



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

LEO LAAKSONEN
KOMPENSOINTILAITTEIDEN VAIKUTUS ALLASPUMPPAAMON
MUUNTAMON SÄHKÖN LAATUUN JA LOISTEHOMAKSUIHIN

Diplomityö

Tarkastaja: Tutkijatohtori Jenni Rekola
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
31. lokakuuta 2018

TIIVISTELMÄ

LEO LAAKSONEN: Kompensointilaitteiden vaikutus allaspumppaamon muuntamon sähkön laatuun ja loistehomaksuihin

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 60 sivua, 3 liitesivua

Lokakuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja: Tutkijatohtori Jenni Rekola

Avainsanat: harmoniset yliaallot, loisteho, passiivinen kompensointi, STAT-COM, SVC

Tämän diplomityön tarkoituksena on suunnitella kompensointijärjestelmä Turun telakan muuntamoon, joka syöttää rakennusaltaan pumppuja ja neljää nosturia. Kompensointilaitteiston suunnittelu perustuu muuntamossa tehtyihin mittauksiin, joiden pohjalta tutkittiin erilaisia kompensointilaitteita, jotka olisivat mahdollista liittää muuntamoon.

Diplomityössä teoriapohjana erilaisille kompensointilaitteille käytettiin kirjallisuutta, jonka pohjalta tutustutaan erilaisten kompensointilaitteiden toimintaperiaatteisiin sekä millä tavalla ne vaikuttavat verkkoon. Diplomityössä käsitellään passiivisia kompensointilaitteita, jotka voivat suodattaa verkosta loistehoa ja vaimentaa erilaisia harmonisia yliaaltoja. Työssä käsitellään myös erilaisten aktiivisten kompensointilaitteiden tapaa suodattaa loistehoa ja harmonisia yliaaltoja. Tämän lisäksi tutustutaan aktiivisten kompensointilaitteiden säätöön, jolla voidaan taata aktiivisen kompensointilaitteen nopea toiminta, kun verkon loistehossa tapahtuu muutoksia.

Työn lopussa pohditaan mahdollisia loisteholaskutuksesta tulevia säästöjä, joita muodostuu, kun kompensointilaitteita liitetään verkkoon. Lisäksi lasketaan mahdollinen takaisinmaksuaika laitteistolle ja kuinka paljon laitteiston avulla voidaan saada voittoa säästöjen muodossa, kun laskutapana käytetään nettohyötyarvomenetelmää.

Työssä lopulta saatiin tulokseksi, että estokelaparistojen avulla saatiin säästöjä. Estokelaparisto on halpa, koska se on passiivinen kompensointilaitte. Aktiivisten kompensointilaitteiden kohdalla merkittäväksi nousi hinta, mutta suuremman hyödyn ansiosta saatiin estokelan ja aktiivisen kompensoinnin yhdistelmällä eniten säästöjä.

ABSTRACT

LEO LAAKSONEN: The effect of compensation devices to the pool pumping substation's power quality and reactive power costs

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 60 pages, 3 Appendix pages

October 2018

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

Major: Power Electronics

Examiner: Postdoctoral Researcher Jenni Rekola

Keywords: harmonics, passive compensation, reactive power, STATCOM, SVC

The purpose of this master's thesis is to design a compensation system to Turku shipyard's construction pool pumps substation. That substation also supplies four cranes. The design of the compensation system is based on measurements from the substation, which can be used to investigate various compensating devices that could be connected to the substation to compensate power quality.

In this thesis the literature was used as a theoretical background for the various compensating devices operating methods and how they affect the network. The thesis deals with passive compensation devices that can filter the reactive power and absorb current and voltage harmonics. The work also deals with the way in which different active compensating devices are used to filter the reactive power and harmonics. In addition, we are familiarizing with the control of active compensating devices to ensure a fast active compensating device when the reactive power of the network changes.

At the end of the work, consideration is given to the potential savings from the reactive power costs when the compensation device is connected to the grid. In addition, a possible payback time is calculated for the hardware and how much the hardware can be used to gain profits when a net present value is used as a calculation method.

As a result of the thesis, the savings are achieved if reactor-protected capacitors are used as a compensation device because reactor-protected capacitor is a passive compensator and that's why it is also inexpensive. Active compensating devices are more expensive than passive compensation devices because active compensator includes high costs control circuits. However, in this case when reactor-protected capacitor and active compensator are combined reactive power costs are the lowest and shipyard gets more savings.

ALKUSANAT

Diplomityö oli mielenkiintoinen ja opettava projekti, jonka aikana opin tekemään itsenäisesti töitä. Lisäksi työn aikana sain tutustua vielä tarkemmin erilaisiin kompensointilaitteisiin, joista omasta mielestäni minulla on nyt vahva tuntemus. Erilaisten kompensointilaitteiden ominaisuuksien tietämyksestä on mahdollisesti erittäin paljon hyötyä ajatellen tulevaa työuraa.

Diplomityön mahdollisti Meyer Turun kunnossapito-osasta, joten haluan kiittää koko kunnossapito-organisaatiota ja erityisesti Jaakko Lehtistä työni ohjaajaa. Kiitokset myös Elomatic:n Maija Hakamäelle ja Asko Jokiselle, jotka auttoivat minua diplomityöni kanssa. Lisäksi haluan kiittää TTY:n puolelta Jenni Rekolaa työni tarkastajaa, joka antoi erittäin hyvää ohjastusta työn aikana. Haluan myös kiittää ystäviäni ja perhettäni, jotka ovat tukeneet minua opintojen ja diplomityön aikana

Turussa, 24.10.2018

Leo Laaksonen

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 1. | JOHDANTO | 1 |
| 2. | SÄHKÖN LAATU | 3 |
| 2.1 | Loisteho | 3 |
| 2.1.1 | Loistehomaksut | 5 |
| 2.2 | Harmoniset yliaallot | 6 |
| 2.2.1 | Diodisilta esimerkki | 6 |
| 2.2.2 | THD ja TDD | 9 |
| 2.3 | Jännitteen vaihtelu | 11 |
| 2.3.1 | Alijännite | 11 |
| 2.3.2 | Transienttijännitteet | 12 |
| 2.4 | Taajuuspoikkeamat | 13 |
| 3. | PASSIIVINEN KOMPENSOINTI | 14 |
| 3.1 | Peruskomponentit | 14 |
| 3.1.1 | Kondensaattori | 14 |
| 3.1.2 | Kela/Reaktori | 15 |
| 3.2 | Rinnakkaiskondensaattoriparisto | 17 |
| 3.3 | Estokelaparisto | 19 |
| 3.4 | Yliaaltosuodin | 20 |
| 4. | AKTIIVINEN KOMPENSOINTI | 22 |
| 4.1 | SVC | 22 |
| 4.1.1 | FC-TCR | 23 |
| 4.1.2 | TSC-TCR | 24 |
| 4.1.3 | MSC-TCR/MSC-TSC-TCR | 26 |
| 4.1.4 | Säätö | 27 |
| 4.2 | STATCOM | 29 |
| 4.2.1 | ESTATCOM | 30 |
| 4.2.2 | Säätö | 31 |
| 4.3 | Aktiivinen tehosuodin | 32 |
| 5. | KOMPENSOITAVA LAITTEISTO | 35 |
| 5.1 | Muuntamon rakenne | 35 |
| 5.2 | Muuntamon kuormat | 36 |
| 5.2.1 | Nosturit | 36 |
| 5.2.2 | Allaspumput | 40 |
| 5.3 | Mittaustulokset | 42 |
| 6. | KUSTANNUKSET | 49 |
| 6.1 | Sähkönkäytön kustannukset | 49 |
| 6.1.1 | Pätötehokustannus | 49 |
| 6.1.2 | Loistehokustannus | 50 |
| 6.2 | Laitteiston hankinta | 51 |

| | |
|-----------------------------|----|
| 6.3 Takaisinmaksuaika | 53 |
| 7. YHTEENVETO..... | 59 |
| LÄHTEET..... | 61 |

LIITE A: TELAKAN SÄHKÖVERKKO

LIITE B: MUUNTAMON RAKENNE

KUVALUETTELO

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| Kuva 1. | <i>Osoitinpiirros lois- ja pätötehosta [7]</i> | <i>4</i> |
| Kuva 2. | <i>Fingrid asettamat rajat kuinka paljon sen asiakkaat voivat kuluttaa/tuottaa loistehoa [9]</i> | <i>5</i> |
| Kuva 3. | <i>Tasasuuntaus diodisilta vakio virtaisella kuormalla [11].....</i> | <i>7</i> |
| Kuva 4. | <i>Diodisillan verkosta ottama virta ja jännite [10]</i> | <i>8</i> |
| Kuva 5. | <i>Fourierin sarjakehitelmä graafisesti esitettynä [11]</i> | <i>9</i> |
| Kuva 6. | <i>Yksinkertaistettu kondensaattorin rakenne [22].....</i> | <i>15</i> |
| Kuva 7. | <i>Reaktorin rakenne [23]</i> | <i>16</i> |
| Kuva 8. | <i>Kondensaattoripariston tuottama loisvirta esimerkki [23]</i> | <i>17</i> |
| Kuva 9. | <i>Kondensaattoriparisto [13].....</i> | <i>18</i> |
| Kuva 10. | <i>Passiivinen yliaaltosuodin virtojen suunnat ja suuruudet [24].....</i> | <i>21</i> |
| Kuva 11. | <i>FC-TCR topologia [25].....</i> | <i>23</i> |
| Kuva 12. | <i>TSC-TRC [27].....</i> | <i>25</i> |
| Kuva 13. | <i>Periaatekuva säätöalueesta TSC-TRC SVC:llä [27]</i> | <i>26</i> |
| Kuva 14. | <i>SVC säätöjärjestelmä [28]</i> | <i>28</i> |
| Kuva 15. | <i>STATCOM topologia [30]</i> | <i>29</i> |
| Kuva 16. | <i>STATCOM säätöjärjestelmä [34]</i> | <i>31</i> |
| Kuva 17. | <i>Aktiivinen tehosuodin [36]</i> | <i>33</i> |
| Kuva 18. | <i>Aktiivisuotimen injektoima virta verkkoon [36]</i> | <i>34</i> |
| Kuva 19. | <i>Tyristorisilta [11].....</i> | <i>38</i> |
| Kuva 20. | <i>Jännite ja verkkovirran kuvaajat tyristorisillalla [37]</i> | <i>38</i> |
| Kuva 21. | <i>Kolmivaiheisen tyristorisillan virran Fourier-sarja [37]</i> | <i>39</i> |
| Kuva 22. | <i>Muuntajan T4 ottama pätöteho.....</i> | <i>43</i> |
| Kuva 23. | <i>Muuntajan T4 ottama loisteho.....</i> | <i>43</i> |
| Kuva 24. | <i>20 kV:n verkon jännitteen THD</i> | <i>44</i> |
| Kuva 25. | <i>Uuden pukkinosturin tuottama virran THD</i> | <i>44</i> |
| Kuva 26. | <i>6 kV:n verkon vaihejännitteiden tehollisarvot</i> | <i>45</i> |
| Kuva 27. | <i>6 kV:n verkon jännitteen THD</i> | <i>45</i> |
| Kuva 28. | <i>Nosturien aiheuttama näennäis-, pätö- ja loisteho.....</i> | <i>46</i> |
| Kuva 29. | <i>Nosturien aiheuttama loisteho.....</i> | <i>47</i> |
| Kuva 30. | <i>Pätö-, lois- ja näennäistehon kulutus altaan tyhjennyspumppujen ollessa päällä</i> | <i>48</i> |
| Kuva 31. | <i>Asennettavat estokelaparistot a) 600 kVAr b) 300 kVAr.....</i> | <i>52</i> |
| Kuva 32. | <i>Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston nettonykyarvo</i> | <i>54</i> |
| Kuva 33. | <i>Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston nettonykyarvo, kun oletetaan loistehomaksuksi sähköverkkoyhtiöiden loismaksun keskiarvo.....</i> | <i>56</i> |
| Kuva 34. | <i>Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston ja aktiivitehosuotimen nettonykyarvo.....</i> | <i>57</i> |

| | | |
|-----------------|--|-----------|
| Kuva 35. | <i>Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston ja aktiivitehosuotimen nettonykyarvo, kun oletetaan loistehomaksuksi sähköverkkoyhtiöiden loismaksun keskiarvo</i> | <i>57</i> |
|-----------------|--|-----------|

LYHENTEET JA MERKINNÄT

| | |
|-------------|---|
| A | Ampeeri |
| AC | Vaihtovirta (eng. Alternative Current) |
| α | Tyristorin sytytyskulma |
| B | Suskeptanssi |
| C | Kapasitanssi |
| C_0 | Investoinnin kustannus |
| C_t | Investoinnin vuosituotto |
| $\cos \phi$ | Tehokulma |
| DC | Tasavirta (eng. Direct Current) |
| € | Euro |
| ESTATCOM | Aktiivinen loisteho kompensattori energiavarastolla |
| f_l | Verkon perustaaajuus |
| f_r | Resonanssitaajuus |
| FC | Kiinteä kondensaattori (eng. Fixed Capacitor) |
| GTO | Tyristori, joka voidaan sammuttaa hilalta (eng. Gate Turn Off) |
| h | Tunti |
| Hz | Hertsi |
| I | Virta |
| IGBT | Puolijohdekytkin (eng. Insulated-Gate Bipolar Transistor) |
| IGCT | Tyristori, joka voidaan sammuttaa hilalta (eng. Integrated Gate-Commutated Thyristor) |
| i | Diskontaus |
| \hat{i} | Virran huippuarvo |
| i_α | Virran alfa-komponentti |
| i_β | Virran beeta-komponentti |
| i_d | Virran d -komponentti |
| i_q | Virran q -komponentti |
| I_L | Maksimikuormitusvirta |
| I_{sc} | Oikosulkuvirta |
| L | Induktanssi |
| LED | Hohtodiodi (eng. Light-Emitting Diode) |
| MSC | Mekaanisesti kytketty kondensaattoriparisto (eng. Mechanically Switched Capacitor) |
| NPV | Nettonykyarvo |
| P | Pätöteho |
| PCB | Polykloorattu bifenyylä |
| PWM | Eräs modulointi tapa (eng. Pulse-Width Modulation) |
| p | Hetkellinen pätöteho |
| p | Reaktorin suhdeluku |
| Q | Loisteho |
| $-Q$ | Kapasitiivinen loisteho |
| Q_{cap} | Kapasitiivinen loisteho |
| $+Q$ | Induktiivinen loisteho |
| q | Hetkellinen loisteho |
| rms | Tehollisarvo (eng. Root Mean Square) |
| S | Näennäisteho |
| S_{sc} | Kuorman kokonaisteho |

| | |
|------------|--|
| SVC | Staattinen loistehokompensaattori (eng. Static VAR Compensator) |
| STATCOM | Aktiivinen loisteho kompensaattori (eng. Static Synchronous Compensator) |
| t | Aika |
| TDD | Kokonaissärö kuorman ottaman maksimiarvon suhteen (eng. Total Demand Distortion) |
| THD | Kokonaissärö perustaajuisen komponentin suhteen (eng. Total Harmonic Distortion) |
| TSC | Tyristori-ohjattu kondensaattori (eng. Thyristor Switched Capacitor) |
| TCR | Tyristori-ohjattu reaktori (eng. Thyristor Controlled Reactor) |
| U | Jännite |
| \hat{u} | Jännitteen huippuarvo |
| u_α | Jännitteen alfa-komponentti |
| u_β | Jännitteen beeta-komponentti |
| u_d | Jännitteen d -komponentti |
| u_q | Jännitteen q -komponentti |
| V | Voltti |
| VA | Näennäisteho yksikkö (eng. volt-ampere) |
| VAR | Reaktiivinen loisteho yksikkö (eng. volt-ampere reactive) |
| v_d' | d -komponentin ohjaussignaali |
| v_q' | q -komponentin ohjaussignaali |
| W | Watti, pätötehon yksikkö (eng. watt) |
| ω | Kulmanopeus |
| X_L | Induktiivinen reaktanssi |
| X_C | Kapasitiivinen reaktanssi |

1. JOHDANTO

Sähkön laatu -ongelmat ovat viime vuosikymmeninä lisääntyneet nopeasti, sillä yhä useammassa teollisuuslaitoksessa käytetään tehoelektroniikkalaitteita, jotka ovat haitallisia sähkön laadulle. Tehoelektroniikkalaitteet sisältävät puolijohdekytkimiä, jotka saavat aikaan yliaaltoja virtaan, jolloin myös jännitteessä voi näkyä yliaaltoja. [1] Heikko sähkön laatu voi johtaa erilaisiin virhetilanteisiin sähkölaitteilla, jotka ovat kytkettynä verkkoon, jossa esiintyy paljon jännitteen vääristymää. Virhetilanne voi olla esimerkiksi laitteen sammuminen tai laitteen hajoaminen, joka voi johtaa kohtuuttomaan materiaalin menetykseen, kalliin laitteiston uusimiseen tai tiedon häviämiseen jostakin tietojärjestelmästä. Lisäksi heikko sähkön laatu johtaa häviöiden kasvamiseen siirtojohdoilla ja muuntajissa, jolloin siirtokapasiteetti pienenee ja kustannukset kasvavat. [2]

Sähkön laatu ongelmia aiheuttaa myös suuret kuormat, kuten suuret sähkömoottorit, joista erityisesti oikosulkumoottorit, joita teollisuudessa yleisesti käytetään, tuottavat verkolle laatu ongelmia. Tällaisten suurten kuormien kytkeminen verkkoon tai verkosta pois voi aiheuttaa haastetta pitää taajuus sallittujen rajojen sisällä, sekä voi aiheuttaa jännitteen amplitudin muutoksen verkossa. Lisäksi sähkömoottoreiden toiminta perustuu sähkömagneettiseen ilmiöön, jolloin moottorit kuluttavat loistehoa, mikäli magneetointi luodaan verkosta otetun loistehon avulla. Tämä aiheuttaa häviötä siirtojohdoilla ja muuntajissa, mikäli loistehoa ei kompensoida. [3]

Myös kantaverkkoyhtiö Fingrid on huomannut, että loisteho on lisääntynyt Suomen kantaverkossa lähinnä maakaapeleiden yleistymisen johdosta. Maakaapelit ovat johtaneet tilanteeseen, jossa kompensoinnin tarve on muuttunut, sillä ennen verkko kulutti loistehoa, kun vastaavasti nyt siirtoverkko on alkanut tuottaa loistehoa. Tämä taas on johtanut siihen, että kantaverkkoyhtiö Fingrid on alkanut laskuttaa jakeluverkkoyhtiöitä tuotetusta/kulutetusta loistehosta. [4] Jakeluverkkoyhtiöt eivät tietenkään halua yksinään maksaa loistehosta, vaan laskuttavat omia asiakkaitaan mahdollisesta loistehon kulutuksesta/tuottamisesta. Tämä johtaa sähköliittymien haltioiden halukkuuteen sijoittaa kompensointilaitteistoon, jolla voidaan kompensoida loistehoa ja saadaan näin minimoitua loistehosta aiheutuneet kustannukset.

Tämän työn tarkoituksena on pohtia, miten Turun telakalla saadaan kompensoinnin avulla kustannuksia laskettua ja millä tavoin voidaan taata riittävän hyvä sähkön laatu telakka-alueella. Erityisesti työ keskittyy allaspumppaamon muuntamon kompensointijärjestelmän uusimiseen. Työssä pohditaan standardiin perustuen, minkä laatuista sähköä verkossa tulisi olla, jotta mahdollisilta vikatilanteilta vältyttäisiin. Lisäksi perehdy-

tään erilaisiin kompensointilaitteisiin aina vanhemmista kondensaattoriparistoista nykyaikaisiin tehosuotimiin.

Kompensaatiolaitteiden investointikustannukset riippuvat merkittävästi, minkä tyyppistä kompensointia halutaan sähköverkkoon tehdä. Aktiivisen kompensointijärjestelmän kustannukset ovat merkittävästi suuremmat kuin passiivisten kompensointilaitteiden. Tästä syystä voi olla järkevämpää investoida passiiviseen kompensointiin aktiivisen sijasta. Työssä havaittiin myös kompensointilaitteiden takaisinmaksuajan riippuvan voimakkaasti loistehomaksuista, joita verkkoyhtiö tulee perimään asiakkaaltaan. Lisäksi voitiin havaita, että lisäämällä aktiivista kompensointia voitiin välttyä muuntamon loistehomaksuilta kokonaan, jolloin saatiin kaikista suurimmat vuotuiset säästöt loistehomaksuissa.

2. SÄHKÖN LAATU

Sähkön laadun tarkkailu on tärkeässä osassa sähköverkkoyhtiöllä, sillä halutaan taata jokaiselle asiakkaalle riittävän laadukasta sähköä mahdollisimman kustannustehokkaasti. Tästä syystä on olemassa standardi, jonka rajoissa tulisi sähkön laadun pysyä. Sähkön laatua määrittelevät standardi IEC (1000-2-2/4) ja keskijänniteverkon jakelujännite on määritelty standardissa SFS-EN 50160 tai toiselta nimeltä CENELEC (EN50160). Näiden määrittelemien rajojen sisällä tulisi jakeluverkkoyhtiön toimittaa sähköä asiakkaalle. [5] Lisäksi jakeluverkkoyhtiö voi vaatia, että asiakas ei omalla toiminnallaan heikennä liikaa verkon sähkön laatua. Esimerkiksi asennettaessa suurempia sähkölaitteita tai kompensointilaitteita tulisi laitehankinta ja suunnittelutyö tehdä yhteistyössä jakeluverkkoyhtiön kanssa. [6] Tämän kappaleen alaluvuissa on määritelty erilaiset haitalliset komponentit, jota sähköverkoissa esiintyy ja esitetty minkälaisissa rajoissa standardin mukaan tulisi toimia, jotta sähkön laatu olisi riittävän hyvää.

2.1 Loisteho

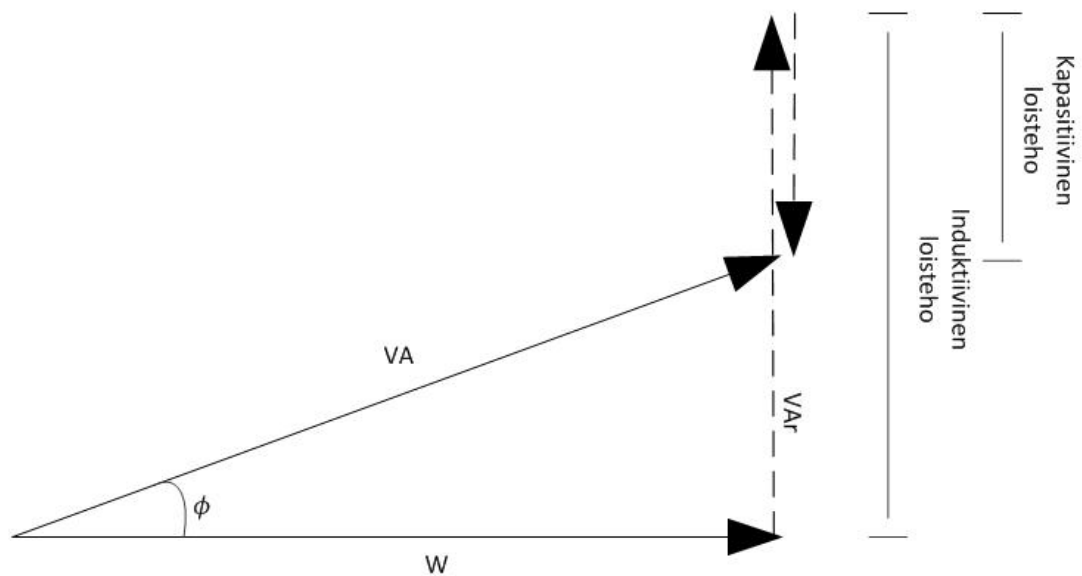
Vaihtosähköverkossa esiintyy loistehoa, sillä sähköpiireissä esiintyy aina sähkökenttiä ja magneettikenttiä, eli sähköpiirit eivät sisällä puhdasta resistanssia vaan niissä esiintyy myös reaktanssia. Sähkökenttä liitetään sähköverkossa esiintyneeseen kapasitanssiin (C) ja magneettikenttä liitetään induktanssiin (L). Nämä molemmat sähköverkossa esiintyvät suuret varastoivat energiaa sähköverkosta ja purkavat energiaa sähköverkkoon yhden jännitejakson aikana. Näin ollen kapasitanssin tai induktanssin verkosta ottama teho vaihtelee positiivisen ja negatiivisen välillä, joka tarkoittaa, että keskiarvolta teho on nolla. Tätä tehoa kutsutaan loistehoksi, jota syntyy kaikissa verkon komponenteissa, joissa on kapasitanssia/induktanssia, kuten generaattorit, muuntajat, maa- ja ilmakaapelit, kompensointilaitteet sekä kuluttajakuormat. Kapasitiivisesta kuomasta puhuttaessa käytetään nimitystä loistehon tuottaja ja induktiivisessa tapauksessa käytetään nimitystä loistehon kuluttaja. Lisäksi on olemassa pätöteho, jolla kuvataan varsinaista työtä tekevää tehoa. [7]

Kuten edellisestä kappaleesta voidaan päätellä, on tehohäviötä vaihtosähköverkossa kahta erilaista loistehohäviötä ja pätötehohäviötä. Loistehohäviöt voidaan jakaa vielä siten, että kapasitiivinen loisteho tuottaa loistehoa ja induktiivinen loisteho kuluttaa loistehoa. Näin ollen tehohäviöt voidaan jakaa kolmeen eri luokkaan kapasitiivinen loistehohäviö ($-Q$), induktiivinen loistehohäviö ($+Q$) ja pätötehohäviö (P). Kun nämä kolme

eri luokkaa laskee yhteen, saadaan selville järjestelmän näennäistehohäviöt (S) kaavan (1) avulla. [7]

$$|S| = \sqrt{|P|^2 + (|+Q| - |-Q|)^2} \quad (1)$$

Näennäistehon avulla voidaan laskea sähköjärjestelmän kokonaishäviöt. Kapasiitiivinen loisteho on 90° :tta jäljessä pätötehoa ja induktiivinen loisteho on 90° :tta edellä pätötehoa. Tästä voidaan tulla siihen lopputulokseen, että on järkevää määrittellä loistehon ja pätötehon yhteisvaikutus imaginääriluvuin, josta voidaan helposti päätellä, minkä suuruiset lois- ja pätötehohäviöt kuorma aiheuttaa verkolle. [7]



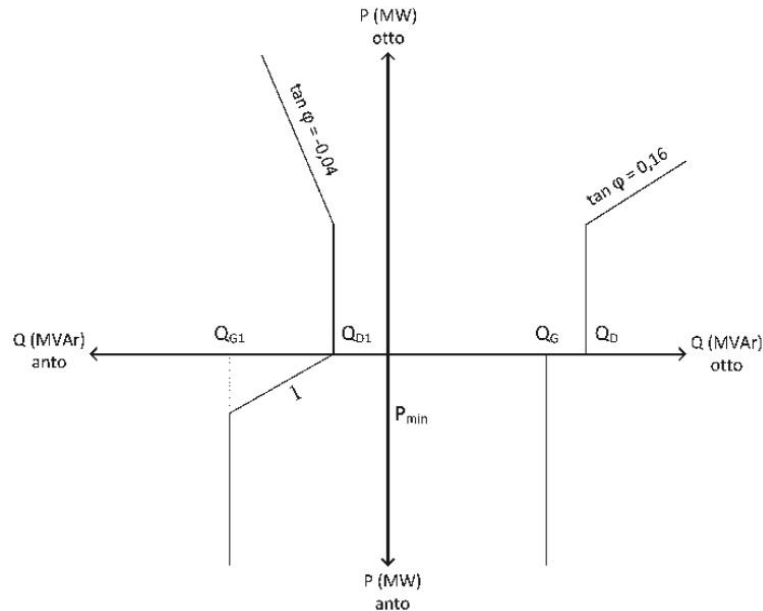
Kuva 1. Osoitinpiirros lois- ja pätötehosta [7]

Kuvasta 1 voidaan havaita graafisesti, kuinka loistehon yhteisvaikutus saadaan lasketua, kun tiedetään kuinka paljon kuormassa on kapasiitivista ja induktiivista loistehoa. Kuvasta nähdään myös pätö-, lois- ja näennäistehojen yksiköt, jotka ovat pätöteho watti, loisteho VAR ja näennäisteho voltti-ampeeri. Lisäksi kuvasta voidaan laskea tehokulma $\cos \phi$, joka pyritään saamaan mahdollisimman lähelle arvoa 1. Kun tehokulma on 1, loisteho on 0 VAR , jolloin loistehohäviöitä ei ole vaan kuorma ottaa verkosta pelkästään pätötehoa. Näin saadaan virran kulutus mahdollisimman pieneksi, jolloin häviöt ja mahdolliset loistehokustannukset minimoituvat. [7]

Standardissa ei oteta kantaa loistehonkulutukseen, mutta tulee ottaa huomioon että, jos loistehoa kulutetaan jossakin pisteessä paljon, saattaa se vaikuttaa jännitteeseen siinä pisteessä. Jännitevaihteluun standardikin ottaa kantaa, joten kompensointia voidaan tarvita, jotta jännite saadaan pidettyä oikealla tasolla. [5]

2.1.1 Loistehomaksut

Suomen kantaverkkoyhtiö Fingrid on alkanut laskuttaa asiakkaitaan liiallisesta loistehon kulutuksesta tai tuottamisesta vuodesta 2017 eteenpäin. Kuvassa 2 on esitetty malli, jonka mukaan Fingrid laskuttaa asiakkaita kulutetusta tai tuotetusta loistehosta. [8]



Kuva 2. Fingrid asettamat rajat kuinka paljon sen asiakkaat voivat kuluttaa/tuottaa loistehoa [9]

Kuvassa näkyy $P(\text{MW})$ otto, joka tarkoittaa että asiakas ottaa verkosta pätötehoa ja anto, joka tarkoittaa että asiakas syöttää verkkoon päin pätötehoa. Tässä tutkitaan vain kuluttavaa asiakasta, sillä Turun telakalla ei omaa tuotantoa ole. Kuluttava asiakas, eli $P(\text{MW})$ otto loistehon kulutuksen raja voidaan laskea kaavan (2) avulla, eli kuvassa Q_D arvo (MVar). [9]

$$Q_D = 0.16 \cdot \frac{W_{\text{otto}}}{t_k} + \frac{P_{\text{netto}}}{0.9} \quad (2)$$

Kaavassa W_{otto} on liittymispisteen ottoenergia vuodessa (MWh). t_k on huipunkäyttöaika, joka on prosessiteollisuudessa 7000 tuntia ja muuta kulutusta laskettaessa käytetään arvoa 5000 tuntia. P_{netto} on liittymispisteen takaisten voimalaitosten nettosähkötehojen summa (MW), joka Turun telakan tapauksessa on nolla, sillä alueella ei ole sähkön tuotantoa. Loissähkön antoraja on vastaavasti 25 %:ia loistehon ottorajasta. [9]

Fingrid alkaa laskuttaa omia asiakkaitaan porrastetusti vuodesta 2017, jolloin Fingrid alkoi laskuttaa kuukauden suurimmasta keskituntitehosta 333 €/MVar . Tämä loistehomaksu maksetaan ylittävältä osalta, mikä edellä on laskettu. Vuonna 2018 Fingrid on

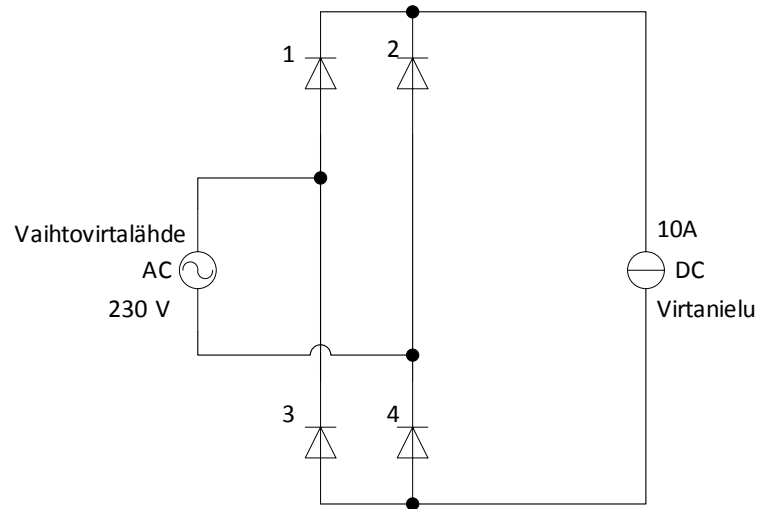
päättänyt nostaa maksun $666 \text{ €/MVA}r$ ja vuonna 2019 loistehon maksuksi asettuu loipullinen $1000 \text{ €/MVA}r$. Lisäksi Fingrid laskuttaa asiakkaitaan loisenergiasta $5 \text{ €/MVA}rh$. [8] Nämä maksut ovat johtaneet jakeluverkkoyhtiöiden paineeseen laskuttaa omia asiakkaitaan loissähköstä.

2.2 Harmoniset yliaallot

Harmoniset yliaallot ovat jännitteeseen tai virtaan summautuvia perusaallon monikertoja, jotka saavat aikaan jännitteen ja virran muotojen muutoksen. Normaalitylanteessa kaikki jännite ja virta sähköverkossa pyritään pitämään sinimuotoisina, mutta lisääntyneet tehoelektronikkalaitteet aiheuttavat sähkön laadulle suuria haasteita epälineaarisista kuormista johtuen. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi erilaiset latauslaitteet ja LED-valaisimet. Harmonisia yliaaltoja aiheutuu myös sähkömoottoreista ja muuntajista, joka johtuu laitteiden magneettisten materiaalien saturoimisesta. Harmoniset yliaallot aiheuttavat vikaantumisriskin sähkömoottoreille, tietoliikennejärjestelmille ja muille sähköverkossa oleville laitteille ylijännitteiden muodossa. Ylijännitteitä muodostuu, kun virran harmoniset yliaallot summautuvat verkkoinduktanssin takia verkkojännitteeseen, jolloin verkkojännitteen summautuneet yliaallot voivat aiheuttaa ylijännitteitä. Lisäksi harmoniset yliaallot lisäävät häviötä sähköverkossa, jolloin verkonsiirtokapasiteetti pienenee. Näistä syistä tulisi harmonisia yliaaltoja pystyä suodattamaan verkosta mahdollisilla kompensointilaitteilla. Kompensointilaitteita on, joko passiivisia tai aktiivisia, joilla voidaan suodattaa verkosta harmonisia yliaaltoja. Tällaisilla kompensointilaitteet voidaan asentaa verkkoon hajautetusti lähelle harmonisten yliaaltojen tuottajia tai keskiteytsti, jolloin kompensointi toteutetaan esimerkiksi sähköasemalla. Lisäksi harmonisia yliaaltoja voidaan pienentää vaihtamalla tasasuuntauspiireissä diodisilta aktiiviseen tasasuuntaussiltaan. [10]

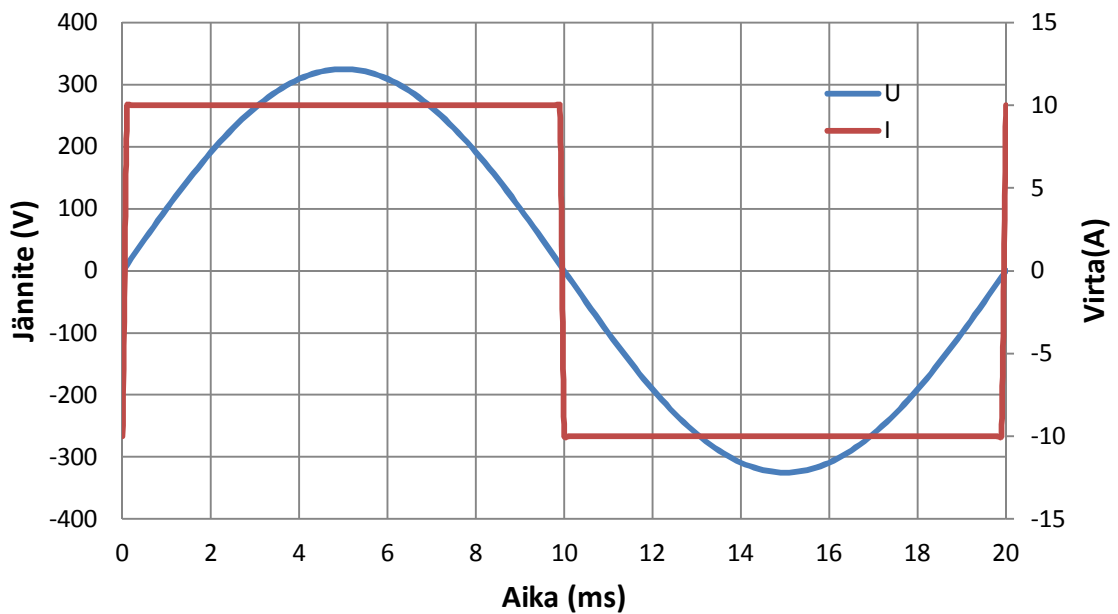
2.2.1 Diodisilta esimerkki

Harmonisten yliaaltojen syntymisen ymmärtää parhaiten esimerkin kautta, joten otetaan tässäkin esimerkiksi tehoelektronikassa paljon käytetty yksivaiheinen tasasuuntaus diodisilta. Diodisillan tarkoituksena on muuttaa verkosta otettu vaihtosähkö tasasähköksi puolijohdekytkimien, eli diodien avulla. Diodi johtaa, kun anodilla on suurempi jännitepotentiaali kuin katodilla. Vastaavasti jännitepotentiaalın kääntyessä vastakkaiseksi diodi siirtyy tilaan, jossa se ei johda virtaa napojensa läpi. Voidaan vielä olettaa, että tasajännite puolella on virtanielu, eli tasajännitepiiri ottaa vakio virtaa koko jännitejakson aikana. [11]



Kuva 3. *Tasasuuntaus diodisilta vakio virtaisella kuormalla [11]*

Kuvassa 3 on esitelty edellä mainittu diodi-silta, joka tässä tapauksessa on kytketty 10 ampeerin virtanieluun ja jännitelähteenä toimii tavallinen verkkojännite, eli 230 VAC_{rms} . Diodi-silta toimii siten, että jännitelähteen positiivisen puolijakson aikana johtavat diodit 1 ja 4, kun taas negatiivisen puolijakson aikana johtavat diodit 2 ja 3. Näin tasajännitepuolella näkyy tasajännite, joka ilman minkäänlaista suodatusta vaihtelee ideaalitapauksessa 0:n ja 325V :in välillä. Virta pysyy kokoajan vakiona, sillä tasajännitepuolella on vain virtanielu. Virtaa siis kuluu koko jännitejaksolla 10 ampeeria, mutta virran suunta muuttuu riippuen siitä onko kyseessä jännitejaksos negatiivinen tai positiivinen puolijakso. Virran aaltomuoto on tässä tapauksessa kanttiaallon muotoinen, eikä sinikäyrän muotoinen, joka johtaa harmonisten yliaaltojen esiintymiseen verkossa. Kuvassa 4 on esitetty jännitteen ja virran aaltomuodot verkosta katsottuna, kun verkkoon on kytketty kuvan 3 mukainen piiri, kun oletetaan, että verkonpuolella ei ole induktanssia. [11]

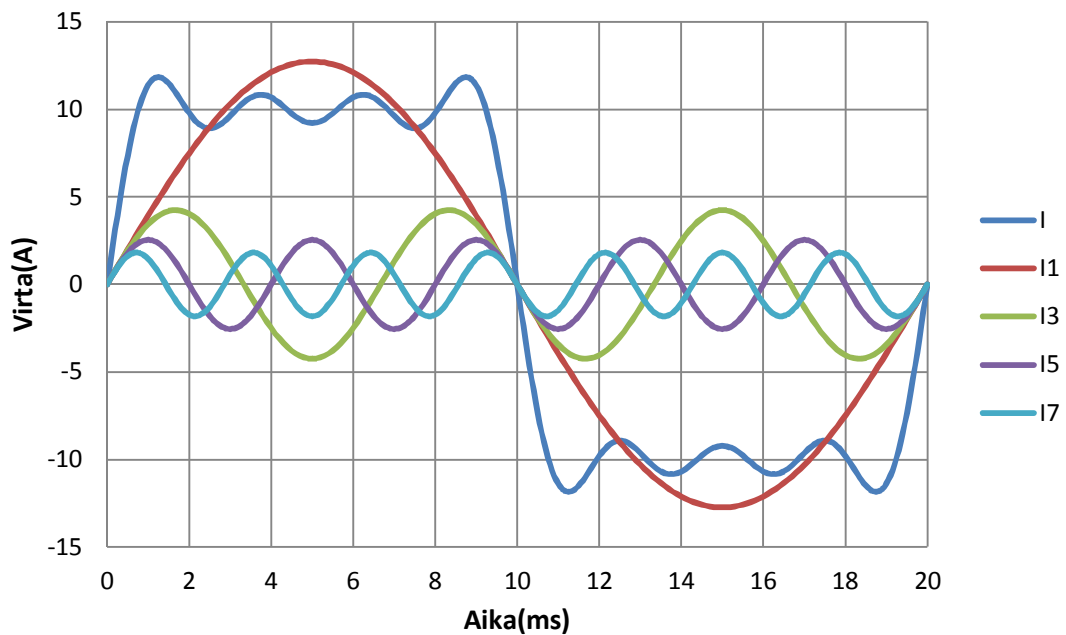


Kuva 4. *Diodisillan verkosta ottama virta ja jännite [10]*

Kun tutkitaan tarkemmin virran käyrämuotoa, voidaan havaita, että virta on samaan tapaan jaksollinen, kuin jännite. Tällaisia jaksollisia aaltoja voidaan mallintaa Fourierin sarjakehitelmällä, eli lisätään perusaallon monikertoja niin kauan signaaliin mukaan, kunnes päästään vastaavaan lopputulokseen, jolta alkuperäinen jaksollinen signaali näyttää. Esimerkkitapauksessa perusaallon taajuus on 50Hz, jolloin tämän taajuuden monin kerrat ovat $h \cdot 50 \text{ Hz}$. h on luonnollinen luku ykkösestä ylöspäin, jolloin monikerrat ovat 100 Hz, 150 Hz, 200 Hz, 250Hz... ja niin edelleen. Monikertojen amplitudit vaihtelevat yleensä siten, että mitä suurempaan monikertaan mennään, sitä pienemmäksi harmonisen komponentin amplitudi pienenee. Toisaalta käyrämuodossa ei esiinny kaikkia harmonisia komponentteja vaan esimerkiksi tässä tapauksessa Fourier-sarjaan jää vain parittomat harmoniset monikerrat. Esimerkki tapauksen Fourier-sarja on esitetty kaavassa (3). Kaavassa \hat{i}_1 on perustaajuuden signaalin amplitudi. [10]

$$\hat{i}_1 \sum_{h=1,3,5\dots}^{\infty} \frac{\cos(2\pi 50\text{Hz} \cdot h)}{h} \quad (3)$$

Kanttiaallon tapauksessa peruskomponentin virran amplitudi saadaan kertomalla tasavirtanielun arvo $\frac{4}{\pi}$:llä. Näin ollen saadaan laskettua kaikkien muiden komponenttien arvo kaavan (3) avulla. [12] Kuvassa 5 näkyy graafisesti, kuinka Fourierin sarjakehitelmällä saadaan kanttiaallon tapainen signaali luotua.



Kuva 5. Fourierin sarjakehitelmä graafisesti esitettynä [11]

Kuvassa on määritetty signaali 7 ensimmäisen harmonisen komponentin avulla. Mikäli näitä komponentteja lisättäisiin äärettömästi, saavutettaisiin kanttiaalto. Tästä Fourier sarjakehitelmä mallista voidaankin päätellä, että kaikki jaksolliset signaalit voidaan mallintaa Fourier-sarjakehitelmän avulla. Kun kompensoinnin avulla poistetaan verkosta kaikki muut paitsi perustaaajuinen aalto, päästään tilanteeseen, jossa suuret ovat vain sinimuotoisia. [11] Tosin matalataajuiset yliaallot ovat haastavia poistaa verkosta ilman suuria kuristimia. Matalataajuiset harmoniset yliaallot aiheuttavat myös kaikkein eniten vääristymää virrassa ja jännitteessä, joka johtaa suuriin häviöihin. Yksivaiheiset kuormat aiheuttavat kolmatta yliaaltoa, joka summautuu nollajohtimeen. Suunniteltua suurempi virta nollajohtimessa aiheuttaa johtimen häviöiden kasvamisen seurauksena merkittävän lämpenemän ja turvallisuusriskin erityisesti vanhoissa asennuskohteissa, joissa nollajohtimen poikkipinta-ala voi olla vaihejohtimia pienempi. [10]

2.2.2 THD ja TDD

Edellä mainittujen harmonisten yliaaltojen yhteisvaikutusta voidaan mitata THD ja TDD arvoilla. Yleisin tapa ilmoittaa kokonaissärö on THD, joka saadaan laskettua harmonisten komponenttien tehollisarvoista kaavan (4) mukaan ja jakamalla tämä perustaaajuisen signaalin tehollisarvolla, kuten kaavasta (4) voidaan nähdä. THD mittauksissa etuna on, että se on helppo laskea. Haittapuolena tosin on, että THD arvo ei ota kantaa yksittäisten harmonisten komponenttien amplitudiin, joten ei voida tietää mitä kaikkia harmonisia yliaaltoja verkossa esiintyy. [13]

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_{h,rms})^2}}{I_{1,rms}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Kaavassa (4) on esitetty THD:n laskukaava virran suhteen, mutta samaan tapaan voidaan laskea myös jännitteen THD. [13] Yleisesti laitteet, joilla THD:ta mitataan, ovat rajoitettu mittaamaan harmonisia komponentteja 63 harmoniseen komponenttiin asti. Esimerkkinä voidaan pitää Schneider Electricin PM5560-mittaria. [14]

TDD:n arvo lasketaan samaan tapaan kuin THD, mutta harmonisia ei tässä tapauksessa verrata perustajuisen aallon tehollisarvoon, vaan järjestelmän määritellyn maksimikuormavirtaan. Toisin sanottuna, kun järjestelmää kuormitetaan vain murto-osalla verrattuna järjestelmän maksimiarvoon voi THD:n arvo kasvaa suureksi, mutta TDD:n arvo pysyy maltillisempana. TDD onkin hyvä tapa mitata harmonisia yliaalloja, kun verkosta otettava kuorma muuttuu. Tällöin voidaan vertailla erilaisten kompensointilaitteiden vaikutusta verkkoon, vaikka kuormitusvirta ei olisi vakio. [13]

Standardissa SFS-EN 50160 on määrätty jännitteen harmonisille yliaalloille rajat, jossa jännitteen tulisi pysyä liittymispisteessä. Standardilaatuun riittää, kun 95 % harmonisista yliaalloista on taulukon 1 mukaisten raja-arvojen alapuolella. [5]

Taulukko 1. SFS-EN 50160 määritelmä sähkön laadulle 40 harmoniseen komponenttiin saakka [5]

| Parittomat yliaallot | | | | Parilliset yliaallot | |
|-------------------------------|-------------------------|---|---|--|-------------------------|
| Kolmella jaottomat | | Kolmella jaolliset | | Järjestysluku h | Suhteellinen jännite |
| Järjestysluku h | Suhteellinen jännite | Järjestysluku h | Suhteellinen jännite | | |
| 5 | 6 % | 3 | 5 % | 2 | 2 % |
| 7 | 5 % | 9 | 1.5 % | 4 | 1 % |
| 11 | 3.5 % | 15 | 0.5 % | 6-24 | 0.5 % |
| 13 | 3 % | 21 | 0.5 % | | |
| 17 | 2 % | | | | |
| 19 | 1.5 % | | | | |
| 23 | 1.5 % | | | | |
| 25 | 1.5 % | | | | |
| Jännitteen ominaisuus | | Hyvä laatu | Normaali laatu | SFS-EN 50160:n mukainen laatu | |
| Harmoniset yliaaltojännitteet | | $U_n \leq$ Edellä olevat arvot ja $THD \leq 3 \%$ | $U_n \leq$ Edellä olevat arvot ja $THD \leq 6 \%$ | 95 % $U_n \leq$ Edellä olevat arvot ja $THD \leq 8 \%$ | |

Taulukon 1 alaosasta voidaan lukea, millä tavoin standardi määrittelee hyvän, normaalin ja riittävän sähkön laadun. [5] Lisäksi on olemassa standardi IEEE 519–1992, joka ottaa kantaa virran harmonisiin yliaaltoihin. Taulukossa 2 on esitetty raja-arvot, joiden sisällä virran harmoniset yliaallot tulisi pysyä. Taulukossa I_{sc} on maksimi oikosulkuvirta ja I_L on maksimikuormitusvirta. Taulukossa on vain parittomien harmoniset maksimiarvot. Parilliset harmoniset ovat 25 %:a näistä arvoista. [2]

Taulukko 2. IEEE 319–1992 standardin mukaiset virran harmonisten yliaaltojen raja-arvot [2]

| Maksimi harmoniset yliaaltovirrat (prosentteina maksimikuormitusvirrasta) | | | | | | |
|---|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|--------|
| Yksittäisten harmonisten komponenttien rajat (parittomat harmoniset) | | | | | | |
| I_{sc}/I_L | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TDD(%) |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20–50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50–100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |
| 100–1000 | 12.0 | 5.5 | 5.0 | 2.0 | 1.0 | 15.0 |
| >1000 | 15.0 | 7.0 | 6.0 | 2.5 | 1.4 | 20.0 |

Kun harmoniset saadaan pidettyä näissä rajoissa, voidaan todeta että verkko on standardin mukainen. Tosin tulee huomioida, mitä alemmaksi harmoniset yliaallot saadaan, sitä vähemmän sähköverkossa syntyy häviötä ja verkkoa voidaan kuormittaa enemmän.

2.3 Jännitteen vaihtelu

Jännitevaihtelulla tarkoitetaan jännitteen muutoksia, jotka ovat pitempiä kuin yksi jännitejakso. Jännitteen amplitudi voi poiketa hetkellisesti tai pysyvästi standardin määrittelemästä arvosta. Jännitteen amplitudin hetkellistä alenemaa kutsutaan jännitekuopaksi. Mikäli jännitteen amplitudin poikkeama on yhtä jaksoa (20ms) lyhyempi, vaihtelua kutsutaan välkynnäksi, joka on saanut nimensä valaistuksen valotehon muutoksesta välkynnän aikana. [15] Tässä kappaleessa tutustutaan myös hieman transienttijänniteilmiöön.

2.3.1 Alijännite

Alijännite eli jännitteen hetkellistä alenemista voidaan kutsua myös nimellä jännitekuoppa. SFS-EN 50160 mukaan jännitekuoppa on jakelujännitteen äkillinen aleneminen 1...90 % jakelujännitteen nimellisarvosta ja palautuminen sieltä lyhyen ajan kuluttua nimelliseen arvoon. Tavallisesti tällaiset jännitekuopat kestävät 10:stä millisekuntista minuuttiin ja syynä ovat usein verkon vikaantumiset, suurien kuormien, kuten sähkömoottorin, verkkoon kytkeminen tai suuren kondensaattoripariston poiskytkentä. Vas-

taavasti ylijännitteitä voi aiheuttaa äkilliset suurien kuormien pois kytkennät tai kondensaattoripariston päälle kytkentä. Jännitekuopan suuruus määritellään vertaamalla alinta jännitekuopan tehollisarvoa verkon nimelliseen tehoarvoon. Lisäksi standardissa on määritely, että jännitteen tehollisarvojen kymmenen minuutin keskiarvoista 95 % tulee olla ± 10 % nimellisestä tehollisarvosta ja tämän lisäksi kaikkien arvojen tulisi olla $+10$ % / -15 %:ia välillä. Mittausajanjakso on yleensä viikko. Standardissa SFS-EN 50160 on määritely häiritsevyyksindeksi, jonka alapuolella välkynnän tulisi pysyä. Välkyntää aiheuttaa usein nopeasta suuren kuorman vaihtelusta, kuten hitsauskoneet tai valokaari uunit. [5]

Haittavaikutuksena jännitekuopat aiheuttavat nopeussäädettyjen sähkökäyttöjen toimintahäiriöitä ja pysähtymistä sekä automaation ja prosessilaitteiden vikaantumista. Tämä saattaa tuottaa kohtuuttomia kustannuksia teollisuuslaitokselle. Lisäksi jännitekuopat aiheuttavat haittaa kontaktoreille, elektroniikalle sekä valaistukselle esimerkiksi purkauslamppujen sammumisen muodossa. Jännitekuopat voivat aiheuttaa verkolle myös lisääntyneitä lämpöhäviöitä kasvaneen virran muodossa. Tämä voi aiheuttaa muuntajien ja sähkömoottorien ylikuumentumisen. [5]

Kompensoinnilla voidaan ehkäistä jännitekuoppien syntymistä. Pysyviä sekä hetkellisiä jännitteen vaihteluita voidaan kompensoida passiivisilla tai aktiivisilla kompensointilaitteistoilla. Lisäksi kriittisille kuormille, kuten datakeskukset tai toimistot, voidaan tarvittaessa lisätä UPS, joka syöttää laitteita sähkökatkojen tai jännitteen alenemien aikana. [16]

2.3.2 Transienttijännitteet

Transienttijännite on jännitteessä tapahtunut hetkellinen muutos, joka voi olla esimerkiksi ilmastollinen ylijännite, eli ukkonen, moottorin kipinäinti tai suuren kuorman äkillinen putoaminen verkosta esimerkiksi vian johdosta. Jännitteen vaihteluun vaikuttaa myös kuinka vahva verkko on kyseessä, mitä vahvempi verkko sitä pienempiä jännitteen muutokset ovat. Transienttijännitteet kestävät maksimissaan vain muutamia millisekunteja. Transienttijännitteen osuessa sähkölinjalle suojarele toimii ja katkaisee sähköt kyseiseltä linjalta. Usein pikajällekytkentä riittää palauttamaan sähköt, mikäli laitevarioita ei linjalle tai kojeistolle ole tapahtunut. [17]

Kompensoinnin kannalta transienttijännitteiden kohdalla voidaan puhua esimerkiksi kondensaattorien kytkentäilmiöstä. Kondensaattorin kytkentätilanteessa kondensaattorin impedanssi on lähellä nollaa, jolloin myös piste johon kondensaattori liitetään, on lähellä maan potentiaalia, mikäli kondensaattori on rinnalle kytketty. Tämä johtaa siihen, että kondensaattorin kytkentätilanteessa verkosta otetun virran määrä kasvaa ja jännite putoaa hetkellisesti. Näitä kytkentäilmiötä voidaan ehkäistä synkronoimalla kondensaattorin

verkkoon kytkentä esimerkiksi vaimennusvastuksella tai – kelalla, mikä on kytkettynä verkkoon noin 200 millisekunnin ajan. [18]

2.4 Taajuuspoikkeamat

Normaali sähköverkontaajuus Suomessa on 50 Hz, jotta sähköverkossa voidaan pitää tämä 50 Hz taajuus, on pätötehon kulutuksen ja pätötehon tuotannon pysyttävä yhtä suurena. Mikäli kulutus on eri suuri kuin tuotanto alkaa sähköverkon taajuus muuttua, joka johtuu generaattorien pyörimisnopeuden muutoksesta. Muutoksen suuruus riippuu kuorman muutoksen luonteesta ja siitä kuinka nopeasti generaattori pystyy vastamaan muuttuneen kuorman tarpeeseen. Tästä syystä johtuen olisi tärkeää, että verkossa on generaattoreita, joiden tehon syöttöä voidaan muuttaa nopeasti. Lisäksi taajuuspoikkeamaa voi aiheuttaa sähköverkossa tapahtuvat vikatilanteet. [13]

Yksi tapa ehkäistä taajuuden muuttumista on lisätä sähköverkkoon energiavarastoja, kuten padottu vesivoima-, paineilma-, suprajohtava magneettikenttä- ja akkuvarasto. [19] Näistä energiavarastoista voidaan siirtää energiaa sähköverkon tarpeiden mukaan. Nykyään kehittynyt akkuteknologia on lisännyt akkujen käyttöä energiavarastoina. Esimerkkinä voidaan pitää Fortumin investointia Järvenpään, joka on pohjoismaiden suurin litium-ioniakkuvarasto. Akkuvarastosta on käytetty nimeä Batcave ja sen nimellisteho on 2 MW, jolla voidaan syöttää verkkoa, kun energian tarve verkossa muuttuu. Lisäksi Batcave pystyy kuluttamaan verkosta pätötehoa, mikäli tehon kulutus romahtaa sähköverkossa. [20]

Standardissa SFS-EN 50160 on asetettu raja-arvot taajuuden muutoksiin, jotka ovat

- yhteiskäyttöverkossa
 - a. $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$ eli (49.5 ... 50.5 Hz) 99.5 % vuodesta
 - b. $50 \text{ Hz} + 4 \%$ / - 6 % eli (47 ... 52 Hz) 100 % ajasta
- erillisverkoissa (esim. jakelujärjestelmät tietyillä saarilla)
 - a. $50 \text{ Hz} \pm 2 \%$ eli (49 ... 51 Hz) 95 % viikosta
 - b. $50 \text{ Hz} \pm 15 \%$ eli (42.5 ... 57.5 Hz) 100 % ajasta

Taajuuden valvonnasta vastaa kantaverkkoyhtiö Fingrid, jolla on vastuu pitää valtakunnanverkon taajuus vakiona. [5]

3. PASSIIVINEN KOMPENSOINTI

Passiivinen kompensointi sähköverkossa sisältää komponentit, kuten sarja - ja rinnan kondensaattorit ja – kelat. Nämä sähköverkossa esiintyvät kompensointilaitteet eivät ole ohjattavia, joka tarkoittaa, että kompensointilaitteet tuottaa tai kuluttaa verkosta aina saman määrän loistehoa. Tässä kappaleessa on tarkoituksena tutustua komponentteihin, joita erilaiset passiiviset kompensointilaitteet käyttävät. Lisäksi kappaleessa pohditaan, millä tavoin peruskomponentteja yhdistelemällä saadaan toteutettua erilaisia kompensointilaitteita, joilla on hyvinkin erilaiset ominaisuudet keskenään. Kappale on rajattu koskemaan vain rinnankytkettyjä kompensointilaitteita, sillä erilaisten laitteiden kompensoinnissa käytetään rinnan kompensointia. Sarjakompensointia käytetään lähinnä siirtojohtojen kompensoinnissa, jolloin siirtojohtoa voidaan mallintaa lyhyemmällä johdolla, jolloin saadaan siirtokapasiteettia johdolla kasvatettua. [21]

3.1 Peruskomponentit

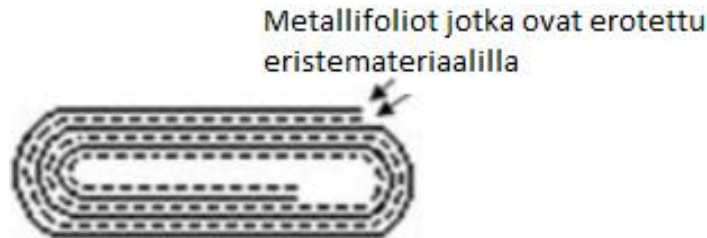
Loistehon ja harmonisten yliaaltojen kompensoinnissa tärkeimmät komponentit ovat kondensaattori ja kela. Loistehon kompensoinnin kannalta näiden komponenttien avulla voidaan luoda piirejä, jotka joko kuluttavat tai tuottavat loisteho. Harmonisten yliaaltojen kannalta voidaan komponentteja kytkeä siten, että resonanssiipiirien avulla voidaan vähentää jotakin tiettyä yliaaltoa. Tässä kappaleessa on esiteltynä näiden kahden komponentin rakennetta.

3.1.1 Kondensaattori

Kondensaattorit ovat tärkeässä osassa loistehon kompensoinnissa, sillä tällä yksinkertaisella komponentilla voidaan tuottaa loistehoa järjestelmään. Kondensaattorin perus toimintaperiaate vaihtosähköverkossa on, että se varaa sähkökenttään energiaa, jonka se toisella ajan hetkellä purkaa takaisin sähköverkkoon. Tämä johtaa siihen, että virta on ideaalisessa tilanteessa jännitettä 90 astetta edellä, jolloin kondensaattori alkaa tuottaa loistehoa verkolle.

Sähköverkon osissa, jonne kompensointikondensaattoreita kytketään, on usein suuret jännitteet (noin 10-20kV), jotta saadaan häviöitä sähköverkossa pienettyä. Suurijännitteiset kondensaattorit koostuvat kahdesta metallifoliosta, joiden välissä on eriste, joka voi olla esimerkiksi paperilla tai muovilla tai näiden kahden komponentin kombinaatiolla. Tämä metallista ja eristeestä koostuva paketti rullataan kuvan 6 mukaisesti ja upote-

taan metalliseen suojakoteloon. Suojakotelo voidaan täyttää joko eristenesteellä tai koteloon voidaan imeä tyhjiö. Ennen eristenesteenä käytetty PCB oli erinomainen eristeneste sen suuren permittiivisyyden ja korkean läpilyöntijännitteen johdosta, mutta myöhemmin on havaittu, että kyseinen materiaali on luonnolle haitallinen. PCB:stä on tästä syystä luovuttu ja tilalle on kehitelty uusia eristenesteitä. [22]



Kuva 6. Yksinkertaistettu kondensaattorin rakenne [22]

Kondensaattorit ovat yleisesti käytetty kompensointilaitte teollisuudessa, sillä teollisuudesta on paljon induktiivisen loistehon kuluttajia, kuten suuret oikosulkumoottorit. Kaiken kaikkiaan kondensaattorit ovat edullinen ja hyvä tapa tuottaa loistehoa sähköverkon tarpeisiin. Kondensaattoreita voidaan liittää verkkoon mekaanisten kytkimien avulla, jolloin saadaan loistehon tuotantoa säädettyä oikealle tasolle, kun kuormituksessa tapahtuu muutoksia. Kondensaattoria käytettäessä kompensointilaitteena tulee huomioida, ettei kondensaattoria voi kytkeä yksinään, mikäli verkon THD on yli 1 %:a. Mikäli kondensaattori kytketään tällaiseen verkkoon, on vaarana, että kondensaattori muodostaa resonanssipiirin. Tämä resonanssipiiri saattaa aiheuttaa verkossa merkittävän ylijännitteen.

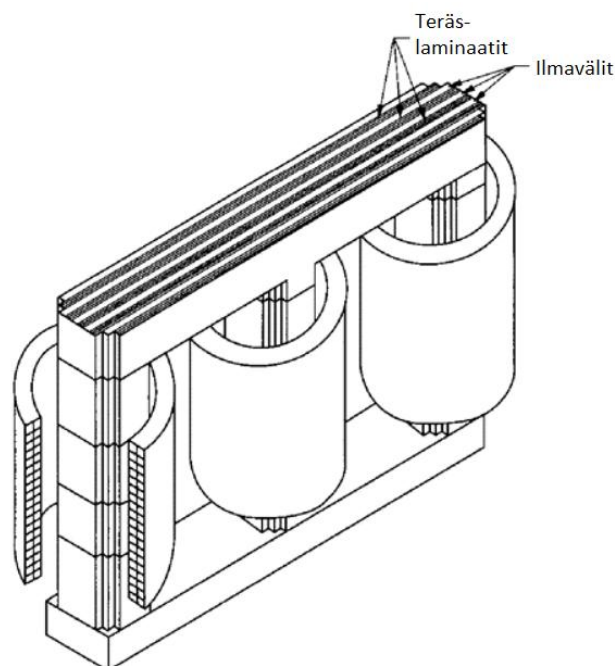
3.1.2 Kela/Reaktori

Kela tai reaktori toimii vastaavasti eritavalla kuin edellä mainittu kondensaattori, sillä se ei varastoi energiaa sähkökenttään vaan magneettikenttään. Magneettikenttään varastoituneen energian se syöttää samaan tapaan takaisin verkkoon kuin kondensaattori, mutta vain eri vaiheessa. Kela kääntää vaihetta 180 astetta eri suuntaan kuin kondensaattori, eli virta on 90 astetta jäljessä jännitettä. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa kela ei tuota vaan kuluttaa loistehoa.

Reaktorit ovat rakenteeltaan samankaltaisia kuin muuntajat. Erona reaktorin ja muuntajan välillä on, että reaktorissa on vain yksi käämi vaihetta kohden. Reaktoreja löytyy yksi ja kolmivaiheisena, vaikka sähköverkossa käytetäänkin lähes aina kolmivaiheista reaktoria, sillä verkko on kolmivaiheinen. Yksivaiheisia reaktoreja käytetään lähinnä nollajohtimen vikavirran rajoittamiseen. Reaktori rakenne on upotettu metalliseen koteloon samaan tapaan kuin edellä mainittu kondensaattori. Kotelo voi sisältää öljypohjajai-

sen eristeeneste tai kotelo voi olla ilmajähdytteinen, jotka ovat yleistyneet pienemmän huolto tarpeen ja pienentyneen palokuorman johdosta. [23]

Kuten edellä mainittu, perustuu reaktorin toiminta magneettikenttään varastoituneen energian varastointiin ja syöttämiseen takaisin verkkoon. Tämä tarkoittaa, että reaktorin sisään tulisi luoda magneettikenttä, johon energia voisi varastoitua. Kun johtimeen aletaan syöttää virtaa, alkaa johtimen ympärillä kiertää magneettivuo. Johtimia alettaessa kiertää kuvan 7 kaltaiseen telineeseen syntyy kelan näköinen rakenne, jolloin yksittäisten kierrosten virrat alkavat vahvistaa toisiaan ja syntyy voimakkaampi magneettivuo kelan sisään. [23]



Kuva 7. Reaktorin rakenne [23]

Kuvassa 7 teräslaminaattien tarkoituksena on ehkäistä pyörrevirtahäviötä, joita syntyy, jos rakenne olisi tehty yksittäisestä terästangosta. Laminaatit ovat eristetty toisistaan eristemateriaalilla, jolloin magneettivuo jatkaa mieluummin etenemistä teräksessä, sillä teräksen reluktanssi on pienempi kuin ilman. Reaktori rakenteen päällä olevat ilmavälit ovat tarkoitettu lähinnä reaktorin jäähdytykseen. Lisäksi teräksen poikkileikkaukseen voidaan lisätä ilmaväli, jota muuttamalla voidaan vaikuttaa magneettivuon voimakkuuteen teräksessä, jolloin myös reaktorin induktanssin arvo muuttuu. Tämä saa aikaa muuttuneen loistehon kulutuksen reaktorissa. [23]

Reaktoreja käytetään yleisesti kapasitiivisen loistehon kompensointiin, jota syntyy erityisesti maakaapeleissa. Teollisuudessa harvemmin tulee kapasitiivista loistehoa kompensoida, koska välimatkat ovat lyhyitä. Tosin tulee huomioida, että monet muut, sekä

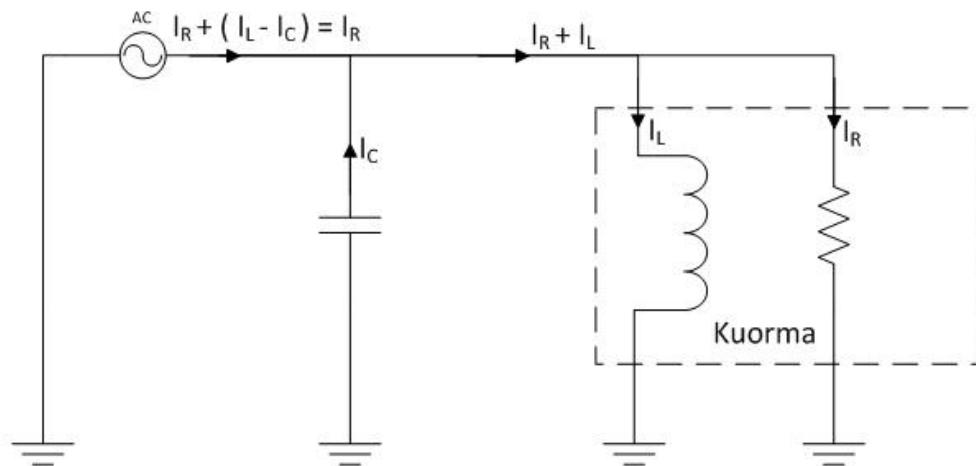
passiiviset, että aktiiviset kompensointilaitteet käyttävät reaktoreja loistehon tuotannon säädön ja harmonisten komponenttien kompensoimiseen verkosta.

3.2 Rinnakkaiskondensaattoriparisto

Rinnakkaiskondensaattoriparisto on yksinkertaisin tapa tuottaa loistehoa verkolle, sillä se koostuu vain kondensaattoriyksiköistä. Kondensaattoriparisto on yksinkertainen ja luotettava, mutta tällaista passiivista kompensointia ei voida säätää kuormituksen mukaan. Lisäksi kondensaattoriparisto voi luoda verkkoinduktanssin kanssa resonanssipiirin, joka voi aiheuttaa merkittävän ylijännitteen. Tässä kappaleessa tutustutaan kondensaattoripariston rakenteeseen ja tutkitaan tarkemmin, mitä vaikutuksia kondensaattoriparistolla voidaan saavuttaa.

Rinnakkaiskondensaattorin tehtävänä vaihtosähköverkossa on tuottaa loistehoa. Tämä saattaa olla yrityksille taloudellisesti kannattavaa, sillä sähköverkkoyhtiöt ovat alkaneet veloittaa loistehon käytöstä. Lisäksi kompensoinnilla pyritään pitämään jännite kytkentäpisteessä haluttuna. [13]

Kuvassa 8 on yksinkertaistettu kuva, kuormana toimii induktiivista loistehoa tuottava kela ja pätötehoa kuluttavana komponenttina toimii vastus. Voidaan kuvitella, että kyseessä olisi yksinkertaistettu sähkömoottorin tuottama kuorma.

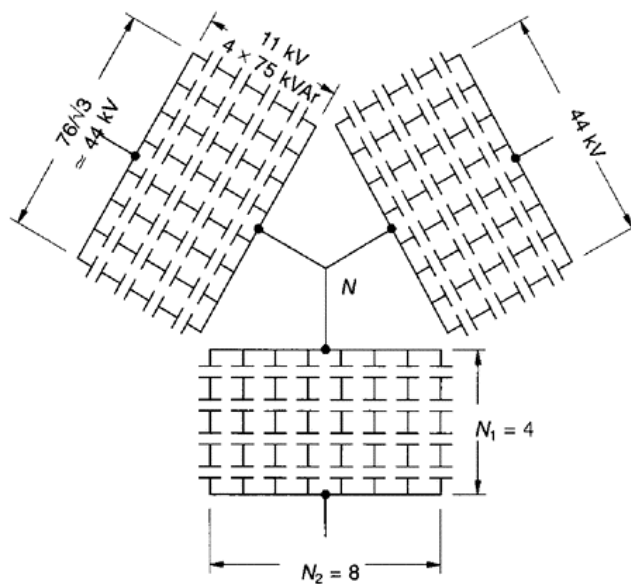


Kuva 8. Kondensaattoripariston tuottama loisvirta esimerkki [23]

Kuten kuvasta voidaan havaita verkko, eli AC vaihtojännitelähde, syöttää kuormalle vain vastuksen tarvitseman virran. Magnetointiin kuluva virta tulee kondensaattoriparistolta, joka on pyritty asentamaan mahdollisimman lähelle kuormaa, jolloin siirtojohdoilla tapahtuvat häviöt minimoituvat. [13]

Rinnakkaiskondensaattoriparisto kootaan nimensä mukaisesti kondensaattoreista. Kondensaattoripariston voi kytkeä kolmivaiheverkkoon joko kolmioon tai tähteen. Paristoa suunniteltaessa tulee huomioida, että kolmioon kytkennässä kondensaattorien yli vaikuttaa pääjännite, kun taas tähteen kytketyssä tapauksessa kondensaattorien yli vaikuttaa vaihejännite. [23]

Otetaan esimerkki tapaus, jossa lasketaan kondensaattoriyksiköiden määrä ja miten ne tulisi kytkeä. Oletetaan, että verkkoa halutaan kompensoida $14\,400\text{ kVAr}$ ja järjestelmän pääjännite on 76 kV . Lisäksi yksittäinen kondensaattoriyksikkö tuottaa loistehoa 75 kVAr ja kestää 11 kV jännitteen tehollisarvon. Ensin tulee laskea kondensaattoriyksiköiden lukumäärä, joka on $\frac{14400}{75} = 192$. Tämän jälkeen tulee pohtia kuinka monta kondensaattoriyksikköä tulee kytkeä sarjaan, jotta jännitteen kestoisuus toteutuu. Oletetaan, että kondensaattoriparisto on tähteen kytketty, jolloin ensin tulee laskea vaihejännite, joka on $\frac{76}{\sqrt{3}} = 43.88\text{ kV}$. Tällöin sarjaan kytkettävien kondensaattoriyksiköiden lukumäärä on $\frac{43.88}{11} = 4$. Tässä tulee huomioida, että luku tulee pyöristää aina ylöspäin, jotta jännitteen kestoisuus ei pääse ylittymään. Kuvassa 9 on esitettyä esimerkkinä tapauksen kondensaattoriparisto. [23]



Kuva 9. Kondensaattoriparisto [13]

Kuvan mukainen kondensaattoriparisto pystyy syöttämään verkkoon $14\,400\text{ kVAr}$:in loistehon, kun paristo kytketään rinnalle verkkoon.

Kondensaattoripariston ollessa piirissä syntyy kondensaattorin ja piirissä olevan induktanssin välille resonanssitaajuus. Tämä taajuus voi periaatteessa osua, mihin vai taajuuteen, mikäli ei ole tiedossa, mikä on kuorman ja verkon induktanssin arvot. Mikäli tämä

resonanssitaajuus osuu matalan harmonisen monikerran kohdalle tai lähelle ja harmonisia yliaaltoja esiintyy verkon jännitteessä tai virrassa, saattaa jännitteeseen tulla suuria ylijännitteitä, jotka ovat haitallisia verkolle. Tilanne voi johtaa teollisuuden tapauksessa suojauslehtien toimimiseen, joka aiheuttaa prosessille keskeytymisen. Muutokset voivat olla myös niin nopeita etteivät suojauslehdet ehdi reagoimaan verkon muutokseen, jolloin verkossa olevilla komponenteilla on suuri riski rikkoutua. Resonanssitaajuuden voi laskea kaavan (5) avulla. [13]

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_{cap}}} \quad (5)$$

Kaavassa f_r on resonanssitaajuus, L induktanssi, C kapasitanssi, f_1 perustaajuus, S_{sc} kuorman kokonaisteho yksikössä kVA ja Q_{cap} on kondensaattorin tuottama loisteho yksikössä $kVar$. Mikäli jännitteessä tai virrassa on yli 1 % harmonisia yliaaltoja, pelkkää kondensaattoriparistoa ei voida käyttää. [13] Teollisuudessa lähes kaikki kuormat ovat epälineaarisia, jolloin 1 % THD ylittyy, joka tarkoittaa sitä, että kondensaattoriparistoa ei voida käyttää.

3.3 Estokelaparisto

Estokelapariston toiminta on lähes samanlainen kuin edellä mainittu kondensaattoriparisto, sillä erotuksella, että kondensaattoripariston eteen on lisätty sarjaan reaktori. Tällaista rakennetta voidaan käyttää siinä tapauksessa, jos verkon THD on yli 1 %:a, jolloin ei voida pelkkää kondensaattoriparistoa käyttää. Reaktorin rakenne on esitelty kappaleessa 3.1.2. Reaktorin lisäyksellä voidaan varmistaa, ettei resonanssiipiiriä synny taajuudelle, joka voisi olla haitallinen verkolle. Reaktorin koko suunniteltaessa voidaan määrittää reaktorille reaktorin suhdeluku p , joka voidaan laskea kaavan (6) avulla. [24]

$$p = \frac{X_L}{X_C} \cdot 100\% \quad (6)$$

Kaavassa X_L on induktiivinen reaktanssi ja X_C on kapasitiivinen reaktanssi. Suhdeluku on kondensaattorin ja reaktorin reaktanssien suhde. Yleisesti suhdeluvuksi valitaan arvo 6 ja 7 %:in väliltä, jolloin resonanssitaajuudeksi saadaan kaavan (7) avulla

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{1}{p}} \quad (7)$$

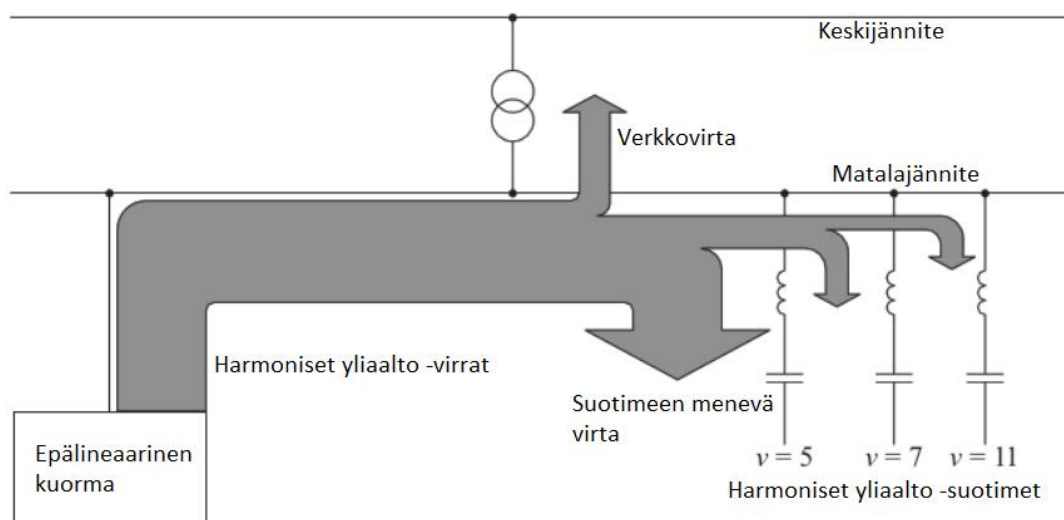
arvo 189 Hz tai 204 Hz:siä. Normaali tilanteessa taloudellisin vaihtoehto on käyttää reaktorin suhdelukuna 7 %, jolloin resonanssitaajuus on tuo 189 Hz:ä. Tämä taajuus on selvästi matalampi kuin 5 harmonin yliaalto, kun oletetaan, että verkon taajuus on 50

Hz. Yksivaiheisessa tapauksessa viritys taajuudeksi valitaan 141 *Hz*:ä, joka on matalampi kuin verkon kolmas harmoninen komponentti. Kuorma ei saisi syöttää verkkoon suunnitellusta resonanssitaajuudesta matalampia harmonisia yliaaltoja. Estokelaparisto pystyy lisäksi suodattamaan verkosta osan viidettä ja seitsemättä yliaaltoa, mutta kasvattaessa suhdelukua p suodatuskyky pienenee. Esimerkiksi viides yliaalto pienenee 10–30 %:a, kun viritystaajuudeksi on valittu 189 *Hz*. Vastaavasti pienentäessä suhdelukua saadaan verkosta suodatettua enemmän, mutta tämä johtaa siihen, että komponenttien kokoa tulee kasvattaa, jotta saavutetaan haluttu tehokertoimen korjaus, jolloin myös kustannukset kasvavat. [24]

Passiivisia kompensointilaitteita voidaan ohjata mekaanisella kytkimellä päälle ja pois kuormitustilanteen muuttuessa. Virtamittaus tulee toteuttaa ennen kyseistä kondensaattori- tai estokelaparistoa, josta voidaan havaita verkon loistehon tarve. Säättöportaat loistehoa tuottaville elementeille tulee valita siten, että saadaan riittävästi portaita, jotta vältytään loistehomaksuilta. [18] Kontaktorit ovat mekaanisia komponentteja, joten ne kuluvat myös mekaanisesti. Lisäksi kyseisen säädön heikkoutena ovat vain tietyt loistehoportaat, mikäli loistehon kulutus osuu portaitten välille, ei tällainen järjestelmä pysty eliminoimaan kokonaisuudessaan loistehoa. Tällainen säätö on myös hidas mekaanisista komponenteista johtuen, koska kontaktoreja ei voi kytkeä päälle ja pois lyhyillä ajanjaksoilla mekaanisesta kulumisesta johtuen. Mekaanisia kytkimiä käytetään yleensä 2-4 kertaa päivässä. Tällöin lyhytaikaisessa loistehon tarpeessa ei tällainen menetelmä ole paras mahdollinen vaihtoehto. Teollisuudessa nopeita loistehon kuluttajia voivat olla esimerkiksi nosturit ja muut teollisuuslaitteet, jotka ovat vain hetkellisesti päällä, mutta teollisuudessa on myös paljon laitteita, joiden loistehon kulutus on tasaisempaa.

3.4 Yliaaltosuodin

Loistehon kompensoinnin lisäksi passiivisilla kompensointilaitteilla voidaan tarvittaessa suodattaa harmonisia yliaaltoja. Yliaaltosuotimen topologia on samantapainen kuin edellä mainittu estokelaparisto, sillä molemmissa tapauksissa on kondensaattorin edessä reaktori. Yliaaltosuodin eroaa vain, sillä tavalla, että resonanssitaajuus suunnitellaan reaktorin ja kondensaattorin suhteen harmonisen monikerran kohdalle. Yliaaltosuodin eroaa myös siten, että tarkoituksena on suodattaa harmonisia yliaaltoja eikä niinkään kompensoida loistehoa. Esimerkiksi, jos halutaan suodattaa virran viides yliaalto verkosta, niin suunnitellaan reaktorin ja kondensaattorin resonanssitaajuus 250 *Hz*:in kohdalle, mikäli kyseessä on 50 *Hz*:in verkko. Tämä tarkoittaa, että suotimen läpi tulee pieni impedanssinen reitti 250 *Hz*:in kohdalle, jolloin tämän taajuinen virta ei siirry verkkoon. Suunniteltaessa suodinta tulee aina ensimmäiseksi suodattaa alin harmoninen yliaalto ensin, kuten kuvasta 10 voidaan nähdä. Tämän jälkeen voidaan lisätä suurempia harmonisten yliaaltojen suotimia yleisesti 2-4 matalimmalle yliaallolle ja loppuun lisätään laajakaista- tai c-tyypin suodin, jolla voidaan suodata korkeammat yliaallot. [24]



Kuva 10. Passiivinen yliaaltosuodin virtojen suunnat ja suuruudet [24]

Lisäksi yksittäiset suodinelementit tuottavat kapasitiivista loistehoa suotimen resonanssitaajuutta alemmille taajuuksille, jolloin perustaajuuden kohdalla suodin tuottaa loistehoa. Suuremmilla taajuuksilla vastaavasti suotimet kuluttavat induktiivista loistehoa. Suotimet ovat edullinen, yksinkertainen ja luotettava ratkaisu verrattuna seuraavassa kappaleessa esitettyihin aktiivisiin suotimiin nähden, sillä nämä laitteet eivät tarvitse erillistä ohjausjärjestelmää. [24] Lisäksi passiivisten suotimien etuna ovat pienet häviöt, huoltovapaus sekä suotimet pystyvät kompensoimaan loistehoa ja rajoittamaan käynnistysvirtoja. Haittapuolena tosin on, että passiivinen yliaaltosuodin pystyy vain eliminoimaan mitoitettut harmoniset yliaallot eikä säätömahdollisuutta ole.

Yhteenvetona voidaan todeta, että kaikille erilaisille passiivisille kompensointilaitteille löytyy sovelluskohteensa. Kondensaattoriparistoa voidaan käyttää kohteissa, joissa on vähän harmonisia yliaaltoja, jolloin ei ole varaa, että syntyisi resonanssipiiri verkkoon. Estokelaparistolla voidaan tuottaa samaan tapaan loistehoa kuin kondensaattoriparistollakin, mutta laitetta voidaan käyttää kohteissa, jossa esiintyy harmonisia yliaaltoja, joita voidaan myös vaimentaa estokelapariston avulla. Yliaaltosuotimella voidaan suodattaa verkosta merkittäviä harmonisia komponentteja ja lisäksi tuottaa loistehoa verkon tarpeisiin. Mikäli passiivilla komponenteilla ei voida taata riittävän hyvää sähkön laatua, tulee käyttää aktiivista kompensointia, jolla voidaan ehkäistä välkyntää ja suuria harmonisia yliaaltoja verkosta.

4. AKTIIVINEN KOMPENSOINTI

Aktiiviset kompensointilaitteet ovat rinnankytkettyjä, kompensointilaitetta voidaan ohjata ja ne pyrkivät pitämään jännitteen vakiona ja tehokertoimen arvossa 1. Ne pystyvät tuottamaan tai kuluttamaan juuri halutun määrän loistehoa, jonka järjestelmä vaatii pitääkseen jännitteen haluttuna kytkentäpisteessä. Yleisesti käytetyt puolijohdekytkimet ovat näissä sovelluksissa, joko tyristori tai IGBT. Lisäksi aktiivisella kompensointi järjestelmällä voidaan eliminoida harmonisten yliaaltojen vaikutus sähköverkossa. Aktiivisia kompensointilaitteita ohjataan puolijohdekytkimillä, jotka ovat huomattavasti nopeampi kuin ennen käytetyt releohjaukset. [21]

Tässä kappaleessa käydään läpi yleisimmät sähköverkon kompensoinnissa esiintyvät aktiiviset suotimet ja tämän lisäksi tutustutaan säätöteoriaan, jolla voidaan taata laitteiden nopea dynamiikka. Aktiiviset kompensointilaitteet ovat rajattu vain rinnankytkettyihin kompensointilaitteisiin SVC:hen, STATCOM:iin ja aktiiviseen tehosuotimeen.

4.1 SVC

SVC on yleisesti käytetty aktiivinen suodin, jota sähköverkossa käytetään tuottamaan/kuluttamaan loistehoa. Staattinen loistehokompensaattori (SVC) muistuttaa rakenteeltaan passiivisuodinta, mutta suotimen virtaa voidaan ohjata tyristoreilla. [21] Tämä tarkoittaa, että SVC pystyy pitämään kytkentäpisteensä jännitteen tasaisena, jolloin vältytään jännitekuopilta, välkynnältä, ylijänniteiltä ja jännite-epäsymmetrialta. [16] SVC:n toiminta perustuu muuttuvaan ekvivalenttiin susceptanssin arvoon, jota voidaan muuttaa muuttamalla SVC:n sytytyskulman arvoa. SVC siis sisältää tyristorikytkimen ja edellisessä kappaleessa esiteltyjä reaktoreja ja kondensaattoreja. SVC on siis säädettävä impedanssi, joka tuottaa tai kuluttaa loistehoa syöttöjännitteeseen verrannollisesti. Vasteaika on 20-30ms. [21]

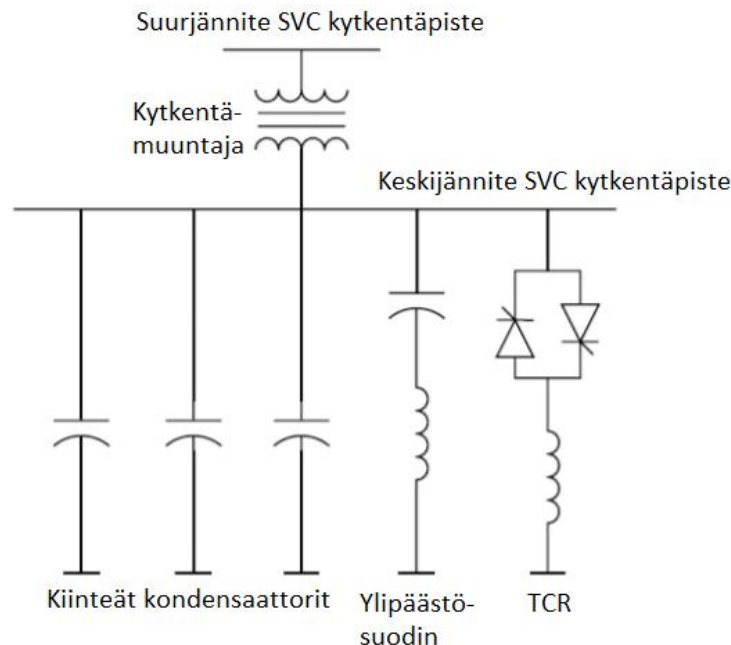
SVC:n komponentit voidaan jakaa kahteen erilaiseen haraan TCR ja TSC. TCR sisältää vastarinnan kytketyn tyristoriparin ja reaktorin, eli voidaan puhua tyristori-ohjatusta reaktorista. TSC vastaavasti sisältää myös tyristorit, mutta reaktorin sijasta käytetään kondensaattoria, jolloin puhutaan tyristori-ohjatusta kondensaattorista. Näiden lisäksi SVC:hen lisätään aina passiivisia kompensointi haaroja, joilla voidaan suodattaa SVC:n tuottamat harmoniset yliaallot. [21] Tässä kappaleessa on esitelty erilaiset SVC-tyypit ja lisäksi tutustutaan ohjausjärjestelmään, jolla voidaan taata, että SVC tuottaa/kuluttaa juuri oikean määrän loistehoa. SVC tuottaa itsessään paljon matalataajuisia harmonisia

yliaaltoja, joten SVC:hen tulee lisätä passiivinen yliaaltosuodin, jolla saadaan suodatettua nämä harmoniset yliaallot pois eivätkä ne päätyisi verkkoon.

SVC voidaan liittää verkkoon alennusmuuntaja kautta tai reaktorin kautta, joka vaimentaa korkeita virran harmonisia yliaaltoja. Alennusmuuntajalla voidaan saada aikaan, että SVC:n komponenttien kokoja voidaan pienentää, mutta tämä ei ole yleensä teollisuudessa tarpeellista. SVC:n voi liittää keskijänniteverkkoon ilman alennusmuuntajaa.

4.1.1 FC-TCR

FC-TCR on topologia, jossa on suuret kondensaattorit tuottamassa loistehoa verkkoon. Tämän lisäksi kytkentäpisteeseen on lisätty TCR, jonka avulla saadaan aikaan kytkentäpisteeseen säädettävä loistehon tuotanto kytkemällä tyristorien avulla reaktoria päälle ja pois. TCR:n kytkeminen verkkoon mahdollistaa SVC:lle muuttuvan impedanssin, jolloin voidaan tyristorisillan sytytyskulmaa säätämällä saada haluttu impedanssi SVC:lle. Lisäksi tulee huomioida, että TCR on kytketty kolmioon, jolloin kolmas yliaalto alkaa kiertää kolmiossa, eikä siirry verkkoon. Kuvassa 11 on esitetty kyseinen kytkentätopologia. [25]



Kuva 11. FC-TCR topologia [25]

Kondensaattoriparistoja yleensä kytketään keskijännite pisteeseen enemmän kuin yksi, sillä kondensaattorien eteen voidaan lisätä reaktori, joka voidaan säätää siten, että verkosta voidaan suodattaa matalia harmonisia yliaaltoja. Samaa tapaan kuin ylipäästösuodin poistaa suurimmat harmoniset yliaallot verkosta pois. [25]

Tämä on teollisuudessa käytetyin SVC:n rakenne, jolla loistehoa kompensoidaan. Vakio kondensaattoriparistot tuottavat jatkuvan loistehon esimerkiksi oikosulkumoottoreille, jotka pyörivät kokoajan. TCR osalla saadaan ohjattavuutta, jolloin voidaan pienentää SVC:n tuottaman loistehon määrää. Lisäksi tällä rakenteella voidaan ehkäistä verkosta nopeita jännitemuutoksia nopealla säädöllä. [25]

SVC:n ohjaus toimii siten, että määritellään tyristoreille sytytyskulma α 90° ja 180° :een väliltä. Kun sytytyskulma pienenee induktiivinen loisteho kasvaa ja kun taas sytytyskulma kasvaa induktiivinen loisteho pienenee, jolloin kapasitiivinen loisteho kasvaa. [25]

Kuten edellä mainittu SVC mallinnetaan verkkomalleissa usein susceptanssina, jonka käänteisarvo on reaktanssi. Tämä reaktanssin arvo saadaan laskettua kaavan (8) avulla,

$$X_{TCR} = \frac{\pi X_L}{\delta - \sin \delta} \quad (8)$$

jossa δ on johtavuuskulma. Tämä kulma saadaan laskettua kaavan (9) avulla.

$$\delta = 2(\pi - \alpha) \quad (9)$$

Koko SVC:n tuottama impedanssin arvo voidaan laskea kaavan (10) avulla.

$$X_{SVC} = \frac{X_C X_{TCR}}{X_C + X_{TCR}} \quad (10)$$

Tästä voidaankin päätellä kuinka paljon loistehoa SVC joko kuluttaa tai tuottaa laske-
malla loisteho kaavan (11) avulla,

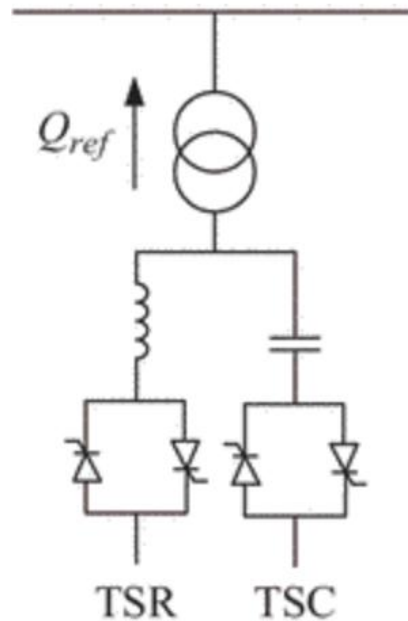
$$Q_{SVC} = U^2 / X_{SVC} \quad (11)$$

jossa U on kuvan 11 jännite kytkentäpisteessä. Näin saadaan selville loistehon määrä, jonka tämä SVC pystyy tuottamaan/kuluttamaan. Kaavan avulla voidaan tehdä myös malli, josta nähdään millä tavoin sytytyskulman α muutos vaikuttaa loistehon arvoon. [21]

4.1.2 TSC-TCR

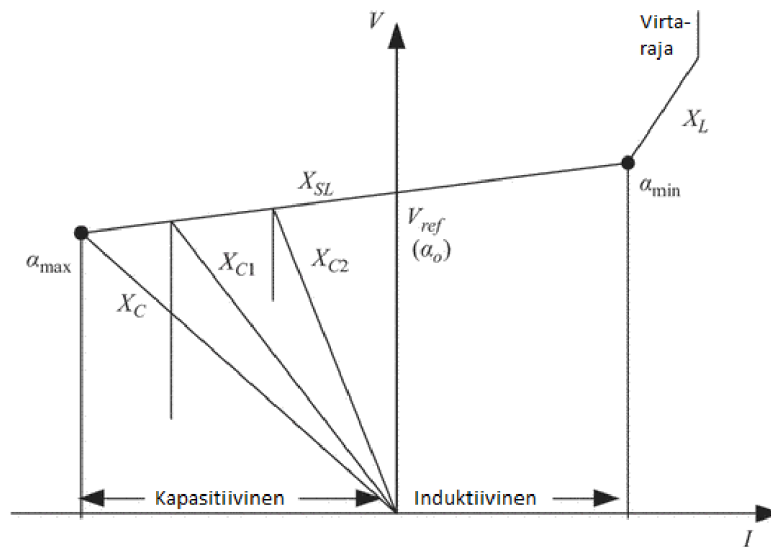
TSC-TCR on lähes vastaavanlainen kuin edellä mainittu FC-TCR, mutta kiinteät kondensaattoriparistot, kuten nimestäkin voidaan päätellä, on korvattu tällä TSC elementillä. TSC, eli tyristori-ohjattu kondensaattori, antaa SVC:lle enemmän säätövaraa ja vika-tilanteissa pystytään rajoittamaan ylijännitteitä kondensaattoreita säätämällä, mutta haittapuolena on, että säädöstä tulee monimutkaisempaa ja SVC:n rakenne on kalliimpi. TSC-haarassa voidaan käyttää myös estokelaparistoa, jolla voidaan ehkäistä harmonisia yliaaltoja verkossa. Lisäksi TSC eroaa TCR:stä siten, että TCR haaran tyristorien syty-

tyskulmia voidaan muokata halutunlaiseksi, kun taas TSC:een tapauksessa näin ei ole vaan tyristorit kytketään aina päälle lähellä jännitejakson nollassa. TSC-haaraa ei ole mahdollista kytkeä samaan tapaan kuin TCR:ää, koska tämä aiheuttaisi muilla kuin nollassa voltin kytkentähetkellä suuren virtapiikin, joka voisi vaurioittaa tyristoreja. [26] Kuvassa 12 on esitetty TSC-TCR periaate kuva.



Kuva 12. TSC-TRC [27]

Kuvassa on merkitty erikseen TSR- ja TSC-haara, joilla saadaan aikaan SVC:n säädettävyys. TSC tuo lisää ohjattavuutta SVC:lle, jolloin voidaan SVC:n reaktorin kokoa pienentää. Lisäksi TSC-haaroja voidaan lisätä enemmän kuin 1, jolloin voidaan saavuttaa parempi ohjattavuus. TSC-haarojen etuna on myös, että ne eivät tuota harmonisia yliaalloja toisin kuin TCR, joten TCR haaran pienentäminen TSC:n avulla voi johtaa tilanteeseen, jossa SVC:n tuottamat harmoniset yliaallot saadaan pienentymään. Tämä johtaa myös SVC:n pienentyneisiin tehohäviöihin. [26] Kuvassa 13 on esitetty periaate, jonka mukaan SVC kompensoi loistehoa verkosta.



Kuva 13. Periaatekuva säätöalueesta TSC-TRC SVC:llä [27]

Kuvasta voidaan nähdä, että kyseisessä SVC:ssä on kolme kondensaattoriparistoporrasta, joiden avulla voidaan tuottaa kapasitiivista loistehoa. Lisäksi kuvasta voidaan lukea, miten TCR:n sytytyskulma α vaikuttaa loistehon tuotantoon SVC:ssä. Kaavasta (10) voidaan päätellä, kuinka suurena ekvivalenttisenä reaktanssina voidaan SVC:tä pitää. Kaavassa X_C muuttuu, kun kondensaattoriparistoja kytketään päälle tai pois. Tästä voidaan päätellä, että myös kaavasta (11) loistehon arvo Q_{SVC} muuttuu. [27]

4.1.3 MSC-TCR/MS-C-TSC-TCR

MSC-TCR toimii samoin kuin edellä mainittu TSC-TCR. Erona TSC:lle on, että kondensaattorit ovat kytketty kontaktorien välityksellä. Mekaanisten kytkinten välityksellä lisätyt kondensaattorit eivät juurikaan lisää mahdollisuutta muuttaa loistehoa, sillä kyseisiä kytkimiä kytketään päälle ja pois yleensä 2-4 kertaa päivään aikana. Lisäksi kytkimen sulkemiseen ja avaamiseen kuluu useita jännitejaksoja, eikä kytkimen tilaa voi muuttaa, mikäli kondensaattoriparisto on varautunut. Tosin tulee muistaa, että kytkimen kautta liitetyt kondensaattoriparistot ovat huomattavasti halvempia. Mekaaninen kytkin voi kytkeä kondensaattoripariston, missä tahansa jännitejakson kohdassa päälle, jolloin voi verkolle aiheuta haitallisia transienttijännitteitä. [18]

Säätöä voidaan nopeuttaa lisäämällä TSC-haara SVC:hen, jolloin saadaan myös lisää säätöportaita kompensointilaitteeseen. TSC käyttää hyväkseen tyrystoreja, joten se voi jokaisen jännitejakson nollakohdassa päättää kytkeekö se kondensaattoripariston päälle tai ei. Etuna MSC-laitteelle on pienentyneet häviöt, sillä kondensaattoriparistot ovat suoraan kytkettynä suurjännitelinjaan. [18]

4.1.4 Sääto

SVC:n tyristorien sääto voi perustua joko vaihekohtaiseen laskentaan vaiheenkääntöpiiriä hyödyntäen tai avaruusvektoriteoriaan. Säätojärjestelmässä on kaksi eri osaa: nopea sääto välkyntän kompensointiin ja hitaampi sääto jännitteen amplitudin pitämiseksi vakiona kytkentäpisteessä. SVC:n säätoon tarvitaan järjestelmästä mittaustietoja, kuten kuorman ottama virta ja kytkentäpisteen jännite mittausta, jotta voidaan laskea kuorman ottaman loistehon määrä. Yksittäisen vaiheen loisteho saadaan laskettua vaiheenkääntön avulla, kun lisätään tai vähennetään hetkellisistä arvoista + tai -45 astetta. Kaavassa (12) on esitetty tapa, miten saadaan laskettua loisteho suoraan tehokertoimella ja vaiheenkääntön avulla.

$$Q_V = \frac{1}{2}(\hat{u}\hat{i} \sin \varphi) \quad (12)$$

$$= \frac{1}{2}(\hat{u} \sin(\omega t - \frac{\pi}{4}) \cdot \hat{i} \sin(\omega t - \varphi + \frac{\pi}{4}) - \hat{u} \sin(\omega t + \frac{\pi}{4}) \cdot \hat{i} \sin(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{4}))$$

Kaavassa Q_V on vaiheen loistehon määrä, \hat{u} ja \hat{i} ovat jännitteen ja virran huippuarvoja, φ on kuorman vaihekulma, ω jännitteen kulmanopeus ja t on aika. Tästä voidaan laskea jokaiselle vaiheelle loisteho, jonka SVC:n tulisi eliminoida. Kuten edellä jo on mainittu, mallinnetaan SVC:tä ekvivalenttisenä susceptanssina, jolloin yksittäisen vaiheen susceptanssin arvo saadaan laskettua kaavan (13) avulla,

$$B_V = \frac{V_{phase}}{Q_V^2} \quad (13)$$

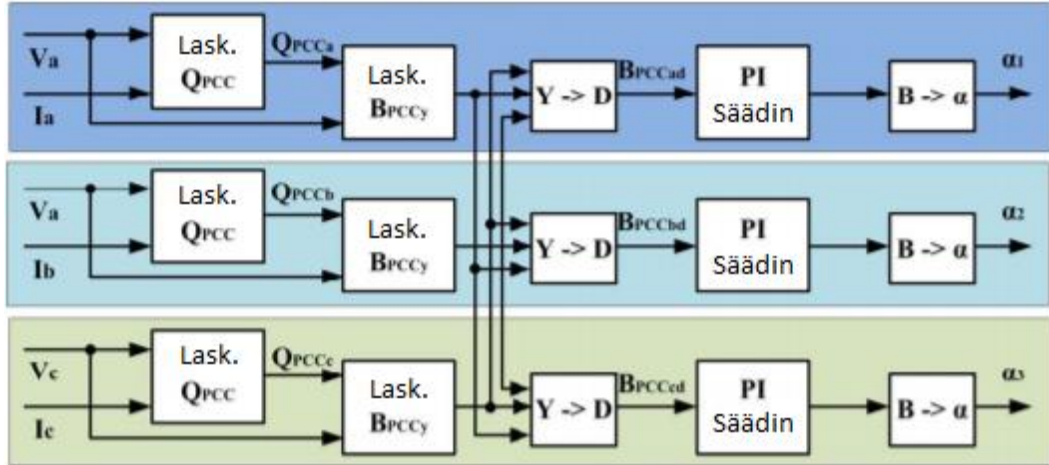
jossa B_V on kuorman susceptanssi, V_{phase} on kytkentäpisteen vaihejännite ja Q_V on kuorman tuottama loisteho kyseisessä vaiheessa. SVC:n susceptanssin tulisi nyt olla käänteinen ja yhtä suuri kuin laskettu ekvivalentti susceptanssi, joka verkossa näkyy. Susceptanssi on käänteinen arvo verkossa esiintyvälle reaktanssille, kuten edellä on mainittu.

Mikäli TCR osa SVC:ssä on kytketty kolmioon, saadaan selville kolmiossa A ja B vaiheen välinen kolmion haaran haluttu ekvivalentti reaktanssi laskettua kaavan (14) avulla.

$$X_{AB} = \frac{X_A X_B + X_A X_C + X_B X_C}{X_C} \quad (14)$$

Samalla tavalla voidaan laskea myös muiden vaiheiden ekvivalentit reaktanssit. Kuvassa 14 on esitetty SVC:n säätojärjestelmä. Kuvassa vasemmalla näkyy mittaustiedot ja oikealla laskettu tyristorien sytytyskulmat. Kuvan PI-säädin saa edellä mainitusta referenssiarvon. Mittausarvon säädin saa SVC:n syöttämästä virrasta ja jännite on sama

kuin mihin SVC on kytketty. Ohjearvon vastaavasti säädin saa kuorman virrasta ja kytkentäpisteen jännitteestä. Ohjearvo ja mittaesarvo syötetään PI-säätimelle, joka antaa ohjaussignaalin SVC:lle. [28]



Kuva 14. SVC säätöjärjestelmä [28]

Lisäksi on olemassa avaruusvektorit, joiden avulla voidaan laskea loistehon arvo joka hetkellä, jonka perusteella voidaan päätellä tarvittava impedanssin arvo. Avaruusvektoreita hyödynnettäessä voidaan käyttää stationääristä koordinaatistoa tai synkronista koordinaatistoa, jonka avulla voidaan laskea tarvittava loistehon määrä kytkentäpisteessä. Erona koordinaatistoille on, että toinen on pyörivä koordinaatisto ja toinen on paikallaan pysyvä, eli stationäärikoordinaatistossa suuret ovat sinimuotoisia ja synkronisessa koordinaatistossa DC-suureita. Kaavassa (15) on esitetty laskutapa, jolla saadaan laskettua hetkellinen pätö- ja loisteho kuorman kytkentäpisteessä, kun on käytetty apuna stationäärikoordinaatiston suureita. Jännitemittaus kyseisessä tapauksessa voidaan suorittaa kuorman kytkentäpisteestä ja virtamittauksella mitataan kuorman ottama virta, jolloin saadaan selville kuorman kuluttama pätö- ja loistehon määrä. [29]

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha} i_{\alpha} + u_{\beta} i_{\beta} \\ u_{\beta} i_{\alpha} - u_{\alpha} i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (15)$$

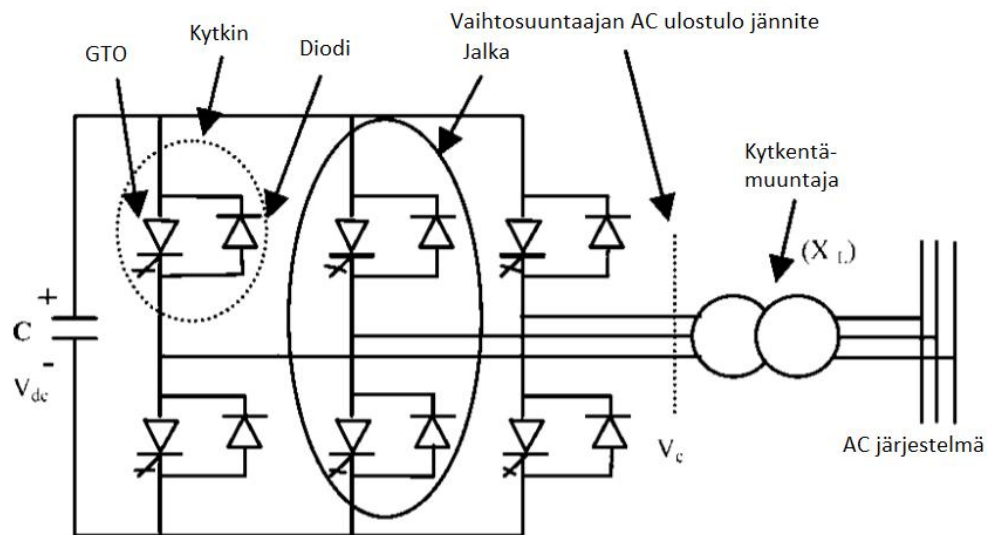
SVC:n tarkempi säätöjärjestelmien analysointi on lähes mahdotonta, koska ne ovat yrityssalaisuuksia. Moderneilla säätöjärjestelmillä voidaan saavuttaa huomattavia etuja kilpailijoihin nähden, jolloin tuotteita saadaan paremmin myytyä. Yksittäinen suuri kehittämisen kohde laitevalmistajilla on saada laitteet mahdollisimman nopeaksi ja tämä tulisi saavuttaa siten, että verkkoon muodostuisi mahdollisimman vähän haitallisia harmonisia yliaaltoja.

SVC on arviolta noin viisi kertaa kalliimpi kuin passiivisuodin, mutta SVC on säätö ominaisuuksiltaan parempi. SVC pystyy kompensoimaan suuria jännitevaihteluita, joita passiivi suotimilla ei voida suodattaa, joten esimerkiksi valokaariuunien ja hitsauslait-

teiden yhteydessä on välttämätöntä käyttää SVC:tä, sillä molemmat laitteet tuottavat verkolle suuria hetkellisiä kuormia, jotka saavat aikaan jännitevaihtelua verkossa. SVC:n häviöt ovat noin 1 %:n mitoitetusta tehosta, mutta häviöt riippuvat SVC:n toimintapisteestä

4.2 STATCOM

Kuten edellä mainittu SVC myös STATCOM:n tarkoituksena on kompensoida loistehoa. STATCOM on säädetty loisvirtalähde, joka tuottaa millaisen tahansa halutun loisvirran. STATCOM:n topologia poikkeaa SVC:stä, sillä STATCOM:illa ei ole samanlaisia tyristoriohjattua järjestelmää vaan STATCOM:ssa on vaihtosuuntaaja, joka on kytketty energiavarastoon, kuten kondensaattoriparistoon. STATCOM kytketään myös kytkentämuuntajan kautta verkkoon samasta syystä kuin SVC, eli voidaan pienentää komponenttien kokoja. Teollisuudessa voidaan STATCOM liittää suoraan verkkoon suodatin reaktorin kautta, mikäli verkon jännite on tarpeeksi matala. Lisäksi muuntaja/reaktori suodattaa korkeita harmonisia yliaaltoja, joita muodostuu STATCOM:n vaihtosuuntaajan kytkentätaajuudelle. Vaihtosuuntaajassa tulee käyttää puolijohdekytkimiä, jotka pystyvät myös sulkemaan virran kulun kesken puolijakson. Toisin kuin tyristori, joka voidaan liipaista päälle ja on niin kauan päällä, kunnes jännite on nolla. Tällaisia puolijohdekytkimiä ovat esimerkiksi GTO, IGBT ja IGCT. [30] Kuvassa 15 on esitetty STATCOM:in topologia ja millä tavoin STATCOM on kytketty verkkoon.



Kuva 15. STATCOM topologia [30]

Kuvassa kytkinelementtinä on käytetty GTO tyristoria, jonka voi kytkeä joko päälle tai pois. Lisäksi suuntaajassa on diodit suojaamassa GTO tyristoria ja näiden kautta voidaan varastoida kondensaattoriparistolle energiaa. Tässä tapauksessa kyseessä on 2-

tasoinen vaihtosuuntaaja, mutta STATCOM:ssa voidaan käyttää myös monitasoisia suuntaajaratkaisuja korkeilla jännitetasoilla, jolloin käytettävien kytkinkomponenttien jännitekesto on pienempi. [30]

STATCOM pystyy syöttämään verkkoon minkä tahansa taajuista ja amplitudista jännitettä, joten se pystyy verkosta saamansa mittausdatan perusteella syöttämään verkkoon kapasitiivista ja induktiivista loistehoa riippuen siitä, millä tavoin kytkimiä kytketään päälle ja pois. Loistehoa säädetään muuttamalla STATCOM:n jännitteen amplitudia ja pätötehoa säädetään muuttamalla STATCOM:n jännitteen vaihetta. Vertailtaessa STATCOM:a taas edellä mainittuun SVC:hen on STATCOM:lla nopeampi reagointiaika loistehon muutoksiin verkossa, joten STATCOM vähentää paremmin välkyntää verkossa. Lisäksi STATCOM:a tulee huoltaa vähemmän ja se on fyysiseltä kooltaan pienempi. [31]

Lisäksi STATCOM:lla voidaan ehkäistä verkossa olevia virran harmonisia yliaaltoja, joita epälineaariset kuormat syöttävät verkkoon. Tällöin tulee mittaus tietona ottaa verkosta tarkka virran arvo, jota verrataan referenssi arvoon, jonka avulla voidaan päätellä miten tulisi vaihtosuuntaajan puolijohdekytkimiä ohjata. Kadu et. al. mukaan suoralla virtaohjauksella saatiin MATLAB simuloinnissa pienennettyä THD:n arvoa 21.54 %:sta 6.96 %:iin STATCOM:n avulla. Simuloinnissa kuormana oli käytetty rinnan, sekä epälineaarista, että lineaarista kuormaa. Lisäksi STATCOM pystyi simulointien perusteella nostamaan tehokertoimen arvon 0.78:sta 0.92:een. [32]

4.2.1 ESTATCOM

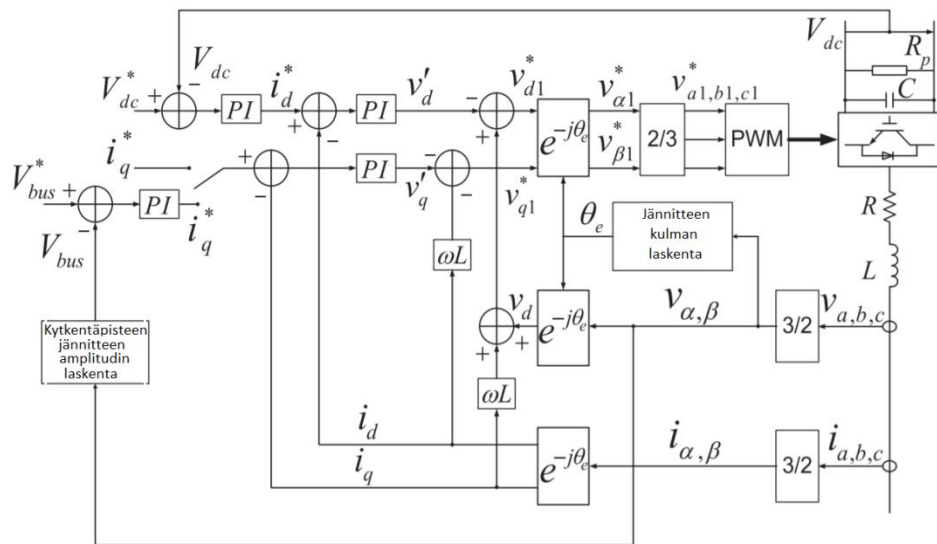
ESTATCOM poikkeaa edellä mainitusta STATCOM:sta siten, että kondensaattoripariston lisäksi tasajännite puolelle on lisätty akku tai superkondensaattori, josta saadaan myös energia verkon tarpeisiin. ESTATCOM:lla on etu, SVC:hen ja STATCOM:iin verrattuna, että se pystyy syöttämään pätötehoa verkkoon sen mukaan, kuinka paljon energiaa mahdollisesti on varastoitunut ESTATCOM:n energiavarastoon. Tämä on tärkeää heikossa verkossa, jolloin voidaan verkon välkyntää, jännitetransientteja ja jännitekuoppia ehkäistä lisäämällä verkkoon pätötehoa. Akkuvarasto tuo lisää hintaa laitteelle ja lisäksi laitteen säätö monimutkaistuu verrattuna tavalliseen STATCOM:iin. Kun energiavarasto lisätään järjestelmään, tulee huomioida jännitteiden suuruudet niin välipiirissä kuin akulla. Mikäli jännitteet ovat erisuuruiset, tulee välipiirin ja akun väliin lisätä esimerkiksi hakkuriteholähde, joka muuttaa tasajännitteen oikeaksi molemmille osille. [33]

4.2.2 Säätö

STATCOM:in säätöön on olemassa runsaasti erilaisia vaihtoehtoja, joista käytetyin on säätö synkronisessa koordinaatistossa. Erilaiset säädinratkaisut vaikuttava merkittävästi STATCOM:in käyttäytymiseen verkossa, eli esimerkiksi kuinka nopeasti STATCOM pystyy vastaamaan muuttuneeseen loistehoon verkossa. [34] dq -vektorisäädössä jännitteiden ja virtojen kolmivaiheiset siniaallot muutetaan DC-signaaleiksi Parkin muunnoksen avulla. Näin saadaan laskettua jännitteen ja virran d ja q komponentit, jotka voidaan syöttää PI-säätimelle, koska komponentit ovat DC-tasossa. Säädin pystyy toteuttamaan STATCOM:n säädön näiden d - ja q -komponentin avulla. [35] Komponenttien avulla voidaan laskea kuorman hetkellinen pätö- ja loisteho kaavan (16) avulla. Mittaukset voidaan suorittaa, joko verkon tai kuorman puolelta, jolloin selville saadaan, joko verkon tai kuorman kuluttama pätö- ja loisteho.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d i_d + u_q i_q \\ u_q i_d - u_d i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d i_d \\ -u_d i_q \end{bmatrix} \quad (16)$$

Kaavassa p on hetkellinen pätöteho, q hetkellinen loisteho, u_d ja i_d jännitteen ja virran d -komponentit ja u_q ja i_q jännitteen ja virran q -komponentit. Mikäli oletetaan, että jännitteen arvo dq -akselilla on d -akselin suuntainen, eli u_q on nolla, jää jäljelle kaavan (16) oikealla esitetyt kaavat, jotka yksinkertaistavat hieman pätö- ja loistehon laskua. [34] Kuvassa 16 on esitetty STATCOM:n perinteisin säätöjärjestelmä.



Kuva 16. STATCOM säätöjärjestelmä [34]

Kuvassa oikealla yläkulmassa voidaan havaita itse STATCOM:n vaihtosuuntaaja ja energiavarasto. Kuten kuvasta nähdään, verkon puolelta on otettu jännite- ja virtamittaus jokaiselta kolmelta vaiheelta, jotta voidaan muodostaa Parkin muunnoksella jännit-

teen ja virran d ja q -komponentit. Lisäksi on laskettu jännitteen kulma, jotta Parkin muunnos olisi mahdollinen. Lisäksi mittauksessa tulee mitata välipiirin jännite, jotta STATCOM pystyy pitämään välipiirin jännitteen vakiona. [34]

Itse säätimessä on useampi säädin, jolloin voidaan puhua niin sanotusta kaskadi-säätimestä. Kaskadi-säädin ratkaisu on tässä rakennettu molemmille virran komponenteille ja säätö toteutetaan synkronisessa koordinaatistossa, jotta virran d - ja q -komponenttia voidaan säätää toisistaan riippumatta. Lähdetään tutkimaan aluksi ulointa säätösilmukkaa, jonka dynamiikka tulee säätää kaikkein hitaimmaksi, jotta vältetään säädön epästabiliinen tila. Sisemmän säätösilmukan on ehdittävä saavuttaa uusi ohjearvonsa ennen kuin uusi ohje tulee ulommalta säätösilmukalta. Välipiirin jännitesäätö saa mittaustiedoksi välipiirin jännitteen ja referenssiarvoksi halutun välipiirin jännitteen. Tästä saadaan virran d -komponentin referenssiarvo, jota verrataan virtamittauksesta saatuun verkkovirran d -komponentin arvoon, jonka jälkeen PI-säädin antaa ulostuloksi ohjaussignaalin v_d' . Tämä säätösilmukka saa aikaan muuttuneen pätötehon kulutuksen STATCOM:lla, eli välipiirin jännitteen ollessa liian pieni ottaa STATCOM verkosta pätötehoa ja vastaavasti välipiirin jännitteen ollessa liian suuri syöttää STATCOM verkkoon pätötehoa. [34]

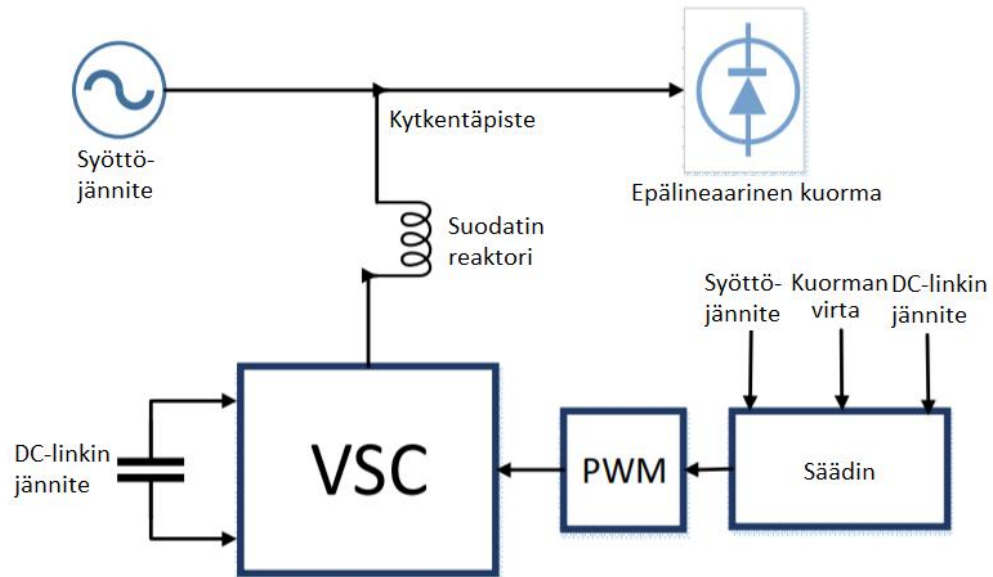
Säädettäessä loistehoa STATCOM:lla tulee säätää virran q -komponenttia. Tässä säätöpiirin esimerkissä q -komponentin referenssi voi tulla kahdesta eri paikasta, joko sen on saanut käyttäjä päättää itse tai se on laskettu verkon amplitudin arvosta. Yleensä halutaan verkon jännitteen amplitudin arvo pitää kytkentäpisteessä vakiona, jolloin käytetään tätä puolta säätösilmukasta. Samaan tapaan kuin edellä välipiirin jännitteen säädin on loistehon säädin kaskadiin kytketty, eli ensin vertaillaan kytkentäpisteen jännitteen amplitudin mitattua ja referenssiarvoa, jotka syötetään PI-säätimelle. PI-säädin antaa ulostuloksi virran q -komponentin referenssiarvon, jota verrataan verkosta mitattuun virran q -komponentin arvoon, jonka jälkeen PI-säädin antaa ohjaussignaalin arvon v_q' . [34]

v_d' ja v_q' signaalit muutetaan takaisin kolmivaiheisiksi sinimuotoisiksi signaaleiksi, jotka PWM-lohkon avulla saadaan muutettua STATCOM:n vaihtosuuntaaja kytkintilojen tiedoksi. Nämä kytkintilat siirretään STATCOM:n vaihtosuuntaajalla ja näin STATCOM pystyy pitämään kytkentäpisteen jännitteen tavoiteltuna tai jos käytetään vektorimodulointia, niin kytkentäohjeet saadaan muodostettua suoraan näistä v_d' ja v_q' vektoreista. Kytkentätilat toteutetaan STATCOM:lla. [34]

4.3 Aktiivinen tehosuodin

Aktiivisen tehosuotimen toiminta perustuu siihen, että rinnalle kytketty aktiivinen tehosuodin syöttää verkkoon harmonisia virran komponentteja, jotka ovat vastakkaisia verrattuna kuorman tuottamiin virran harmonisiin komponentteihin. Lisäksi aktiivinen

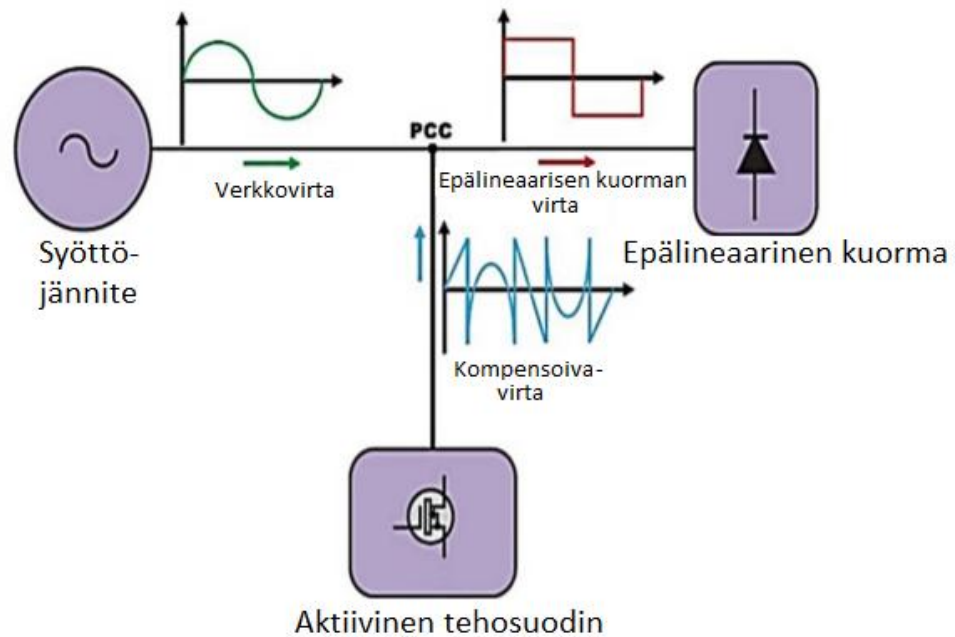
tehosuodin pystyy syöttämään verkkoon induktiivista tai kapasitiivista loistehoa, jolla saadaan korjattua verkon tehokerrointa lähelle arvoa yksi. Aktiivinen tehosuodin pystyy myös pitämään jännitteen haluttuna kytkentäpisteessä ja pystyy poistamaan epäsymmetriset jännitteet verkosta. Kuvassa 17 on esitetty perinteinen rinnankytketty aktiivinen tehosuodin. [36]



Kuva 17. Aktiivinen tehosuodin [36]

Kuvasta nähdään, että säätimelle menee tehosuotimen tapauksessa verkon syöttöjännite, kuorman virta ja DC-linkin jännite. Näiden tietojen pohjalta aktiivinen tehosuodin pystyy injektoimaan verkkoon virtaa, jolla saadaan kompensoitua virran harmoniset yliaallot ja loisteho. Aktiivisessa tehosuotimessa käytetään IGBT puolijohdekytkimiä, joilla saavutetaan suuri kytkentätaajuus ja pienet kytkentähäviöt. [36]

Aktiivista tehosuodinta voidaan ohjata samaan tapaan kuin edellä mainittuja SVC:tä ja STATCOM:a, eli joko käyttämällä stationääristä tai synkronista koordinaatistoa. Kun ollaan stationäärikoordinaatistossa, puhutaan säätöjärjestelmästä, jonka toiminta perustuu hetkelliseen mitattuun tehoon. Lisäksi on olemassa muitakin säätöjärjestelmiä, joilla voidaan aktiivisia tehosuotimia ohjata. Kuvassa 18 on esitetty millaista virtaa aktiivinen tehosuodin syöttää verkkoon, kun kuormana on jo aikaisemmin esillä ollut yksivaiheinen diodisilta. [36]



Kuva 18. Aktiivisuotimen injektoima virta verkkoon [36]

Aktiivisen tehosuotimen etuna passiiviseen kompensointiin nähden on, että aktiivi tehosuodin ei synnytä resonanssipiiriä verkon induktanssin kanssa. Lisäksi aktiivi tehosuotimella saavutetaan nopea säätö ja voidaan ehkäistä harmonisia yliaaltoja tehokkaasti verkosta. Aktiivi tehosuodin on kaiken lisäksi kustannustehokas ratkaisu matala- ja keskijänniteverkoilla, mutta jännitteiden kasvaessa on passiiviset suotimet selkeästi halvempia.

5. KOMPENSOITAVA LAITTEISTO

Telakka-alueella on investoitu uusiin laitteisiin viime vuosina, jolloin myös sähkön laadusta tulee pitää huolta, jotta laitteet eivät vain tästä syystä vaurioidu. Lisäksi Turku Energia on aikomassa alkaa laskuttaa telakkaa loistehosta, jota telakalla eri laitteet kulluttavat. Tässä kappaleessa tutustutaan muuntamoon, jonne kompensointilaitteistoja ollaan päivittämässä. Lisäksi pohditaan millaisia kuormia kyseinen muuntamo syöttää, jotta voidaan suunnitella kompensointilaitte siten, ettei kompensointilaitte ja verkko muodosta resonanssiipiiriä. Kappaleessa tutustutaan myös pintapuolisesti telakan keskijänniteverkkoon, josta myös muuntamo, jonne kompensoinnin uusimista ollaan suunnittelemassa, saa syöttönsä. Lopuksi käydään läpi sähkön laadusta tehtyjä mittauksia, joita on saatu kyseisestä muuntamosta.

5.1 Muuntamon rakenne

Telakan sähköverkko on kuvattu liitteessä A, joka on päivitetty 30.11.2015 Kaj Söderlundin toimesta, jossa näkyy koko telakka-alue ja keskijännite verkon kaikki muuntajat. Kuten liitteestä voidaan nähdä, on telakalla säteittäinen sähköverkko, jota syötetään yhdellä 110 kV:n syötöllä. 63KL1:seen tulee Turku Energialta 110 kV:n syöttö, joka muunnetaan kahdella telakan päämuuntajalla 20 kV:n keskijännitteeksi. Molempien muuntajien koko on 16 MVA. Päämuuntaja 1 syöttää telakan levyhallia ja alihankkijakylää. Päämuuntaja 2 syöttää rakennusaltaan lähistöllä olevia muuntajia ja tämän lisäksi maalaushalleja. Verkko on yhdistetty siten, että yhdellä muuntajalla voi syöttää koko telakalle sähkön esimerkiksi muuntamon huollon aikana.

Muuntamo, jonne kompensointia ollaan lisäämässä, on liitteessä A näkyvä 14KL1, joka on päämuuntajan 2 perässä. Muuntamosta 14KL1 löytyy kaksi alennusmuuntajaa, joilla 20 kV:n jännite muunnetaan 6 kV:ksi. Liitteessä B on esitetty muuntamosta syötettävät kuormat ja suunnitelma, millä tavoin tullaan allaspumppuja uusimaan. Liitteestä voidaan havaita nämä kaksi päämuuntajaa. Molempien muuntajien koko on 3150 kVA ja muuntajat syöttävät kahta erillistä virtakiskoa. Virtakiskot voidaan yhdistää toisiinsa kiskojen välissä olevien erottimien avulla, jolloin muuntajat syöttävät yhteissyötöllä molempia kiskoja tai yksittäinen muuntaja voi syöttää kaikkia muuntamosta syötettäviä kuormia. Lisäksi on mahdollista, että virtakiskot erotetaan toisistaan, jolloin muuntajat syöttävät omia kuormiaan.

Nykyinen kompensointi on toteutettu yhdellä kondensaattoriparistolla, joka on sijoitettu muuntamon virtakiskojen väliin. Kondensaattoripariston loisteho on noin 70 *kVA*:a, joka ei riitä kompensoimaan loistehoa, kun allaspumppujen avulla tyhjenetään rakennusallasta eikä se myöskään riitä kompensoimaan nosturien loistehon tarvetta, kun nostureita ajetaan. Lisäksi, mikäli halutaan virtakiskoja syöttää erikseen kahdella muuntajalla, voidaan kompensointi liittää vain toisen muuntajan virtakiskoon. Nykyinen kondensaattoriparisto sisältää tällä hetkellä ympäristölle vaarallista PCB:tä.

Liitteestä B voidaan havaita kaksi pientä ympyrää, joiden vieressä on numero 3. Nämä kuvaavat muuntamossa olevia virtamuuntajia, joiden avulla voidaan mitata kuormien virtoja. Liitteestä B voidaan havaita, että virtamuuntajia on kaksi joka lähdölle. Toisella mitataan ylivirtaa ja toisella mitataan virtaa esimerkiksi energianmittausta varten, mikäli kyseiselle sovellukselle olisi tarvetta. Lisäksi muuntamosta löytyy jännitemuuntaja, jolla voidaan mitata jännitettä kytkentäpisteessä. Jännitemuuntajasta löytyy myös avokolmioon kytketty jännitemuuntaja, jolla saadaan selville epäsymmetrisyydet verkossa. Jännitteen mittausta tarvitaan myös edellä esillä olleessa energian mittauksessa ja näiden mittamuuntajien avulla saatiin myös mittaustuloksia kyseisestä muuntajasta.

5.2 Muuntamon kuormat

Muuntamo syöttää altaantyhjennyspumppuja sekä nostureita. Nostureiden kuormitus sisältää nosto- ja siirtomootorit sekä nosturin hytin lämmityksen ja valaistuksen. Lämmityksen ja valaistuksen osuus nosturin kokonaistehonkulutuksesta on kuitenkin olemattoman pieni. Pääasiassa muuntamo syöttää siis moottorikuormia. Nosturisyoittöjä muuntamosta lähtee tällä hetkellä neljä, kahdelle nivelpuominosturille ja kahdelle pukkinosturille. Nivelpuominostureiden näennäistehot ovat 800 *kVA*, pukkinostureiden näennäistehot 2000 *kVA* ja näiden lisäksi on suunnitteilla, että muuntamosta lähtee syöttö uudelle nivelpuominosturille, jonka näennäisteho tulisi olemaan 500 *kVA*. Liitteestä B voidaan havaita että muuntamo syöttää tällä hetkellä altaan pohjalle olevia 1 *MW*:n pumppuja, mutta tulevaisuudessa pumpput korvataan neljällä 400 *kW*:n altaantyhjennyspumppulla. Tässä kappaleessa tutustutaan hieman tarkemmin, minkä tyyppisiä kuormia nämä edellä mainitut ovat ja millaisia haasteita ne aiheuttavat sähköverkolle.

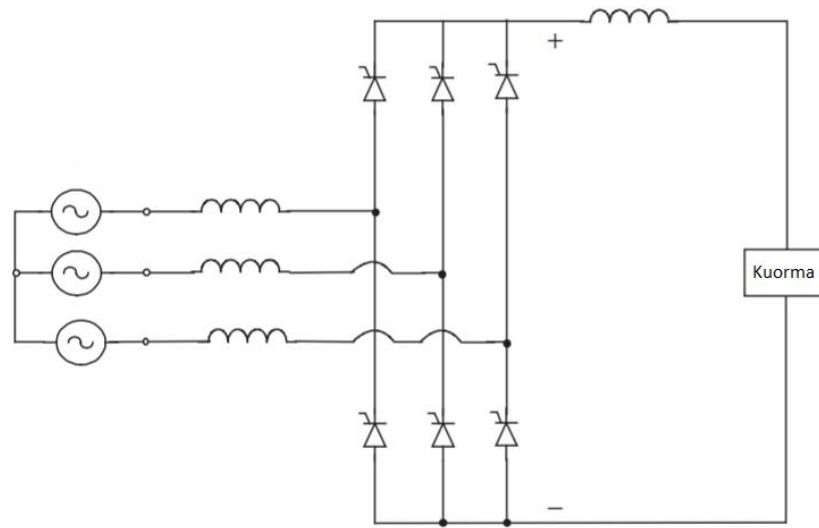
5.2.1 Nosturit

Muuntamo, jonne kompensointia ollaan suunnittelemassa, syöttää sähköä kahden tyyppisille nostureille, nivelpuominostureille ja pukkinostureille. Pukkinosturin tehtävänä telakalla on siirtää painavia lohkoja laivaan, joista koko laivan runko koostuu. Telakalla on kaksi pukkinosturia, joista toisen nostokyky on 600 tonnia ja juuri rakennetun uuden nosturin nostokapasiteetti on 1200 tonnia. Lohkot ovat usein varusteltuja jo valmiiksi, kun ne nostetaan laivaan, mutta silti laivassa riittää töitä, jotta saadaan kaikki lohkorajat

liitettyä toisiinsa ja muutoinkin varustelulla riittää työtä, jotta laivaan saadaan kaikki asiakkaan toivomat elementit. Kun runkoon tuodaan tavaraa, ei tavaraa viedä käsin, vaan altaan vieressä olevat nivelpuominosturit siirtävät kaiken tarvittavan laivaan. Telakalta löytyy myös muun tyyppisiä nostureita, kuin vain nivelpuominostureita, mutta kyseisestä muuntajasta ei lähde syöttöä muille nostureille. Telakan nivelpuominostureiden nostokapasiteetit molemmilla nostureilla on 50 tonnia. Näiden kahden nivelpuominosturin lisäksi suunnitteilla on, että muuntamoon lisätään kolmas nivelpuominosturi, jonka nostokyky olisi 25 tonnia.

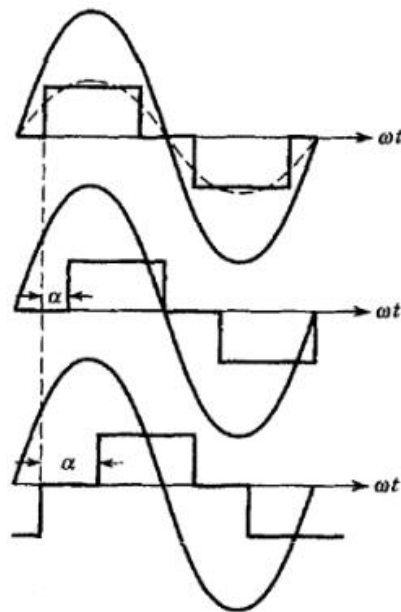
Nivelpuominosturit ovat keskenään identtiset ja kyseiset nosturit on modernisoitu samaan aikaan. Nosturit sisältävät kahta erilaista sähkömoottorin ohjausjärjestelmää. Toinen on tyristorikäyttö, jolla ohjataan DC-moottoria ja toinen on taajuusmuuttaja, jolla ohjataan muuttuvanopeuksista vaihtosähkömoottoria. 6-pulssista tyristorisiltaa käytetään nosturin apu- ja päänostossa ja kaikki muut nosturin liikkeet on toteutettu taajuusmuuttajalla, jonka tasasuuntauspuoli on toteutettu kolmivaiheisella diodisillalla. 6-pulssista tyristorisiltaa on käytetty myös vanhan 600 tonnin pukkinosturin kaikissa liikkeissä, eli kun tätä nosturia ajetaan, vaikuttaa se samalla tavalla verkkoon kuin ajettaisiin nivelpuominosturien nosto liikettä. Tosin tulee muistaa, että pukkinosturilla kuormat ovat huomattavasti suurempia, joten pukkinosturin käyttö vaikuttaa verkkoon enemmän, vaikka kuormat ovat samantyyppisiä. Uudessa 1200 T:n pukkinosturissa on käytetty yhtä IGBT-tasasuuntaussiltaa, joka syöttää sähköä eri liikkeiden vaihtosuuntaajille, sekä moottoria jarrutettaessa syöttää energiaa takaisin verkkoon.

Tyristorisilta pystyy muuttamaan DC-moottorin nopeutta muuttamalla DC-moottorin ankkurijännitettä. Tyristorisilta pystyy tähän muuttamalla sillassa olevien tyristorien sytytyskulmaa, eli asettamalla tyristori johtavaan tilaan. Tyristorisiltaa voidaan ohjata tässä sovelluksessa 0° :sta aina 180° :seen. Kun ohjaus on 0° :tta syöttää tyristorisilta maksimi jännitteen tasasähköpiirille, sytytyskulman ollessa 90° :tta on tasasähköpiirin jännite 0 V :a ja sytytyskulman ollessa 180° :tta antaa tyristorisilta tasajännite puolella suurimman mahdollisen negatiivisen jännitteen, jolloin moottori pyörii vastakkaiseen suuntaan kuin 0° :teen tapauksessa. Kuvassa 19 on esitetty tyristorisilta ja tässä tapauksessa voidaan kuvitella kuorman paikalle moottori. Lisäksi kuvaan tulee ajatella jokaisen tyristorin paikalle kaksi vastarinnan kytkettyä tyristoria, jotta moottoria voidaan ajaa neljässä kvadrantissa. [37]



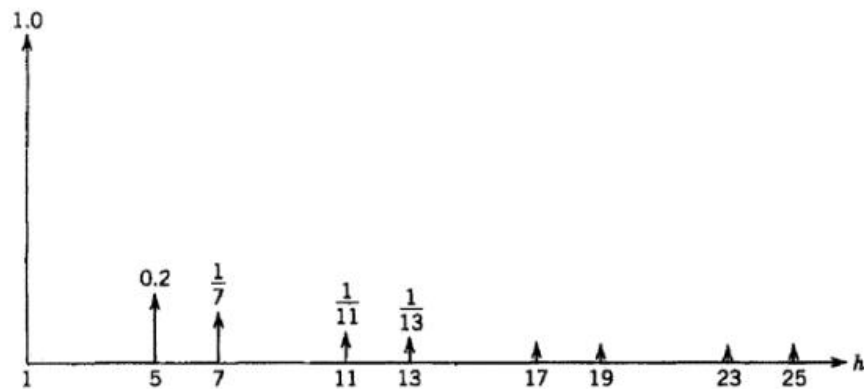
Kuva 19. *Tyristorisilta [11]*

Kuvassa nähtävä tyristorisilta pystyy muuttamaan kuorman yli olevaa jännitettä muuttamalla tyristorien sytytyskulmaa. Tyristorisilta tosin on epälineaarinen kuorma, kun mietitään sähköverkon kannalta ja näin aiheuttaa verkolle harmonisia yliaaltoja. Mikäli oletetaan, että kuorma on voimakkaasti induktiivinen, kuten DC-moottori on, voidaan ajatella, että kuormaa ottaa tasasuuntaajalta vakiovirtaa. Näin ollen tasasuuntaaja ottaa verkosta kantiaalto muotoisen virran. Kuvassa 20 on esitetty virran käyttäytyminen, kun tyristorien sytytyskulma on ylemmässä $\alpha=0^\circ$, keskimmaisessä $\alpha=30^\circ$ ja alimmassa $\alpha=60^\circ$ [37]



Kuva 20. *Jännite ja verkkovirran kuvaajat tyristorisillalla [37]*

Kuvassa on esitetty kolmivaiheisen verkon yhden vaiheen jännite ja -virta. Kanttiaalto kuvaa virran käyttäytymistä ja lisäksi ylempään kuvaan on lisätty katkoviiva, joka kuvaa perustaajuista virran komponenttia. Tämä tarkoittaa sitä, että verkkovirrassa esiintyy Fourierin -sarjakehitelmään mukaan parittomia yliaaltoja, mutta kaikki kolmella jaolliset yliaallot suodattuvat virrasta pois. Erityisesti 5. ja 7. yliaalto olisi hyvä saada suodatettua verkosta, jotta jännite ei säröytyisi. Kuvassa 21 on esitetty Fourier-sarjan virran harmonisten komponenttien amplitudit, joita muodostuu, kun tyristoritasasuuntaaja on kytkettynä verkkoon. [37]



Kuva 21. Kolmivaiheisen tyristorisillan virran Fourier-sarja [37]

Fourier-sarjasta voidaan havaita, että kolmivaiheinen tyristorisilta syöttää verkkoon viidettä, seitsemättä, yhdeksättä ja kolmättätoista yliaaltoja. Näiden häirtävaikutusten lisäksi tulee huomioda, että tyristorisilta tuottaa aina, kun tyristori liipaistaan, jännitekuopan ja näitä jännitekuoppia syntyy jännitejakson aikana 6. Lisäksi tulee huomioda tehokulma, jonka tyristorisilta tuottaa, mikäli tyristorien sytytyskulma on erisuuri kuin nolla. Tehokulman voi laskea suoraan tyristorin sytytyskulmasta kaavan (17) avulla. [37]

$$\cos \phi = \cos \alpha \quad (17)$$

Joten tyristorisilta alkaa tuottaa loistehoa sytytyskulman ollessa suurempi kuin 90° :ta. Vastaavasti sytytyskulman ollessa alle 90° :ta kuluttaa silta loistehoa. [37]

Taajuusmuuttaja tapauksessa, jossa on diodisilta, mistä muuttaja ottaa välipiirille jännitteen, toimii diodisilta samalla tavalla kuin tyristorisillan sytytyskulman ollessa 0° :tta. Tällöin tulee huomioda, että verkkoon syntyy samoja virran ja jännitteen harmonisia yliaaltoja, vaikka nykyaikaiset taajuusmuuttajat sisältävätkin suotimia, joilla voidaan hieman suodattaa virran harmonisia yliaaltoja. Taajuusmuuttajat, joita muuntamon syötoissä esiintyy, on samaan tapaan 6-pulssisia kuin tyristorisillojen tapauksessa. Tosin diodisillan ollessa kytkettynä verkkoon ei synny ollenkaan loistehoa eli tehokerroin

$\cos \phi = 1$. Diodisiltaa käytettäessä luomaan välipiiri tulee huomioida, että välipiirille lisätään jarruvastus, jotta moottoreita voidaan myös hidastaa.

Uudessa nosturissa on IGBT-tasasuuntaussilta, joka pystyy ohjauspiirin ansiosta ohjaamaan IGBT-kytkimiä siten, että harmonisia yliaalloja ei synny kytkentätaajuuden alapuolelle eikä loistehoa synny. Kun tasasuuntaus on toteutettu kyseisellä tavalla, välipiirin ei tarvitse lisätä jarruvastusta, vaan IGBT-silta syöttää verkkoon jarrutusenergiaa, mikä syntyy, kun moottoreita joudutaan jarruttamaan. Kytkentätaajuuden yläpuolella harmoniset yliaallot ovat IGBT-sillan tapauksessa suodatettu passiivisella suotimella, jolla saadaan nämä korkeataajuiset harmoniset yliaallot suodatettua. Yksi tapa ratkaista sähkön laatu -ongelmat olisi vaihtaa kaikki tyristori- ja diodisillat IGBT-silloiksi, mutta tämä olisi erittäin kallis vaihtoehto verrattuna keskitettyyn kompensointilaitteistoon.

Nostureita käytetään päivittäin telakka-alueella laivan rakennuksen apuvälineenä. Nostureita ajetaan siis jatkuvasti, mutta liikkeet voivat kestää muutamasta sekunnista aina useisiin minuutteihin saakka, joka aiheuttaa kompensointilaitetta suunniteltaessa ongelmia. Loistehon arvo muuttuu kokoajan riippuen siitä kuinka paljon nostureiden liikkeistä on samanaikaisesti päällä ja harmoniset yliaallojen arvot muuttuvat siinä samalla. Telakalla on toki riittävän vahva verkko pitämään jännite vakiona kytkentäpisteessä, vaikka nostureita ajettaisiin kuinka paljon, joten tästä syystä ei kompensointilaitteistoa välttämättä tarvitsisi lisätä.

5.2.2 Allaspumput

Laivan rungon ollessa riittävän valmis päästetään rakennusallas täyteen vettä, jolloin laiva alkaa kellua veden päällä. Rakennusaltan ollessa täynnä vettä, siirretään laivan edestä portti pois, jonka jälkeen laiva voidaan siirtää varustelulaituriin, jossa laiva varustellaan loppuun. Näitä altaantyhjennyspumppuja voidaan syöttää samalla muuntajalla kuin kaikkia muitakin kuormia tai pumppuja voidaan syöttää erikseen muuntajalla, joka syöttää uutta pukkinosturia (Liite B). Laivoja valmistuu noin 2-3 vuodessa, jolloin myös altaan pumppaaminen toteutetaan 2-3 kertaa vuodessa. Varustelun jälkeen ajetaan laivalla vielä merikoeajo, jonka jälkeen laiva on valmis luovutettavaksi loppuasiakkaalle. Kun laiva on varustelu laiturissa, täytyy allas tyhjentää, jotta päästään rakentamaan seuraavaa laivaa. Tästä syystä rakennusaltan vierellä on pumput, jolla voidaan allas tyhjentää. Pumppuina toimi ennen kaksi 1 MW:n moottoria, mutta nyt vanhat moottorit ollaan korvaamassa neljällä 400 kW:n oikosulkumoottorilla, jotka laskennallisesti pystyvät tyhjentämään altaan samalla nopeudella, kuin vanhat 1 MW:n moottorit, eli noin 10 h:ssa.

Telakalla allaspumput on kytketty suoraan verkkoon, kuten voidaan liitteestä B nähdä. Tästä syystä pumppujen käynnistäminen voi aiheuttaa ongelmia verkolle, sillä oikosul-

kumoottorit ottavat käynnistyessään 4-7 kertaisen virran nimellisvirtaan nähden. Lisäksi oikosulkumoottorit kuluttavat loistehoa, jota kuluu roottorin magnetointiin. Yksittäinen uusi pumppu tuottaa loistehoa noin 360 *kVAr* datalehden mukaan, jolloin kaikkien neljän pumpun toimiessa nimellisissä olosuhteissa kuluttaa pumppaamo noin 1440 *kVAr*:a. Käynnistysvaiheessa yksittäinen pumppu kuluttaa noin 2.5 *MVAr*, joten kaikkia pumppuja ei voida käynnistää yhtä aikaa, sillä kahden syöttömuuntajan yhteisteho on vain 6.30 *MVA*. Uusia moottoreita ei ole vielä mitattu, sillä pumppuja ei ole vielä muuntaamoon asennettu. Elomatic rakensi kyseisistä pumppukäynnistyksistä simulointimallin, jonka tuloksia on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Simulointimallin tulokset allaspumppaamon muuntamosta

| Kuormitus | Näennäisteho (<i>MVA</i>) | Toisiojännite (<i>kV</i>) | U/Un(%) |
|--|-----------------------------|-----------------------------|---------|
| 1. Vain 1200t nosturin valaistus | 0.33 | 6.1 | 101 |
| 2. Neljä pumppua käynnissä + 1200t nosturivalaistus | 2.65 | 5.8 | 97 |
| 3. Neljä pumppua käynnissä + 1200t nosturivalaistus + Loistehon kompensointia 1200kVAr | 2.09 | 6.0 | 100 |
| 4. Pumppaus (3 pumppua päällä) + 1200t nosturivalaistus + neljäs pumppu käynnistyy | 4.27 | 5.5 | 91 |

Taulukossa U/Un(%) tarkoittaa simuloidun jännitteen suhdetta nimelliseen jännitteeseen. Simulointitulosten perusteella käynnistystilanteessa jännitteen alenema on 9 %. Standardissa mainitaan, että jännite saa pudota 10 % hetkellisesti, joten pumpun käynnistys ei standardin puolesta aiheuta ongelmaa[5]. Käyttöjännite romahtaisi vielä enemmän, mikäli jotakin nosturia ajetaan samalla, kun pumppuja käynnistellään. Käyttäjät ovat hoitaneet asian yhteisesti sopimalla, ettei nostureita ajeta samaan aikaan, kun pumppuja ajetaan ylös.

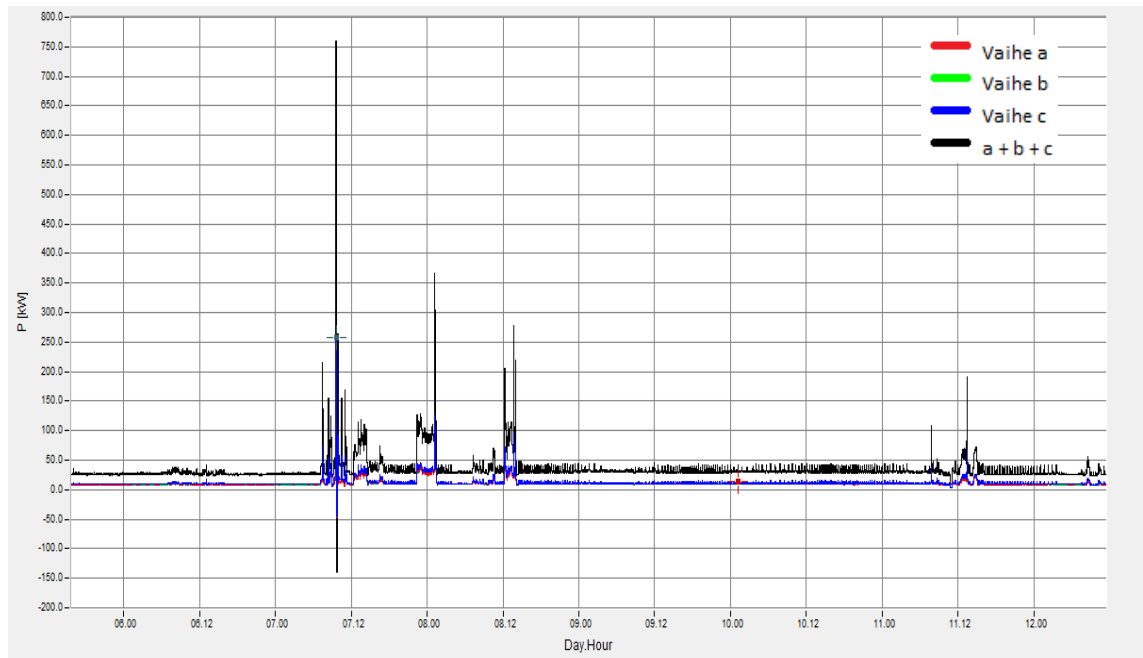
Harmonisia yliaaltoja kolmivaiheinen oikosulkumoottori ei tuota, sillä kuorma on melko lineaarinen ja symmetrinen. Ainostaan magnetoitumisen saturointi voi aiheuttaa suuritaajuisia harmonisia yliaaltoja, joka saattaa aiheuttaa esimerkiksi jännitteen huipun leikkaantumisen. Magnetoitumisen saturoinnilla tarkoitetaan tilannetta, jossa materiaali on niin magnetoitunut, ettei se pysty magnetoitumaan enempää ja tällöin energiaa ei siirry materiaaliin. Saturointia ei tapahdu vanhoilla pumpuilla, joten voidaan melko varmasti olettaa, ettei uusillakaan pumpuilla saturoitumista tapahdu.

5.3 Mittaustulokset

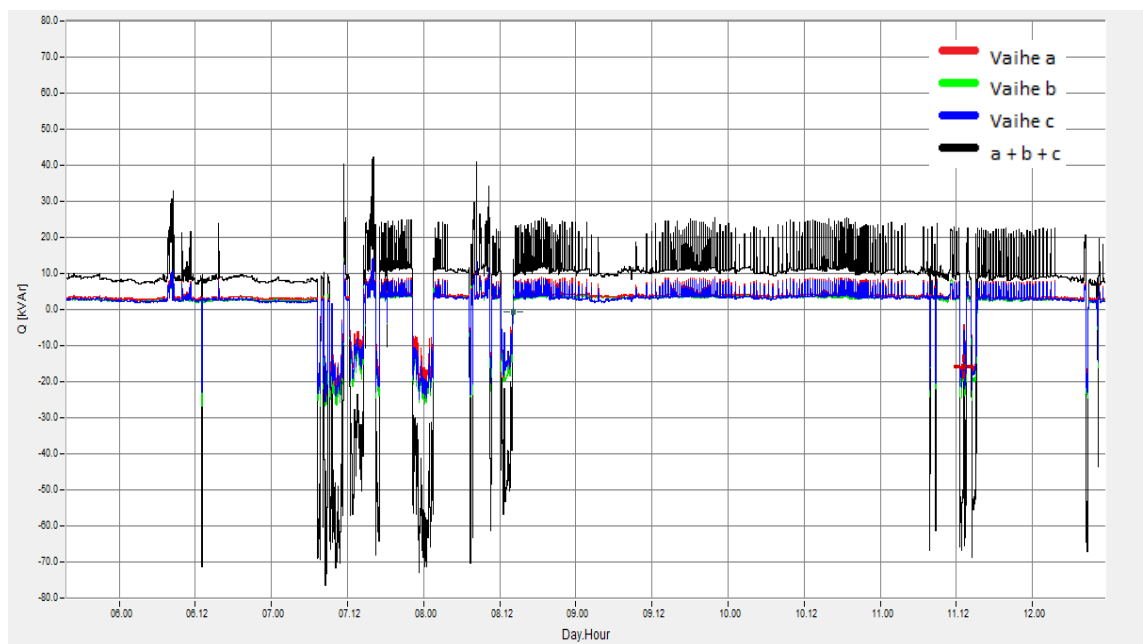
Sähkön laatu on mitattu pisteessä, jonne kompensointia ollaan lisäämässä, jotta voidaan varmistua, että tuleva laitteisto pystyy kompensoimaan riittävän määrän loistehoa ja harmonisten yliaaltojen vaikutus saataisiin minimoitua. Turun telakalla allaspumppaamon muuntamoon tehtiin sähkön laadun mittauksia 5.6.2018 – 12.6.2018 GE:n toimesta. Mittauksissa pyrittiin mittaamaan verkon jännitteiden suuruuksia ja jännitesäröjä 20 kV:n ja 6 kV:n puolelta. Lisäksi tarkoituksena oli mitata molempien muuntajien läpi kulkevaa virtaa, josta voidaan laskea muuntamon pätö- ja loistehon kulutus. Näin voidaan päätellä, kuinka paljon kyseinen muuntaja kuluttaa loistehoa ja kuinka suuri tarve on jännitteen reguloinnille, jotta saadaan kytkentäpisteessä jännite pysymään haluttuna.

Mittaukset muuntamossa suoritettiin kahdella mittarilla, joista mittari 1 oli kytketty ennen T3 muuntajaa olevaan virtamuuntajaan ja mittari 2 ennen T4 olevaa virtamuuntajaan. (Liite B) Mittarin 2 jännite mittausta oli kytketty 20 kV:n puolelle ja mittari 1 mittasi jännitettä 6 kV:n puolelta. Näin saatiin mitattua molempien puolien jännitesärö ja perustaaajuisen amplitudin vaihtelu. Mittauksissa tuli ottaa myös huomioon, että T4:n avulla oli rakennettu väliaikaissyöttö uudelle pukkinosturille, eli tämä muuntaja syötti vain uutta pukkinosturia. T3 muuntaja syötti kaikkia muita nostureita, joiden syöttö kyseisestä muuntamosta tulee. Näiden lisäksi T3 muuntaja syötti yhden yön 1 MW:n pumppuja, jolloin mittauksista nähtiin pumppujen vaikutus sähköverkkoon. Uusien 400 kW:n pumppujen vaikutusta verkkoon ei vielä voida mitata, sillä näiden pumppujen asennustyöt ovat alkaneet vasta mittauksien jälkeen.

Mittarin 2 tuloksista näkyy uuden pukkinosturin tarvitsema pätö- ja loistehon määrä, kun nosturia kuormitetaan. Pätötehoa nosturi ottaa noin 25 kW, joka kuluu lähinnä uuden pukkinosturin valaistuksen ylläpitämiseen. Liikuteltaessa nosturia, nousee pätötehon arvo hetkellisesti jopa 750 kW:iin ja tämän lisäksi muita pätöteho piikkejä voidaan kuvasta 22 nähdä. Pätötehopiikit riippuvat nosturilla nostettavan kuorman suuruudesta, sekä kuinka nopeasti nosturia ajetaan. Kuvasta 23 voidaan havaita, että muuntajan T4 verkosta ottama loisteho vaihtelee +40 ja -70 kVAr:n välillä. Loistehon tuotanto johtuu todennäköisesti nosturin aktiivisesta verkkosillasta, joka syöttää energiaa verkkoon päin nosturin välipiirin jännitteen noustessa esimerkiksi silloin, kun kuormaa lasketaan. Tämän lisäksi loistehoa tuottaa verkkoon muuntajien ja kuristimien tyhjäkäyntihäviöt.



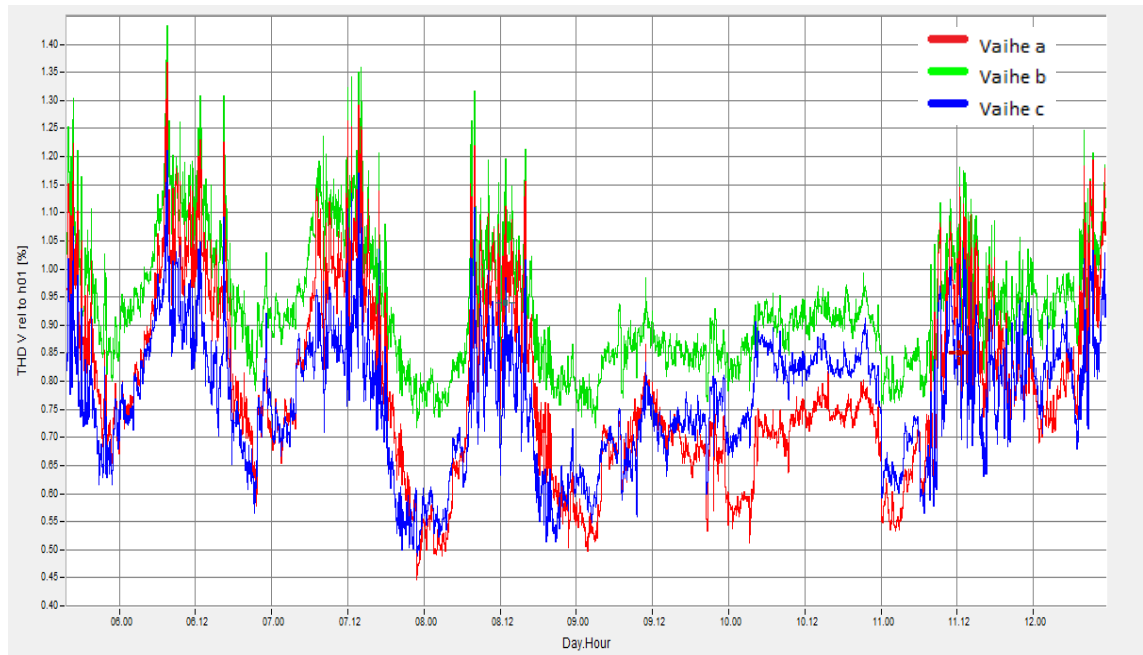
Kuva 22. Muuntajan T4 ottama pätöteho



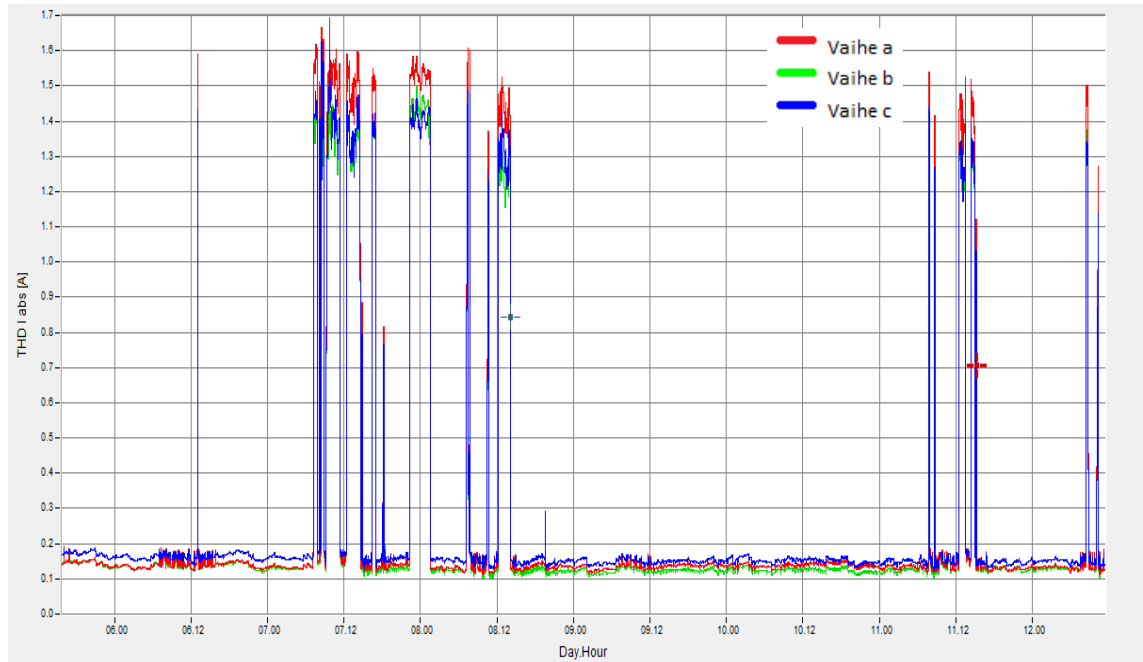
Kuva 23. Muuntajan T4 ottama loisteho

Samaisella mittarilla voitiin mitata myös keskijänniteverkon jännitesäro, sekä jännitteen tehollisarvon muutokset. Jännitteen tehollisarvo vaihteli mittausten aikana 20.28 kV :n ja 20.68 kV :n välillä, joten jännite pysyi hyvin standardissa määritellyissä rajoissa. Kuvassa 24 on esitetty keskijänniteverkon THD, joka on keskiarvoltaan noin 1 %. Tämäkin arvo vaikuttaa erittäin hyvältä verkon kannalta ja asettuu hyvin standardin rajojen sisälle. Lisäksi kuvassa 25 on esitetty virran THD arvo, joka maksimissaan on noin 1.6 % ja tästäkin voidaan sanoa, että sähkön laadullisesti ei ole ongelmia. Uusi pukkinosturi ku-

luttaa/tuottaa niin vähän loistehoa ja säröä verkolle, että kompensointia ei kannata tämän koneen takia hankkia.



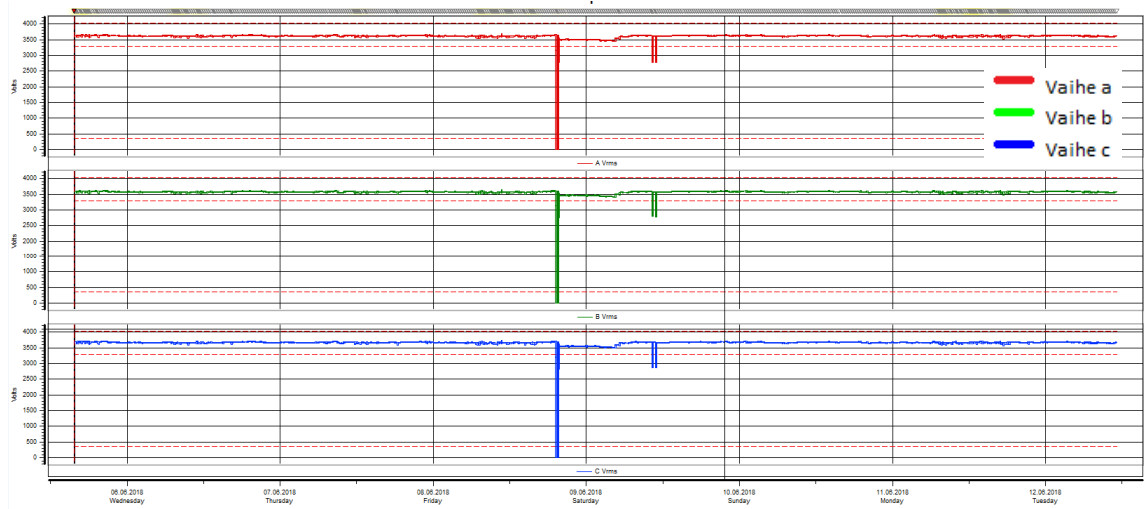
Kuva 24. 20 kV:n verkon jännitteen THD



Kuva 25. Uuden pukkinosturin tuottama virran THD

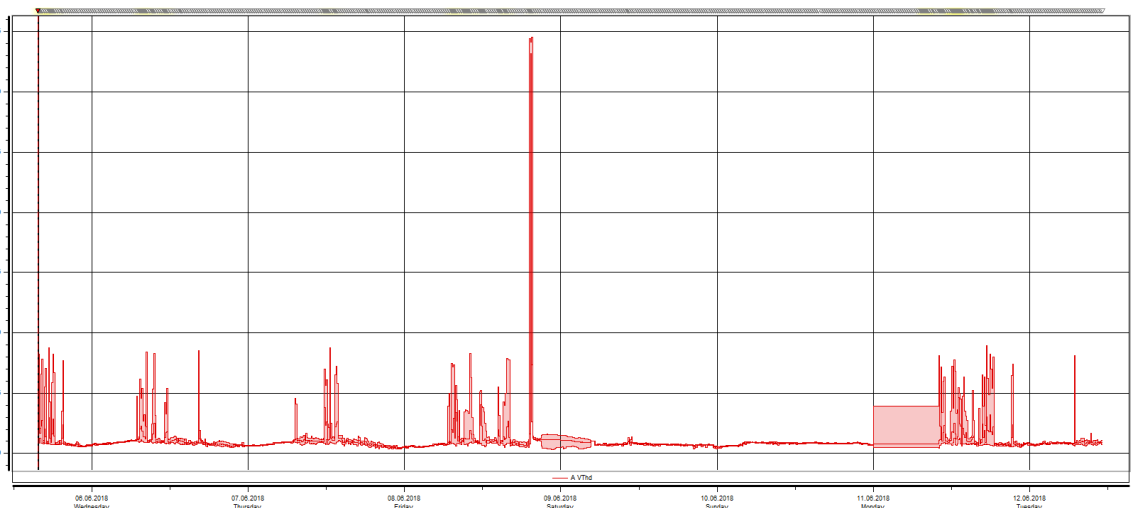
Mittarilla 1 mitattiin muiden kuormien, eli kahden nivelpuominosturin, vanhan pukkinosturin ja kahden allaspumpun, yhteisvirtaa ja 6 kV:n verkon jännitettä. Edellä esitetty pukkinosturi ei juurikaan vaikuttanut toisella mittarilla tehtyyn mittaukseen,

sillä jännite 20 kV:n puolella pysyi jännite erittäin vakaana mittarilla 2 mitattuna. Kuvassa 26 on esitetty vaihejännitteet, jotka ovat mitattu mittarin 1 avulla.



Kuva 26. 6 kV:n verkon vaihejännitteiden tehollisarvot

Kuvasta voidaan havaita suuri jännitealenema, jolloin jännite putoaa lähelle nollaa. Tämä johtuu allaspumpun epäonnistuneesta käynnistämisestä. Lisäksi kuvaajista voidaan havaita kaksi pienempää notkahdusta, jotka johtuvat allaspumppujen onnistuneista käynnistys tapahtumista. Muutoin jännite pysyy hyvin halutussa arvossa, mutta kompensoinnin avulla voitaisiin rajoittaa tuota jännitealenemaa. Pääsyyinä toki kompensoinnille on loistehomaksujen välttäminen. Lisäksi mittarilla on saatu mitattua 6 kV:n verkon jännitesärö, joka on esitetty kuvassa 27.

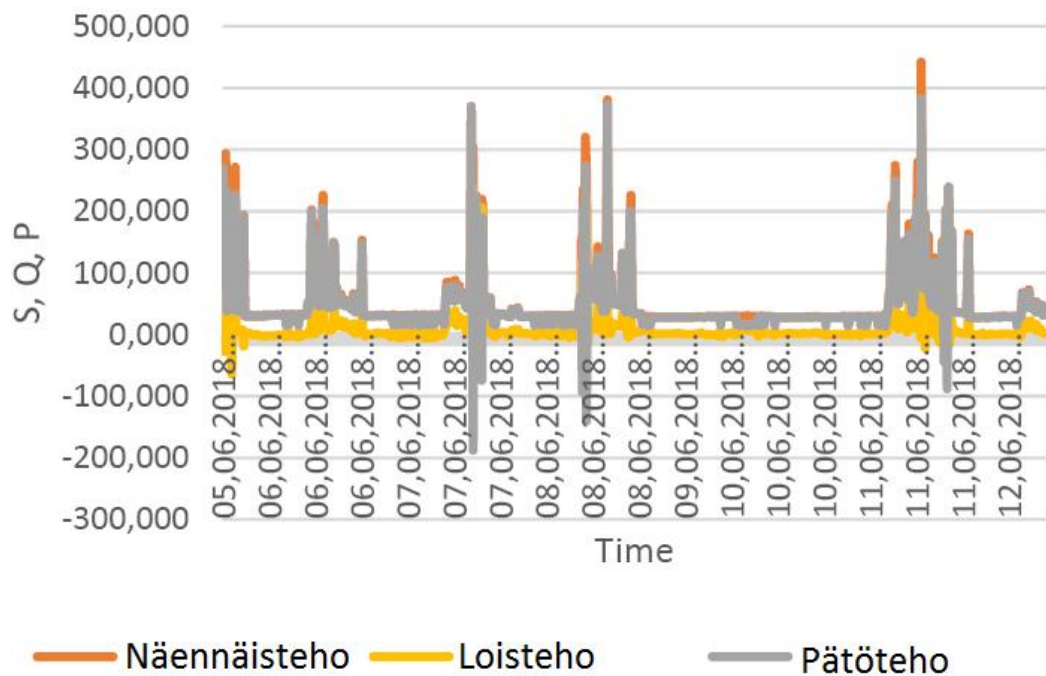


Kuva 27. 6 kV:n verkon jännitteen THD

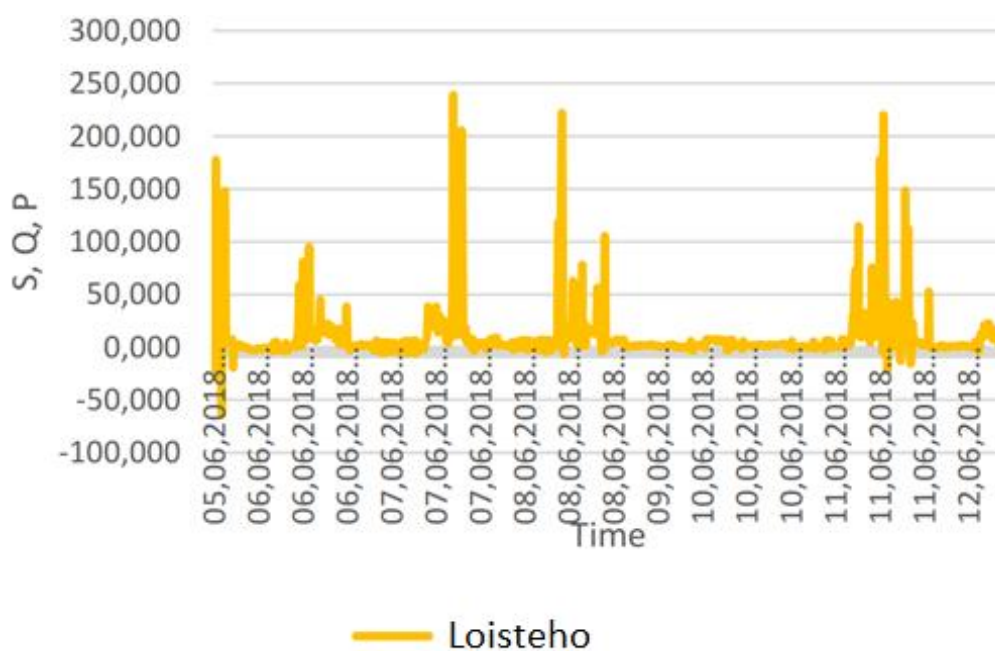
Kuvasta voidaan havaita, että jännitteen THD on 8 %:in luokkaa, joka alkaa olla siinä rajalla, että standardi laatu ylittyy. Tästä syystä tulisi pohtia tapaa, jolla saataisiin jännitesärö minimoitua. Kuvaajasta voidaan havaita jälleen suuri piikki samaan tapaan kuin

jännitteiden tehollisarvo mittauksessa, joka johtuu epäonnistuneesta pumpun käynnistyksestä. Lisäksi voidaan havaita, että pumput eivät itsessään aiheuta jännitteen säröytymistä, sillä pumppujen ollessa käynnissä oli jännitteen THD alimmillaan.

Jännitesärön lisäksi, jonka nosturit saavat aikaan, kuluttavat nosturit pätö- ja loistehoa. Kuvassa 28 on esitetty pätö- ja loistehon lisäksi näennäisteho, jonka kuorma aiheuttaa. Loisteho mittaukset ovat esitetty omassa kuvassa 29 selkeyden vuoksi. Lois- ja pätötehon suhdetta laskettaessa mittarilla tuli ottaa huomioon muuntajan kellolukema, sillä virtamittaus tehtiin 20 kV:n puolelta ja jännitemittaus 6 kV:n puolelta. Muuntajan kellolukema oli 11, joten vaihesiirtoa piti kääntää 30^o:tta. Tämän lisäksi virta tuli redusoida 6 kV:n puolelle, jotta päästään oikeisiin tuloksiin.

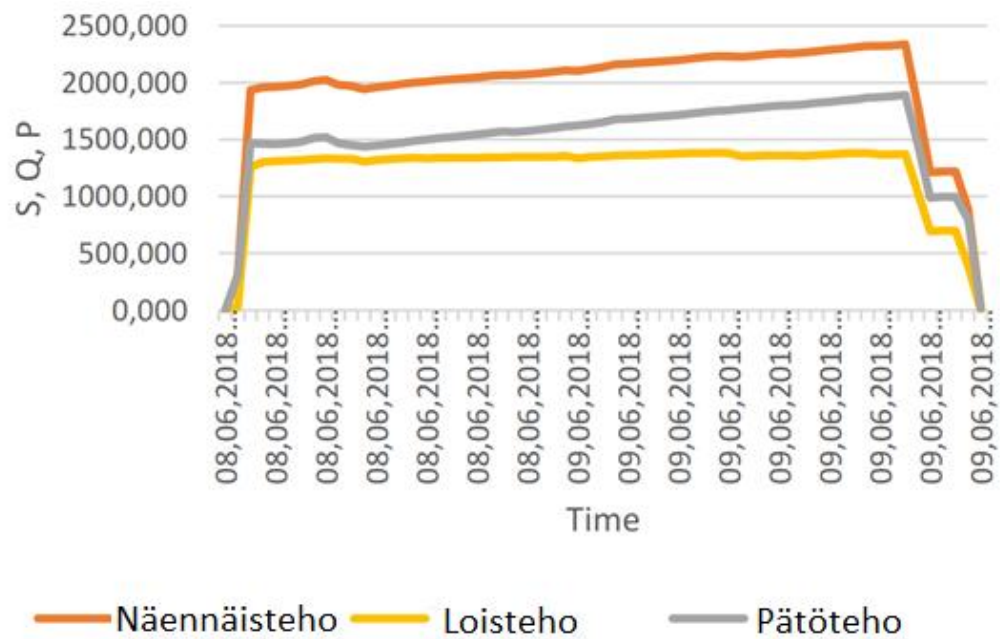


Kuva 28. Nosturien aiheuttama näennäis-, pätö- ja loisteho



Kuva 29. Nosturien aiheuttama loisteho

Kuvasta voidaan havaita, että mittausjaksolla maksimi loistehon arvo on noin 250 $kVAr$:a. Muuntamoon oli kytkettynä vielä 70 $kVAr$:n kondensaattoriparisto, jolloin nosturit kuluttavat maksimissaan 320 $kVAr$ loistehoa. Lisäksi kuvaajasta tulee huomioida pitkä 0 $kVAr$ alue, sillä siinä kohdassa pumput ovat olleet päällä ja näiden loistehon kulutus on poistettu kuvaajasta. Nostureita ei myöskään tuolla ajan jaksolla käytetty. Kuvasta voidaan päätellä, että loistehon kulutus vaihtelee hyvin voimakkaasti nosturikäytöllä, joten mahdollisesti olisi hyvä valita aktiivinen tehosuodin, jolla voitaisiin eliminoida tämä loisteho ja samalla suodattaa jännitteen ja virran harmonisia yliaaltoja. Harmoniset yliaallot voitaisiin kompensoida myös passiivisilla komponenteilla, mutta tällöin ei saataisi kaikkia harmonisia kompensoitua, eikä järjestelmän kaikkea loistehon tuotantoa/kulutusta saataisi kompensoitua. Lisäksi kuvassa 30 on esitetty pätö-, lois- ja näennäistehon kulutus, kun 1 MW :n pumput olivat käytössä.



Kuva 30. Pätö-, lois- ja näennäistehon kulutus altaan tyhjennyspumppujen ollessa päällä

Tästä loistehon mittauksesta saadaan hyvää osviittaa tulevaisuuteen, sillä uusien pumppujen tullessa loisteho datalehdessä on noin 360 kVAr per pumppu, jolloin pumpput kuluttavat yhteensä loistehoa noin $4 \cdot 360 \text{ kVAr} = 1440 \text{ kVAr}$. Näin ollen pumppujen kompensointi tarve on lähes sama kuin vanhoilla pumppuilla, kuten edellä olevasta kuvasta voidaan havaita. Pumppuja tulevaisuudessa on neljä kappaletta, jolloin olisi järkevää toteuttaa pumppujen kompensointi portaittain, sillä pumppauksen alkuvaiheessa käynnistetään pumpput yksitellen ja altaan tyhjetessä sammutetaan pumppuja yksitellen. Tämä johtaa tilanteeseen, jossa altaan ollessa lähes tyhjä on käytössä vain yksi pumppu, joka kuluttaa loistehoa vain 360 kVAr .

6. KUSTANNUKSET

Teollisuuslaitoksessa kustannukset pyritään minimoimaan, jolloin laitoksen on mahdollista tehdä liiketoiminnallaan mahdollisimman paljon voittoa. Investoinnit ovat tärkeässä osassa, jotta teollisuuslaitoksen tuottavuutta saadaan lisättyä. Lisäksi investointeja voidaan tehdä, jotta saataisiin minimoitua käyttökustannuksia. Näin saadaan toiminnasta mahdollisimman kustannustehokasta. Tässä kappaleessa tutustutaan sähköverkon kompensointilaitteiston kannattavuuteen, eli kuinka paljon voidaan kompensointilaitteistolla pienentää sähkölaskua. Sähkölaskun pienentyminen johtaa telakalla pienentyneisiin kustannuksiin, joka johtaa siihen, että investointi maksaa itsensä takaisin jollakin aikavälillä ja tämän jälkeen alkaa tuottaa voittoa pienentyneiden sähkönkäytön kustannusten muodossa.

6.1 Sähkönkäytön kustannukset

Sähkölasku voidaan jakaa kahteen eri osaan, eli pätö- ja loisteho kustannuksiin. Pätöteho sähköverkossa on työtä tekevää tehoa ja loisteho liikkuu verkossa edestakaisin. Pätötehoa voidaan siirtojohdoilla pienentää vain lisäämällä generaattoreita verkkoon. Tällaista saarekekäyttöä tässä työssä ei tarkastella, joten generaattorin lisäyksen kustannuksista ei puhuta tässä. Loistehoa voidaan kompensoida erilaisilla kompensointilaitteilla, jolloin voidaan minimoida loistehon kulutus, josta sähköverkkoyhtiöt perivät maksuja.

6.1.1 Pätöteho-kustannus

Suurien teollisuuslaitosten pätötehon laskutus voidaan toteuttaa sähköverkkoyhtiön puolelta kahdella eri tavalla. Ensimmäinen tapa on laskuttaa yritystä sähköenergian käytöstä, samaan tapaan kuin omakotitaloja. Käytännössä tarkoittaa sitä, että sähköverkkoyhtiö veloittaa kilowattituntimittarilta luettavan luvun mukaan ja tämä kerrotaan sähköverkkoyhtiön määräämällä kilowattituntihinnalla. Toinen tapa laskuttaa sähköstä on laskuttaa yritystä jokaisen kuun maksimi pätötehopiikistä, eli sähköverkkoyhtiö on määritellyt yhdelle kilowatille summan, jonka se veloittaa asiakkaaltaan pätötehopiikin mukaan. [38] Telakalla pätötehon osalta on käytössä tällä hetkellä ensimmäinen laskutus-tapa, jossa Turku Energia veloittaa telakkaa sähköenergian käytön mukaan.

6.1.2 Loistehokustannus

Loistehon veloitus sähköverkkoyhtiöille on uusi asia, sillä vasta viime vuosina Fingrid on alkanut laskuttaa loistehon kulutuksesta. Sähköverkkoyhtiöt ovat aloittaneet laskuttaa loistehosta suuria laitoksia, jotka kuluttavat huomattavia määriä loistehoa. Tällä pyritään ehkäisemään loistehon siirto siirtojohtoilla ja siirtämään vastuuta laitoksille, jotta ne huolehtisivat itse riittävästä loistehon tuotannosta. Turku Energialla on myös pohdittu, että se alkaisi laskuttaa telakkaa loistehosta, mutta ei vielä tähän ole ryhtynyt, joten tutkitaan loistehomaksuja Turku Energian julkaiseman palveluhinnaston mukaan. Palveluhinnastossa on loistehon hinnaksi määritelty 1.74 €/kVAr kuukaudessa. [38] Loistehoa laskutetaan samaan tapaan kuin pätötehoa, kun käytössä on maksimitehoon perustuva laskutus. Lisäksi loistehoa saa kuluttaa tietyn määrän ilman, että tästä koituu maksua sähköverkkoyhtiön asiakkaalle. Turku Energia on määritellyt tämän ilmaisen alueen siten, että loistehoa saa kuluttaa kuukauden suurimmasta pätötehon määrästä 20 %:a, eli suurimman pätötehon kulutuksen ollessa esimerkiksi 100 kW :a saa loistehoa kuluttaa 20 kVAr :a ilmaiseksi.

Muuntamon, jonne ollaan kompensointia lisäämässä, loistehon kulutus ympäri vuoden voidaan päätellä edellisen kappaleen mittaustuloksista. Tässä riittää jokaisen kuukauden maksimiloistehon määrä, josta voidaan päätellä yksittäisen kuukauden loistehomaksu. Lasketaan aluksi sellaisen kuukauden loistehomaksu, jolloin allaspumppuja ei käytetä. Vanhojen nostureiden maksimiloistehon määräksi arvioitiin mittaustulosten perusteella 320 kVAr :a. Tähän lukemaan tulee lisätä vielä uuden pukkinosturin loistehon kulutus, jonka maksimiarvo oli mittauksien perusteella noin 40 kVAr . Näistä luvuista voidaan päätellä, että maksimiloistehon kulutus on noin 360 kVAr :a. Tämän lisäksi tulee arvioida maksimipätötehoa, joka on mittausten perusteella noin 500 kW :a, josta 20 %:a on 100 kW :a. Tämä arvo tulee vähentää laskettaessa loistehon kustannuksia, jotka ovat yhteensä $(360 - 100) \text{ kVAr} \cdot 1.74 \text{ €/kVAr} \approx 450 \text{ €}$. Kuukausilta, jolloin allas tyhjenetään, saadaan maksimiloistehon arvoksi mittausten ja pumppujen datalehdien perusteella $1440 + 360 = 1800 \text{ kVAr}$:a ja maksimipätötehon arvoksi $1400 + 500 = 1900 \text{ kW}$:a. Näin ollen saadaan loistehon kustannukseksi kuukausilta, joina allas tyhjenetään $(1800 - 1900 \cdot 0.2) \text{ kVAr} \cdot 1.74 \text{ €/kVAr} \approx 2470 \text{ €}$. Taulukossa 4 on esitetty loisteho kustannukset vuodessa.

Taulukko 4. Loistehon kustannukset suhteessa pumppausten määrään vuoden aikana

| Pumppausten lukumäärä vuodessa | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------------------------------|------|------|------|-------|-------|-------|
| Loistehomaksu (€) | 5400 | 7420 | 9440 | 11460 | 13480 | 15500 |

Kuten taulukosta voidaan havaita, vaikuttaa voimakkaasti loistehomaksuihin pumppaus-
ten määrä, joita vuoden aikana suoritetaan.

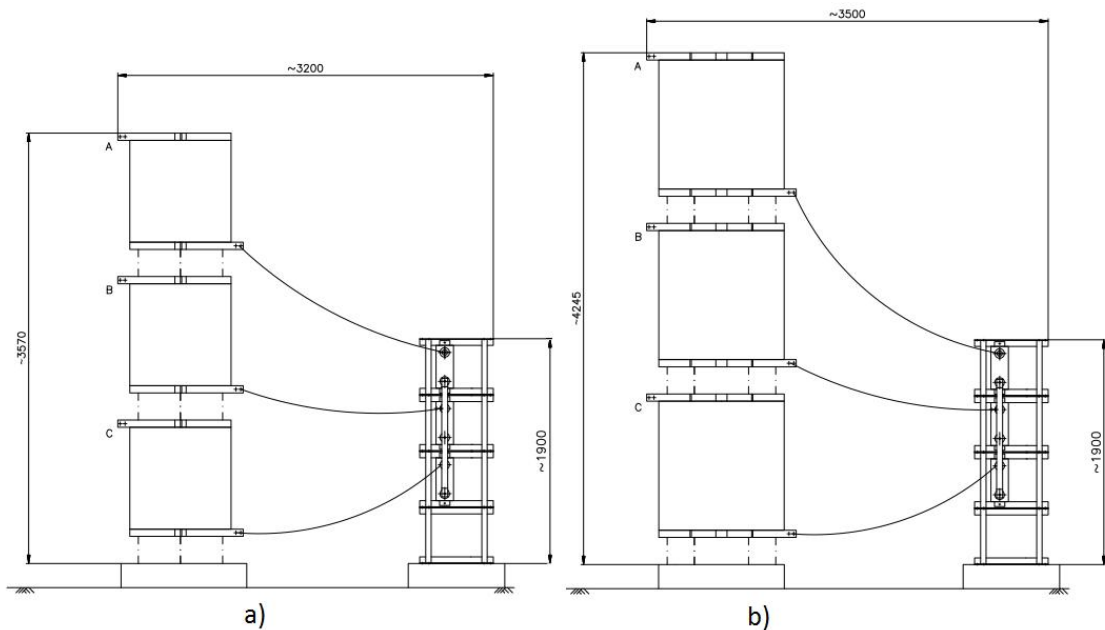
6.2 Laitteiston hankinta

Laitteiston hankinnassa on tärkeää pohtia mitä mahdollisia etuja voidaan saavuttaa kompensointilaitteella ja kuinka paljon kyseinen laitteisto maksaa verrattuna toisiin laitteisiin. Muuntamo, johon kompensointia suunnitellaan, sisältää jonkin verran harmonisten yliaaltojen tuottajia, sekä suuria loistehoa kuluttavia kuormia. Nosturit ovat muuntamossa suurimmat harmonisia yliaaltoja tuottavat kuormat, jonka johdosta voidaan kompensointilaitteista pois sulkea kondensaattoripariston, sillä jännitteen THD on noin 8 %:a, joka ylittää kondensaattoriparistolle suotavan 1 %:in THD:n. Passiivisista suotimista jää tästä syystä jäljelle vain estokelaparisto ja passiiviset yliaaltosuotimet. Näiden lisäksi muuntamossa voidaan käyttää aktiivisia kompensointilaitteita, mutta näiden hinta on huomattavasti kalliimpi kuin passiivisen kompensoinnin.

Kompensointi muuntamossa voidaan jakaa kahteen osaan. Toinen kompensointilaitte kompensoi allaspumppujen loistehoa ja toisella kompensointilaitteella voitaisiin kompensoida nosturien aiheuttamat harmoniset yliaallot sekä loistehon kulutus. Allaspumppujen osalta kompensointijärjestelmän määrittäminen on suhteellisen suoraviivaista, sillä mittaustuloksista voidaan havaita, että loisteho käyttäytyy tasaisesti eikä allaspumput juurikaan tuota verkolle harmonisia yliaaltoja. Näistä syistä on helppo valita allaspumppujen kompensointilaitteeksi neliportainen estokelaparisto, joka toki hieman pystyy myös suodattamaan verkosta yliaaltoja. Lisäksi allaspumppuja käytetään vain muutamia kertoja vuodessa, joten mekaanisilla kytkimillä voidaan toteuttaa muuttuva loistehon tuotanto. Kompensoinnin lisääminen muuntamon ei ole välttämätön, sillä simulointituloksista voidaan päätellä, ettei pumppujen käynnistäminen aiheuta suurta jännitekuoppaa. Pääsyy kompensoinnille tässä tapauksessa on loistehomaksujen aleneminen. Estokelapariston portaksi tulee valita 300, 600, 900 ja 1200 *kVAr* ja näiden portaiden avulla pystyy estokelaparisto muuttamaan loistehon tuotantoa riippuen siitä kuinka paljon allaspumppuja on kerrallaan päällä. Kompensointiin ei kannata käyttää suurempia portaita, jotta muuntajan kuomat ei mene ylikompensoinnin puolelle. Tällaisen laitteen hinnaksi tulee noin 60000 €, kun muuntamoon lisätään kaksi 300 *kVAr*:n estokelaparistoa ja yksi 600 *kVAr*:n estokelaparisto, joita kytkemällä päälle ja pois saadaan nuo neljä edellä mainittua loistehoporrasta toteutettua.

Estokelaparistoille viritystaajuudeksi valittiin 189 *Hz*, jolloin tätä alemmilla taajuuksilla estokelaparisto tuottaa loistehoa, eli halutulle 50 *Hz*:n taajuudelle saadaan 300 tai 600 *kVAr*:n loistehon tuotanto. Jotkin sähköverkkoyhtiöt haluavat ettei 189 *Hz*:n viritystaajuutta käytetä, sillä estokelaparisto voi tällä viritystaajuudella häiritä verkkokäskysignaaleja. Näitä verkkokäskysignaaleja kyseisessä muuntamossa ei ole, joten voi-

daan tämän perusteella päätyä kyseiseen viritystaajuuteen. Kuvassa 31 on esitetty estokelaparistojen fyysinen koko.



Kuva 31. Asennettavat estokelaparistot a) 600 kVAr b) 300 kVAr

Kuvassa on esitetty GE:n vaihtoehto kyseisistä estokelaparistoista, jotka on tarkoitettu ulos asennettavaksi. Kuvista voidaan havaita, että reaktorin koko, joka on vasemmalla esitetty, on huomattavasti suurempi verrattuna itse kondensaattorin kokoon. Kuvan estokelaparistot on kytketty kolmioon siten, että kondensaattorin perässä on estokelapariston tähtipiste ja jokaiselle vaiheelle on liitetty reaktori sarjaan. Kuvasta 300 kVAr:n estokelaparistoja tulee asentaa kaksi kappaletta, jotta saadaan halutut loistehon tuotannon portaat toteutettua. Näitä loistehoportaita säädetään manuaalisesti samalla, kun altaassa pumppuja kytketään päälle ja pois. Näin saadaan mahdollisimman halpa säätöratkaisu, jolloin voidaan investoinnin kustannuksia pienentää. Kytkeä voidaan toteuttaa etäohjauksella, mikäli muuntamoon lisätään valmius tähän samalla, kun muuta kojeistoa uusitaan. Nimellinen virta 300 kVAr:n portaalle on 34 A:a ja 600 kVAr:n portaalle 68 A:a, joten muuntamoon tulee lisätä suojarile, jotta mahdollisen estokelapariston rikkoutumisesta ei koko muuntamo mene jännitteettömäksi. Tätä suojalaitteen hintaa ei ole otettu huomioon laitteen hinnassa, joka on edellä arvioitu.

Kondensaattoripariston käytännön huollossa tulee toteuttaa äärimmäistä varovaisuutta, sillä kondensaattorit saattavat olla varautuneita, vaikka jännite olisi kytketty pois kondensaattoreilta. Tästä syystä tulee varmistaa aina ettei kondensaattorin navoissa ole jännitettä ennen kuin huoltotoimet aloitetaan kondensaattoriparistolle. Estokelaparistot ovat melko huoltovapaita komponentteja, mutta laitevalmistajan määräämät ennako- huollot tulee toteuttaa äärimmäistä varovaisuutta noudattaen. Lisäksi kondensaattoreita

tulee mitata aika ajoin, jotta voidaan varmistua, ettei kondensaattorin eristeessä ole vaurioita, joka voisi johtaa kondensaattorin tuhoutumiseen.

Nosturien kompensointi tuokin haastetta huomattavasti enemmän, sillä harmoniset yliaaltojen ja loistehon voimakkaan vaihtelun takia kompensoinnin suunnittelu ei ole yhtä suoraviivaista. Kompensoinnissa on pakko käyttää aktiivista kompensointilaitetta, jolla saadaan kompensoitua voimakas loistehon vaihtelu. Passiivisten suotimien haittapuolella tällaisessa tapauksessa on, että kompensointi jää ylikompensoinnin puolelle. Tämä ylikompensointi voi aiheuttaa resonanssipiirin verkon muiden osien kanssa, joka voi johtaa verkon epästabiiliin tilaan. Aktiivinen 330 *kVAr*:n kompensointilaitte ja kompensointilaitteen alennusmuuntaja maksaa noin 43500 €:a. Nosturit kuluttava maksimisaaan noin 320 *kVAr*:a loistehoa, jolloin kyseisellä aktiivisella kompensointilaitteella voitaisiin kumota koko nosturien kuluttama loisteho. Lisäksi kompensointilaitteella saadaan poistettua virran harmonisia yliaaltoja ja samalla aktiivisesta kompensointilaitteesta saadaan säädin estokelaparistoille, jolloin manuaalista estokelaparistojen kytkemistä verkkoon ei tarvita.

6.3 Takaisinmaksuaika

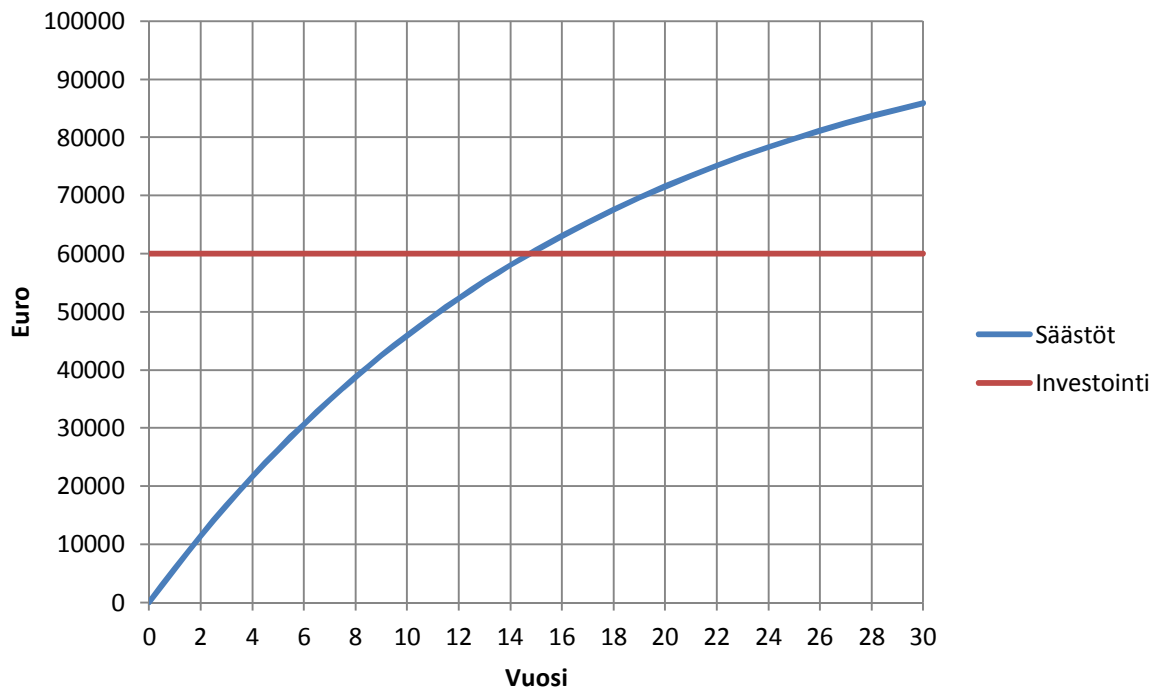
Investoinnin takaisinmaksuajalla tarkoitetaan aikaa, jolloin investointi on maksanut itsensä takaisin. Tämä tarkoittaa, että investoinnilla on saatu rahallista vastiketta yhtä paljon takaisin, kuin investointi on maksanut, joko lisääntyneiden säästöjen tai tuottojen muodossa. Tässä tapauksessa investointi saa aikaan pienentyneen sähkölaskun, jolloin saavutetaan säästöjä. Takaisinmaksuaikaa määrittäessä tulee määrittellä NPV-arvo, eli nettonykyarvo, jonkin jakson yli. NPV-arvo muuttaa tulevaisuudessa saatavat rahalliset säästöt nykyhetkeen, sillä rahan arvo tulevaisuudessa tulee tippumaan, johtuen esimerkiksi inflaatiosta. NPV saadaan laskettua kaavan (17) avulla. [39]

$$NPV = \sum_{j=1}^k \frac{C_t}{(1+i)^j} - C_0 \quad (17)$$

Kaavassa k on vuosien lukumäärä, eli kuinka monen vuoden päähän tarkastellaan nettonykyarvoa. i on diskontausarvo, joka telakan investoinneissa on 6 %:a. C_t on summa tuloista/säästöistä, jonka investointi tuottaa. Tässä tulee muistaa investointien mahdolliset kunnossapito- ja muut kustannukset, joita investointi tarkasteluajanjaksona kuluttaa ja nämä tulee vähentää mahdollisesta investoinnin säästöistä/tuotosta. C_0 on kaavassa investoinnin kokonaiskustannus, eli laitteen/palvelun alkukustannus. [39] Tässä työssä diskontausarvona käytetään tuota 6 %:a.

Tämän NPV-arvon tulisi olla positiivinen, jotta investointi on kannattava. Tarkastellaan tässä aluksi vain allaspumppujen kompensointilaitteiden mahdollista takaisinmaksuai-

kaa. Tutkitaan kuinka suuri kaavasta (17) k :n arvon tulisi olla, jotta NPV-arvo olisi positiivinen. Oletetaan, että pumppauksia telakalla tehtäisiin vuodessa 3 kappaletta. Näin ollen voidaan taulukosta 4 ottaa loistehon kustannus kolmen pumppauksen kohdalta, joka on 11460 €. Tämän jälkeen voidaan laskea loisteho säästö, joka syntyy, kun verkkoon on liitetty estokelaparistojen avulla toteutettu kompensointi. Tämä saadaan lasketta, kun käytetään hyväksi Turku Energian määrittämää hintaa ja kertomalla tämä laitteen maksimilla kompensoinnin määrällä, jolloin säästön arvoksi saadaan $1200 \text{ kVAr} \cdot 1.74 \text{ €/kVAr} \approx 2080\text{€}$. Tämä lukema on säästö, jonka kompensointilaitte saa aikaan kuukaudesta. Altaan tyhjennys suoritetaan kolme kertaa vuodessa, jolloin vuotuisiksi säästöiksi saadaan $2080\text{€} \cdot 3 = 6240\text{€}$. Investoinnin kustannus on noin 60000 €:a, josta tulee ottaa huomioon, että hinta sisältää vain laitekustannuksen. Tähän hintaan tulisi lisätä vielä asennuskustannukset, mutta niistä ei vielä ole tietoa, joten lasketaan suuntaa antava takaisinmaksuaika pelkällä laitteen hinnalla. Kuvassa 32 on esitetty nettonykyarvon kaavalla investoinnin nettonykyarvo ensimmäisestä vuodesta aina kolmenkymmenen vuoden päähän nykyhetkestä.



Kuva 32. *Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston nettonykyarvo*

Kuvaajassa käyrien leikkaus kohta kertoo laitteen takaisinmaksu ajan, joka on noin 15 vuotta. Telakalla on suunnitteilla, että pumppauksia aletaan suorittaa 4 vuodessa, jolloin myös laitteiston takaisinmaksuaika lyhenee 14 vuoteen. Lisäksi kuvaajasta voidaan päätellä, että kolmenkymmenen vuoden aikana investointi on tuottanut noin 25000 €:a. Mikäli pumppauksia olisi 4 vuodessa, saadaan kolmessakymmenessä vuodessa nettonyky-

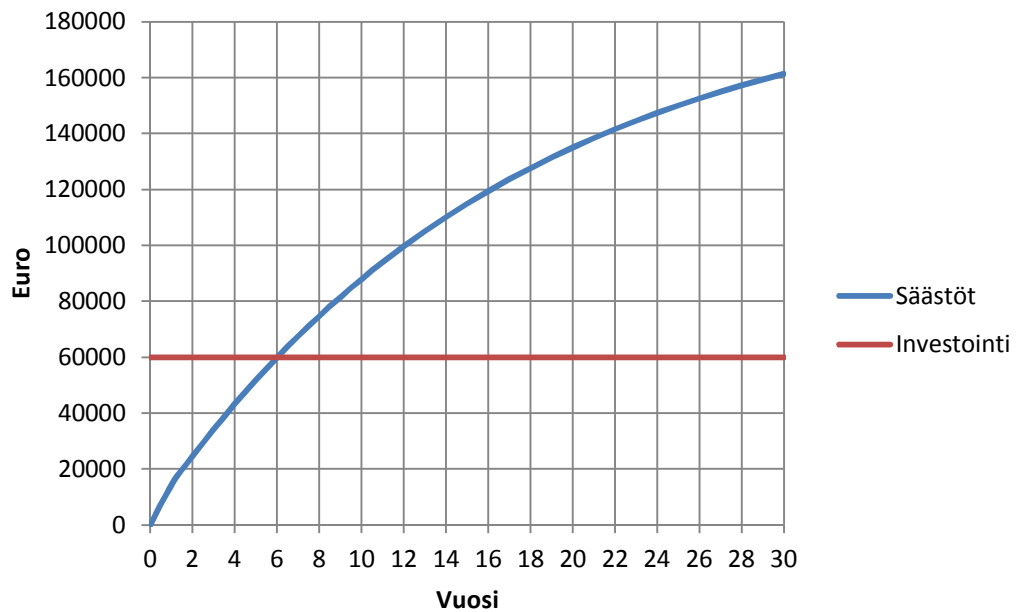
arvoksi 28000 €. Toki tulee muistaa, että tässä laskussa ei ole otettu huomioon asennuskustannuksia eikä mahdollisia kompensointilaitteen kunnossapitokustannuksia.

Loistehomaksut ovat vielä uusi asia sähköverkkoyhtiöille, joten loissähköstä aiheutuvat kustannukset muuttavat varmasti vielä tulevaisuudessa paljon. Taulukossa 5 on esitetty viiden eri sähköverkkoyhtiöiden loistehokustannuksia.

Taulukko 5. *Loistehomaksut Suomalaisilla sähköverkkoyhtiöillä*

| Sähköverkkoyhtiö | Loistehomaksu (€/kVAr, kk) |
|------------------|----------------------------|
| Turku Energia | 1.74 |
| Vantaa Energia | 2.50 |
| Helen | 2.84 |
| Caruna | 4.05 |
| Elenia | 4.77 |

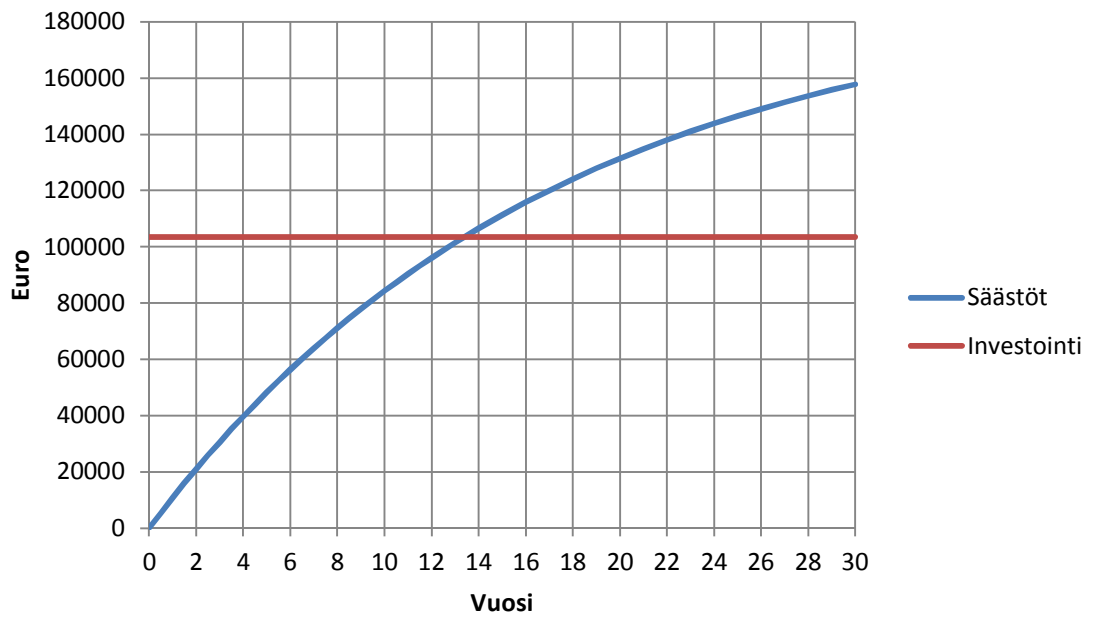
Mikäli näistä loistehomaksuista otetaan keskiarvo, saadaan loistehomaksuksi 3.18 €/kVAr kuukaudessa. Voidaankin olettaa, että tulevaisuudessa myös Turku Energia tulee nostamaan loistehon kustannuksia lähemmäs tätä keskiarvoa. Kun lasketaan laitteiston takaisinmaksuaikaa tämän keskiarvon avulla, säästöksi voidaan saada kuukaudessa, jolloin pumppaus suoritetaan, $1200 \text{ kVAr} \cdot 3.18 \text{ €/kVAr} \approx 3820\text{€}$. Näin ollen voidaan samaan tapaan kuin edellä laskea takaisinmaksuaika kolmelle pumppaukselle. Kuvassa 33 on esitetty vuotuiset säästöt suhteessa investointiin, kun oletetaan, että vuodessa allas tyhjennetään kolme kertaa. Nyt takaisinmaksuajaksi voidaan laskea kuusi vuotta, joka alkaa olla melko hyvä investoinnin takaisinmaksu ajaksi. Lisäksi kolmesakymmenessä vuodessa tuloja laitteistolla saadaan lähes 100000 €:a. Mikäli pumppauksia suoritetaan tulevaisuudessa neljä vuoden aikana, saadaan takaisinmaksuajaksi alle viisi vuotta ja kolmesakymmenessä vuodessa laite on tuottanut säästöjä yli 150000 €:a.



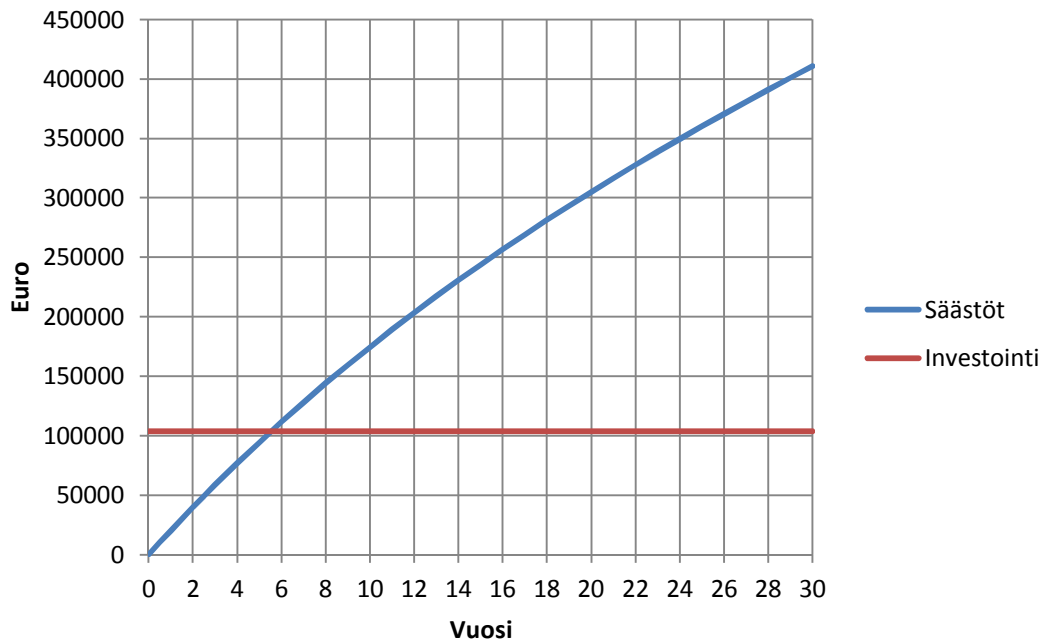
Kuva 33. *Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston nettonykyarvo, kun oletetaan loistehomaksuksi sähköverkkoyhtiöiden loismaksun keskiarvo*

Lisättäessä verkkoon aktiivinen 330 $kVAr$:n tehonsuodin voidaan havaita, että loistehomaksut menevät nollian, johtuen ilmaisesta loisteho alueesta. Tästä johtuen vuotuiset säästöt voidaan lukea suoraan taulukosta 4, kun oletetaan, että loistehomaksu on Turku Energian $1.74 \text{ €/}kVAr$. Aktiivinen osa kompensointiin lisättäessä kasvaa samalla investointikustannus $60000 + 43500 = 103500 \text{ €}$, jonka avulla voidaan laskea koko kompensointilaitteen nettonykyarvo, joka on esitetty kuvassa 34, kun oletetaan pumppausten määrä kolmeksi vuodessa. Tosin tulee muistaa, että kuvaajassa näkyy vain laitteiston hinta, eli esimerkiksi asennuskustannuksia kyseisessä kuvassa ei näy. Kuvasta voidaan nähdä, että nyt takaisinmaksuajaksi saadaan noin 13 vuotta, joka on noin 2 vuotta vähemmän kuin edellä esitetyllä pelkällä estokelaparistolla. Nettonykyarvolla laskettaessa saadaan voittoa kolmenkymmenen vuoden aikana noin 55000 € :a. Oletettaessa, että pumppauksia tehtäisiin neljä vuoden aikana, saadaan takaisinmaksuajaksi noin 11 vuotta ja nettonykyarvolla saadaan voittoa säästöjen muodossa 82000 € :a.

Mikäli oletetaan loistehomaksuksi jakeluverkkoyhtiöiden loistehomaksujen keskiarvo, joka on noin $3.18 \text{ €/}kVAr$ kuukaudessa. Tällä tavalla voidaan säästöjä loistehomaksuissa saada kuukausilta, jolloin pumppausta ei suoriteta $(360 - 0.2 \cdot 500) kVAr \cdot 3.18 \text{ €/}kVAr \approx 830 \text{ €}$ ja kuukausilta, jolloin pumppaus suoritetaan $(1800 - 1900 \cdot 0.2) kVAr \cdot 3.18 \text{ €/}kVAr \approx 4520 \text{ €}$. Näin ollen saadaan nettonykyarvomenetelmällä laskettua kuvan 35 mukainen kuvaaja, kun oletetaan pumppausten määräksi vuoden aikana 3.



Kuva 34. *Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston ja aktiivitehosuotimen nettonykyarvo*



Kuva 35. *Nettonykyarvolla määritetty estokelapariston ja aktiivitehosuotimen nettonykyarvo, kun oletetaan loistehomaksuksi sähköverkkoyhtiöiden loismaksun keskiarvo*

Kuvasta voidaan nähdä, että nettonykyarvomenetelmällä takaisinmaksuajaksi saadaan noin 5 vuotta ja kolmessakymmenessä vuodessa saadaan voittoa investoinnilla lähes 307250 €:a. Neljällä pumppauksella vuodessa saavutetaan takaisin maksuajaksi hieman

alle 5 vuotta ja kolmessakymmenessä vuodessa saadaan investoinnilla säästöjä nettonykyarvomenetelmällä lähes 350000 €:a. Taulukossa 6 on esitetty erilaisten tilanteiden takaisinmaksuaikoja ja nettonykyarvo tuottoa kolmessakymmenessä vuodessa, kun pumppausten määräksi oletetaan kolme vuodessa.

Taulukko 6. *Suunniteltujen kompensointilaitteiden takaisinmaksuaikoja ja mahdollinen tuotto kolmessakymmenessä vuodessa*

| | Investointi (€) | Loistehomaksu (€/kVAr, kk) | Takaisinmaksuaika (vuosi) | Tuotto 30. vuodessa (€) |
|--|--------------------|-------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Estokelaparisto | 60000 | 1.74 | 15 | 25000 |
| | | 3.18 | 6 | 100000 |
| Estokelaparisto + aktiivinen kom- pensointilaite | 103500 | 1.74 | 13 | 55000 |
| | | 3.18 | 5 | 307250 |

Taulukosta voidaan päätellä, että estokelaparistolla ja aktiivisuotimella saadaan huomattavasti enemmän säästöjä kuin pelkällä estokelaparistolla. Tämä johtuu estokelaparistojen käytöstä vain pumppauksen aikana, jolloin voidaan tällä passiivikompensaattorilla saada säästöjä. Aktiivisen kompensointilaitteen etuna voidaan pitää myös parantunutta sähkön laatua, joka saavutetaan aktiivisella kompensoinnilla.

7. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin erilaisten kompensointilaitteiden vaikutusta sähköverkkoon teollisessa ympäristössä ja pohdittiin kompensointilaitetta käytännön sovellukseen. Nykyaikaisia kompensointilaitteita on valtava määrä erilaisia ja kaikilla laitteilla on hieman erilaisia ominaisuuksia. Ominaisuuksina erilaisille kompensointilaitteille on esimerkiksi kompensointilaitteen kyky suodattaa harmonisia yliaaltoja verkosta tai muuttaa loistehon tuotantoa kuorman mukaan. Passiivisilla kompensointilaitteilla ei ole kykyä muuttaa loistehon tuotantoa loistehon kulutuksen mukaan, vaikka passiivisia kompensointilaitteita voidaan liittää tai kytkeä pois verkosta mekaanisten kytkinten avulla. Tätä tosin ei voida tehdä kuin muutamia kertoja päivän aikana, sillä komponentit rasittuvat aina muutostilanteessa eivätkä mekaaniset kytkimetkään kestä muutoksia lyhyissä sykleissä. Lisäksi passiivisessa kompensoinnissa tulee huomioida harmonisten yliaaltojen määrä verkossa, jottei verkkoon synny resonanssiipiiriä, joka voisi johtaa verkon epästabiiliin tilaan ja mahdollisesti laite rikkoihin. Teollisessa ympäristössä on paljon laitteita, jotka ovat käytössä vain hetkellisesti, jolloin loistehon kulutus verkossa voi muuttua erittäin voimakkaasti. Tällaisessa verkkoon voitiin liittää aktiivinen suodin, joka pystyy vastaamaan muuttuvaan loistehon tarpeeseen. Aktiivisuotimilla voidaan myös tehokkaasti suodattaa harmonisia yliaaltoja verkosta.

Työssä sovelluskohteena oli allaspumppaamon muuntamo, joka syötti neljän allaspumpun lisäksi neljää nosturia. Allaspumpuille kompensointilaitteen valitseminen oli melko suoraviivaista, sillä mittaustulosten perusteella voitiin päätellä, etteivät allaspumput tuota verkkoon harmonisia yliaaltoja. Lisäksi allaspumput kuluttivat pumppauksen aikana vakion loistehon, jolloin luonnolliseksi kompensointilaitteen valinnaksi muodostui passiivinen kompensointi, jota voitiin ohjata mekaanisilla kytkimillä päälle, kun altaan tyhjennystä suoritetaan. Nosturikäyttöjen kompensointilaitteiston valinta oli hieman hankalampi, sillä nosturit ajavat vain hetkellisesti, jolloin loistehon kulutus verkossa muuttuu voimakkaasti. Tämän lisäksi nosturit aiheuttavat jännitteeseen harmonisia yliaaltoja, sillä nostureissa on käytetty diodi- ja tyristorisiltoja tasajännitteen luomiseksi. Loistehoa nosturikäyttöiltä ei tarvitse verkon toiminnan takia kompensoida, sillä verkko on tarpeeksi vahva pitämään jännitteen vakiona, vaikka kuormitus nosturien johdosta muuttuu.

Työssä tutustuttiin kuinka paljon voidaan saavuttaa säästöjä estokelaparistoilla, jotka on liitetty kompensoimaan allaspumppaamon pumppujen loistehoa. Tällä loistehon kompensoinnilla voidaan saavuttaa säästöjä alentuneiden loistehomaksujen muodossa. Al-

taan tyhjennyksen aikana saavutettiin kuukauden loistehomaksuissa säästöjä jopa yli 2000 €, mikäli oletetaan loistehomaksun pysyvän nykyisenä. Säästöä pumppauksesta voidaan saada jopa yli 3800 €, jos Turku Energia aikoo nostaa loistehonkustannuksia. Tämän tiedon avulla voitiin laskea nettonykyarvomenetelmällä investoinnin mahdollinen takaisinmaksuaika ja kuinka paljon investointi tuottaisi voittoa jollakin tietyllä aikavälillä. Lisäämällä aktiivista kompensointia järjestelmään saavutettiin vuoden aikana huomattavasti enemmän säästöjä, mutta samalla investointikustannus kasvoi voimakkaasti. Aktiiviseen kompensointilaitteeseen kannattaa investoida, mikäli otetaan huomioon vain laite kustannukset. Takaisinmaksuajaksi saatiin loistehomaksuista riippuen 5-15 vuotta, joten investointia pohtiessa tulee ottaa huomioon mahdolliset loistehomaksujen korotukset. Laite kustannuksien lisäksi syntyy kustannuksia suunnittelu- ja asennustyöstä.

Jatkotutkimuksena muuntamoon tulisi Turun telakalla tehdä sähkön laatu -mittaus 63KL1-muuntamoon, eli koko telakkaa syöttävään muuntamoon, josta tulisi mitata koko telakan loistehon kulutus. Muuntamoon tulisi lisätä kompensointilaitte, jolla saisi kompensoitua loistehoa, jonka telakka kuluttaa. Näin voitaisiin saada tulevia loisteho kustannuksia mahdollisimman alhaiseksi, jolloin voitaisiin saada mahdollisimman teknistaloudellinen verkko. Toki mittauksissa tulisi huomioida, että loistehon kompensointi kannattaa toteuttaa mahdollisimman lähellä loistehoa kuluttavaa laitetta, jolloin verkon siirtokapasiteetti ei pienene.

LÄHTEET

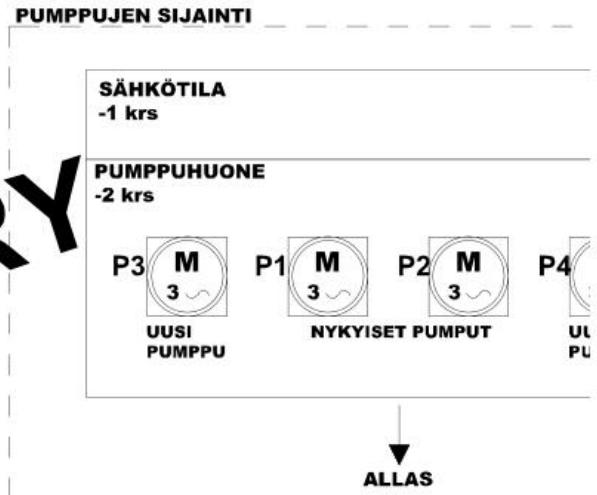
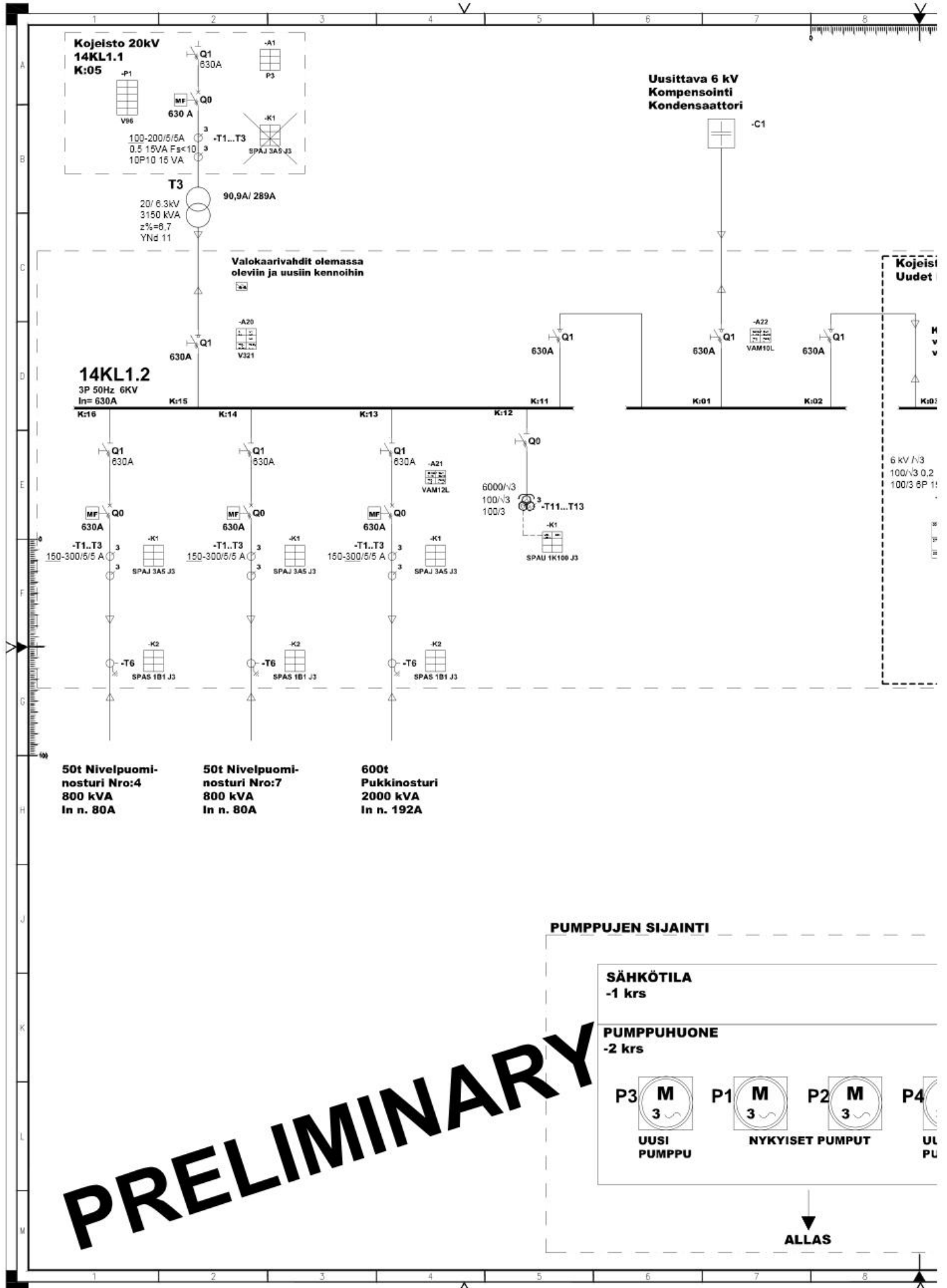
- [1] K. Johnson, R. Zavadil, "Assessing the impacts of nonlinear loads on power quality in commercial buildings-An overview", IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1991, pp. 1863 - 1869
- [2] B. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, "Power Quality : Problems and Mitigation Techniques", 1st ed., Wiley, 2015, pp. 4 – 5 and 16 - 17
- [3] S. J. Chapman, "Electric Machinery Fundamentals", 4th Ed., McGraw-Hill, 2005, pp. 430-433
- [4] V. Tompuri, "Loissähkön kompensointiin on järkeviä ratkaisuja", Artikkel, 23.11.2016, saatavilla (viitattu 24.8.2018):
<https://www.fingridlehti.fi/loissahkon-kompensointiin-jarkevia-ratkaisuja/>
- [5] R. Alanen, H. Hätönen, "Sähkön laadun ja jakelun luotettavuuden hallinta State of art –selvitys", VTT Working papers 52, 2006
- [6] FINGRID, "Liityntä kantaverkkoon", Internetsivu, saatavilla (viitattu 10.9.2018): <https://www.fingrid.fi/palvelut/sahkonsiirto/liitynta-kantaverkkoon/#suunnittelu>
- [7] D. McGillis, K. El-Arroudi, F. D. Galiana, "Reactive power", Artikkel, 2014, saatavilla (viitattu 23.8.2018): <https://www-accessscience-com.libproxy.tut.fi/content/802370>
- [8] FINGRID, "Kantaverkkopalveluhinnoittelu 2017", dokumentti, 1.3.2017, saatavilla (viitattu 11.9.2018):
https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/kantaverkkopalveluhinnoittelu_liite-2.pdf
- [9] FINGRID, "Loissähkön toimitus ja loistehoreservin ylläpito", dokumentti, 1.3.2017, saatavilla (viitattu 11.9.2018):
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/loissahkon-toimituksen-ja-loistehoreservin-yllapito.pdf>
- [10] F. C. De La Rosa, "Harmonic and Power Systems", 2nd ed., CRC, 2006, pp. 1-12

- [11] R.M. Rashid, "Power Electronics Handbook", 4th ed., Elsevier, 2018, pp. 77 and 178 - 182
- [12] Wolfram mathworld, "Fourier Series—Square Wave", Internetsivu, 2018, saatavilla (viitattu 28.8.2018):
<http://mathworld.wolfram.com/FourierSeriesSquareWave.html>
- [13] M.A.S. Masoum, E. F. Fuchs, "Power Quality in Power System and Electrical Machines", 2nd ed., Elsevier, 2015, pp. 20 – 21, 31 – 33, 433 - 435 and 450 - 452
- [14] Y. Kaisalo Schneider Electric, Sähköposti keskustelu, 18.9.2018
- [15] D. Blume, J. Schlabbach, T. Stephanblome, "Voltage Quality in Electrical Power Systems", 1st ed., IET, 2000, pp. 103 - 104
- [16] C.R. Bayliss, B.J. Hardy, "Transmission and Distribution Electrical Engineering", 4th ed., Elsevier, 2012, pp. 1021 – 1026
- [17] K. Shahriyar, O. Hashem, "Reliability in Power Electronics and Electrical Machines - Industrial Applications and Performance Models", 1st ed., IGI, 2016, pp. 323 - 325
- [18] M. Männistö, L. Hietalahti, R. Seesvuori, V. Seesvuori, T. Wilen, "Yliaallot ja kompensointi", 1st ed., Tammer-paino OY, 2006, pp. 49 – 77
- [19] M. Broussely, G. Pistoia, "Industrial Applications of Batteries - From Cars to Aerospace and Energy Storage", 1st ed., Elsevier, 2007, pp. 475 - 483
- [20] Fortum Oyj Viestintä, "Pohjoismaiden suurin akku otettiin käyttöön Järvenpäässä", Lehdistöiedote, 03/2017, saatavilla(viitattu 3.9.2018):
<https://www.fortum.fi/media/2017/03/pohjoismaiden-suurin-akku-otettiin-kayttoon-jarvenpaassa>
- [21] E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T.J.E Miller, "Power Electronic Control in Electrical Systems", 1st ed., Elsevier, 2002, pp. 94 – 95 and 300 - 311
- [22] R.E. James, Q. Su, "Condition Assessment of High Voltage Insulation in Power System Equipment", 1st ed., IET, 2008, pp. 82 - 83
- [23] K.C. Agrawal, "Industrial Power Engineering Handbook", 1st ed., Elsevier, 2001, pp. 815 – 819 and 847 - 852

- [24] W. Hofmann, J. Schlabbach, W. Just, J. Schlabbach, J. Schlabbach, J. Schlabbach, J. Schlabbach, “Reactive Power Compensation : A Practical Guide”, 1st ed., Wiley, pp. 213 – 240
- [25] S.N. Sharma, D.K. Patel, “Model and Simulation of FC-TCR for Reactive Power Compensation Using the MATLAB/SIMULINK”, IJAET, ISSN: 22311963, 2015, pp. 1767 - 1773
- [26] M.H. Rashid, “Power Electronics Handbook – Devices, Circuits and Applications”, 3rd ed., Elsevier, 2011, pp. 857 – 858
- [27] A.A. Sallam, O.P. Malik, “Power System Stability - Modelling, Analysis and Control”, 1st ed., IET, 2015, pp. 386 – 390
- [28] M. Cernan, J. Tlustý, “Study of the susceptance control of industrial Static Var Compensator”, 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), 2015, pp. 538 – 541
- [29] X.B. Sun, D.W. Meng, “A Calculation Method of Reactive Compensation Susceptances Based on Balance Principle”, Applied Mechanics and Materials Vols. 347-350, 2013, pp. 1501 – 1505
- [30] B. Singh, R. Saha, A. Chandra, K. Al-Haddad, ”Static synchronous compensators (STATCOM): a review”, IET Power Electronics (Volume 2, Issue 4), 2009, pp. 297 – 324
- [31] S.M. Mueen, J. Tamura, T. Murata, “Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm”, 1st ed., Springer, 2009, pp. 106 – 107
- [32] A.D. Kadu, P. Depra, R. Junela, N. Pande, “Application of STATCOM for Harmonic Mitigation and Power Factor Improvement Using Direct Current Control Technique”, Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), 2017, pp. 1 – 4
- [33] A. Virtanen, H. Tuusa, “Performance Comparison of Conventional STATCOM and STATCOM with Energy Storage in a Low Voltage Induction Motor Application”, IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012, pp. 4719 – 4726
- [34] S. Li, L. Xu, T.A. Haskew, “Control of VSC-based STATCOM using conventional and direct-current vector control strategies”, 1st ed., Elsevier, 2012, pp. 175 - 186

- [35] F.V. Lopes, D. Fernandes, W.L.A Neves, “A Traveling-Wave Detection Method Based on Park’s Transformation for Fault Locators”, IEEE Transactions on Power Delivery (Volume: 28, Issue: 3), 2013, pp. 1626 – 1634
- [36] R.P. Keshawala, S.N. Pandya, S.K. Patel, D.P. Suthar, “Comparative Analysis of 3-phase 3-wire Shunt Active Power Filters using various Control Strategies”, IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNxT), 2018, pp. 1 – 6
- [37] N. Mohan, T.M. Undeland, W.P. Robbins, “Power Electronics – Converters, Applications and Design”, 3rd ed., Wiley, 2003, pp. 126 – 143
- [38] Turku Energia, “Turku Energia sähköverkot OY verkkopaveluhinnasto 1.4.2017”, hinnasto, 1.4.2017, saatavilla(viitattu: 17.10.2018):
https://www.turkuenergia.fi/app/uploads/2016/11/liite_verkkophinnasto_FI_210x260_PRINT_20170401.pdf
- [39] P. Hanafizadeh, V.Latif, ”Mathematical and Computer modeling”, 1st ed., Elsevier, 2011, pp. 233 - 242

LIITE B: MUUNTAMON RAKENNE



PRELIMINARY

