (Männistö ym. 2018, 17.)

Sähkökäyttäjän näkökulmasta kompensointitarve syntyy lähinnä verkkoyhtiön loistehon hinnoittelusta, mutta suuri loistehomäärä voi myös lisätä tarvetta kasvattaa pääsulakkeen kokoa nostaten täten liittymismaksua. Myös käyttäjän omassa verkossa loisteho vaikuttaa häviöiden kasvuun ja lisää johtojen poikkipinta-aloja pelkkään pätötehon siirtoon verrattuna. (Männistö ym. 2018, 17.)

Kompensoinnin vaatimusten määrittäminen kuuluu jo sähkösuunnitteluun, jossa yleensä määritellään koko kiinteistön tai rakennuksen kompensointiratkaisu, tai mieluiten koko jakelumuuntajan käsittämän jakelualan kompensointiratkaisut. Pienjännitekuluttajan osalta kuitenkin koko jakelumuuntajan kompensointiratkaisujen määrittely on haastavaa, koska lopputulokseen vaikuttavat myös saman jakelumuuntajan muut kuluttajat eikä yksittäinen verkkoon liittyjä pääse vaikuttamaan koko jakelumuuntajan ratkaisuihin. Periaatteena loistehon kompensoinnissa tulisi olla, että syntynyt loisteho kompensoidaan sen syntypaikassa. Tämä menettely kuitenkin on taloudellisesti mahdotonta, jolloin loisteho kompensoidaan yleensä koko kiinteistön osalta yhdellä suurella keskitetyllä kompensointiyksiköllä. (Männistö ym. 2018, 79.)

Laitekohtainen kompensointi toteutuu ilman erillisiä paikalliskompensointiparistoja, esimerkiksi elektronisilla liitännäislaiteilla ja taajuusmuuttajakäyttöillä, joista ei synny verkkoon loistehoa. Verkkoihin liitettyjen laitteiden yliaaltopitoisuuden vuoksi loistehon kompensointi joudutaan nykyisin toteuttamaan lähes aina estokelaparistolla. (Männistö ym. 2018, 79.)

Kompensoinnilla saavutetaan siis suurempi verkon siirtokapasiteetti, koska kuormituksesta poistuu siirrettävä loiskomponentti. Tällöin myös pätötehohäviöt ovat huomattavasti pienempiä, koska vain työtä tekevää tehoa siirretään verkossa. Vaikka kondensaattorit itsessäänkin aiheuttavat pätötehohäviöitä, ovat niiden aiheuttamat häviösäästöt sähköverkossa kuitenkin moninkertaisia. Kompensointi pienentää myös loisvirtaa, jolloin samalla pienenee myös jännitteenalenema U_a kaavan 88 mukaisesti. Alle 16 mm^2 :n johdinpoikkipinta-aloilla, jolloin reaktanssi on pieni, on kompensoinnin vaikutus jännitteenalenemaan merkityksetön, mutta suurilla poikkipinta-aloilla ja pitkällä siirtoetäisyydellä vaikutus on merkittävä. (Männistö ym. 2018, 80-83.)

$$U_a = RI_p + XI_q \quad (88)$$

missä R on koko siirtoverkon resistanssi watteina, X on koko siirtoverkon reaktanssi watteina, I_p on pätövirta ampeereina ja I_q on loisvirta ampeereina. Kompensointilaitteistojen yliaaltosuodatuksella voidaan suodattaa verkon yliaaltoja, mikä parantaa sähkön laatua. Kun jännitesärö THD pienenee, kulutuskojeiden häiriöt ja vauriot ovat epätodennäköisempiä. Samalla myös häviöt eri verkkokomponenteissa pienentyvät. (Männistö ym. 2018, 83.)

Toisin kuin esimerkiksi kokonaissärölle ja yliaaltojännitteille, standardi SFS-EN 50160 ei määrittele rajoja pätö-, näennäis- tai loistehojen säädettävän (1-60 s) maksimitehollisarvoille tai tehokerrointen ominaisuuksille, mutta ne ovat erittäin tärkeitä sähkönlaadun osatekijöitä.

5.1 Kompensointilaitteiden resonanssit

Vaihtosähköpiirien teoriassa esiintyneet resonanssi-ilmiöt ovat läsnä myös kompensointilaitteiden ja yliaaltosuodattimien kondensaattorien tapauksessa. Mikäli kondensaattoriparisto liitetään sähköverkkoon ilman kuristinta, verkon induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi muodostavat muuntajan alapuolelta katsottuna rinnakkaisresonanssipiirin, joka vahvistaa syntyviä yliaaltovirtoja. Virrat vahvistuvat pienjänniteverkossa tyypillisesti 1-5-kertaisiksi, keskijänniteverkossa jopa 10-20-kertaisiksi. Verkon resistanssi- tai reaktanssisuhteiden lisäksi virtojen vahvistumiseen vaikuttaa se, kuinka kaukana resonanssitaajuus on kustakin yliaaltotaajuudesta. Verkon resistiivinen kuormitus vaimentaa virtojen

vahvistumista. Muuntajan yläpuolelta tarkasteltuna muuntajan induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi muodostavat sarjaresonanssiin, ja mikäli kyseessä olevan keskijännitepiirin resonanssitaajuuden läheisyydessä esiintyy keskijänniteverkossa jännitesärökomponentti, alkaa kondensaattoripariston kulkea muuntajan kautta kyseessä olevan taajuinen yliaaltovirta, jonka vaikutus säröyttää pienjänniteverkon jännitettä. (Männistö ym. 2018, 64.)

Jos ei huomioida verkon resistanssia ja kapasitanssia, ilman kuristinta olevan kondensaattoripariston ja verkon resonanssitaajuus voidaan laskea kaavalla 56:

$$f_r = \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \cdot f_n \quad (56)$$

missä f_r on rinnakkaisresonanssitaajuus, S_k verkon oikosulkuteho (kVA), Q_c on kompensointiteho (kvar) ja f_n on verkon nimellistaajuus. Jännitesärö kasvaa tyypillisesti 2-3-kertaiseksi resonanssin vuoksi vahvistuneiden virtojen vaikutuksesta, mutta heikoissa verkoissa särön vahvistuminen voi olla vielä voimakkaampaa. Vahvistuneet yliaaltovirrat taas kuormittavat termisesti verkkoa ja etenkin kompensointikondensaattoreita, jonka vuoksi kondensaattoriportaiden etusulakkeet voivat palaa. Automaattikaparistojen tapauksessa tulee huomioida myös sarja- ja rinnakkaisresonanssitaajuuksien muutos kompensointitehon Q_c muuttuessa portaiden mukaisesti. (Männistö ym. 2018, 65.)

Jos kondensaattoriparisto on varustettu kuristimella, on kyseessä estokela- tai suodatinparisto, jolloin muuntajan alapuolelta tarkasteltuna on verkon ja pariston välillä rinnakkaisresonanssiin ja pariston kuristimen ja kondensaattorin välillä sarjaresonanssiin. Tällöin sarjaresonanssi taajuudet ovat vakiot riippumatta kytkettyneiden portaiden määrästä, ja rinnakkaisresonanssitaajuudet muuttuvat vähäisesti eri porrasmäärien suhteen. Kuitenkin rinnakkaisresonanssitaajuudella esiintyvä harmoninen tai epäharmoninen yliaaltovirta vahvistuu. (Männistö ym. 2018, 65.)

Muuntajan yläpuolelta tarkasteltuna kondensaattoriparistot, jotka on varusteltu kuristimilla, muodostavat sarjaresonanssiin muuntajan kanssa. Sarjaresonanssiin induktanssi on muuntajan ja pariston kuristimen induktanssin summa. Jos muuntajaa syöttävässä verkossa esiintyy kyseisillä sarjaresonanssitaajuuksilla jännitesärökomponentteja, ne aiheuttavat muuntajan läpi paristoon kulkevan virran. (Männistö ym. 2018, 66.)

Myös kondensaattoreiden kytkentäilmiöt voivat aiheuttaa resonanssilanteita, joissa kondensaattorin varautumisen aiheuttama jännitepiikki voi vahvistua normaalia suuremmaksi resonanssin vaikutuksesta (Männistö ym. 2018, 76).

5.2 Laiteratkaisut loistehon kompensointiin ja yliaaltojen suodatukseen

Kuten edellä mainittiin, loistehon kompensointiin voidaan käyttää pienjännitteisiä kondensaattoriyksiköitä, ja ne koostuvat yleensä useasta rinnankytketystä elementistä. Pienjänniteyksiköt ovat yleensä 3-vaiheisia, sisäisesti kolmioon tai tähteen kytkettyjä, ja tyypillisesti 2,35-75 kvar:n yksikköjä, joiden nimellisjännite on tyypillisesti 525 V tai 890 V. Koneiden sähköasennuksia koskeva standardi SFS-EN 60204-1 asettaa kondensaattorin purkautumisella jännite katkaistaessa säännön, jossa jännitteisten osien on syötön katkaisun jälkeen oltava 60 V tai alempi, tai ne on purettava 60 V:iin tai alle sen enintään 5 sekunnin kuluessa katkaisusta edellyttäen, ettei se häiritse laitteiston toimintaa. Yleensä tähän tarkoitukseen käytetään sisäisiä purkausvastuksia. (Männistö ym. 2018, 47.)

Rinnakkaiskondensaattoriparistoja käytetään kuoman kanssa rinnankytkettyinä. Ne voidaan jakaa kiinteisiin ja säädettäviin paristoihin, joista kiinteät liitetään sähköverkkoon ilman säätömahdollisuutta, ja säädettäviä eli automatiikkaparistoja säädetään portaittain. Pienjänniteverkon automatiikkapariston ohjaus perustuu yleensä loistehonsäätäjään, jolle asetellaan havahtumisrajat induktiiviselle ja kapasitiiviselle puolelle. Ohjaus tapahtuu mittaamalla kuormitusten loistehon tarvetta mittamuuntajilla syöttöjohdosta, jonka mukaan kytketään kondensaattoriportaita verkkoon tai pois verkosta, sekä eri yhdistelmillä portaita. Rinnakkaiskondensaattoriparistoja käytetään yleensä pää- tai ryhmäkeskuksilla tai laitekohtaisessa kompensoinnissa. Ne sopivat kohteisiin, jossa yliaaltojen esiintyminen ei ole merkittävää, mutta nykyään suositellaan kuitenkin käytettäväksi estokelaparistoa, jotta estetään haitallisten resonanssien synty yliaaltovirtojen vuoksi. (Männistö ym. 2018, 48-49.)

Kun verkko on lievästi yliaaltopitoinen, täytyy tarkastella tarvetta toteuttaa kompensointi rinnakkaiskondensaattoripariston sijasta estokelaparistolla tai yliaaltosuodattimilla. Aiemmin käsiteltyjen resonanssi-ilmiöiden vuoksi perinteisellä kondensaattoriparistoilla ei voida kompensoida loistehoa yliaaltopitoisessa verkossa. Estokelaparistossa jokaisen kondensaattoriportaan kanssa on kytketty sarjan kuristin, joka muodostavat sarjaresonanssipiirin, joka on viritetty eri taajuudelle kuin verkossa esiintyvät yliaaltotaajuudet. Sarjaresonanssipiirin viritystaajuuden alapuolella, esimerkiksi verkon taajuudella 50 Hz, paristo tuottaa loistehoa eli on kapasitiivinen, ja viritystaajuuden yläpuolella se on induktiivinen

eikä tyypillisillä yliaaltotaajuuksilla vahvista niitä. Yleisenä estokelapariston viritystaajuutena käytetään 189 Hz, joka on 3. ja 5. yliaallon välissä. (Männistö ym. 2018, 51.)

Estokelaparistot suodattavat myös yliaaltoja, ja niiden suodattavaan vaikutukseen voidaan vaikuttaa estokelan viritystaajuuden valinnalla. Yleensä suodattava vaikutus on noin 10-30 % viidennen yliaaltovirran määrästä 189 Hz:n viritystaajuudella. Vaikutus on riippuvainen estokelallisen kompensoinnin tehosta ja viritystaajuudesta, ja heikkenee viritystaajuuden poiketessa enemmän esiintyvistä yliaaltotaajuuksista. Kiinteitä estokelaparistoja käytetään yksittäisten vakiotehoisten laitteiden tai ryhmien kompensointiin, kun verkko on yliaaltopitoinen. (Männistö ym. 2018, 52.)

Yliaaltosuodattimia käytetään verkoissa, joissa yliaaltopitoisuus on suuri. Myös yliaaltosuodattimella voidaan tuottaa tarvittava loisteho mutta myös poistaa yliaaltovirtoja verkosta. Yliaaltosuodattimien koostuu kondensaattoreista ja niiden kanssa sarjaan kytketystä kuristimesta. Kondensaattoreiden perustaajuudella tuottama loisteho mitoitetaan halutun kompensointiasteen mukaan, ja kuristimen induktanssi valitaan niin, että yhdessä kondensaattoreiden se muodostaa yliaaltotaajuudella erittäin pieni-impedanssisen sarjaresonanssiipiirin, jolloin suurin osa syntyvistä yliaalloista kulkeutuu suodattimeen. Normaalisti yliaaltosuodatin koostuu kolmesta sarjaresonanssiipiiristä, joiden viritys on tehty yleisimpien yliaaltotaajuuksien, 5. 7. ja 11. harmoninen yliaalto, mukaisesti. Yliaaltosuodattimien mitoitus voi olla haastavaa, koska verkon tarkastelussa tulee ottaa huomioon koko muuntopiirin tila. (Männistö ym. 2018, 54.)

Kolmansien yliaaltojen suodatuksessa niiden erilaisen luonteen ja summautumisen vuoksi suodatusratkaisut ovat erilaisia kuin muiden yliaaltojen. Asettamalla nollajohtimeen rinnakkaisresonanssiipiiri, eli niin sanottu estopiiri, voidaan kolmannen yliaallon määrää pienentää. Käytettävissä on myös yksivaiheinen vaiheen ja nollan välinen sarjaresonanssiipiiri eli imusuodin sekä puolijohdetekniikalla toimivat aktiivisuodatinratkaisut. Estopiirin toiminta perustuu suuren impedanssin muodostamiseen 150 Hz:n taajuudelle nollajohtimen kanssa sarjaan kytketyn rinnakkaisresonanssiipiirin avulla, jolloin 3. yliaalto ei pääse kulkemaan nollajohtimessa. Imusuotimen toiminta taas perustuu 150 Hz:n taajuudelle viritettyyn sarjaresonanssiipiiriin, jonka kautta 3. yliaaltovirta pääsee kulkemaan, jolloin jännitesäro pienenee ja saadaan myös tuotettua haluttu määrä loistehoa. Suodatin koostuu kondensaattoreista, joiden kanssa on kytketty sarjaan kuristimia. Kuristimen induktanssi valitaan niin, että suodatin muodostaa erittäin matalaimpedanssisen sarjaresonanssiipiirin 3. yliaaltotaajuudelle, jolloin suurin osa 3. yliaallosta päättyy suodattimeen. Koteloitu suodatin varustetaan kontaktorilla, termisellä ylivirtareleellä, kuristimilla, kondensaattoreilla ja jännitteenvälvontareleellä. (Männistö ym. 2018, 56.)

Nopeita kuormitusmuutoksia sisältävissä verkoissa voidaan myös käyttää tyristorikytkettyjä kondensaattoriparistoja sekä staattisia kompensoitajia. (Männistö ym. 2018, 58-59.)

Aktiivisuodattimet ovat tulleet passiivisilla komponenteilla toteutettujen yliaaltosuodattimien rinnalle. Aktiivisilla, puolijohdeilla toteutetuilla suodattimilla mitataan virran yliaaltokomponentteja ja tuotetaan niitä vastaava 180° :n vaihesiirrossa oleva virta, joka kumoaa alkuperäisen yliaaltovirran. Jos kuorman yliaaltovirrat ylittävät aktiivisuodattimen kapasiteetin, se jatkaa toimintaansa mutta jättää kompensoimatta kapasiteetin ylittävän osan yliaalloista, joten aktiivinen suodatin ei voi ylikuormittua. Aktiivisuodatin toimii kuten taajuusmuuttaja käyttäen energialähteenä kompensoitavan verkon varaamia tasajännitekondensaattoreita ja tuottamalla PWM-modulaatiolla halutun virran verkkoon. Yleensä invertte-reissä käytetään IGBT-transistoreita, mutta myös GTO- ja MOSFET-transistoreita voidaan käyttää. (Männistö ym. 2018, 60.)

Verrattuna passiivisiin suodattimiin, etuna aktiivisella suodattimella on mahdollisuus valita useita suodatettavia taajuuksia, millä vältetään rinnakkaisresonanssien vaara, ja kooltaan aktiivisuodatin on kompaktimpi. Aktiivisuodattimella voidaan myös kompensoida kolmella jaolliset, nollajohtoon summautuvat yliaallot. Se voidaan myös asentaa mihin tahansa verkon pisteeseen, eikä kompensoitavan virran suunnalla, käyrämuodolla tai virtamuutoksen dynamiikalla ole merkitystä. Aktiivisuodattimella kuormitus voi olla epäsymmetrinen, vaihesiirto induktiivinen tai kapasitiivinen, eikä verkon impedanssilla tai jännitteen laadulla ole vaikutusta sen toimintaan. Esteenä aktiivisuodattimien yleistymiselle on ollut puolijohdekytkimien suorituskyky sekä korkeampi hinta suhteessa passiivisuodattimiin. (Männistö ym. 2018, 60-61.)

6 SÄHKÖAUTOJEN LATAUS

Standardissa SFS-EN IEC 61851-1 on määritelty sähköautojen lataukseen käytettävät lataustavat, joista Suomessa ensisijaisesti käytettäväksi suositellaan lataustapoja 3 ja 4. Osalla vakuutusyhtiöistä voi esiintyä vakuutus sopimuksissa ehtoja esimerkiksi normaalin kotitalouspistorasian käytölle sähköauton latauksessa, mutta myös lataustavalle 1, eli kevyiden sähköajoneuvojen lataukselle on asetettu tarkkoja vakuutusehdoissa tarkkoja rajoitteita, kuten latauksen kieltäminen palava-aineisten materiaalien läheisyydessä. Lataustavat määräytyvät jännitteen, virran ja käytetyn lataustekniikan mukaisesti. (Sähkötieto 2023, 5.)

Lataustapa 1 (Mode 1), käytetään lähinnä keveiden sähköajoneuvojen, kuten sähköpyörien, sähkömoottoripyörien ja -moottoripyörien sekä keveiden nelipyöრაisten ja sähköisten liikkumisvälineiden lataamiseen. Lataustavassa 1 sähköajoneuvo liitetään sähköverkkoon käyttäen syöttöpuolella jännitteeltään korkeintaan 250 V:n yksivaiheista tai 480 V:n kolmivaiheista, virraltaan korkeintaan 16 A:n standardisoitua pistorasiaa sekä tehoa syöttäviä johtimia ja suojamaadoitusjohtimia. Yleisesti pistorasiana käytetään joko suko-pistorasiaa tai normaalia kolmivaiheista pistorasiaa. (Sähkötieto 2023, 5.)

Lataustavassa 2 (Mode 2) sähköajoneuvo liittämiseen sähköverkkoon käytetään jännitteeltään korkeintaan 250 V:n yksivaiheista tai 480 V:n virraltaan korkeintaan 32 A:n standardisoitua pistorasiaa sekä tehoa syöttäviä johtimia ja suojamaadoitusjohtimia. Myös lataustavassa 2 käytetään yleisesti pistorasiana joko suko-pistorasiaa tai normaalia kolmivaiheista pistorasiaa. Lataustapa 2 on kuitenkin tarkoitettu vain lyhytaikaiseen käyttöön, mikäli varsinaista lataustavan 3 mukaista latauspistettä ei ole käytettävissä. Tällöin kuitenkin liitosjohdossa on oltava tarvittavat suojalaitteet, ja latausvirraksi suositellaan asetettavaksi enintään 8 A. (Sähkötieto 2023, 5.)

Lataustapa 3 (Mode 3) on toinen suositeltavista lataustavoista, jossa sähköajoneuvo liitetään sähköverkkoon käyttäen sähköajoneuvon lataamiseen tarkoitettua järjestelmää, eli kiinteää latausasemaa. Lataustavan 3 ohjaustoiminnot ulottuvat sähköajoneuvon latauslaitteeseen, jolloin sen lataustapahtumaa ja lataustehoa voidaan säätää portaittain ampeerin välein ja myös varmistua ajoneuvon oikeasta kytketymisestä latauspisteeseen. Tällöin latausvirta voi olla 6 - 63 A, eli latausteholtaan 1,4 – 43 kW. Pistorasiana lataustavassa 3 käytetään sähköauton lataukseen tarkoitettua, standardin EN 62196-2 mukaista pistorasiaa. (Sähkötieto 2023, 6.)

Lataustapa 4 (Mode 4) on tehokkain käytettävissä lataustavoista, ja siinä sähköajoneuvo liitetään sähköverkkoon käyttäen ajoneuvon ulkopuolista laturia. Lataustapaa 4 kutsutaan myös pikalataukseksi, tehollataukseksi ja DC-lataukseksi, ja se on tarkoitettu erityisesti sähköajoneuvojen lataukseen. Toisin kuin muissa lataustavoissa, joissa auton oma laturi tasasuuntaa syötettävää verkkojännitettä ja lataa akustoja, lataustavassa 4 laturi itse tasasuuntaa ja syöttää akkuihin ladattavan tasavirran. Kuten lataustavassa 3, myös lataustavassa 4 ohjaustoiminnot sähköajoneuvon lataustapahtumaa ja lataustehoa voidaan säätää portaittain ja myös varmistua ajoneuvon oikeasta kytkeytymisestä latauspisteeseen (Sähkö-tieto 2023, 6, Go-e 2022.)

Lataustavoissa 1 ja 2 voidaan käyttää standardin SFS-EN 60309-2 mukaista teollisuuspistorasiaa tai standardin SFS 5610 mukaista maadoitettua kotitalouspistorasiaa sillä edellytyksellä, että ajoneuvon pitkäaikaista latausvirtaa rajoitetaan tarpeeksi pieneksi. Standardin SFS 5610 mukaiset kotipistorasiat eivät sovellu pitkäaikaiseen sähköautojen lataukseen pistokytkimen täydellä mitoitusvirralla, joten niiden latausvirta tulisi rajoittaa 8 A:iin. IEC 60884-1 mukaisesti valmistettuja vahvennettuja pistorasioita ja pistotulppia (High-Load, HL) eli niin kutsuttuja super-sukoja kuitenkin voidaan yhdessä kuormittaa standardin mukaisesti jatkuvasti 16 A:n virralla. (Sähkö-tieto 2023, 6.)

Lataustavassa 3 pistoketyyppinä käytetään yleisimmin SFS-EN 62196-2 mukaista pistoketyyppiä 2 (Type 2), eli niin kutsuttua Mennekes-pistoketta. Muita lataustavan 3 pistoketyyppejä ovat tyyppin 1 (Type 1) pistoke, niin kutsuttu Yazaki, ja tyyppin 3 (Type 3) pistoke, niin kutsuttu Scame. Tyyppin 1 ja 3 pistokkeet eivät kuitenkaan ole yleisiä Euroopan markkinoilla myytävissä autoissa. (Sähkö-tieto 2023, 6.)

Lataustavan 4 pistoketyypit ovat standardin SFS-EN 62196-3 mukainen pistoketyyppi 4 (Type 4) CHAdeMO ja CCS-standardin mukainen pistoketyyppi FF, eli CCS2 tai Combo 2. Lataustavan 4 mukaiset latausasemat voidaan yleensä varustaa molemman tyyppin pistokkeilla. (Sähkö-tieto 2023, 6.) Toisin kuin lataustavassa 3, jossa latausasema voi olla varustettu kiinteällä latausjohdolla tai pelkällä pistokkeella, tehollatauspisteiden kaapelit ovat aina kiinteitä. Tasavirtalatauksen latauspistokkeita merkitään tyyppin ja latauslaitteen jännitealueen mukaisesti. Kun kyseessä on CCS- latauspistoke ja merkintä on K, on latauslaitteen jännitealue 50-500 V, kun taas kirjaimen ollessa L on jännitealue 200-920 V. CHAdeMo-latauspistokkeessa vastaavat merkinnät ovat M ja N. Mikäli latauslaite kykenee koko jännitealueeseen 50- 920 V, merkitään pistokkeeseen molemmat kirjainsymbolit, eli K ja L tai M ja N. (Linja-aho & Mäkinen & Orrberg 2022, 55-56.)

Kuten jo mainittiin, lataustapojen 3 ja 4 mukaisten latausasemien ohjaustoiminnoilla voidaan ohjata sähköajoneuvon lataustapahtumaa ja säätää latauksen tehoa. Tällöin voidaan käyttää kuormanhallintaa, jolla autojen ottamaa latausvirtaa voidaan rajoittaa tai jaksottaa latauksia tai mahdollisesti kytkeä irti tarvittaessa muita kuormituksia. Kuormanhallinnan peruseräiteenä kuitenkin on, ettei keskuksen tai liittymän nimellisvirta ylittyisi, mutta sillä voidaan myös jakaa kuormitusta lataavien autojen kesken joko perinteisesti vuorottelemalla sähkökuormia, puolittamalla latausteho jakelun kuormituksen noustessa tai säätämällä lataustehoa portaattomasti jakelun kuormituksen mukaisesti. (Sähkötieto 2023, 12.)

Sähköautojen latauksen aiheuttamissa yliaaltopitoisuuksissa on havaittu olevan huomattavia eroja eri valmistajien välillä, ja välillä ne ylittävät IEC-standardin mukaiset arvot joissakin tilanteissa, usein yksittäisten yliaaltojen osalta. Myös useiden sähköautojen yhtäaikainen lataus voi nostaa verkon yliaaltopitoisuutta yli sallitun rajan, vaikka yksittäinen sähköauto olisikin IEC-standardin mukainen. (Mariscotti 2022.)

7 MITTAUSJÄRJESTELYT JA KÄYTETTÄVÄ MITTALAITTEISTO

Mittaukset suoritettiin Kokkolan Halpa-Halli Oy:n kiinteistöissä. Lataustavan 3 eli AC-latausasemien autojen yksittäismittaukset suoritettiin Kokkolan myymälän parkkihallissa, ja lataustavan 4 eli DC-latausasemien mittaukset suoritettiin Alahärmän myymälän pysäköintialueella. Mittalaitteena käytettiin Fluke 1735 Power Logger -kolmivaiheista sähkönlaadun keruulaitetta. Mittauskuormituksena työssä toimivat käytössä olevan latausinfrastruktuurin käyttäjät.

Latausasemat ovat julkisessa käytössä, joten niiden käyttöä ei voitu rajoittaa mittauksien ajaksi, mikä toi oman haasteensa mittaukstopahtumaan. Koska kaikki latauspisteet olivat asiakkaiden käytettävissä, ei mittausta ei voitu suorittaa koko sähköauton latauspisteiden varokelohkon syötöstä, vaan mittaukset tehtiin yksittäisistä ryhmälähdöistä.

7.1 Fluke 1735 Power Logger

Fluke 1735 Power Logger on tallentava mittalaite, jolla voidaan tehdä jännite-, virta- ja tehoanalyysija kuormituksista ja sähköverkoista. Tallennettua dataa voidaan käsitellä ja analysoida Fluke Power Log Classic -ohjelmistolla.

Mittalaitteessa on viisi eri mittaustoimintoa, joista ensimmäinen on Meter V / A / Hz, joka näyttää vaihejännitteen, vaihevirratt ja nollavirran numeroarvoina sekä taajuuden. Toinen mittaustoiminto, Scope, näyttää jännitteiden ja virtojen aaltomuodot, niiden välisen vaihe-eron sekä kursorin kohdalla jännitteen ja virran arvot. Kolmas mittaustoiminto on Harmonics, jolla voidaan mitata harmoniset yliaallot 40. yliaaltoon asti vaihekohtaisesti jännitteistä, virroista ja nollavirroista. Näytöltä on luettavissa myös kokonaissärön THD-arvo. Neljäs mittaustoiminto on Power, joka näyttää eri tehosuureet vaihekohtaisesti sekä kokonaistehona. Näytettävät tehosuureet ovat pätöteho, näennäisteho, loisteho, tehokerroin ja $\cos \phi$. Myös energiakulutuksia voidaan mitata, jolloin voidaan tarkastella hetkellisiä energiakulutuksia, tai kokonaiskulutusta tunnin aikana. Viimeinen mittaustoiminto, Events, näyttää nimensä mukaisesti tapahtumia, kuten jännitekuoppia, -kohoumia ja -keskeytyksiä, jotka tallennetaan automaattisesti myöhempää tarkastelua varten. Tapahtumien liipaisurajoja voidaan muuttaa Menu-valikossa.

Mittauksen ollessa käynnissä voidaan myös tallentaa niin sanottuja ruutukaappauksia, jotka tallentuvat

mittalaitteeseen. Mittalaitteen tiedonkeruutoiminnolla voidaan tallentaa mitattuja arvoja, joita voidaan tallentaa samanaikaisesti riippuen mittaustoimintojen kiertokytkimien asennosta. Esimerkiksi Powermittaustoiminto tallentaa myös jännitteen, virran ja taajuuden arvot, mutta harmoniset yliaallot on mitattava erillisellä mittauksella. Piirtojakson pituuteen ja arvojen tallennustiheyteen vaikutetaan keskiarvoistusajalla (Averaging period), mikä tarkoittaa aikaväliä, jolloin tieto mittauksen aikana tallennetaan.

Mitatut arvot voidaan mittauksen jälkeen siirtää tietokoneelle, ja tarkastella mittaustuloksia Power Log Classic -ohjelmistolla. joista mittauksia voidaan tarkastella taulukkomuodossa, aikakuvaajalla esitetynä tai palkkikaaviona mittauservoista jaettuna mittaustapahtumiin, esimerkiksi kuinka monta kertaa mittaustapahtumista jännitteen keskiarvo oli 232,9 V. Harmonisten yliaaltojen mittaustuloksia voidaan tarkastella aikakuvaajana tai palkkikaaviona, jossa näkyvät kokonaissärö THD sekä yliaaltojännitteiden ja -virtojen suhde perustaajuiseen jännitteeseen.

7.2 AC-latausasemien mittausjärjestely

Kokkolan Halpahallin myymälän parkkihallissa on neljä sähköauton latauspaikkaa, joiden latauspisteet ovat toteutettu kahdella Alfen Eve Double Pro-line -latausasemalla (KUVA 1). Latausasemassa on kaksi pistoketyypin 2 pistoketta, latausasemien suurin latausteho on 2 x 11 kW, tai 1 x 22 kW, jos vain yksi auto lataa asemasta. Jokaiselle latauspistokkeelle on oma, 3-vaiheinen ryhmälähtönsä, jonka sulakkeiden koot ovat 3 x 32 A. Vaihejärjestys eri pistokkeilla on toteutettu kiertävänä, jotta yksivaiheista latausta käyttävien autojen yhtäaikainen vaihekuorma saadaan jaettua tasaisemmin. Kuvassa 2 nähdään latausaseman näyttö, kun sillä ladataan sähköautoa. Nähtävissä on hetkellinen latausteho, latausjakson aikana ladattu kokonaisteho ja lataukseen kulunut aika.



KUVA 1. Kokkolan parkkihallin latausasemat



KUVA 2. Latausaseman latausnäky

Mittauspisteenä oli myymälän sähköpääkeskustilassa sijaitseva ryhmäkeskus RK11 (KUVA 3), jonka ryhmäjohtoihin mittauskytkennät sijoitettiin.



KUVA 3. Mittausjärjestelyt ryhmäkeskuksella

Kuten jo aiemmin mainittiin, koska latausasemat ovat julkisia, ei niiden käyttöä voitu rajoittaa mittauksien ajaksi, joten tarkasteltavat autot valikoituivat sen mukaisesti, minkälaisia autoja mittausajan kohtana latausasemilla ladattiin. Ensimmäinen mittauksen kohde oli Kia Optima plug-in -hybridi, jonka latausteho on 3,7 kW, laturi on yksivaiheinen, nimellisvirraltaan 16 A. Toinen mittauksen kohteista oli Volvo XC60 T8 plug-in -hybridi, jonka lataustehoksi ilmoitetaan myös 3,7 kW, ja myös siinä laturi on yksivaiheinen, nimellisvirraltaan 16A. Kolmas mittauksen kohde oli Mercedes Benz C300e-plug-in -hybridi, jonka latausteho on 11 kW ja jonka ollessa kolmevaiheinen, nimellisvirraltaan 3 x 16 A.

Mittaustiheydeksi määritettiin 2 sekuntia, jotta mahdollinen ajallisesti epälineaarinen virta on paremmin nähtävissä. Kia Optiman osalta tehomittauksen mittausjakson ajaksi valittiin 1 tunti, jotta saadaan yleinen käsitys sähköauton oman laturin kuormituksesta hieman pidemmällä aikajaksolla. Harmonisten yliaaltojen mittausjakson pituudeksi valittiin 5 minuuttia, jolloin standardin mukaisesti mittausjakson ollessa alle 10 minuuttia voidaan mittaustuloksista laskea tarvittaessa neliöllisiä keskiarvoja.

Volvon ja Mercedes Benzin osalta tehon mittausjaksojen pituudeksi valittiin 10 minuuttia, koska mittauksen laajuus on riittävä yleisen tarkastelun kannalta. Harmonisten yliaaltojen mittauksen ajaksi valittiin 5 minuuttia. Mikäli haluttaisiin selvittää yksittäisten autojen latausjaksojen käyttäytymistä koko latausjakson ajan, tulisi mittausaika olla pidempiä, mutta työn kannalta tämä ei ole olennaista.

7.3 DC-latausaseman mittausjärjestely

Alahärmän Halpahallin myymälän pysäköintialueella on kaksi pikalatauspaikkaa, joiden latauspisteet ovat toteutettu Tritium RTM-75 -latausasemalla (KUVA 4). Latausasemassa on kaksi pistoketyypin 4 CCS-pistoketta, ja latausaseman suurin latausteho on 75 kW, joka kahden lataajan kuormituksessa jaetaan tasaisesti lataajien kesken. Latausasemalle on sähköpääkeskuksessa yksi kolmivaiheinen, 3 x 125 A:n ryhmälähtö. Kuvassa 5 nähdään latausaseman näyttö, kun sillä ladataan sähköautoa. Nähtävissä on hetkellinen latausteho, latausjakson aikana ladattu kokonaisteho, lataukseen kulunut aika ja auton akuston varaus prosentteina.

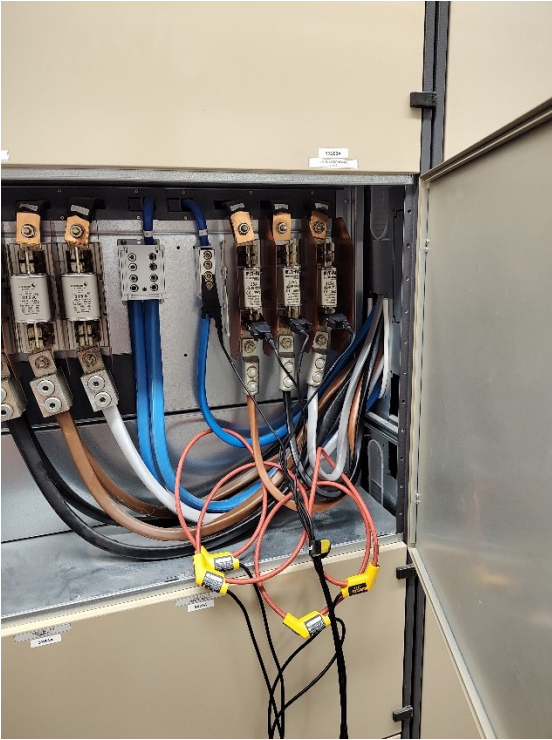


KUVA 4. DC-latausasema Tritium RTM 75



KUVA 5. Tritium RTM 75 latausnäkyvä

Mittauspisteinä oli myymälän sähköpääkeskustilassa sijaitseva sähköpääkeskus, jonka ryhmäjohtoihin mittauskytkennät on sijoitettu (KUVA 6).

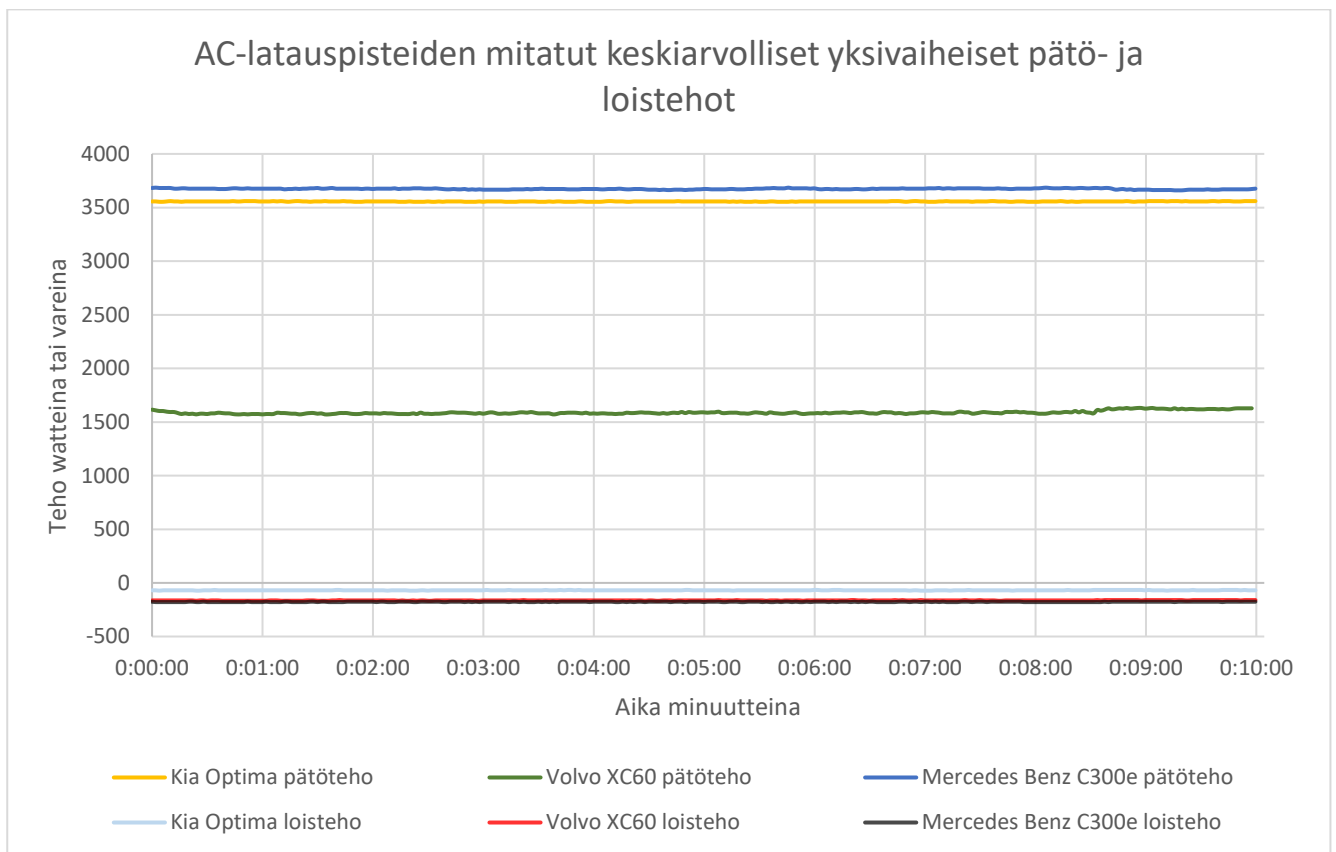


KUVA 6. Sähköpääkeskuksen mittausjärjestelyt

Mittaustiheydeksi määritettiin 2 sekuntia, jotta mahdollinen ajallisesti epälineaarinen virta on paremmin nähtävissä. Tehomittausjakson ajaksi valittiin 10 minuuttia, ja harmonisten yliaaltojen mittausjakson pituudeksi valittiin 10 minuuttia. Valitettavasti latausasemasta jo aiemmin havaittu ja ilmoitettu vika oli vieläkin korjaamatta, jonka vuoksi latausaseman antama teho oli keskimäärin vain 35 kW, jolloin täyttä kuormitusta ei saatu mitattua.

8 MITTAUSTULOKSIEN KÄSITTELY

Kuviossa 23 esitetään AC-latauspisteestä mitattujen sähköautojen keskiarvolliset yksivaiheiset pätö- ja loistehot 10 minuutin mittausjakson ajalta. Tulokset ovat keskiarvollisia tehoja koska kompensoinnin tapauksessa kondensaattoriparistojen säätö tapahtuu viiveellisesti, jolloin keskiarvollinen teho on olennaisempi tarkastelun kannalta eikä loistehoa ole tarkoitus kompensoida kokonaan, jotta vältetään ylikompensaatiolta.



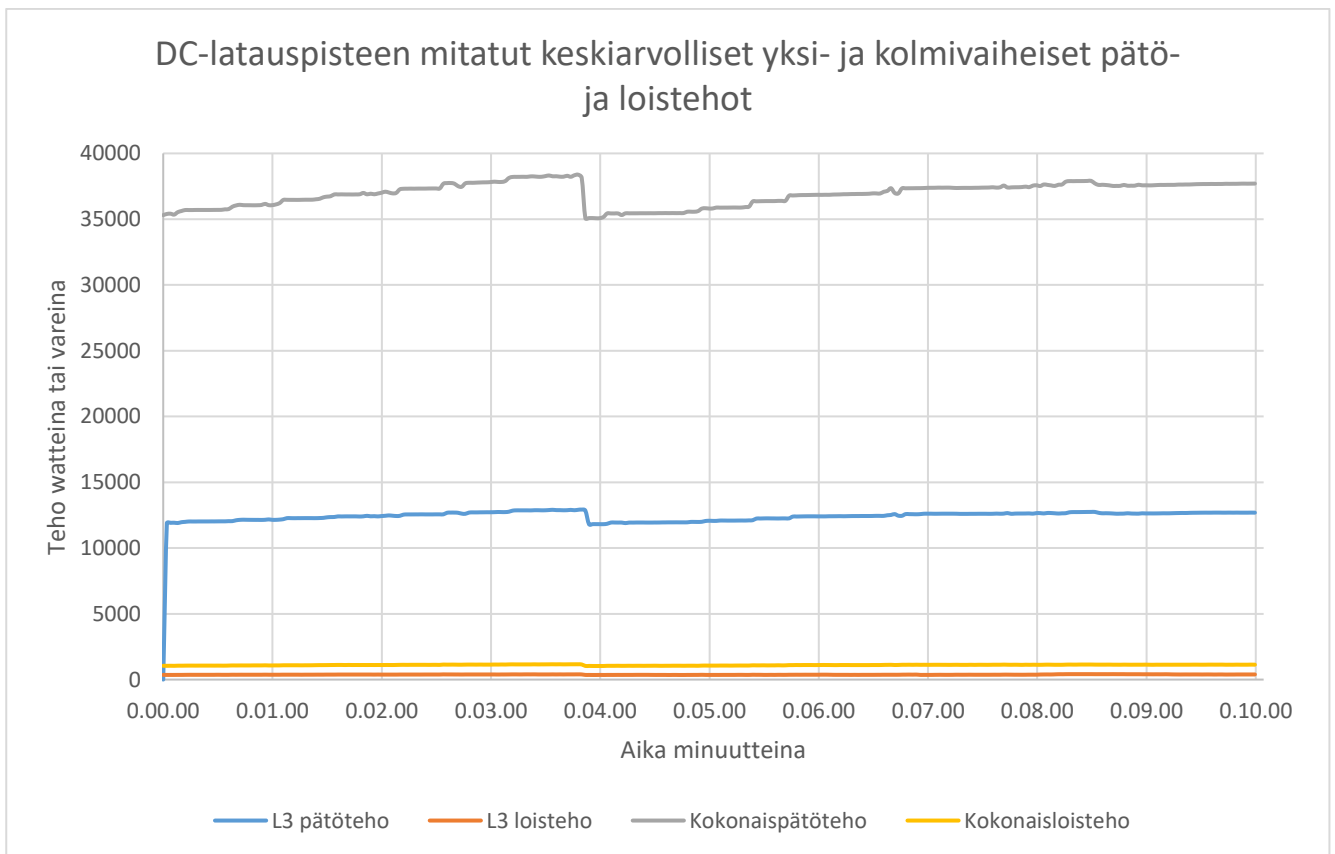
KUVIO 23. AC-latauspisteiden keskiarvolliset yksivaiheiset pätö- ja loistehot

Kuviossa 23 esitetyt tehot ovat yksivaiheisia tehoja, myös kolmivaiheisen lataustapahtuman eli Mercedes Benz C300e:n, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia keskenään. Kuviossa esitettävä vaihe L2 valittiin suurimman vaihekohtaisen kuormituksen perusteella. Taulukossa 4 on esitetty mitatut kaikkien vaiheiden tehot ja kokonaistehot mittausjaksojen alusta. Vaikkakin mittaustulokset toki vaihtelevat mittausjakson aikana, mutta kuten kuvioista 23 nähdään ovat ne suhteellisen stabiilit koko mittausjakson ajan.

TAULUKKO 4. AC-latauspisteiden mitatut keskiarvolliset tehot

AC-latauspisteiden mitatut keskiarvolliset yksivaiheiset pätö- ja loistehot sekä kokonaistehot								
	Pätöteho			Loisteho			Kokonaisteho	
	L1 (W)	L2 (W)	L3 (W)	L1 (var)	L2 (var)	L3 (var)	Pätöteho (W)	Loisteho (var)
Kia Optima	3557	0	-9,409	-69	-34,5	6,273	3547	-97
Volvo XC60	-9,404	0	1615	3,136	-31,364	-136	1606	-191
Mercedes Benz C300e	3569	3682	3666	-38	-176	-135	10918	-348

Kuviossa 24 on esitetty DC-latausaseman mitatut keskiarvolliset yksi- ja kolmivaiheiset pätö- ja loistehot mittausjakson ajalta, taulukossa 5 mitatut yksivaiheiset tehot ja kokonaistehot mittausjakson alusta.

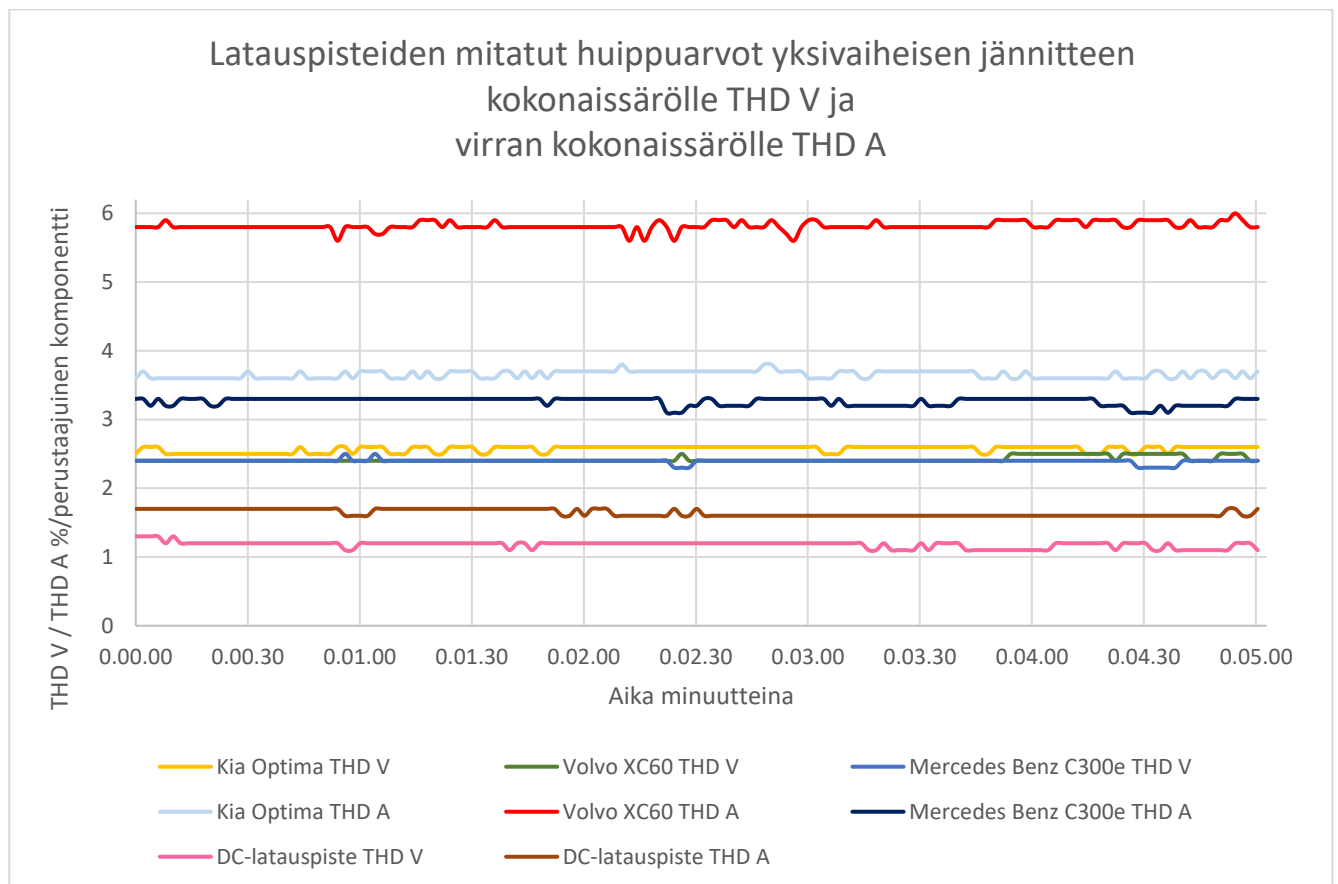


KUVIO 24. DC-latauspisteiden keskiarvolliset yksi- ja kolmivaiheiset pätö- ja loistehot

TAULUKKO 5. DC-latauspisteiden mitatut keskiarvolliset tehot

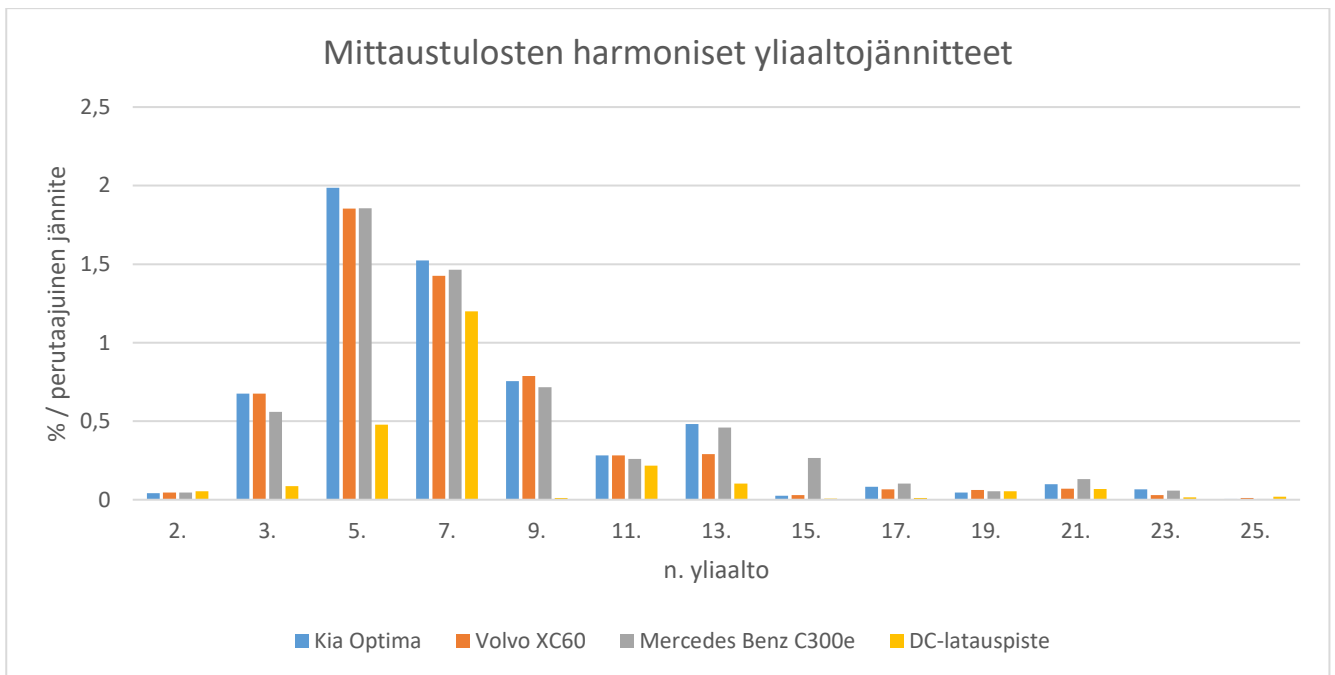
DC-latauspisteiden mitatut keskiarvolliset yksivaiheiset pätö- ja loistehot sekä kokonaistehot								
	Pätöteho			Loisteho			Kokonaisteho	
	L1 (W)	L2 (W)	L3 (W)	L1 (var)	L2 (var)	L3 (var)	Pätöteho (W)	Loisteho (var)
DC-latauspiste	11570 kW	11852	11887	329	361	361	35309	1051

Kuviossa 25 esitetään mittausjakson aika mitatut yksivaiheisen jännitteen kokonaissäröt jännitteelle ja virralle prosentteina perustaajuisesta suureesta. Kolmivaiheisten kuormitusten tapauksessa kuvioon on valikoitu suurimman särön sisältänyt vaihe. DC-latauspisteen mittausjakson pituuden ollessa 10 minuuttia, on kuvioon valittu mittausjakson ensimmäiset 5 minuuttia.

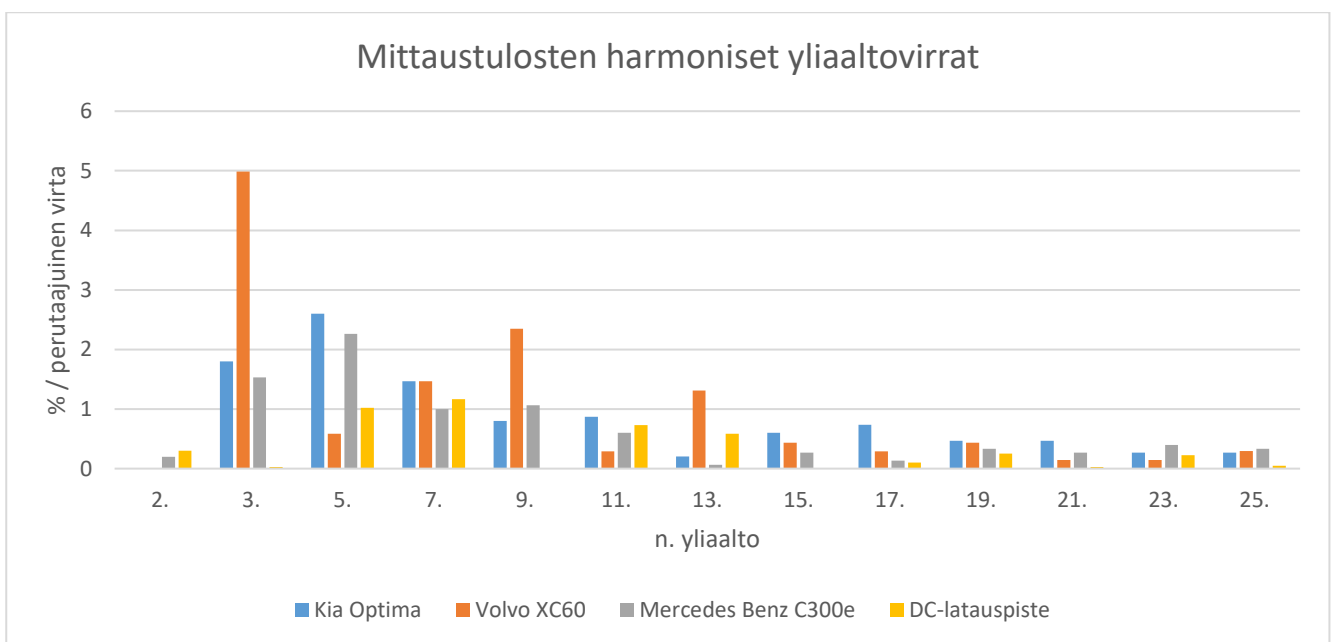


KUVIO 25. Jännitteen ja virran kokonaissäröt suhteessa perustaajuiseseen suureeseen

Kuviossa 26 esitetään harmonisten yliaaltojännitteiden mittaustulokset prosentteina perustaajuisesta jännitteestä palkkikaaviona. Harmonisista yliaalloista on esitelty vain ne, joissa osuus oli >0 %. Kuviossa 27 on esitelty vastaavasti harmonisten yliaaltovirtojen mittaustulokset. Molemmissa kuviossa kolmivaiheisista kuormituksesta esitetty vaihe on valittu suurimman yliaaltosisällön mukaisesti.



KUVIO 26. Mittaustulosten harmoniset yliaaltojännitteet



KUVIO 27. Mittaustulosten harmoniset yliaaltovirrat

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Mittaustulokset AC-latauksen osalta olivat hieman ennakoajatuksista poikkeavat, sillä kaikkien mitattujen autojen osalta loisteho olikin kapasitiivista eli ne tuottavat loistehoa eivätkä kuluta sitä. Tuotetun kapasitiivisen loistehon osuus toisaalta on hyvin pieni suhteessa kulutettuun pätötehoon paitsi Volvo XC60 tapauksessa, joka poikkeaa kahdesta muusta autosta hyvinkin paljon, niin loistehon kuin yliaaltojen osalta. Volvon tapauksessa myös latausteho oli poikkeuksellisen alhainen, koko latausta-
pahtuman ajan vain 1,6-1,7 kW, joka on huomattavasti alhaisempi kuin internetistä löytyvä tieto auton latauksen suurimmasta tehosta 3,7 kW, joka olisi kyllä latauspisteen puolesta ollut saatavissa. Toisaalta olen kuullut muiden sähköalan ammattilaisen parissa keskusteltavan kyseisen automerkin sähköautojen latauksen yliaaltojen aiheuttavan häiriöitä jopa tietyn merkkisten latauspisteiden toimintaan, ja olisi mielenkiintoista tietää, mistä alhainen latausteho johtui. Muutoin autojen tulokset olivat yllättävänkin samansuuntaisia keskenään.

Kapasitiivinen loisteho johtuu mitä luultavammin tasasuuntauspiirin suodatukselta mutta mielenkiintoista on, miksi suodatus on mitoitettu menemään kapasitiivisen puolelle, koska yleensä sähkölaitteissa pyritään pysymään induktiivisen puolella kuten esimerkiksi loistehon kompensointilaitteistoissa säädintä asettaessa tehdään. Kaikkien mitattujen autojen tapauksessa loisteho oli kapasitiivista, joten kyse ei ole yhden laturin ominaisuudesta. Nykyisillä kaksisuuntaisilla jakeluyhtiön mittareilla voidaan mitata myös ylikompensointia ja osa verkkoyhtiöistä on ottanutkin käyttöön laskutuksen myös tuotetusta loistehosta, poiketen aiemmasta pelkän kulutetun loistehon laskutuksesta. Kohteissa, joissa loistehon estokelaparisto on muutenkin nykyisellään hieman ylimitoitettu kompensointipiortailtaan, voisi teoriassa tulla hetkellistä ylikompensointia AC-latauksen osalta, mutta olettaen että 3 kpl Mercedes Benzin verrokiautoja lataisi yhtä aikaa, olisi kapasitiivinen loisteho vain 1 kvar:n luokkaa, ja toisaalta loistehon säädin tiputtaisi tämän havaitessaan muutaman minuutin kuluessa kompensointipiortaan pois päältä.

DC-latauksessa valitettavasti laturin vian vuoksi täyden kuormituksen mittausta ei onnistunut, mutta toisaalta oli hienoa tuottaa tilaajalle mittauksiin perustuvaa faktatietoa viasta, jonka tilaaja oletti jo olevan korjattu. DC-latauspisteessä mittaustuloksissa esiintyi induktiivista loistehoa, joka on toki kulutettuun pätötehoon nähden suhteutettuna pieni arvo. Huomioon täytyy kuitenkin ottaa laturin puolittainen teho, jolloin jos voidaan olettaa loistehon kasvavan lineaarisesti kuormituksen kanssa, olisi loisteho täydellä

75 kW:n kuormituksella jo 2 kvar, joka on jo pienellä estokelaparistolla huomattava määrä. Esimerkiksi Halpa-Hallin uuden myymälän suunnittelussa kompensointilaitteiston koko on $2,5 + 2,5 + 10$ kvar.

Kokonaissärön ja harmonisten yliaaltojen mittaukset olivat kaikki standardin mukaisia, mutta kuten jo mainittiin, Volvon tapauksessa verrokkeja huomattavasti korkeampia. Toki voidaan myös miettiä, onko standardi tarpeeksi tiukka raja-arvoissaan, kun tiedetään että koko muuntopiirin yliaallot yhdessä voivat aiheuttaa moninaisia ongelmia tiettyyn osaan verkkoa, ja kun nykyisellään yliaaltoja tuottavat laitteet ovat lisääntyneet huomattavasti, voisi raja-arvojen tarkastelu uudelleen olla aiheellista.

Yliaaltojen vaikutus voi myös vaikuttaa yksivaiheisten AC-latureiden kuormittamattomilla vaiheilla näkyviin pätö- ja loistehoihin, kuten Kian ja Volvon osalta nähdään verkkoon päin kulkevan noin 9 W verran pätötehoa.

Kolmivaiheisissa latauksissa huomataan syntyvän myös 2. yliaaltovirtaa, jota yksivaiheisissa latauksissa ei esiinny, vaikka määrä tosin on erittäin pieni. DC-latauksen osalta taas voidaan nähdä syntyvän kokonaissärön olevan pienin, joten voidaan sanoa ainakin kulutettuun pätötehoon suhteutettuna DC-latauksen olevan yliaaltojen suhteen verkolle paras ratkaisu.

AC-latauksessa olisi ollut erittäin mielenkiintoista tutkia yliaaltojen osalta kahden auton yhtäaikaista vaikutuksia mittaustuloksiin, joka yksin työtä suorittaessa osoittautui hieman liian hankalaksi toteuttaa. Myös sellaisessa tilaajan kohteessa, jossa energiatehokkuushankkeita on laajasti toteutettu, koko kiinteistön liittymiskohdan yliaaltosisältöä tulisi tarkastella ilman estokelaparistoa, jotta saataisiin kuva kaikkien laitteiden yhteisvaikutuksesta yliaaltosisältöön. Toisaalta ainakaan nykyisellään havaittuja ongelmia yliaaltojen kanssa tilaajan kiinteistöissä ei ole, joka osittain varmastikin on estokelaparistojen ansiota. DC-latauksessa tulisi vertailla muiden latauspisteiden valmistajien mittaustuloksia, jotta nähtäisiin, ovatko ne loisteholtaan ja yliaalloiltaan saman suuntaisia.

Yhdeksi ongelmaksi voi myös muodostua korkeataajuisien yliaaltojen suhteellisen pienikin osuus, joka voi EMC-häiriöiden muodossa vaikuttaa kiinteistön muihin laitteisiin, kuten myymälän äänentoistojärjestelmiin. Mittauksiin käytetyllä Fluken mittarilla ei kuitenkaan kovin korkeataajuisia yliaaltoja saada mitattua, koska viimeinen mitattava yliaalto on 25. harmoninen yliaalto, joten asiaa olisi hyvä tarkastella siihen soveltuvalla mittarilla tai oskilloskoopilla.

Jotta esimerkiksi kapasitiivisen loistehon syntyminen suhteen ei tarvitsisi arvailla, olisi mielenkiintoista tarkastella latausasemien ja sähköautojen latureiden tasajännitettä oskilloskoopin avulla, jotta voitaisiin saada tietoa, kuinka tasasuuntaus on oikeasti toteutettu ja suodatettu, mutta tämä vaatisi käytännössä jonkin latauslaitteen suhteellisen suurta purkamista.

Teoriaosuutta kirjoittaessa loistehon kompensointi ja yliaallot, sekä niiden välinen läheinen yhteys selkeytyi itselleni huomattavasti. Tutkiessani suomenkielistä kirjallisuutta, esimerkiksi se minkä vuoksi vain tietyt yliaallot ovat yleensä merkityksellisiä, jäi oikeastaan kaikista lähteistä uupumaan, mutta onneksi englanninkielisissä lähteissä asia oli selitetty auki riittäväällä laajuudella. Aihealueen ymmärtämiseksi tämä kuitenkin on tärkeää ja mielestäni loistehon ja yliaaltojen teoriaa käsitellessä tulisi teorian lähteä liikkeelle nimenomaan vaihtovirtapiireistä ja niihin liittyvistä teoreettisista kaavoista, joiden ymmärtäminen on edellytys loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen ymmärtämiseen.

Täyssähköautolla pidempää matkaa ajaessa, tämänhetkinen julkisten latauspisteiden hitaus konkretisoitui itselleni melko selkeästi. Autojen toimintasäteet ovat kuitenkin vielä suhteellisen lyhyitä, joten pidempiä matkoja suunnitellessa, ovat lataukseen käytettävät ajat suhteellisen pitkiä. Ilmoitetut latausasemien tehot vaihtelivat myös paljon todellisista, ja toisten autojen lataus vaikuttaa saatavaan lataustehoon paljon. Jos suunnittelet aikataulusi esimerkiksi tunnin pikalatauksella 75 kW:n latausteholla, voi toisen sähköauton sattuessa latauspisteelle samanaikaisesti oman auton latausaika tuplaantua. Tulevaisuudessa latauspisteiden tehot ja latausverkoston kattavuus tulevat varmasti laajentumaan, kuin myös sähköautojen toimintasäteet.

LÄHTEET

Ahoranta, J. 2021. *Sähkötekniikka*.15.-19. painos. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Aura, L.& Tonteri, A. 1996. *Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet*. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Aura, L.& Tonteri, A. 2005. *Teoreettinen sähkötekniikka*. 3.-5. painos. Helsinki: Werner Söderström Osakeyhtiö.

Autoalan Tiedotuskeskus. 2024. *Sähköautojen määrän kehitys*. Saatavissa: https://www.aut.fi/tilastot/autokannan_kehitys/sahkoautojen_maaran_kehitys. Viitattu 21.4.2024.

Go-e. 2022. *The 4 EV charging modes you need to know about*. Saatavissa: <https://go-e.com/en/magazine/charging-modes-electric-car>. Viitattu 16.4.2024.

Electronics tutorials. *Harmonics and harmonic frequency in AC circuits*. Saatavissa: <https://www.electronics-tutorials.ws/accircuits/harmonics.html>. Viitattu 10.4.2024.

Hietalahti, L. 2013. *Sähkövoimatekniikan perusteet*. Tampere: Amk- Kustannus Oy Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011. *Tehoelektroniikan perusteet*. Tampere: Amk- Kustannus Oy Tammertekniikka.

Kaleva. 2024. *Pulkkilan sähköongelma ratkesi – Induktiolieden oikuttelu loppui, kun talo siirrettiin pois sähköautojen latausaseman muuntopiiristä*. Saatavissa: <https://www.kaleva.fi/pulkkilan-sahkoongelma-ratkesi-induktiolieden-oiku/6259219>. Viitattu 21.4.2024.

Linja-aho, V., Mäkinen, J., Orrberg, M. 2022. ST-Käsikirja 41. *Sähköajoneuvot ja latausjärjestelmät*. 6. uusittu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

Mariscotti, A. 2022. Harmonic and Supraharmonic Emissions of Plug-In Electric Vehicle Chargers. *Smart cities*. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/smartcities5020027>. Viitattu 17.4.2024.

Männistö, M., Hietalahti, L., Seesvuori, R., Seesvuori, V., Wilén, T., Eronen, M. 2018. *Yliaallot ja kompensointi*. 2., uudistettu painos. Espoo: Sähköinfo Oy.

SFS-EN 50160:2022. *Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet*. 2022. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS.

Sähköinen liikenne Ry. 2024. *Sähköisen liikenteen tilannekatsaus Q4/2023*. Saatavissa: <https://emobility.teknologiateollisuus.fi/sites/emobility/files/inline-files/2023%20Q4%20Sa%CC%88hko%CC%88inenLiikenne%20tilannekatsaus%202024%2001%2030%20jaettava.pdf>. Viitattu 21.4.2024.

Sähkötieto Ry. 2023. ST-kortisto 51.90. *Sähköauton lataaminen ja latauspisteiden toteutus*. Espoo: Sähköinfo Oy.

The Snell Group. *Understanding Power System Harmonics and their Effects*. Saatavissa: <https://www.thesnellgroup.com/featured-tips/understanding-power-system-harmonics-and-their-effect>. Viitattu 10.4.2024.

Voipio, E. 1976. *Virtapiirit ja verkot*. 20., muuttumaton painos. Helsinki: Otatieto Oy