



TAMPEREEN  
AMMATTIKORKEAKOULU

# SYÖTTÖMUUNTAJAN MITOITUS TAAJUUS- MUUTTAJIEN TESTAUSLABORATORIOON

Jussi Riihimäki

Opinnäytetyö  
Huhtikuu 2017

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Sähkövoimatekniikka



## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutus  
Sähkövoimatekniikka

RIIHIMÄKI, JUSSI:

Syöttömuuntajan mitoitus taajuusmuuttajien testauslaboratorioon

Opinnäytetyö 57 sivua, joista liitteitä 4 sivua  
Huhtikuu 2017

---

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli mallintaa Danfoss Drivesin Tampereen tuotekehitysyksikön sähköjakelujärjestelmää ja tutkia vaihtoehtoisia ratkaisua testauslaboratoriossa käytössä olleelle jännitteennostojärjestelmälle. Tutkimusaineistona toimi yrityksen sisäinen ja ulkoinen materiaali, suoritettut mittaukset, henkilöstön haastattelut sekä sähköalan kirjallisuus, standardit ja ohjeet.

Opinnäytetyössä vaihtoehtoisia ratkaisua toimipisteen nykyiselle ratkaisulle selvitettiin perinteisestä erotusmuuntajasta sekä säästömuuntajasta. Muuntajia lähdettiin mitoittamaan syöttöverkon oikosulkuvirran ja muuntajan nimellisvirran välisen oikosulkusuhteen perusteella. Työn tilaaja määritteli mitoittavalle muuntajalle seuraavat vaatimukset: muuntajan tulisi tuottaa 500 V:n ja 690 V:n jännitteet testattavalle taajuusmuuttajalle sekä syöttöverkon ja taajuusmuuttajan välisen oikosulkusuhteen tulisi olla 120. Työssä tutustuttiin muuntajien ja taajuusmuuttajan ominaisuuksiin sekä tehtiin johtopäätöksiä niiden soveltuvuudesta syöttämään testattavaa diodikokoalutasasuuntaajalla varustettua taajuusmuuttajaa. Osana opinnäytetyötä mallinnettiin tuotekehitysyksikön sähköjakelujärjestelmä ja laskettiin jakelujärjestelmän oikosulkuvirrat, joiden avulla pystyttiin mitoittamaan vaadittu muuntaja.

Työn perusteella saatiin mallinnettua toimipisteen sähköjakelujärjestelmä sekä tuotettua tilaajalle muuntajaehdotukset säästö- ja erotusmuuntajasta nykyisen ratkaisun korvauksiksi. Tuotekehitysyksikössä testausjärjestelmien kehittäminen on tärkeä osa tarkan ja todennukaisen testauksen saavuttamiseksi.

---

Asiasanat: taajuusmuuttaja, erotusmuuntaja, säästömuuntaja, testaus, oikosulkuvirta

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Electrical Engineering  
Option of Electrical Power Engineering

JUSSI, RIIHIMÄKI:  
Supply Transformer Design for AC Drive Verification Laboratory

Bachelor's thesis 57 pages, appendices 4 pages  
April 2017

---

The objective of this thesis was to model the Danfoss Drives Tampere's R&D unit's electrical distribution system, and to explore alternative solutions for the current supply system used in the verification laboratory. Research material used in this thesis were use of Danfoss Drives internal and external documents, measurements, interviews with personnel, electrical literature, international standards and guides.

Investigation for the alternative solution to replace the current system in the unit, was started from a traditional isolating transformer and auto-transformer. Transformers are dimensioned from the basis of the relationship between the power supply short-circuit current and the transformer rated current. The client defined the transformer to have following requirements: a transformer should produce 500V and 690V voltage to the tested frequency converter and short circuit ratio between the supply and the drive should be 120. Big part of the thesis dealt with transformers and frequency converters features and the transformers compatibility to supply a frequency converter with a full bridge diode rectifier.

The result of this thesis provided the client with two transformer proposals to replace the current system. In an R&D unit, development of the test systems is an important part of achieving accurate and realistic testing.

---

Key words: frequency converter, isolating transformer, auto-transformer, testing, short-circuit current

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖVERKON KOMPONENTTEJA JA OMINAISUUKSIA .....	8
2.1	Taajuusmuuttaja.....	8
2.1.1	Tasasuuntaaja .....	9
2.1.2	Jännitevälipiiri.....	11
2.1.3	Vaihtosuuntaaja.....	11
2.1.4	Taajuusmuuttajan verkkovaikutukset.....	14
2.2	Muuntajat .....	17
2.3	Ideaalinen muuntaja .....	18
2.4	Todellinen muuntaja ja häviöt .....	20
2.4.1	Tyhjäkäyntihäviöt .....	20
2.4.2	Kuormitushäviöt.....	21
2.4.3	Yliaaltojen vaikutus muuntajaan.....	22
2.5	Erotusmuuntaja .....	23
2.5.1	Erotusmuuntajan sijaiskytkentä .....	24
2.6	Säästömuuntaja .....	27
2.6.1	Säästömuuntajan sijaiskytkentä .....	29
2.7	Lähtötilanne Danfoss Drivesin Tampereen toimipisteessä.....	32
3	SÄHKÖJÄRJESTELMÄN MALLINTAMINEN .....	33
3.1	Oikosulkuvirta .....	33
3.2	Oikosulkusuhte .....	36
3.3	Theveninin menetelmä ja oikosulkupiirin impedanssit .....	37
3.3.1	Syöttöverkko .....	39
3.3.2	Muuntajat .....	40
3.3.3	Kaapelit ja kiskot.....	40
3.4	Oikosulkupiirin impedanssit.....	41
3.4.1	Syöttöverkko .....	41
3.4.2	Päämuuntaja .....	42
3.4.3	Kaapelit .....	43
3.4.4	Mitoitettu muuntaja.....	44
3.4.5	Järjestelmän oikosulkuvirta.....	44
4	MUUNTAJAN MITOITUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT.....	47
4.1	Muuntajan mitoitus oikosulkusuhteen perusteella.....	47
4.2	Muuntajan valinta .....	48
5	POHDINTA.....	50
	LÄHTEET.....	52

LIITTEET .....	54
Liite 1. Kaapelointipiirros Vehnämyllynkatu 18, Tampereen sähkölaitos.....	54
Liite 2. Mitoitettujen muuntajien laskennalliset taulukot.....	55
Liite 3. 300kVa erotusmuuntaja datalehti, Trafotek Oy.....	56
Liite 4. 300kVa säästömuuntajan datalehti, Trafotek Oy.....	57

## LYHENTEET JA TERMIT

AFE	Active front end, aktiivinen syöttöyksikkö
PWM	Pulse width modulation, pulssileveysmodulaatio
INU	Inverter unit, vaihtosuuntausyksikkö
IGBT	Insulated gate bipolar transistor, suuritehoinen bipolaaritransistori, jonka hila on eristetty
ATP	Ajotyöpiste
LC	Värähtelypiiri, joka muodostuu kelan ja kondensaattorin rinnan- tai sarjakytkenästä

## 1 JOHDANTO

Danfoss Drives on globaalisti toimiva taajuusmuuttajiin ja niiden valmistukseen erikoistunut yritys. Suomessa Danfoss Drivesilla on päätoimipaikka Vaasassa, jossa sijaitsee yksi sen tehtaista. Tampereella sijaitsee Danfoss Drivesin tuotekehitykseen erikoistunut yksikkö sekä Vantaalla markkinointiyksikkö. Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Tampereen tuotekehitysyksikön testausorganisaatio. Taajuusmuuttajien testaus on tärkeä osa tuotekehitysketjua esimerkiksi ennen laitteen lanseeraamista markkinoille tai kun laitteisiin tehdään muutoksia.

Tampereen tuotekehitysyksikössä oli tarve mahdollistaa suuritehoisempien taajuusmuuttajien testaus. Opinnäytetyön tavoitteena on kartoittaa vaihtoehtoja toimipisteessä käytössä olleelle taajuusmuuttajasyöttöiselle muuntajalle, jota kutsutaan keinoverkoksi. Keinoverkon ongelmina ovat ilmenneet testattavan 500V taajuusmuuttajan syöttöjännitteen säröytyminen ja liiallinen jännitteenalenema kuormitettaessa keinoverkkoa yli 50A kuormitusvirralla. Voidaan siis todeta, että testattavaa taajuusmuuttajaa syöttävä verkko on niin sanotusti liian heikko.

Työn tarkoituksena on selvittää toimipisteen nykyisen sähköjakelujärjestelmän tilanne ja tutkia ratkaisuja, joilla nykyistä sähköjakelujärjestelmää saataisiin kehitettyä. Työssä lähdetään mitoittamaan keinoverkon korvaajaksi perinteistä galvaanisella erotuksella olevaa muuntajaa sekä säästömuuntajaa. Danfoss Drives työn tilaajana määritteli, että mitoitettavan muuntajan tulisi kyetä tarjoamaan 500 voltin sekä 690 voltin vaihtojännitteet testattavalle taajuusmuuttajalle. Lisäksi muuntajan mitoituksen tulisi parantaa syöttöverkon jäykkyyttä, jotta taajuusmuuttajan syöttämät yliaaltovirrat eivät säröyttäisi syöttöjännitettä, eikä jännitteenalenemaa ilmenisi.

Työssä ensimmäiseksi tutustutaan kuusipulssisella dioditasasuuntaussillalla varustettuun taajuusmuuttajaan sekä taajuusmuuttajan syöttöverkolle aiheuttamiin vaikutuksiin. Seuraavaksi tutustutaan erotusmuuntajan sekä säästömuuntajan ominaisuuksiin, sijaiskytkentöihin ja vertaillaan muuntajien ominaisuuksia keskenään. Tämän jälkeen tutustutaan sähköverkon ominaisuuksiin, käydään läpi muuntajien mitoitukseen merkitsevät tekijät ja mallinnetaan sähköverkkoa matemaattisesti.

Opinnäytetyön lopuksi luodaan ehdotus vaihtoehtoisesta ratkaisusta keinoverkon korvauksiksi. Opinnäytetyön aineistona käytetään Danfoss Drivesin ja Trafotek Oy:n henkilöstöhaastatteluja.

Kiitän Danfoss Drivesin asiantuntijoita mielenkiintoisesta ja haastavasta opinnäytetyöaiheesta, jonka avulla pääsin tutustumaan tehoelektroniikkaan ja muuntajien toimintaan entistä syvemmin. Pääsin työssäni hyödyntämään myös aiemmin oppimiani asioita sekä syventämään osaamistani. Esitän myös kiitokset Trafotek Oy:n asiantuntijoille mielenkiinnosta työtäni kohtaan.

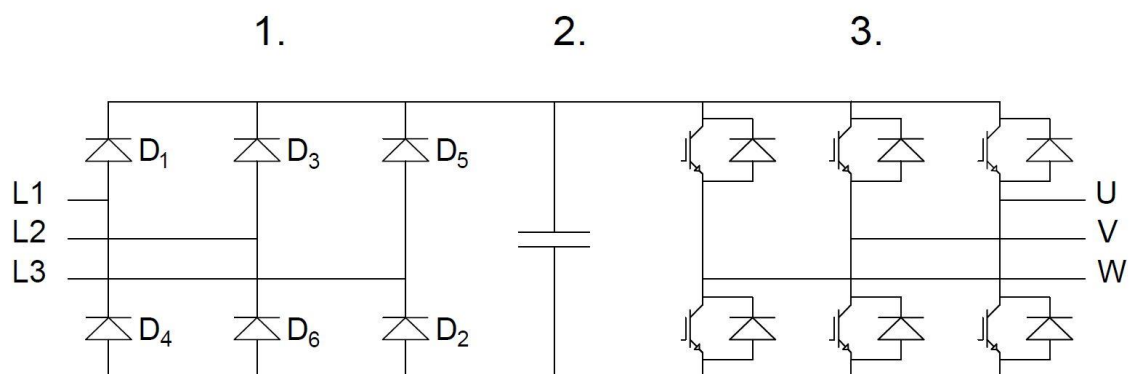
## 2 SÄHKÖVERKON KOMPONENTTEJA JA OMINAISUUKSIA

Tässä kappaleessa käsitellään sähköverkossa vaikuttavia tekijöitä ja tutustutaan niiden ominaisuuksiin. Ensimmäisessä osuudessa havainnollistetaan taajuusmuuttajan toimintaperiaate, tutkitaan sen rakennetta ja verkkovaikutuksia. Tämän jälkeen kuvataan erotusmuuntajan sekä säästömuuntajan ominaisuudet ja tutustutaan yliaaltojen vaikutuksiin muuntajissa. Lopuksi esitellään toimipisteessä käytössä oleva keinoverkko ja tutustutaan sen ominaisuuksiin.

### 2.1 Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikan laite, jolla pystytään esimerkiksi säätämään sähkömoottorin pyörimisnopeutta syöttötaajuutta ja jännitettä muuttamalla. Yleisimmin teollisuudessa on käytössä jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, joka voidaan toiminnallisuuden perusteella jakaa kolmeen osaan: tasasuuntaaja, välipiiri ja vaihtosuuntaaja. Taajuusmuuttajassa sähköverkon puolella on tasasuuntaussilta, jolla tasasuunnataan sähköverkon vaihtojännite tasajännitteeksi. Tasasuuntaussilta voi olla tyypiltään aktiivinen tai passiivinen, riippuen sen topologiasta. Taajuusmuuttajan välipiiri toimii energiavarastona, suodattaa tasasuuntaajan pulssimaisen tasajännitteen ja vaihtosuuntaaja muodostaa tasajännitteestä lopulta halutun taajuista vaihtojännitettä käyttäen tehopuolijohdesiltaa. (Tuusa & Partanen, Pyrhönen, Silventoinen ym 2010)

Kuvassa (Kuva 1) on esitettyä taajuusmuuttajan pääkomponentit.



Kuva 1. Kuusipulssi-diodisiltainen taajuusmuuttaja

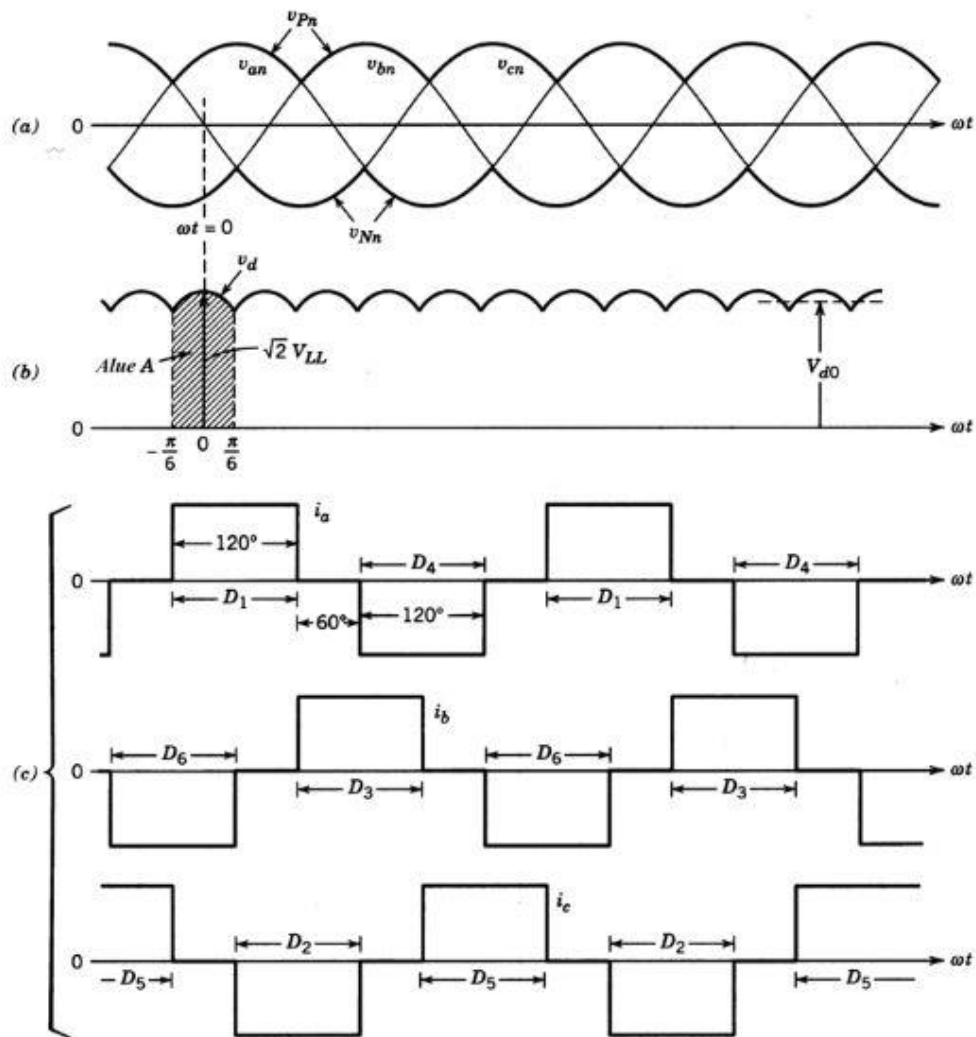


Kuvassa (Kuva 1) ensimmäisenä on esitetty kuusipulssinen tasasuuntaussilta. Diodeilla toteutettu tasasuuntaussilta on passiivinen silta, joka ei kykene syöttämään tehoa takaisin verkkoon päin. Toisena esitetään taajuusmuuttajan välipiiri. Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa välipiiriin on kytketty kondensaattori tasoittamaan välipiirin jännitteen vaihtelua. Kolmantena on esitetty vaihtosuuntaaja. Vaihtosuuntaajalla muodostetaan välipiirin tasajännitteestä halutun taajuista vaihtojännitettä ohjaamalla vaihtosuuntaajan kytkinkomponentteja. Kuvassa (Kuva 1) esitetty vaihtosuuntaaja muodostuu kuudesta IGBT-puolijohdekytkimen ja diodin vastarinnankytkennästä.

### 2.1.1 Tasasuuntaaja

Tasasuuntaajatopologioita on useita. Tasasuuntaajan kytkinkomponentteina voidaan käyttää diodeja, tyristoreja tai transistoreja. Yleisin tasasuuntaajatyyppejä on kuitenkin diodeja sisältävä kuusipulssitasasuuntaaja. Diodeilla toteutettua tasasuuntaussiltaa ei pystytä ohjaamaan, joten sitä kutsutaan passiiviseksi sillaksi. Diodisilta pystyy siirtämään tehoa vain yhteen suuntaan. Tyristorien sytytyskulmaa voidaan ohjata, mutta ohjausmahdollisuudet ovat rajalliset. IGBT-puolijohdekytkimillä toteutettua siltaa kutsutaan aktiiviseksi sillaksi. Aktiivisilla kytkinkomponenteilla toteutettu silta mahdollistaa kahdensuuntaisen tehonsiirron. Diodisuuntaajan etuna on diodien edullisuus ja niiden toimintavarmuus. Diodisuuntaajien hyötysuhde on myös korkea. Diodisilta ei ole ohjattava, joten käynnistystilanteessa diodisillan rinnalle tarvitaan latauspiiri. Latauspiirin avulla pienennetään käynnistyksessä syntyviä latausvirtapiikkejä, jotka syntyvät taajuusmuuttajan liittämisestä syöttöverkkoon. (Partanen, Pyrhönen, Silventoinen ym 2010)

Kuvassa (Kuva 2) on esitetty kuusipulssisen dioditasasuuntaajan vaihtojännitteen muodostuminen. Diodisillan diodit (D1, D3 ja D5) ovat suurimman jännitearvon valitsimia ja diodit (D2, D4 ja D6) pienimmän jännitearvon valitsimia. Suurimman jännitearvon valitsimista yksi diodi, jonka anodi on suurimmassa potentiaalissa, on johtavassa tilassa ja kaksi muuta ovat käänteisesti biasoituneita. Pienimmän jännitearvon valitsimista diodi, jonka katodi on pienimmässä potentiaalissa johtaa ja kaksi muuta ovat käänteisesti biasoituneita. Jokainen diodi johtaa  $120^\circ$  ajan, leikaten vaihtojännitteen huippuarvon kuvan (Kuva 2) mukaisesti. Välipiirin tasajännite muodostuu siis suurimman ja pienimmän jännitteen hetkellisarvojen erotuksena. (Mohan, Undeland & Robbins 1995)



Kuva 2. Kuusipulssisen diodisillan jännitteen muodostuminen (Mohan, Undeland & Robbins 1995, muokattu)

Dioditasasuuntaajan muodostaman tasajännitteen keskiarvo  $U_d$  voidaan laskea kaavalla (Kaava 1). Tulokseen päädytään laskemalla käyrämuodosta keskiarvo pinta-alaintegraalin avulla seuraavasti

$$U_d = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{3}{\pi}\right) \cdot U_v = 1,35 \cdot U, \quad (1)$$

jossa  $U_d$  on tasasuunnatun jännitteen keskiarvo,  $U_v$  on verkon vaihejännitteen tehollisarvo ja  $U$  on pääjännitteen tehollisarvo. (Mohan, Undeland & Robbins 1995)

### 2.1.2 Jännitevälipiiri

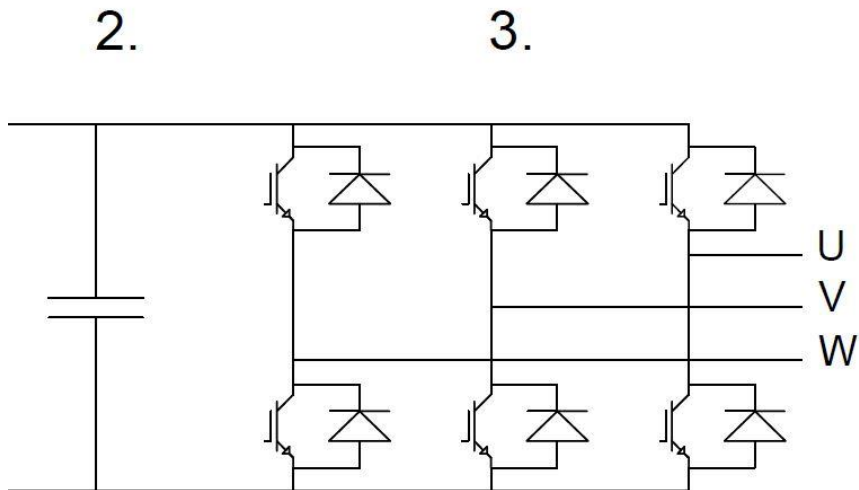
Jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa tasasuuntaajan ja vaihtosuuntaajan välille on kytketty kondensaattori. Kondensaattorin tarkoitus on tasoittaa tasasuuntaajan muodostaman jännitteen aaltoisuutta sekä toimia energiavarastona. Välipiirin tasajännitteestä voidaan myös muuntaa käyttöjännite taajuusmuuttajan ohjauselektronikalle.

Mikäli tehdään nopeita hidastuksia taajuusmuuttajan ohjaamalle moottorille, muuttuu moottori generaattoriksi. Moottori alkaa tällöin tuottaa tehoa, joka virtaa taajuusmuuttajan välipiiriin, joka nostaa välipiirin jännitettä. Taajuusmuuttajan jänniteensäätäjä pyrkii kompensoimaan tätä nostamalla lähtötaajuutta. Käytön hidastuvuus riippuu käytön ja moottorin häviöistä sekä taajuusmuuttajan kyvystä kuluttaa moottorin tuottamaa jarrutusenergiaa. Vakiorakenteinen taajuusmuuttaja pystyy jarruttamaan moottoria vain häviöiden suuruisella teholla, joka on noin 20% nimellistehosta. (Vacon Oyj 2017)

Kuusipulssisella diodisillalla varustetussa taajuusmuuttajassa epätahtimoottorin tuottamaa tehoa ei pystytä syöttämään takaisin verkkoon, joten välipiiriin on asennettava jarrukatkoja sekä jarruvastus, mikäli halutaan tehdä nopeita jarrutuksia. Lisäjarrutusta vaativia käyttöjä ovat muun muassa lingot, nosturit sekä erittäin nopeita suunnanvaihtoja vaativat käytöt. (Vacon Oyj 2017)

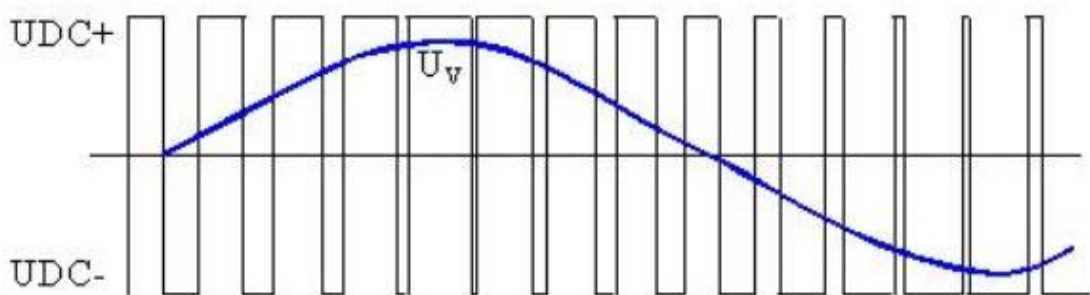
### 2.1.3 Vaihtosuuntaaja

Taajuusmuuttajassa vaihtosuuntaajalla muodostetaan halutun taajuinen vaihtojännite. Kuvassa (Kuva 3) on esitetty kolmivaiheisen vaihtosuuntaajan päävirtapiiri, joka muodostuu kolmesta haarasta, joista kukin tuottaa yhden vaiheen jännitteen.



Kuva 3. IGB-transistoreilla toteutettu vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaajan toiminta perustuu kytkimien nopeaan ohjaamiseen. Vaihtosuuntaajan IGBT-puolijohdekytkimiä ohjataan suurella kytkentätaajuudella (yleensä 2-16kHz), jotta saadaan muodostettua haluttu perusaalto. Vaihtosuuntaajassa halutun taajuisen ja suuruisen vaihejännitteen muodostamiseen käytetään yleisesti pulssileveysmodulointitekniikkaa. Pulssileveysmodulointitekniikassa jokaisen vaihejännitelähdön tehpuolijohdekytkimiä kytketään suurella kytkentätaajuudella vuorotellen tasajännitevälipiiriin positiiviseen ja negatiiviseen kiskoon. Puolijohdekytkimien keskinäisiä johtoajoja muuttamalla syntyy keskimääräisesti oikean suuruinen pienempitaajuinen vaihtojännite, joka on esitetty kuvassa (Kuva 4). (Tuusa)



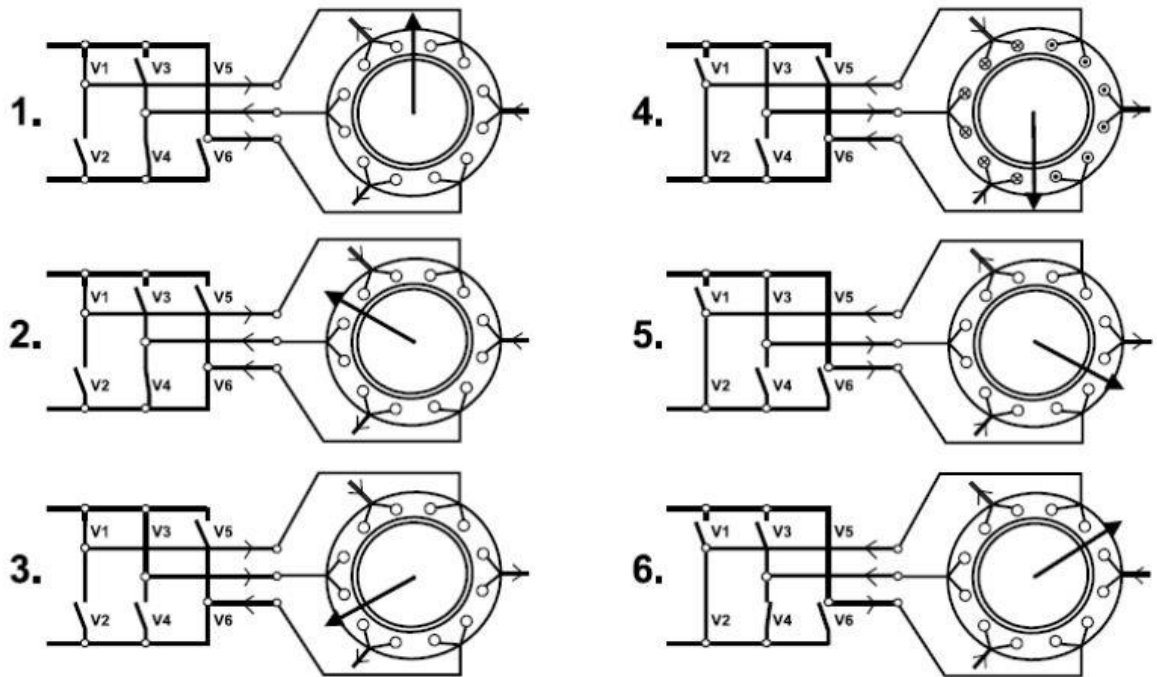
Kuva 4. Perusaallon vaihejännitteen muodostuminen PWM-tekniikkaa käyttäen (Tuusa)

Jokainen haara muodostuu ylä- ja alahaarasta, joissa kummassakin on IGBT-puolijohdekytkimen ja diodin vastarinnankytkentä. Tämä mahdollistaa virran kulkemisen haarassa molempiin suuntiin. Vain toinen haaran kytkimistä voi olla päällä yhtä aikaa, muuten haaraan muodostuisi oikosulku. Vaihtosuuntaajalla on hyvä tehohyötysuhde, joka se-

littyy sillä, että kytkimen ollessa johtamattomassa tilassa sen tehohäviö on nolla. Kytkimen ollessa johtavassa tilassa sen häviöt ovat pienet. Kytkimien muutoksesta eli kommutoinnista häviöitä syntyy myös hieman. (Mohan, Undeland & Robbins 1995)

Kolmivaiheisia vaihtosuuntaajia käytetään nopeussäätöisissä sovelluksissa, joita ovat esimerkiksi sähköiset ajoneuvot, teollisuudessa käytettävät koneet, tuulivoimalat sekä aurinkovoimalat. On visioitu, että sähköjakelu siirtyisi tulevaisuudessa tasajännitteiseksi, johtaen vaihtosuuntaajien kysynnän kasvuun. Vaihtosuuntaajan rakennetta on alettu käyttämään taajuusmuuttajissa myös tasasuuntaajan tilalla, jotta pystytään siirtämään moottorin tuottamaa tehoa takaisin verkkoon. Tehon syöttö takaisin verkkoon vaatii mm. lisäsuodatusta ja muita rakenneominaisuuksia taajuusmuuttajalta. (Danfoss Drives & Partanen, Pyrhönen, Silventoinen ym 2010)

Kuvassa (Kuva 5) on esitetty oikosulkumoottorin ohjauksen periaate taajuusmuuttajalla, roottorin pyörähtäessä yhden kierroksen eli  $360^\circ$ . Vaihtosuuntaussilta on esitetty kytkinmallilla. Vaihtosuuntaussillalla kytketään jokainen moottorivaihe, joko negatiiviseen tai positiiviseen tasajännitevälipiiriin määritellyssä järjestyksessä. Sähkömoottorin vuo saadaan pyörimään myötäpäivään sulkemalla kytkimet V1, V4 ja V5. Kuvan ensimmäisessä osassa kytkimet V1, V4 ja V5 ovat johtavassa tilassa, jolloin virran suunta on tällöin kytkimissä V1 ja V5 positiivinen käämityksiä kohti. Virran suunta kytkimellä V4 on vastakaissuuntainen. Roottorin kuvitteellinen vektori on tällöin  $0^\circ$ . Kytkimien asentoja ohjaamalla roottorin vektorin suunta muuttuu  $60^\circ$  asentojen 1-6 välillä. Kytkinasentoja on kahdeksan erilaista. Kahdessa kytkinasennossa jännite on nolla, jolloin kaikkia vaiheita yhdistää sama tasajännitevälipiiri. Kuudessa muussa kytkinasennossa moottorin käämissä on jännite, joka muodostaa magneettivuon. Kuvassa (Kuva 5) on esitetty nämä kuusi kytkinasentoa ja käämitysten jännitteen luomat vuon suunnat. Jännite synnyttää käämityksissä myös virran, jonka suunnat on esitetty nuolilla jokaisessa vaiheessa. (ABB. 2001)



Kuva 5. Oikosulkumoottorin ohjauksen periaate taajuusmuuttajalla (ABB 2001)

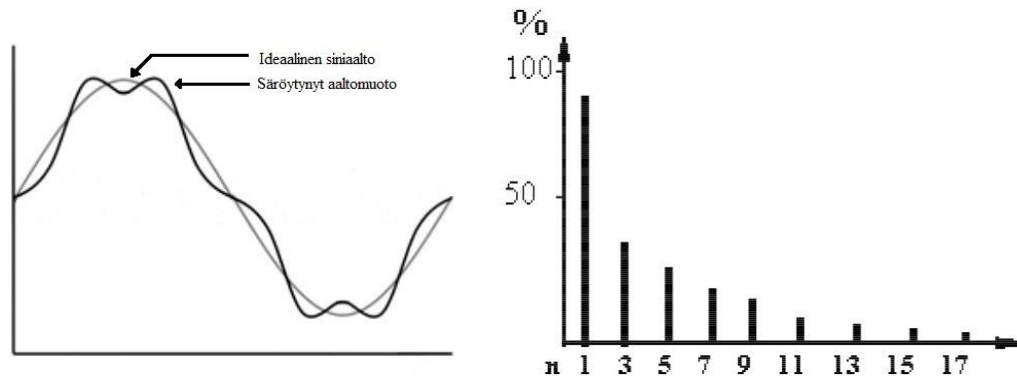
#### 2.1.4 Taajuusmuuttajan verkkovaikutukset

Nykyaikana tehoelektroniikan käytöt ovat yleistyneet jatkuvasti ja tuoneet mukanaan myös negatiivisia verkkovaikutuksia, kuten yliaaltoja. Yliaalloiksi kutsutaan sähköverkon virtoja ja jännitteitä, joiden taajuus ylittää verkon nimellistaajuuden. Yliaaltoja synnyttävät jakeluverkkoihin virran tai jännitteiden epälineaariset virtapiirien osat. Epälineaaristen virtapiirien ottama virta on epäsinimuotoista. Näiden virtapiirien synnyttämät yliaallot eivät välttämättä aiheuta ongelmia niitä synnyttävälle laitteelle vaan niiden leviäminen muille sähkökäyttäjille aiheuttaa helposti ongelmia, mikäli niihin ei ole varauduttu. (Korpinen, Mikkola, Keikko & Falck 2016)

Yliaallot ovat energiaa, jota ei voida hyödyntää sähköverkossa. Yliaallot aiheuttavat muun muassa ylimääräisiä häviöitä sekä muuntajissa että johdotuksissa, välkkymistä valaistuksissa sekä aiheuttavat sähköverkon virran ja jännitteen säröytymistä. Säröytyminen voi edelleen vaarantaa sähköverkkoon kytkettyjen herkkien elektroniikkalaitteiden vikaantumista. (ABB 2000)

Kuvassa (Kuva 6) on esitetty siniaallosta säröytynyt aaltomuoto sekä säröstä muodostettava yliaaltospektri. Yliaaltospektri muodostuu kertalukujen  $n$  suhteesta perusaaltoon.

Yliaaltospektrin ensimmäistä termiä kutsutaan perusaalloksi ja muita järjestyslukunsa mukaisesti. Yliaallot ovat useimmiten harmonisia, eli verkkotaajuuden kokonaisia monikertoja. (Korpinen, Mikkola, Keikko & Falck 2016)



Kuva 6. Säröytynyt aaltomuoto ja yliaaltospektrin periaatekuva (Sähköala 2017 & Korpinen, Mikkola, Keikko & Falck 2016, muokattu)

Suuntaajien peruskomponentteina toimivat aina puolijohdekytkimet, jonka avulla katketaan virtapiiriin virtaa halutulla tavalla, tai verkon ja kuorman määräämänä. Puolijohdekytkimen toimintajakso ja taajuus määräytyvät valitun kytkennän perusteella. Verkkokommutoiduissa suuntaajissa kytkimen sulkeutumishetken määrää kuormituksen ottama virta tai jännite, kuitenkin avautumisen määrää syöttöverkko. Tästä johtuen verkkokommutoitujen suuntaajien suunnittelulla tai käytöllä ei voida vaikuttaa syöttöverkosta otettavaan loistehoon tai verkkoon syötettäviin virtayliaaltoihin. Hilakommutoidut suuntaajat tarjoavat tehokkaita ratkaisuja tähän ongelmaan, sillä suunnitteluvaiheessa voidaan vaikuttaa suuntaajan kehittämään loisvirtaan ja ylivirtaharmonisiin. (Aura & Tonteri 1996, 425)

Syöttöverkon yliaaltovirrat aiheuttavat syöttöverkon impedansseissa, jotka muodostuvat muuntajista sekä kaapeleista, taajuuttaan vastaavia jännitehäviöitä. Näin syntyvät jännitteen yliaallot, jotka jännitteen siniaaltoon summautuessaan aiheuttavat käyrämuodon säröytymisen. Virran särö on yleisesti jännitteen säröä suurempi johtuen verkon impedanssien pienyydestä. (Aura & Tonteri 1996, 425 & Korpinen, Mikkola, Keikko & Falck 2016)

Yksivaiheiset laitteet synnyttävät kolmella jaollisia parittomia yliaaltoja. Aallot summautuvat nollajohtimeen kolmesta vaiheesta, niiden ollessa keskenään samanvaiheisia. Tällöin nollajohtimessa kulkee perustajuisen vaihevirran lisäksi kolminkertainen kolmella jaollisten parittomien yliaaltojen virta. (ST 2006)

Jännite- ja virtasärön määrittelemiseen käytetään monenlaisia käsitteitä. Tässä työssä särökertoimena käytetään perusaallon tehollisarvon mukaisesti määriteltyä variaatiota. Jännitteen- ja virran säröt voidaan laskea kaavoissa (Kaava 2 ja Kaava 3) esitetyillä tavoilla.

$$U_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (2)$$

$$I_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (3)$$

Diodisiltaisen kuusipulssisillan verkkovirran yliaaltotaajuudet ovat tässä tapauksessa muotoa

$$n = p \cdot k \pm 1 \quad (k = 1, 2, \dots), \quad (4)$$

jossa  $p$  on suuntaajan pulssiluku ja  $k$  on jokin positiivinen kokonaisluku.

Yliaaltovirrat  $I_{(n)}$  aiheuttavat yhdessä verkon impedanssin  $Z_{N(n)}$  kanssa verkkoon yliaaltojännitteitä  $U_{(n)}$  yhtälön (Kaava 5) mukaisesti.

$$U_{(n)} = Z_{N(n)} \cdot I_{(n)}, \quad (5)$$

jossa  $U_{(n)}$  on taajuuskomponenttia  $n$  vastaava yliaaltojännite,  $Z_{N(n)}$  on taajuuskomponenttia  $n$  vastaava verkon impedanssi ja  $I_{(n)}$  on taajuuskomponenttia  $n$  vastaava yliaaltovirta. (ABB 2001)



Taulukko 1. Kolmivaiheisen dioditasasuuntaussillan tyypilliset yliaaltopitoisuudet In/I1 suhteena (ABB 2000)

Yliaaltojen järjestysluku	Teoreettinen 6-pulssi-suuntaaja (%)	Käytännön 6-pulssi-suuntaaja (%)	Käytännön 6-pulssi-suuntaaja kuristinsuodattimella
5.	20	63	30
7.	14	54	12
11.	9	10	9
13.	8	6	6
17.	6	7	4
19.	5	5	4

Taulukossa (Taulukko 1) on esitetty kuusipulssisen dioditasasuuntaajan käytännön yliaaltosisältö teoreettiselle ja todelliselle suuntaajalle ilman suodatusta sekä todellisen suuntaajan yliaaltosisältö kuristinsuodattimella. Voidaan todeta, että käytännön suuntaajalla yliaaltosisältö on huomattavasti suurempi kuin teoriassa.

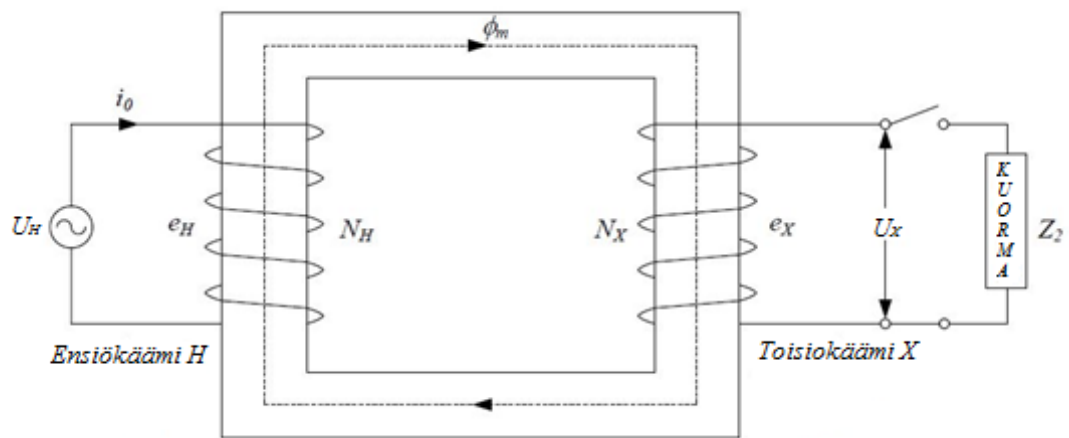
## 2.2 Muuntajat

Muuntajien päätehtävä sähköjakelujärjestelmissä on alentaa tai kasvattaa syöttöjännitettä. Muuntajatyypit valitaan haluttujen ominaisuuksien perusteella ja valmistajat pysyvät rakentamaan muuntajia myös erikoisempiin sovelluksiin. Opinnäytetyössä tutkittaviksi taajuusmuuttajan syöttömuuntajiksi valittiin perinteinen erotusmuuntaja sekä säästömuuntaja.

Muuntajat ovat staattisia laitteita, jotka indusoivat sähkömagneettisen yhteyden virtapiirien välille energian siirtämiseksi niiden välillä. Muuntajia on usean tyyppisiä ja niiden ominaisuuksia muokataan haluttua käyttöä varten. Yleisesti muuntaja sisältää kaksi tai useamman käämityksen rautasydämen ympärillä. Jokaisella vaiheella on yleensä kaksi käämitystä, ensiö- ja toisiokäämi yhteisellä magneettipiirillä tai sydämellä. Käämityksien resistanssi voi vaihdella ohmin murto-osista useisiin ohmeihin. Muuntajan sydän on valmistettu korkean magneettisen permeabiliteetin omaavasta raudasta, joka tuottaa tiheän magneettivuon verraten pienellä magneettisella voimalla. Muuntajat ovat useimmiten sähkönsiirtojärjestelmien isoimpia, painavimpia ja kalleimpia komponentteja. (Alberta electric system operator 2014)

### 2.3 Ideaalinen muuntaja

Muuntajia käytetään useissa eri tarkoituksissa, mutta niiden perusteoriat ja konseptit ovat samat. Muuntajan toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Kuvassa (Kuva 7) on esitetty ideaalisen muuntajan periaatekuva. Kuvassa on esitetty ensiö- ja toisiokäämit sekä niitä yhdistävä muuntajan sydän kahdella pylväällä. Käämityksen ovat asennettu vastakkaisille sydämen pylväille. Käämityksiä yhdistää yhteinen magneettivuo  $\phi_m$ . Muuntaja on kuormittamattomassa tilassa, koska toisiopuoli on avoin. Ensiöpuolelle on kytketty jännitelähde  $U_H$ . (Alberta electric system operator 2014)



Kuva 7. Ideaalinen muuntaja ensiö- ja toisiokäämillä (Alberta electric system operator 2014, muokattu)

Muuntajan toiminnan ymmärtämisen yksinkertaistamiseksi, muuntaja voidaan ajatella ideaalisena muuntajana. Ideaalinen muuntaja on siis täysin häviötön laite. Ensiökäämin ollessa virrallinen se synnyttää magneettivuon, joka lävistää toisiokäämin täydellisesti ja indusoi siten jännitteen. (Alberta electric system operator 2014)

Indusoituneen jännitteen ja magneettivuon välinen yhteys on annettu Faradayn laissa seuraavasti

$$e_{kierros}(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}, \quad (6)$$

jossa  $e_{kierros}(t)$  on hetkellinen indusoitunut jännite yhdessä kierroksessa ja  $\varphi(t)$  on sydämen vuo. Olettaen, että muuntajaa syötetään sinimuotoisella vaihtojännitteellä taajuudella  $f$ , sydämen vuo  $\varphi(t)$  on sinimäinen. Tällöin käämikierroskohtainen indusoituneen jännitteen tehollisarvo saadaan

$$e = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot \Phi_{max} \cdot f, \quad (7)$$

jossa  $f$  on verkon taajuus ja  $\Phi_{max}$  on sydämen sinimäisen magneettivuon amplitudi.

Laskennan helpottamiseksi yhtälö esitetään muodossa:

$$e = \frac{E}{N} = 4,44 \cdot B_m \cdot A \cdot f, \quad (8)$$

jossa  $E$  on käämiin indusoitunut jännite,  $N$  on käämityksen kierrokset,  $A$  on sydämen poikkileikkauksen pinta-ala ja  $B_m$  on sydämen vuon maksimitiheys. Yhtälössä annetulla taajuudella ja kierrosten lukumäärällä, sydämen vuo määräytyy syötetyn jännitteen mukaisesti. Käytännössä  $B_m$  määräytyy sydänmateriaalin mukaan. Ensio- ja toisiokäämityksissä kulkee sama vuo, joka indusoi jännitteet ensio- ja toisiokäämityksiin, tällöin

$$e = \frac{E_H}{N_H} = \frac{E_X}{N_X}, \quad (9)$$

Indusoituneen jännitteen käämityksiin täytyy siten olla verrannollinen käämityksen kierroksiin

$$\frac{E_H}{E_X} = \frac{N_H}{N_X}, \quad (10)$$

jossa  $E$  on indusoitunut jännite,  $N$  on käämityksen kierrokset ja alaindeksit  $H$  viittaavat ensiosuureisiin sekä  $X$  toisiosuureisiin. Jos ideaalisen muuntajan toisioon lisätään kuorma, virta kulkee toisiossa ja siten myös ensiossa. Magneettisen piirin näkökulmasta, magnetomotoriset voimat molemmissa käämityksissä ovat tasoittuneet, jolloin

$$\frac{E_H}{E_X} = \frac{N_H}{N_X} = \frac{I_X}{I_H}, \quad (11)$$

(Alberta electric system operator 2014)

## 2.4 Todellinen muuntaja ja häviöt

Edellä tarkasteltiin muuntajan toimintaperiaatetta ideaalisella eli häviöttömällä muuntajalla. Todellisuudessa muuntajassa kuitenkin esiintyy häviöitä. Muuntajan häviöt jaetaan tyhjäkäyntihäviöihin ja kuormitushäviöihin. Nämä häviötyypit ovat yhteiset kaikille muuntajille, riippumatta muuntajan käyttökohteesta tai tehosta.

### 2.4.1 Tyhjäkäyntihäviöt

Tyhjäkäyntihäviöt, joita kutsutaan myös rautahäviöiksi, esiintyvät aina kun muuntajan ensiökäämitykseen vaikuttaa jännite. Muuntajan toisiokäämitys on tilanteessa avoin ja muuntaja on kuormittamaton. Magneettivuo virtaa rautasydämessä ja ainoa esiintyvä virta kulkee ensiökäämityksessä. Häviöt ovat pääasiallisesti rautahäviöitä, johtuen hystereesistä ja pyörrevirroista, joita ajallisesti vaihteleva magneettivuo rautasydämessä tuottaa. (Kalo 2014)

Hystereesihäviöt muodostuvat magneettivuon suunnan muutoksista ja raudan permeabiliteetin epälineaarisuudesta, johtaen kitkaliikkeeseen muuntajan sydämessä. Hystereesihäviöt riippuvat sydänmateriaalista. Hystereesihäviöitä voidaan vähentää sydänmateriaalin käsittelyllä. Kylmävalssaus, laserkäsittely ja raorientointi ovat menetelmiä sydänmateriaalin käsittelyyn. Hystereesihäviöt ovat yleisesti 50-80% tyhjäkäyntihäviöistä. (Sumper & Baggini 2012, 23)

Pyörrevirtahäviöitä muodostuu vaihtelevan magneettikentän vaikutuksesta, virtojen induoituessa vuon läpäisemään rautaan. Pyörrevirtahäviöt synnyttävät lämpöä muuntajan sydämen laminoinneissa. Pyörrevirtahäviöitä voidaan vähentää rakentamalla muuntajan

sydän ohuista laminoituista levyistä, jotka ovat eristetty toisistaan lakkauksella. Pyörrevirtahäviöt ovat yleisesti noin 20-50% kokonaistyhjäkäyntihäviöistä. (Sumper & Baggini 2012, 23)

#### 2.4.2 Kuormitushäviöt

Kuormitushäviöt, joita myös kuparihäviöiksi ja oikosulkuhäviöiksi kutsutaan, syntyvät vastushäviöistä käämityksissä ja johtimissa sekä pyörrevirroista rungossa ja käämityksissä. Kuormitushäviöitä esiintyy, kun toisioon on kytketty kuormitus, jolloin muuntajan ensiö- ja toisiökäämitykset ovat virralliset. Vaikka rautahäviöitä esiintyy myös sydämessä tässäkin tilanteessa, niitä ei lasketa kuormitushäviöiksi. Mitatessa kuormitushäviöitä, muuntajalle suoritetaan oikosulkumittaus. Oikosulkumittauksessa toisiopuolen liittimet oikosuljetaan ja yhdistetään maahan. Ensiöön syötetään pieni jännite, jonka avulla saadaan tuotettua nimellinen kuormitusvirta. (Kalo 2014)

Resistiivisiä lämpöhäviöitä kutsutaan myös kuparihäviöiksi. Kuparihäviöt esiintyvät muuntajan käämityksissä ja johtuvat käämitysten resistanssista. Häviöt lisääntyvät kuormitusvirran neliönä ja ovat verrannollisia käämityksen resistanssiin. Eli kuparihäviöt lisääntyvät  $I^2R$  suhteessa. Kuparihäviötä voidaan vähentää kasvattamalla käämityksen poikkipinta-alaa  $A$  tai lyhentämällä käämityksen pituutta  $l$ . Käämityksen resistanssi  $R$  voidaan siis esittää seuraavasti

$$R = \frac{\rho \cdot l}{A}, \quad (12)$$

Kuparin käyttäminen johtimena ylläpitää tasapainoa muuntajan painon, fyysisten mittojen, hinnan ja resistanssin välillä. (Kalo 2014 & Sumper & Baggini 2012)

Magneettikentät, joita syntyy vaihtojännitteen vaihtelusta, muodostavat pyörrevirtahäviöitä, joita esiintyy myös käämityksissä. Pienentämällä johtimen poikkipinta-alaa vähenvät pyörrevirtahäviöt, joten monisäikeisiä toisistaan eristettyjä johtimia käytetään saavuttamaan vaadittu matala resistanssi, kuitenkin huomioiden pyörrevirtahäviöiden muodostuminen. (Sumper & Baggini 2012, 23)

### 2.4.3 Yliaaltojen vaikutus muuntajaan

Muuntajan kuormitusvirran sisältäessä yliaaltoja, virran kohtaama vastus käämityksessä ei ole sama kuin puhtaalla 50Hz virralla. Tämä johtuu taajuuden aiheuttamasta virranahdosta käämityksissä, tällöin suurempitaajuisten virtakomponenttien kohtaama resistanssi kasvaa.

Induktanssien reaktanssi kasvaa tunnetusti suoraan verrannollisena taajuuteen

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (13)$$

jossa  $f$  on taajuus ja  $L$  on induktanssi.

Induktanssi on myös riippuvainen taajuudesta siten, että se pienenee taajuuden kasvaessa. Induktanssin pieneneminen johtuu käämityksissä syntyvien pyörrevirtojen vaikutuksesta. Induktanssin pienenemistä käytännössä on hyvin vaikea laskea. (Tamsi 1978, 35)

Yliaallot aiheuttavat virtalämpöhäviöitä käämitysten lisäksi myös muuntajan muissa mekaanisissa rakenteissa, kuten mahdollisessa öljysäiliössä ja palkeissa. Virtalämpöhäviöitä aiheutuu virran synnyttämistä hajavoista, jotka kulkiessaan muuntajan rakenneosissa aiheuttavat pyörrevirtoja. Häviöitä on käytännössä hyvin vaikea laskea. Ne eivät yleisesti noudata samoja lakeja kuin kuormitusvirran käämeissä aiheuttamat häviöt. Häviöihin vaikuttaa muuntajan koko ja ensisijaisesti alajännitepuolen virran suuruus. Häviöt ovat sitä suuremmat, mitä lähempänä käämitykset ovat muuntajan rautaosia ja mitä massiivisemmat muuntajan rautaiset rakenneosat ovat. Tavallisissa muuntajissa ensiö- ja toisiokäämit kuitenkin sijoitetaan mahdollisimman lähelle toisiaan hajavoiden minimoimiseksi. Käämit sijoitetaan yleensä päällekkäin saman sydämen ympärille. Täten käämitysten väli jää pieneksi ja hajavuot pienenevät merkittävästi. (Tamsi 1978, 39 & Sumper 1992)

Yliaaltosisälteinen kuormitusvirta johtaa myös lisärautahäviöiden kasvamiseen. Muuntajan rautahäviöt muodostuvat pyörrevirta- ja hystereesihäviöistä sydämessä. Häviöt ovat riippuvaisia taajuudesta, vuontiheydestä sekä muuntajasydämen rakenteesta. Hystereesihäviöt  $P_h$  ja pyörrevirtahäviöt  $P_p$  voidaan laskea kaavoilla (Kaava 14 ja Kaava 15)

$$P_h = k_h \cdot f \cdot \hat{B}^2 \quad (14)$$

$$P_p = k_p \cdot f \cdot \hat{B}^2, \quad (15)$$

joissa  $\hat{B}$  on vuontiheyden huippuarvo sekä  $k_h$  ja  $k_p$  ovat rautasydämen materiaalista riippuvaisia vakioita.

Tavallisesti esiintyvillä jännitteen yliaaltopitoisuuksilla lisärautahäviöt ovat korkeintaan 1-2% perusaallon rautahäviöistä. (Tamsi 1978, 46-47)

Yliaaltoja sisältävä virta johtaa myös muuntajan suurempaan lämpenemiseen, kuin tehollisarvoltaan saman suuruinen sinimuotoinen 50Hz virta. Täten yliaaltojen lisäämää lämpenemistä ei voida arvioida suoraan virran tehollisarvon mukaan. (Tamsi 1978, 47)

## 2.5 Erotusmuuntaja

Ensimmäisenä vaihtoehtona keinoverkon korvaajaksi esitetään erotusmuuntaja. Erotusmuuntajassa ensiökäämitys ja toisiokäämitys ovat galvaanisesti erotettuja. Erotusmuuntajan rakenne on tyypiltään yleisin muuntajarakenne.

Erotusmuuntajassa halutut toisiojännitteet voidaan tuottaa rakentamalla muuntaja kahdella toisiokäämityksellä tai rakentamalla muuntaja, jossa on yksi toisiokäämitys väliottopisteillä halutuille jännitetasoille. Tässä tapauksessa väliottopisteet olisivat 500V ja 690V tasoissa.

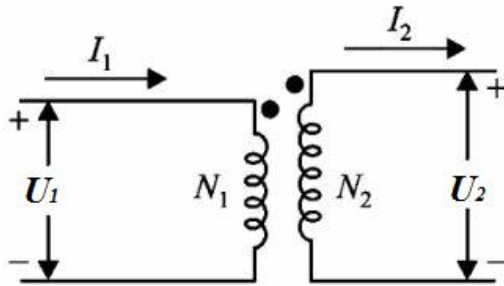
Kuvassa (Kuva 8) on esitetty erotusmuuntajan piirimalli. Piirimallin erotusmuuntajalle voidaan esittää Kirchoffin jänniteyhtälöt ensiö- ja toisiokäämitykselle seuraavasti

$$\bar{U}_1 = \bar{I}_1 \cdot (R_1 + jX_1) + \bar{E}_1, \quad (16)$$

sekä toisiokäämitykselle

$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 \cdot \bar{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2), \quad (17)$$

joissa  $\bar{U}_1$  on ensiöjännite,  $\bar{I}_1$  on ensiövirta,  $r_1$  on käämityksen  $N_1$  resistanssi,  $jX_1$  on käämityksen  $N_1$  reaktanssi,  $E_1$  on indusoitunut jännite ensiökäämissä,  $\bar{U}_2$  on toisiojännite,  $\bar{I}_2$  on toisiovirta,  $r_2$  on käämityksen  $N_2$  resistanssi,  $jX_2$  on käämityksen  $N_2$  reaktanssi ja  $E_2$  on indusoitunut jännite toisiokäämissä. (Del Toro 1985, 64)



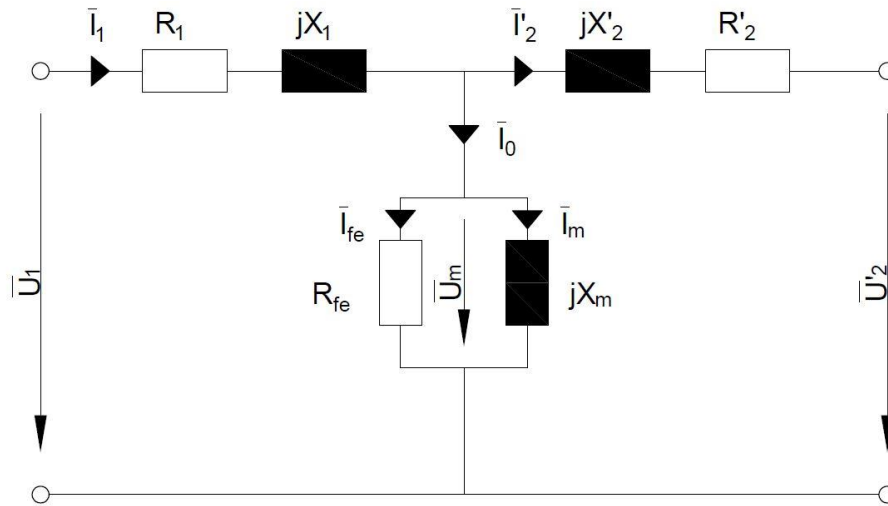
Kuva 8. Erotusmuuntajan piirimalli (Nagsarkar & Sukhija 2014, muokattu)

### 2.5.1 Erotusmuuntajan sijaiskytkentä

Kuvassa (Kuva 9) on esitetty erotusmuuntajan täydellinen sijaiskytkentä. Kuvassa on otettu huomioon myös muuntajan tyhjäkäyntivirta. Sijaiskytkennän komponenttien arvot voidaan mitata muuntajasta tai laskea muuntajan rakenteesta. Käyttäjillä harvoin on mahdollisuutta johtaa lausekkeita rakenteesta lähtien, joten komponentit useimmiten mitataan. Komponentit voidaan mitata suorittamalla muuntajalle ensiön ja toision vaihekohtaiset resistanssit  $R_1$  ja  $R_2$ , tehdään muuntajalle tyhjäkäyntikoe, jonka avulla saadaan selville poikittaiskomponentit  $R_{fe}$  ja  $X_m$ . Oikosulkukokeen avulla saadaan selville pitkitäiskomponentit  $R_k$  ja  $X_k$ , jotka esitetään jäljempänä. (Hietalahti 2011)

Muuntajan sijaiskytkennän parametrien analysoimiseksi, tulee yleisesti sijaiskytkentä esittää yhdessä jännitetasossa, jolloin sijaiskytkennän parametrit tulee redusoida, joko ensiö- tai toisiopuolen jännitetasoon. Sijaiskytkennän parametrien ollessa redusoitu ensiö- tai toisiopuolelle, on sijaiskytkentä edelleen liian monimutkainen käytännöllisiin mitoituksiin. Muuntajan magnetointihaara monimutkaistaa sijaiskytkentää vielä huomattavasti. (Alberta electric system operator 2014)



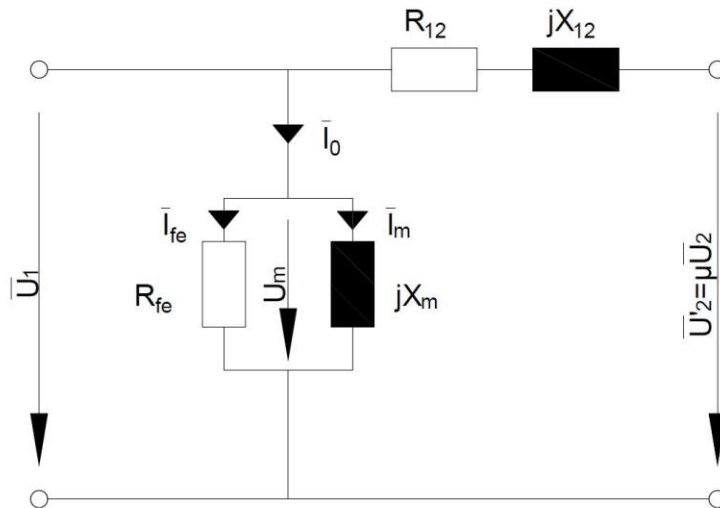


Kuva 9. Erotusmuuntajan täydellinen sijaiskytkentä

Kuvassa  $R_1$  on ensiökäämin resistanssi,  $X_1$  on ensiökäämin hajareaktanssi,  $R'_2$  on toisiokäämin resistanssi ensiöön redusoituna,  $X'_2$  on toisiokäämin ensiöön redusoitu hajareaktanssi,  $R_{fe}$  on rautahäviöresistanssi,  $X_m$  on magnetointireaktanssi.  $U_1$  on ensiöjännite,  $I_1$  on ensiövirta,  $U_m$  on vuo-jännite,  $I_0$  on tyhjäkäyntivirta,  $I'_2$  on ensiöön redusoitu toisiovirta,  $I_{fe}$  on rautahäviövirta ja  $I_m$  on magnetointivirta.

Yleisesti vakiojännitteellä ja vakioataajuudella toimivien muuntajien magnetointivirta  $I_m$  on yleensä hyvin pieni noin 2-5% nimellisestä käämityksen virrasta. Tämä johtuu muuntajan rautasydämessä käytetystä korkean permabiliteetin omaavasta raudasta joka pitää virran  $I_m$  hyvin pienenä. (Del Toro 1985)

Nimellisellä maksimivirralla jännitehäviö käämitysresistansseissa ja hajareaktansseissa ei ylitä 6% muuntajan nimellisjännitteestä. Täten käämitysten virran ja käämityksen yli vaikuttavan jännitteen vaikutukset magnetointihaaraan ovat hyvin pienet ja niiden vaikutukset magnetointihaaraan voidaan jättää huomioimatta. Tämä yksinkertaistus mahdollistaa käämityshaarojen yhdistämisen yhdelle puolelle. Erotusmuuntajan ensiötason redusoitu sijaiskytkentä on esitetty kuvassa (Kuva 10), jossa resistanssit  $R_1$  ja ensiöön redusoitu resistanssi  $R_2$  on yhdistetty muodostaen termin  $R_{12}$ . Edellä mainitulla tavalla on muodostettu myös termi  $jX_{12}$ . Muodostettu sijaiskytkentä on riittävän tarkka mallinustarkoituksiin ja hyödyllinen tehojärjestelmätutkimuksissa. (Alberta electric system operator 2014, 14-15)



Kuva 10. Erotusmuuntajan ensiötasoon redusoitu sijaiskytkentä

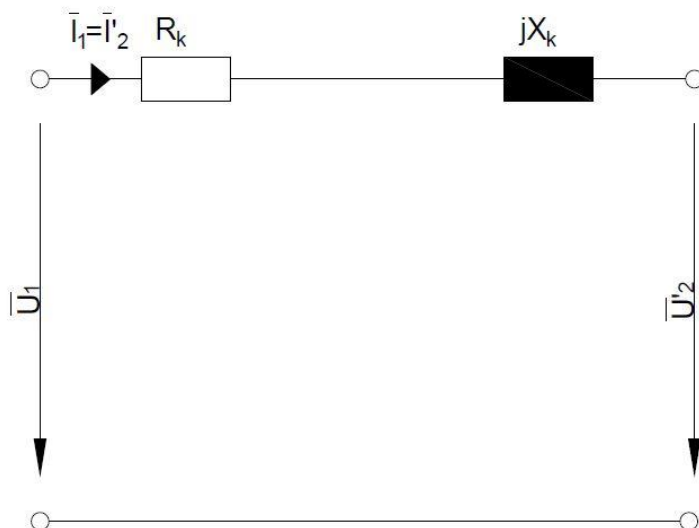
Muuntajan sijaiskytkentää voidaan yksinkertaistaa entisestään poistamalla magnetointihaaran vaikutus sijaiskytkennästä. Kun magnetointihaara poistetaan sen pienen vaikutuksen takia, voidaan muuntajan sijaiskytkentä esittää yksinkertaistettuna sijaiskytkentänä, kuten kuvassa (Kuva 11) on esitetty. Aikaisemmin esitettyjen sijaiskytkentöjen resistanssit ja reaktanssit voidaan laskea tällöin yhteen kuten kaavoissa (Kaava 19 ja 20) on esitetty seuraavasti, muodostan ekvivalenttisen resistanssin  $R_k$  ja reaktanssin  $X_k$ . Resistanssin ja reaktanssin laskemiseksi on ensin tunnettava erotusmuuntajan muuntosuhde  $\mu$

$$\mu = \frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}, \quad (18)$$

$$R_k = R_1 + R'_2 = R_1 + \mu^2 \cdot R_2, \quad (19)$$

$$X_k = X_1 + X'_2 = X_1 + \mu^2 \cdot X_2, \quad (20)$$

(Del Toro 1985)



Kuva 11. Erotusmuuntajan yksinkertaistettu sijaiskytkentä

Kuvassa (Kuva 11) esitettyä sijaiskytkentää käytetään, kun halutaan esittää muuntajan sarjaimpedanssia. Tällä metodilla impedanssi esitetään jännitehäviöprosenttina muuntajan ollessa kuormitettuna täydellä virralla. Esimerkiksi 5% impedanssi tarkoittaa, että jännitehäviö täydellä kuormitusvirralla on 5% tyhjäkäyntijännitteestä tai vastaavasti toisiosassa oikosuljettu, 5% jännite aiheuttaa täyden virran kulkemisen käämityksissä. (Alberta electric system operator 2014, 16)

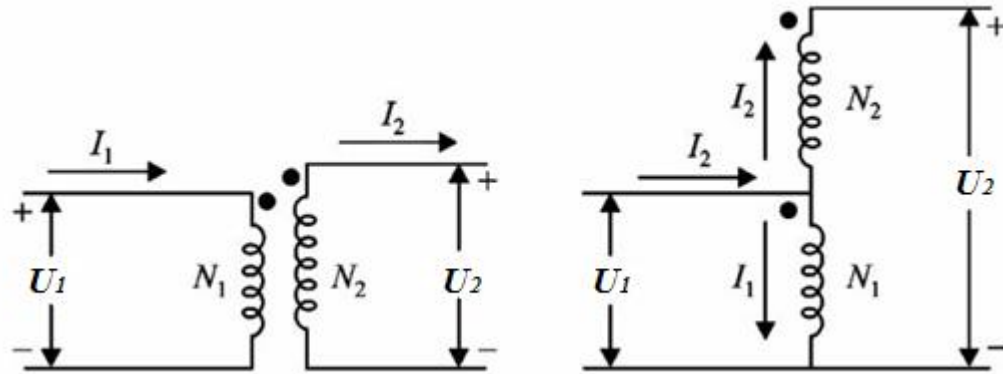
Muuntajan kilpiarvoissa, tätä arvoa esitetäänkin yleensä suhteellisena oikosulkuiмпedanssina  $z_k$  tai suhteellisena oikosulkujännitteenä  $u_k$ .

## 2.6 Säästömuuntaja

Toisena vaihtoehtona keinoverkon korvaajaksi esitetään säästömuuntaja. Säästömuuntajaa syötettäisiin myöskin sähkönjakelujärjestelmän 400V jännitteellä, toisiosasta saataisiin 500V ja 690V jännitteet väliottopisteiden avulla.

Eräs perinteisten muuntajien perusominaisuuksista on galvaaninen erotus ensiö- ja toisiokäämitysten välillä. Erotusmuuntaja voidaan muuttaa säästökytketyksi muuntajaksi eli säästömuuntajaksi kytkemällä sen ensiö- ja toisiokäämitys sarjaan kuten kuvassa (Kuva 12) on esitetty. Säästömuuntajalla on mahdollista saavuttaa huomattavat rahalliset säästöt verrattuna samoilla spesifikaatiolla verrattuun erotusmuuntajaan. Säästömuuntaja vaatii

rakenteensa vuoksi huomattavasti vähemmän kuparia, johtaen pienempiin kuormitushäviöihin. Pienemmät häviöt parantavat hyötysuhdetta verrattuna erotusmuuntajaan. Säätömuuntajan suurin haitta on sen galvaanisen erotuksen puuttuminen. (Nagsarkar & Sukhija 2014)



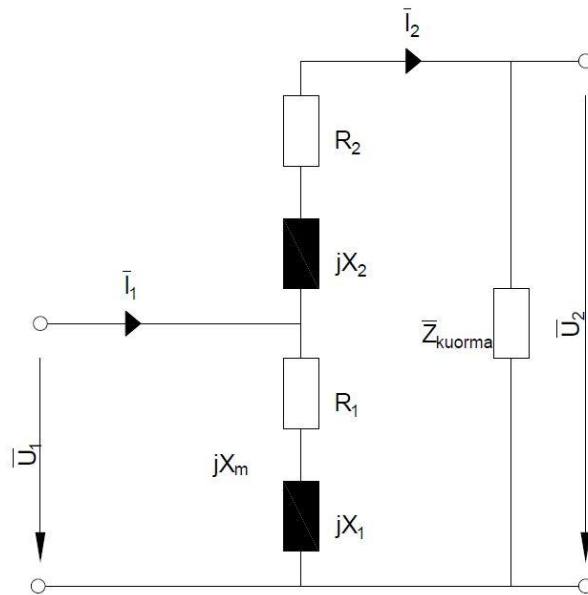
Kuva 12. Säätömuuntajan muodostuminen erotusmuuntajasta (Nagsarkar & Sukhija 2014, muokattu)

Säätömuuntajan toisena etuna on mahdollisuus suurempaan teholuokitukseen verrattuna erotusmuuntajaan. Oletetaan, että  $S_m$  ja  $S_{sm}$  ovat erotusmuuntajan ja säätömuuntajan näennäistehon luokitukset, jolloin

$$\frac{S_{sm}}{S_m} = \frac{(\bar{U}_1 + \bar{U}_2)\bar{I}_1}{\bar{U}_1\bar{I}_1} = 1 + \frac{N_2}{N_1} = 1 + \frac{1}{\mu} \quad (21)$$

jossa  $\bar{U}_1$  on syöttöjännite,  $\bar{I}_1$  on syöttövirta,  $N_1$  kuvaa ensiökäämin kierroslukumäärää,  $\bar{U}_2$  on kuorman jännite,  $\bar{I}_2$  on kuorman virta,  $N_2$  kuvaa toisiökäämin kierroslukumäärää sekä  $\mu$  on muuntosuhde. (Vasudevan, Sridhara & Sasidhara Rao 2017)

Kaavasta (Kaava 21) on huomattavissa, että säätömuuntajan suurempi toisiojännite on mahdollinen suuremmilla kierroksilla käämityksessä  $N_2$ . Säätömuuntaja verrattuna erotusmuuntajaan samalla nimellisteholla, omaa pienemmän sisäisen impedanssin, korkeamman hyötysuhteen ja pienemmän fyysisen koon. (Nagsarkar & Sukhija 2014)



Kuva 13. Jännitettä nostavan säästömuuntajan piirimalli

Kuvassa (Kuva 13) esitetyllä jännitettä nostavalla säästömuuntajalla voidaan johtaa jänniteyhälöt Kirchoffin lain avulla ensimmäiseksi syöttöpuolelle

$$\bar{U}_1 = \bar{E}_1 + (\bar{I}_1 - \bar{I}_2) \cdot (R_1 + jX_1), \quad (22)$$

sekä kuorman puolelle

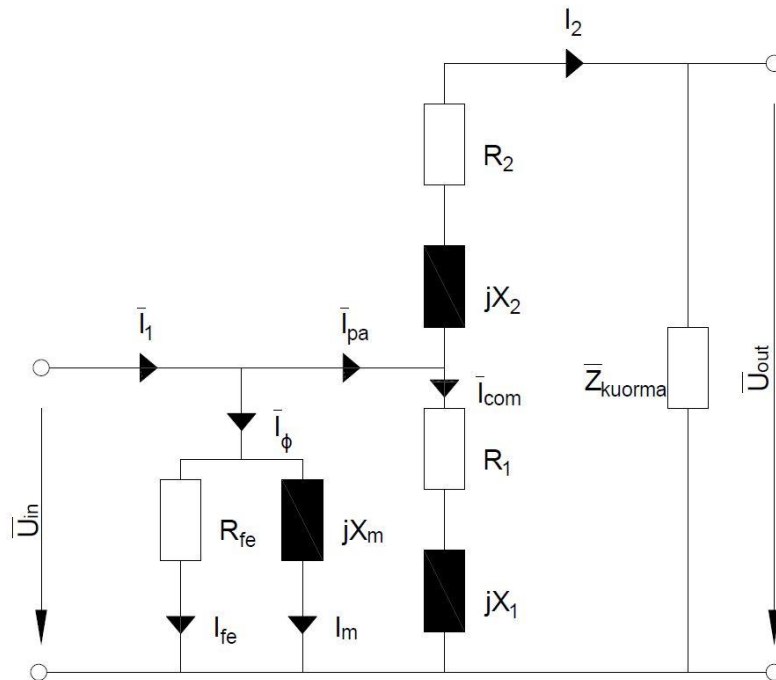
$$\bar{E}_2 = \bar{U}_2 - (\bar{I}_1 - \bar{I}_2) \cdot (R_1 + jX_1) + \bar{I}_2 \cdot (R_2 + jX_2), \quad (23)$$

joissa  $\bar{U}_1$  on syöttöjännite,  $\bar{I}_1$  on syöttövirta,  $r_1$  on käämityksen  $N_1$  resistanssi,  $jX_1$  on käämityksen  $N_1$  reaktanssi,  $E_1$  on ensiökäämiin indusoitunut jännite,  $\bar{U}_2$  on kuorman jännite,  $\bar{I}_2$  on kuorman virta,  $r_2$  on käämityksen  $N_2$  resistanssi,  $jX_2$  on käämityksen  $N_2$  reaktanssi ja  $E_2$  on toisiokäämiin indusoitunut jännite. (Vasudevan, Sridhara & Sasidhara Rao 2017)

### 2.6.1 Säästömuuntajan sijaiskytkentä

Säästömuuntajan sijaiskytkentä on käytettävissä jännitettä nostavalle sekä laskevalle säästömuuntajalle. Säästömuuntajan sijaiskytkennän parametrit ovat selvitettävissä samoilla menetelmillä kuin perinteisellä erotusmuuntajalla. Säästömuuntajan vuotoimpe-

danssi voidaan selvittää suorittamalla mittaukset pienemmän jännitteen puoli oikosuljetuna. Magnetointihaaran parametrit voidaan selvittää tyhjäkäyntimittauksella. Säästömuuntajalla oikosulkuimpedanssi on pienempi kuin perinteisellä muuntajalla samoilla spesifikaatioilla. Pienempää oikosulkuimpedanssia pidetään joissain tapauksissa säästömuuntajan huonona puolena sen mahdollistaessa suuremman oikosulkuvirran muodostumisen. (Alberta electric system operator 2014, 30-31 & Vasudevan, Sridhara & Sasidhara Rao 2017)



Kuva 14. Säästömuuntajan täydellinen sijaiskytkentä

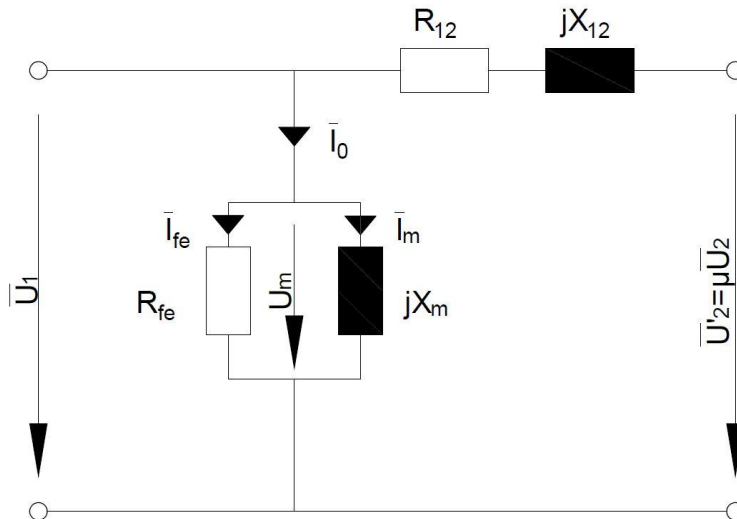
Säästömuuntajan yksinkertaistetun sijaiskytkennän käämitysten resistanssit ja hajareaktanssit voidaan esittää ekvivalenttisen resistanssina  $R_k$  sekä reaktanssina  $X_k$

$$R_k = R_1 + R'_2 = R_1 + (\mu - 1)^2 \cdot R_2, \quad (24)$$

$$X_k = X_1 + X'_2 = X_1 + (\mu - 1)^2 \cdot X_2, \quad (25)$$

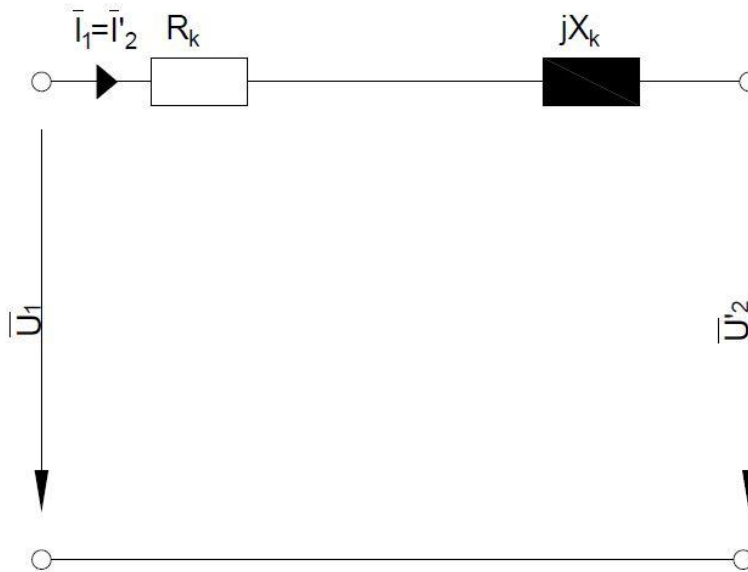
(Vasudevan, Sridhara & Sasidhara Rao 2017)

Kuten erotusmuuntajalla, voidaan sijaiskytkentä esittää ottaen huomioon magnetointihaara. Sijaiskytkentä voidaan esittää tällöin kuvassa (Kuva 15) esitetyllä tavalla.



Kuva 15. Säästömuuntajan ensiötasoon redusoitu sijaiskytkentä

Mikäli sijaiskytkentää halutaan yksinkertaistaa, jättäen huomioimatta magnetointihaara, voidaan esittää sijaiskytkentä tällöin kuvassa (Kuva 16) esitetyllä tavalla.



Kuva 16. Säästömuuntajan yksinkertaistettu sijaiskytkentä

Kuten sijaiskytkennöistä huomataan, lukuun ottamatta täydellistä sijaiskytkentää, ovat redusoitu- sekä yksinkertaistettu sijaiskytkentä samat kuin erotusmuuntajalla. Erona sijaiskytkennöissä on lopulta lukuarvot. Sijaiskytkentä ei itsessään ota huomioon erotusmuuntajan galvaanista erotusta.

## 2.7 Lähtötilanne Danfoss Drivesin Tampereen toimipisteessä

Keinoverkko -nimitystä käytetään Danfoss Drivesin Tampereen toimipisteellä toteutusta järjestelmästä, joka muodostuu taajuusmuuttajasyöttöisestä muuntajasta. Tampereen toimipisteen sähköjakelujärjestelmä on rakennettu nykyaikaisesti siten, että ajettaessa sähkömoottoreita taajuusmuuttajilla, pystytään kuormamoottorin tuottama sähköenergia siirtämään takaisin syöttöverkkoon AFE-järjestelmän avulla. Sähkönsyöttö on toteutettu usean AFE-yksikön avulla, jossa välipiiriin on rakennettu oma kiskostonsa, josta kyetään vaihtosuuntausyksiköiden (INU) avulla tuottamaan ajotyöposteisiin vaaditut käyttöjännitteet. Keinoverkossa jännitteen nostaminen on mahdollista syöttävän taajuusmuuttajan käyttöpaneelin avulla nostamalla välipiiriin jännitettä. (Danfoss Drives 2016)



Kuva 17. Tampereen toimipisteen keinoverkko

Kuvassa (Kuva 17) on esitetty keinoverkon rakenne. Ensimmäisenä on esitetty vaihtosuuntausyksikkö (INU), jolla muodostetaan haluttu vaihtojännite. Toisena on esitetty YNd11- kytkentäryhmäinen 300kVa muuntaja. Muuntajaa syötetään siis jännitettä nostavana. Kolmantena on esitetty muuntajan korkeajännitepuolelle kytketty LC-suodatin. Suodattimella saadaan parannettua pulssinleveysmoduloitu jännite sinimuotoiseksi. Neljäntenä on esitetty ajotyöposte, johon testattava taajuusmuuttaja sijoitetaan. (Danfoss Drives 2016)



### 3 SÄHKÖJÄRJESTELMÄN MALLINTAMINEN

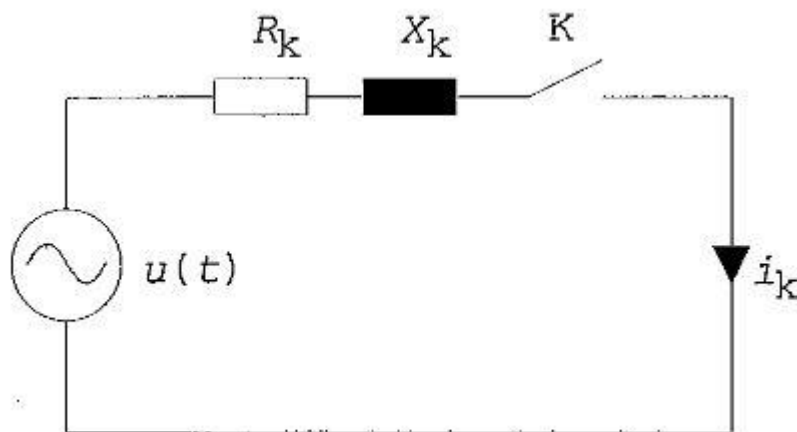
Tässä luvussa tutustutaan oikosulkuvirran ominaisuuksiin, esitetään Theveninin menetelmä sähkönjakelujärjestelmän mallintamiseen ja kuvataan laskentamenetelmät.

Oikosulkuvirtojen laskennalla saadaan määritettyä sähköverkon jäykkyys. Oikosulkuvirran laskemiseen helppokäyttöisimmät menetelmät ovat ominaisoikosulkutehooon perustuva menetelmä sekä Theveninin menetelmä. Theveninin menetelmällä saadaan selville myös vaihekulmat. (Huotari & Partanen 1998)

Tässä opinnäytetyössä mallinnustarkkuuden parantamiseksi päädyttiin käyttämään Theveninin menetelmää. Tällöin päästään laskennassa tarkempiin arvoihin ja pystytään huomioimaan vaihekulmat.

#### 3.1 Oikosulkuvirta

Oikosulkuvirran syntymistä tarkastellaan kuvassa (Kuva 18) muodostetun sijaiskytkennän avulla. Kuvassa kytkimen K sulkeminen vastaa oikosulkua.



Kuva 18. Yksivaiheisen oikosulun sijaiskytkentä ilman kuormitusta (Huotari & Partanen 1998)

Syöttöjännitteen ollessa yhtälön (26) mukainen

$$u(t) = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha), \quad (26)$$

voidaan kuvassa (Kuva 18) esitetyle piirille johtaa differentiaaliyhtälö

$$R_k i_k + L_k \frac{di_k}{dt} = \hat{u} \sin(\omega t + \alpha), \quad (27)$$

jossa  $\hat{u}$  on sinimuotoisen jännitteen huippuarvo,  $\omega$  on kulmataajuus,  $t$  on aika oikosulun alkuhetkestä,  $\alpha$  on jännitteen vaihekulma nollakohdasta laskettuna oikosulun alkuhetkellä,  $R_k$  on oikosulkupiirin resistanssi,  $i_k$  on oikosulkuvirta ja  $L_k$  on oikosulkupiirin induktanssi. (Huotari & Partanen 1998)

Yhtälöstä (Kaava 27) voidaan ratkaista oikosulkuvirta  $i_k(t)$  seuraavasti

$$i_k(t) = \frac{\hat{u}}{Z_k} \left[ \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) - e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\alpha - \varphi_k) \right], \quad (28)$$

jossa  $Z_k$  on oikosulkupiirin vaiheimpedanssi,  $\varphi_k$  on oikosulkupiirin impedanssin vaihekulma, ja  $\tau$  on oikosulkupiirin aikavakio. (Huotari & Partanen 1998)

Oikosulkupiirin vaiheimpedanssi  $Z_k$ , vaihekulma  $\varphi_k$  ja aikavakio  $\tau$  määritellään oikosulkupiirin resistanssin  $R_k$  ja reaktanssin  $X_k$  avulla seuraavasti

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} \quad (29)$$

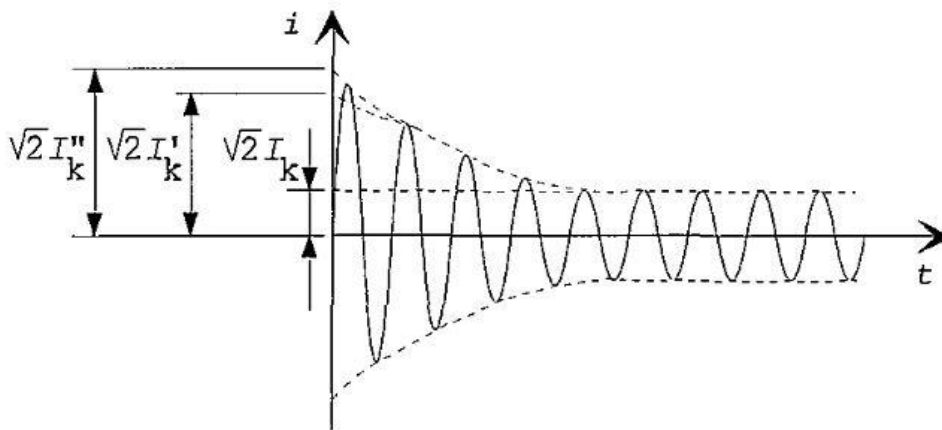
$$\varphi_k = \arctan \frac{X_k}{R_k} \quad (30)$$

$$\tau = \frac{X_k}{\omega R_k} = \frac{L_k}{R_k}, \quad (31)$$

Yhtälössä (Kaava 28) ensimmäisenä terminä on oikosulkuvirran vaihtovirtakomponentti. Toinen termi on oikosulkuvirran tasakomponentti, joka vaimenee aikavakiolla  $\tau$ . Tasavirtakomponentti saattaa oikosulkuvirran hetkellisarvon alkutilanteessa vikaa edeltäneen virran suuruiseksi. (Huotari & Partanen 1998).

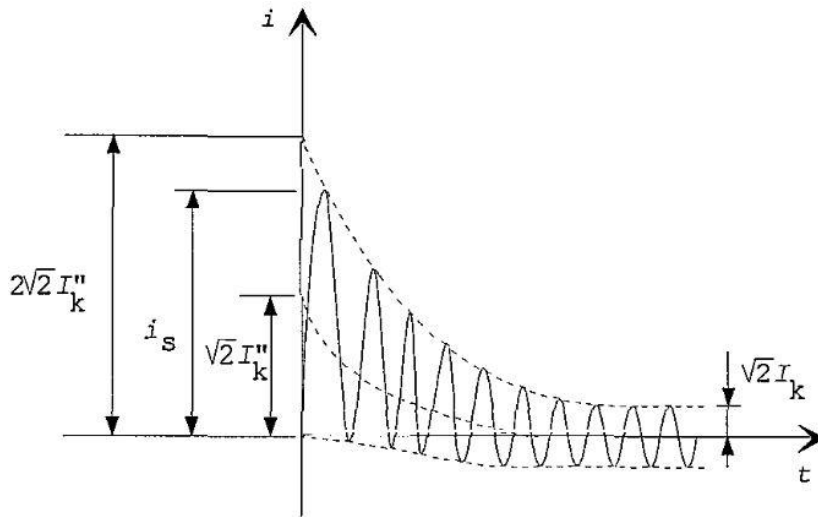
Kuvassa (Kuva 18) esitettyssä piirissä ei ole kuormitusta, joten vikaa edeltänyt virta on nolla. Täten vaihto- ja tasavirtakomponentit ovat alussa yhtä suuria, mutta vastakkaismerkkisiä.

Oikosulun muodostumishetkellä on suuri vaikutus tasakomponentin suuruuteen. Mikäli oikosulku muodostuu hetkellä, jossa  $\alpha - \varphi_k = 0^\circ$  tai  $180^\circ$ , ei tasavirtakomponenttia esiinny. Tällöin oikosulkuvirta on symmetrinen. Kuvassa (Kuva 19) on esitetty symmetrisen oikosulkuvirran muodostuminen. On muistettava, että kolmivaihejärjestelmässä oikosulkuvirta voi olla symmetrinen ainoastaan yhdessä vaiheessa kerrallaan. (Huotari & Partanen 1998)



Kuva 19. Symmetrinen yksivaiheinen oikosulkuvirta (Huotari & Partanen 1998)

Muulla hetkellä oikosulkuvirta on tasakomponentin takia epäsymmetrinen. Mikäli oikosulku muodostuu hetkellä, jossa  $\alpha - \varphi_k = +90^\circ$ , tasavirtakomponentti on suurimmassa arvossaan alkuhetkellä ja oikosulkuvirta tällöin epäsymmetrinen (Kuva 20). (Huotari & Partanen 1998)



Kuva 20. Epäsymmetrinen yksivaiheinen oikosulkuvirta (Huotari & Partanen 1998)

Oikosulkuvirta saavuttaa huippuarvonsa noin 10ms kuluttua muodostumishetkestä. Suurinta oikosulkuvirran huippuarvoa kutsutaan sysäyoikosulkuvirraksi  $i_s$ . (Huotari & Partanen 1998)

Kuvissa (Kuvat 19 ja 20) esitetyt termit ovat seuraavat  $I_k''$  on alkuoikosulkuvirta,  $I_k'$  on muutosoikosulkuvirta,  $I_k$  on jatkuvan tilan oikosulkuvirta ja  $I_s$  on oikosulkuvirran huippuarvo eli sysäyoikosulkuvirta. (Huotari & Partanen 1998)

Kolmivaiheisten oikosulkuvirtojen muodostuminen jätetään tässä osuudessa tarkastelematta. Todetaan vain, että symmetrinen kolmivaihejärjestelmä jaetaan täten kolmeen yksivaiheiseen piiriin. (Huotari & Partanen 1998)

### 3.2 Oikosulkusuhte

Syöttöverkon oikosulkutehon ja verkkoa kuormittavan laitteen nimellistehojen välinen suhde eli oikosulkusuhte on tärkeä mitoitusperuste. Oikosulkusuhte toimii eräänä määritelmänä syöttöverkon jäykkyydelle. Tällä tarkoitetaan, että verkon oikosulkuteho on suuri verrattuna sitä kuormittavaan tehoon. Tällöin verkon impedanssit ovat pieniä, eivätkä verkkoa kuormittavat laitteet vaikuta merkittävästi verkon jännitteen sinimuotoisuuteen tai aiheuta merkittävää jännitteenalenemaa. Sähköverkon oikosulkutehon ja laitteen oikosulkutehon välisen suhteen kasvaessa taajuusmuuttajan tuottamat yliaaltovirrat

tuottavat pienempiä yliaaltojännitteitä verkkoon, koska verkon impedanssi pienenee oikosulkutehon kasvaessa. (Mattsson 2008)

Oikosulkusuhde  $R_{sc}$  lasketaan kaavalla (Kaava 32). Oikosulkusuhde voidaan myös määrittellä syöttävän verkon oikosulkuvirran  $I_{sc}$  ja nimellisvirran  $I_n$  suhteella, kaavassa (Kaava 33) esitetyllä tavalla. Virtojen tulee kuitenkin olla redusoitu samaan jännitetasoon. Syöttöverkon oikosulkuteho  $S_{sc}$  voidaan laskea nimellisjännitteen  $U_n$  ja kokonaisimpedanssin  $Z_k$  avulla, kuten kaavassa (Kaava 34) on esitetty. Laitteen nimellinen näennäisteho  $S_n$  voidaan laskea laitteen nimellisjännitteen  $U_n$  ja laitteen nimellisvirran  $I_{equ}$  avulla kaavalla (Kaava 35). Esitetty laitteen nimellistehon laskentakaava pätee kolmivaiheisille laitteille, joiden nimellinen syöttövirta on  $I_{equ}$ . (IEC 1998)

$$R_{sce} = \frac{S_{sc}}{S_n}, \quad (32)$$

$$R_{sce} = \frac{I_{sc}}{I_n}, \quad (33)$$

$$S_{sc} = \frac{U_n^2}{Z_k}, \quad (34)$$

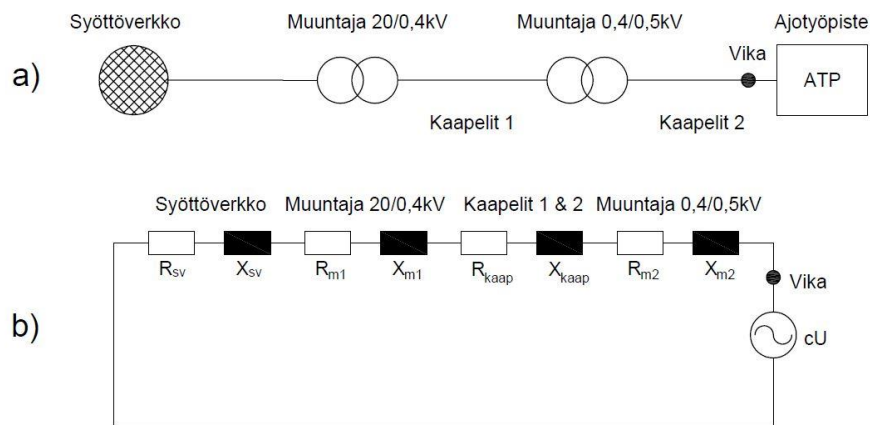
$$S_n = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n, \quad (35)$$

### 3.3 Theveninin menetelmä ja oikosulkupiirin impedanssit

Laskettaessa sähköjärjestelmän oikosulkuvirtoja käyttäen Theveninin menetelmää, tulee oikosulkupiirin komponentit kuvata riittävän tarkkoilla matemaattisilla malleilla. Oikosulkuvirtaa syöttävänä komponenttina toimii syöttävä verkko. Muita syöttäviä komponentteja ovat muun muassa tahtikoneet ja epätahtikoneet, mutta niitä ei käsitellä tässä laskennassa. Oikosulkuvirtaa rajoittavia komponentteja ovat oikosulkupiirin impedanssit, joita ovat muuntajat, kuristimet, kiskot, kaapelit ja johdot. Muuntajat ja kuristimet ovat näistä tärkeimpiä. (Huotari & Partanen 1998)

Tampereen toimipisteen mallinnettava oikosulkupiiri muodostuu päämuuntajan takaisesta syöttöverkosta, toimipisteen tontilla sijaitsevasta päämuuntajasta, jolla muutetaan

keskijänniteverkon 20kV jännite pienjännitetasoon 0,4kV ja päämuuntamon ja mitoitettavan muuntajan välisistä kaapeloinneista, mitoitettavasta muuntajasta sekä ajotyöpisteen ja mitoitettavan muuntajan välisistä kaapeleista. Syöttökeskusten kiskostojen impedansseja ei ole tässä laskennassa otettu huomioon niiden mitättömien impedanssien vuoksi. Kuvassa (Kuva 21) on esitetty mallinnettava verkko viivakaaviona sekä siitä muodostetulla impedanssiesityksellä.



Kuva 21. Theveninin menetelmällä muodostettu piiri

Laskettaessa oikosulkuvirtoja käyttäen Theveninin menetelmää, kolmivaiheinen oikosulkuvirta  $I_{k3v}$  on laskettavissa käyttäen yhtälöä (Kaava 36).

$$I_{k3v} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_k} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (\sqrt{(R_k)^2 + (X_k)^2}} \quad (36)$$

joissa  $c$  on taulukosta (Taulukko 2) esitetty kerroin,  $U$  on järjestelmän pääjännite ja  $Z_k$  on piirin kokonaisimpedanssi. (Huotari & Partanen 1998)

Taulukko 2. Taulukko IEC 60909 mukaisista kertoimista (ABB 2000)

Nimellisjännite ( $U_n$ )	Maksimioikosulkuvirta ( $C_{max}$ )	Minimioikosulkuvirta ( $C_{min}$ )
Pienjännite 100-1000V a) 230V/400V b) muut jännitteet	1	0,95
	1,05	1
Keskijännite 1kV-35kV	1,1	1
Suurjännite 35kV-230kV	1,1	1

Seuraavaksi esitetään oikosulkupiirin impedanssien määrittäminen eri komponenteille oikosulkupiiristä.

### 3.3.1 Syöttöverkko

Syöttävästä verkosta tunnetaan yleensä alkuoikosulkuvirta  $I_{k_{sv}}''$  tai näennäinen oikosulkuteho  $S_{k_{sv}}''$ . Syöttöverkon oikosulkuteho  $S_{k_{sv}}''$  on laskettavissa seuraavasti oikosulkuvirrasta  $I_{k_{sv}}''$

$$S_{k_{sv}}'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{k_{sv}}'' \quad (37)$$

Syöttävän verkon impedanssi  $Z_{kv}$  voidaan laskea seuraavasti

$$Z_{k_{sv}} = \frac{cU_n^2}{S_{k_{sv}}''} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{k_{sv}}''}, \quad (38)$$

jossa  $U_n$  on syöttävän verkon nimellispääjännite,  $S_{k_{sv}}''$  on syöttävän verkon näennäinen alkuoikosulkuteho,  $I_{k_{sv}}''$  on syöttävän verkon alkuoikosulkuvirta ja  $c$  on taulukon (Taulukko 2) mukainen jännitekerroin.

Jos syöttöverkon resistanssia ei tunneta, voidaan syöttöverkon pienjännitepuolelle redusoitu reaktanssi ja resistanssi laskea kaavoilla (Kaava 39 ja 40)

$$X_{k_{sv}} = \frac{1,1 \cdot U_n^2}{S_{k_{sv}}''}, \quad (39)$$

$$R_{k_{sv}} = 0,1 \cdot X_{k_{sv}}, \quad (40)$$

joissa  $R_{k_{sv}}$  on syöttävän verkon resistanssi,  $X_{k_{sv}}$  on syöttävän verkon reaktanssi,  $U_n$  on pienjännitepuolen nimellispääjännite ja  $S_{k_{sv}}''$  on syöttävän verkon näennäisalkuoikosulkuteho. (Huotari & Partanen 1998)

### 3.3.2 Muuntajat

Kaksikämmimuuntajalle oikosulkuimpedanssi, oikosulkuresistanssi ja oikosulkureaktanssi laskettiin kaavoilla (Kaava 41, 42 ja 43)

$$Z_{k_m} = \frac{u_k}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \quad (41)$$

$$R_{k_m} = \frac{u_r}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3 \cdot I_n^2}, \quad (42)$$

$$X_{k_m} = \sqrt{Z_{k_m}^2 - R_{k_m}^2}, \quad (43)$$

joissa  $Z_{k_m}$  on muuntajan oikosulkuimpedanssi,  $R_{k_m}$  on muuntajan oikosulkuresistanssi,  $X_{k_m}$  on muuntajan oikosulkureaktanssi,  $U_n$  on muuntajan nimellispääjännite,  $I_n$  on muuntajan nimellisvirta,  $S_n$  on muuntajan nimellinäennäisteho,  $P_{kn}$  on muuntajan kokonaispätötehohäviöt nimellisvirralla,  $u_k$  on muuntajan suhteellinen oikosulkujännite ja  $u_r$  on muuntajan resistanssin aiheuttama suhteellinen oikosulkujännite. (Huotari & Partanen 1998)

### 3.3.3 Kaapelit ja kiskot

Oikosulkuvirtojen laskemiseksi selvitettiin syöttökaapelointi tuotekehitysyksikön sähköpiirustuksista. Kaapelityyppien resistanssiarvot selvitettiin valmistajien taulukoista (Reka 2016) ja reaktanssiarvot selvitettiin julkaisusta D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista (Tiainen 2012). Kaapelityypit, arvot sekä muut laskentaan tarvittavat tiedot kerättiin taulukkoon (Taulukko 4).

Teollisuuden sähköverkoissa kaapelipituudet ovat yleensä niin lyhyitä, että niiden vaikutus oikosulkupiirin impedanssiin on vähäinen. Laskettaessa oikosulkuvirtoja ja impedansseja, tarvitaan kaapeleiden resistanssi ja reaktanssiarvot valmistajien luetteloista. Arvot ovat yleisesti ilmoitettu pituusyksikköä kohti, jolloin kaapelin impedanssi  $Z_j$  lasketaan yhtälöllä



$$Z_j = (r + jx)l, \quad (45)$$

jossa  $r$  on kaapelin tasavirtaresistanssi ( $+20^\circ\text{C}$ ) pituusyksikköä kohti,  $x$  on kaapelin reaktanssi pituusyksikköä kohti ja  $l$  on kaapeliyhteyden pituus. (Huotari & Partanen 1998)

### 3.4 Oikosulkupiirin impedanssit

Seuraavaksi voidaan laskea numeerisesti oikosulkupiirin komponenttien impedanssit aikaisemmin esitetyillä menetelmillä, jonka jälkeen saadaan muodostettua lopullinen Theveninin-piiri, josta saadaan halutut oikosulkuvirrat.

#### 3.4.1 Syöttöverkko

Syöttävän verkon alkuoikosulkuvirraksi  $I_{k_{sv}}$  saatiin Tampereen Sähkölaitokselta liitteen (liite 1) mukaisesti 15000A. Oikosulkuvirta oli määritetty toimipisteen sähköpääkeskukselle, jolloin kyseiseen arvoon on jo määritetty 800kVa päämuuntajan impedanssi sekä syöttökaapeliin impedanssit pääkeskukselle.

Syöttöverkon impedanssia laskettaessa tulee tietää, halutaanko määrittää suurinta vai pienintä oikosulkuvirtaa, jolloin valitaan aikaisemmin esitetystä taulukosta (Taulukko 2) haluttu kerroin  $c$ . Tässä työssä vain suurin oikosulkuvirta on tarpeellinen oikosulkusuhteen määrittämiseksi.

Aluksi on laskettu syöttävän verkon näennäisoikosulkuteho  $S_{k_{sv}}$  kaavalla (Kaava 37)

$$S_{k_{sv}} = \sqrt{3} \cdot 400V \cdot 15000A = 10,39MVA,$$

Seuraavaksi laskettiin syöttävän verkon impedanssi  $Z_{k_{sv}}$  päämuuntajan pienjännitepuolella kaavalla (Kaava 38). Jännitekertoimeksi  $c$  otettiin suurinta oikosulkuvirtaa laskettaessa taulukon (Taulukko 2) mukaista arvoa  $c_{max} = 1,0$ .

$$Z_{k_{sv}} = \frac{1,0 \cdot 400V^2}{10,39MVA} = 0,015396\Omega,$$

Kun verkon impedanssi tiedetään, voidaan siitä ratkaista verkon pienjännitepuolelle redusoitu reaktanssi  $X_{k_{sv}}$  ja verkon resistanssi  $R_{k_{sv}}$  seuraavasti kaavoilla (Kaava 39 ja 40)

$$X_{k_{sv}} = \frac{1,1 \cdot 400^2}{10,39MVA} = 0,016939\Omega,$$

$$R_{k_{sv}} = 0,1 \cdot 0,016939\Omega = 0,001694\Omega,$$

Reaktanssin ja resistanssin tulosten perusteella saadaan verkon impedanssi kulmamuodossa seuraavasti  $(0,001694+j0,016939)\Omega$

### 3.4.2 Päämuuntaja

Toimipisteen päämuuntajan impedanssia ei suoranaisesti tarvita oikosulkuvirran määrittämisessä, koska Tampereen Sähkölaitoksen ilmoittama oikosulkuvirta oli ilmoitettu toimipisteen sähköpääkeskukselle. Päämuuntajan laskennalliset arvot ovat kuitenkin esitetty tässä osuudessa, jotta niitä voidaan tarkastella myöhemmin tarvittaessa.

Taulukko 3. Päämuuntajan kilpiarvot

ABB CTF-800/20.5PNSm		
Nimellisjännite [V]	YJ	20500 ±2x2.5%
	AJ	410
Virta [A]	YJ	22.53
	AJ	1127
Kytkentäryhmä	Dyn11	
Nimellistaajuus [Hz]	50	
Oikosulkuimpedanssit [%]	6.01	
Tyhjäkäyntihäviöt [W]	600	
Kuormitushäviöt [W]	7928	

Päämuuntajan kilpiarvojen avulla laskettiin oikosulkuimpedanssi, nimellisvirta, oikosulkuresistanssi ja oikosulkureaktanssi seuraavasti:

$$Z_{k_{pm}} = \frac{u_k}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{6.01\%}{100} \cdot \frac{400V^2}{800 \cdot 10^3 VA} = 0,01202 \Omega,$$

$$I_{n_{pm}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{800kVA}{\sqrt{3} \cdot 400V} = 1154,7 A,$$

$$R_{k_{pm}} = \frac{u_r}{100\%} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{P_{kn}}{3 \cdot I_n^2} = \frac{7928W}{3 \cdot (1154.7A)^2} = 0,001982 \Omega,$$

$$X_{k_{pm}} = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{0.01202\Omega^2 - 0,001982\Omega^2} = 0,011855 \Omega,$$

### 3.4.3 Kaapelit

Piiriin laskettavat kaapeleiden impedanssit laskettiin taulukkoon (Taulukko 4). Ensimmäiseksi on esitetty päämuuntajan ja sähköpääkeskuksen (102MDS0.1) välinen kaapelointi on toteutettu AXCMK-HF 4x4x300+88 Al, jossa yksittäisen kaapelin pituus on 100m. Tätä impedanssia ei kuitenkaan erikseen lasketa mukaan, sillä se on jo otettu huomioon Tampereen Sähkölaitoksen ilmoittamassa 15000A oikosulkuvirrassa.

Seuraavaksi taulukossa (Taulukko 2) on esitetty sähköpääkeskuksen ja prosessin syöttökeskuksen (101PMS0.1) välinen kaapelointi. Kaapelointi on toteutettu neljällä rinnakkaisella AXCMK-HF 4x185+57 Al, joiden yksittäinen pituus on 10m.

Prosessin syöttökeskuksen (101PMS0.1) ja ryhmäkeskuksen (101RIC0.2) välinen kaapelointi on toteutettu kahdella rinnakkaisella AMCMK 3x185+57 Al, joiden yksittäinen pituus on 15m.

Ryhmäkeskuksen (101RIC0.2) ja tämänhetkisen keinoverkon välinen kaapelointi on toteutettu kahdella rinnakkaisella AMCMK 3x120+41 Al, joiden yksittäinen pituus on 15m.

Kaapeleiden yhteisimpedanssiksi  $\bar{Z}_{k_j}$  laskettiin 400V tasossa  $0,003817 \angle 21,59^\circ \Omega$ .

Taulukko 4. Kaapeleiden laskennalliset arvot

	Kaapeleiden impedanssit			Taulukko			Laskettu			
	Kaapeli	Rinnan	Pituus (km)	R ( $\Omega$ )/km	X ( $\Omega$ )/km	Z ( $\Omega$ )/km	R ( $\Omega$ )/km	X ( $\Omega$ )/km	Z ( $\Omega$ )/km	Kulma ( $^\circ$ )
ATP 4	AXCMK-HF 4x300+88	4	0,1	0,1	0,08	0,128	0,0025	0,002	0,0032	38,66
	AXCMK-HF 4x185+57	4	0,01	0,164	0,08	0,182	0,00041	0,0002	0,000456	26
	AMCMK 4x185+57	2	0,015	0,164	0,08	0,182	0,00123	0,0006	0,001369	26
	AMCMK 4x120+41	2	0,015	0,253	0,08	0,265	0,0018975	0,0006	0,001992	17,53
						$\Sigma$	0,003538	0,0014000	0,003817	21,59

### 3.4.4 Mitoitettu muuntaja

Mitoitettavaksi jännitteennostomuuntajaksi valittiin teknillistaloudellisin perustein 300kVA muuntaja. Trafotek Oy toimitti haluttujen vaatimusten mukaisesti tekniset tiedot yhdelle erotusmuuntajalle sekä yhdelle säästömuuntajalle.

Erotusmuuntajaksi valikoitui muuntaja, jolla välitapituksen avulla toisiossa pystytään valitsemaan 500V ja 690V jännitteet. Erotusmuuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi 500V tasossa on 3% sekä 690V tasossa 3,5%.

Säästömuuntajassa jännitteen nosto tapahtuu myös välitapitusten avulla, jotta toisio-  
käämityksestä saadaan 500V ja 690V jännitteet. Säästömuuntajalle suhteellinen oikosul-  
kuimpedanssi 500V tasossa on 0,5% ja 690V tasossa 1,5%.

Toimitettujen muuntajien tekniset arvot laskettiin taulukkoon (Taulukko 5).

Taulukko 5. Muuntajien laskennalliset arvot

300kVA muuntaja				
Muuntajatyyppe	Jännitetaso (V)	Resistanssi R ( $\Omega$ )	Reaktanssi X ( $\Omega$ )	Impedanssi Z ( $\Omega$ )
Erotusmuuntaja	500	0,0134	0,0211277	0,02500
	690	0,0227510	0,0506719	0,0555450
Säästömuuntaja	500	0,0022275	0,0035213	0,0041667
	690	0,0100528	0,0215782	0,0238050

### 3.4.5 Järjestelmän oikosulkuvirta

Järjestelmän lopullisen oikosulkuvirran määrittämiseksi laskettiin ensimmäiseksi yhteen syöttöverkon sekä kaapelointien impedanssit, jonka jälkeen voitiin impedanssit redusoida 500V ja 690V jännitetasoihin.

$$R_{k_{sv}} + R_{k_j} = (0,001694 + 0,003538)\Omega = 0,005236\Omega$$

$$X_{k_{sv}} + X_{k_j} = (0,016939 + 0,001400)\Omega = 0,018339\Omega$$

$$\bar{Z}_{kok} = (0,005236 + j0,018339)\Omega = (0,019072 \angle 74,07^\circ)\Omega$$

Tämän jälkeen redusoidaan yhteenlaskettu impedanssi 400V tasosta mitoitettavan muuntajan 500V ja 690V tasoihin.

### Oikosulkuvirran laskenta 500V tasossa

Ensimmäiseksi redusoidaan 400V tasossa oleva impedanssi 500V tasoon

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \cdot \bar{Z}_{kok} = \left(\frac{500V}{400V}\right)^2 \cdot (0,019072 \angle 74,07^\circ)\Omega = 0,0298 \angle 74,07^\circ\Omega$$

Jonka jälkeen lisätään muuntajan impedanssi aikaisemmin laskettuun kokonaisimpedanssiin

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{kok(500V)} &= \bar{Z}_{kok} + \bar{Z}_{muuntaja} = (0,0298 \angle 74,07^\circ)\Omega + (0,004167 \angle 57,68^\circ)\Omega \\ &= 0,033818 \angle 72,08^\circ\Omega\end{aligned}$$

Lopulta voidaan määrittää järjestelmän suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta 500V tasossa

$$I_{c,3L,max} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{kok(500V)}} = \frac{1 \cdot 500V}{\sqrt{3} \cdot (0,033818 \angle 74,08^\circ)\Omega} = 8536,1A$$

### Oikosulkuvirran laskenta 690V tasossa

Aikaisemmin esitettyjen menetelmien mukaisesti suoritetaan laskenta 690V tasossa

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right)^2 \cdot \bar{Z}_{kok} = \left(\frac{690V}{400V}\right)^2 \cdot (0,019072 \angle 74,07^\circ)\Omega = 0,056751 \angle 74,07^\circ\Omega$$

Jonka jälkeen lisätään muuntajan impedanssi aikaisemmin laskettuun kokonaisimpedanssiin

$$\begin{aligned}\bar{Z}_{kok(690V)} &= \bar{Z}_{kok} + \bar{Z}_{muuntaja} = (0,056751 \angle 74,07^\circ)\Omega + (0,023805 \angle 65,02^\circ)\Omega \\ &= (0,080347 \angle 71,40^\circ)\Omega\end{aligned}$$

Lopulta voidaan määrittää järjestelmän suurin kolmivaiheinen oikosulkuvirta 690V tasossa.

$$I_{c,3L,max} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot \bar{Z}_{kok(690V)}} = \frac{1 \cdot 690V}{\sqrt{3} \cdot (0,080347 \angle 71,40^\circ)\Omega} = 4958,1A$$

## 4 MUUNTAJAN MITOITUKSEEN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tässä kappaleessa tutustutaan muuntajan mitoitukseen vaikuttaviin tekijöihin ja suoritetaan lopullinen muuntajavalinta. Muuntajan mitoitusmenetelmänä tutustutaan oikosukusuhteen perusteella suoritettavaan mitoitukseen.

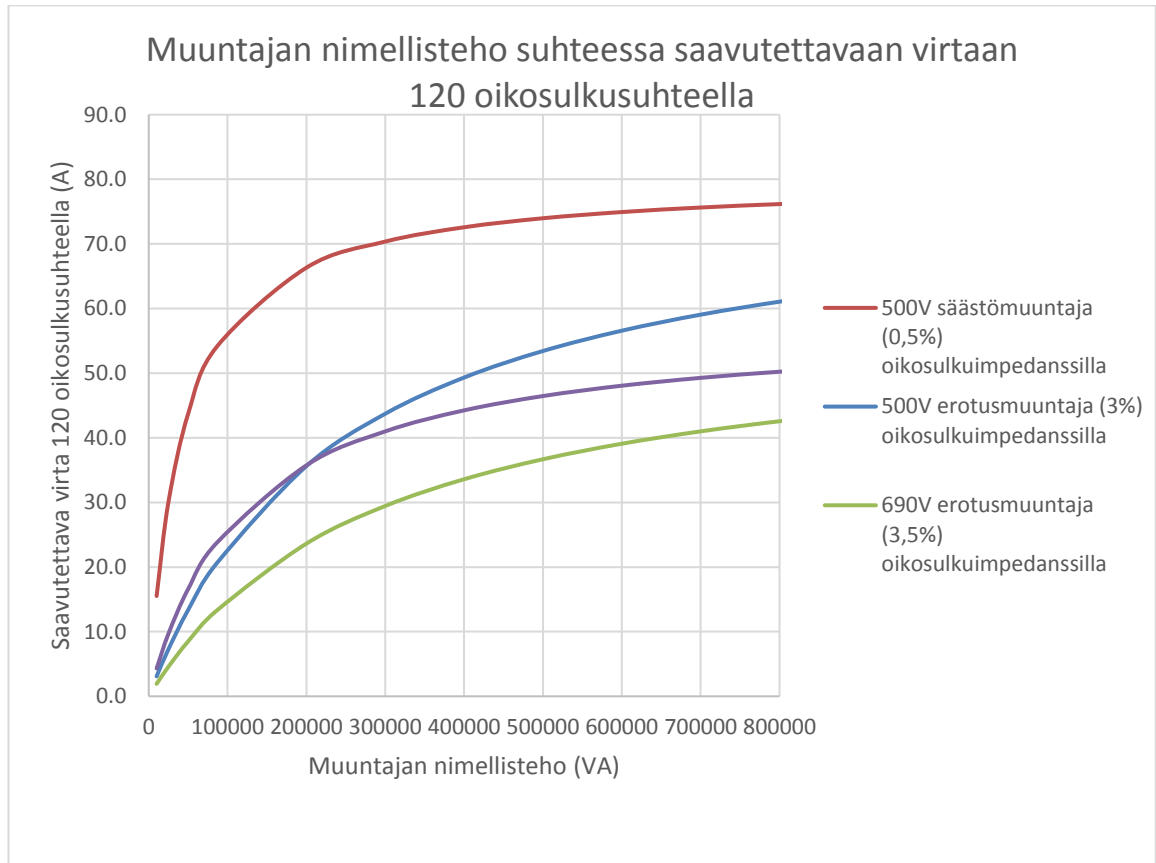
### 4.1 Muuntajan mitoitus oikosukusuhteen perusteella

Danfoss Drives opinnäytetyön tilaajana määritteli vaaditun verkon jäykkyyden, joka esitetään oikosukusuhteenä. Oikosukusuhteen vakioiminen sähkönjakelujärjestelmälle mahdollistaa testaustoimenpiteiden suorittamisen riittävän jäykässä ja samanlaisessa verkossa. Tällöin voidaan sulkea pois testauksessa suoritettujen mittausten epätarkkuuksia.

Mitoitettaessa muuntajaa oikosukusuhteella vakioitiin muuntajan ominaisuuksista oikosukuiimpedanssi  $Z_k$ , erotusmuuntajalla oikosukuiimpedanssi määriteltiin suhteellisarvona 3%, toisiojännitteen ollessa 500V. Oikosukuiimpedanssi on yhtälön (Kaava 42) mukaisesti riippuvainen muuntajan toisiojännitteestä, jolloin muuntajan oikosukuiimpedanssi 690V jännitteellä on 3,5%. Säästömuuntajalle oikosukuiimpedanssi 500V tasossa vakioitiin 0,5% ja 690V tasossa 1,5%. Edellä mainittuihin oikosukuiimpedansseihin päädyttiin Trafotek Oy:n kanssa käytyjen haastatteluiden perusteella. Muuntajan haluttiin olevan kustannustehokas ja mitoituksessa päädyttiin mahdollisimman pieniin oikosukuiimpedansseihin, kuitenkin pysyttäessä listamuuntajissa, sillä erikoismuuntajaa tilattaessa kustannukset nousisivat.

Muuntajien tekniset arvot kirjattiin liitteessä (Liite 2) esitettyihin taulukoihin, jonka jälkeen laskettiin koko sähkönjakelujärjestelmälle oikosukuvirrat  $I_{k3}$  ja oikosukutehot  $S_k$ . Tämän jälkeen jaettiin oikosukuvirta ja oikosukuteho vaaditulla oikosukusuhteella 120. Laskutoimituksen perusteella saatiin suurin virta ja teho, joilla sähköverkkoa voidaan kuormittaa ylläpitäen 120 oikosukusuhte syöttävän verkon ja testattavan laitteen välillä.

Liitteen (Liite 2) esitettyjen lukuarvojen perusteella havainnollistettiin saatuja tuloksia esittämällä ne kuvaajassa (Kuvaaja 1). Kuvaajassa X-akselilla on esitetty muuntajan nimellinen näennäisteho voltti-ampeereina sekä Y-akselilla muuntajalla saavutettava virta ampeereina, ylläpitäen 120 oikosulkusuhte.



Kuvaaja 1. Muuntajan nimellisteho suhteessa saavutettavaan virtaan 120 oikosulkusuhteella

## 4.2 Muuntajan valinta

Tämän opinnäytetyön tarkoitus on selvittää vaihtoehtoista järjestelmää taajuusmuuttajien testauslaboratorioon, jolla pystyttäisiin tuottamaan testattavalle kolmivaiheiselle taajuusmuuttajalle 500V ja 690V syöttöjännitteet. Testattavan taajuusmuuttajan ja syöttöverkon välinen oikosulkusuhte tulee selvitettyllä järjestelmällä pysyä arvossa 120, jotta syöttöverkko on riittävän jäykkä. Muuntajan mitoittamista tarkasteltiin aikaisemmassa kappalessa oikosulkusuhteen perusteella tehtävällä mitoituksella.



Oikosulkusuhteen perusteella tehtävän mitoituksen perusteella, kuvaajasta (Kuvaaja 1) voidaan todeta, että haluttaessa kuormittaa syöttöverkkoa mahdollisimman suurella kuormitusvirralla, valittavaksi muuntajaksi suositeltaisiin nimellistehoaltaan 300kVA säästömuuntajaa, jonka suhteellinen oikosulkuimpedanssi  $z_k$  olisi 500V tasossa 0,5% ja 690V tasossa 1,5%. Kyseisellä muuntajalla pystyttäisiin kuormittamaan syöttöverkkoa 500V taajuusmuuttajalla noin 70A kuormitusvirralla ja 690V taajuusmuuttajalla noin 41A kuormitusvirralla, ylläpitäen taajuusmuuttajan ja syöttöverkon välinen oikosulkusuhte arvoissa 120. 300kVA muuntaja on teknisiltä mitoiltaan ja painoltaan teknillistaloudellisin vaihtoehto. Siirryttäessä suurempitehoisiin muuntajiin, tulevat tekniset mitat sekä hinta vastaan. Kuvaajasta (Kuvaaja 1) tuloksia luettaessa, on havaittavissa, että saavutettava kuormitusvirta halutulla oikosulkusuhteella alkaa tasoittua 300kVA muuntajien jälkeen, eikä niillä saavuteta suhteessa suurempaa hyötyä.

Päädyttäessä tilaamaan edellä mainittu säästömuuntaja, tulisi arvioida halutaanko säästömuuntajalle 500V ja 690V jännitetasojen lisäksi, myös muita jännitetasoja. Valmistajalle pystytään määrittelemään muitakin jännitetasoja muuntajasta, joiden perusteella säästömuuntajaan tehdään lisää välitapituksia.

## 5 POHDINTA

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää Danfoss Drivesin testauslaboratorion nykyinen sähköjakelujärjestelmä ja tutkia ratkaisuja, joilla nykyistä sähköjakelujärjestelmää voitaisiin kehittää. Kattava sähköjakelujärjestelmän mallintaminen ja nykyisellä ratkaisulla tehdyt mittaukset auttoivat paikantamaan nykyisen järjestelmän kehityskohteet. Keskeisimpinä kehityskohteina ilmenivät sähköverkon heikkous sekä taajuusmuuttajan verkkovaikutusten minimointi. Opinnäytetyössä tuotiin esille nykyisen sähköjakelujärjestelmän heikkoudet sekä niiden esiintymiseen johtavat tekijät.

Opinnäytetyön teoriaosuus piti sisällään taajuusmuuttajan, erotusmuuntajan ja säästömuuntajan toimintaperiaatteet, jonka jälkeen nostettiin esiin taajuusmuuttajan verkkovaiikutukset ja niiden vaikutus muuntajiin. Teoriaosuuden lopuksi esiteltiin lähtötilanne toimeksiantajan testauslaboratoriossa. Teoriaosuus toimi opinnäytetyössä tukena sähköjärjestelmän mallintamisessa sekä muuntajan mitoituksessa.

Opinnäytetyön tuloksena muodostettiin ehdotus korvaavasta ratkaisusta. Työn tulos vastasi toimeksiantajan määrittelemiä vaatimuksia, joita olivat vaaditut jännitetasot sekä vaadittu oikosulkusuhte. Lopputuloksen kannalta oli tärkeää, että toimipisteen sähköjakelujärjestelmä mallinnettiin tarkasti, jotta työn tuloksena syntynyt muuntajan valinta voidaan luotettavasti esittää nykyisen järjestelmän vaihtoehdoksi. Epätarkkuudet sähköjakelujärjestelmän mallintamisessa voisivat johtaa virheellisiin tuloksiin, joita ei voitaisi hyödyntää.

Opinnäytetyössä konsultoitiin erinäisiä sidosryhmiä, joita olivat asiantuntijat Danfoss Drivesilta, Trafotek Oy:ltä sekä Tampereen Sähkölaitokselta. Yhdessä Danfoss Drivesin asiantuntijoiden kanssa muodostettiin kuvaus nykytilanteesta ja pohdittiin vaihtoehtoista ratkaisua. Trafotek Oy:n asiantuntijoita haastateltiin puhelimitse ja sähköpostitse ja he ovat keskeisessä roolissa, kartoitettaessa muuntajien teknisiä tietoja. Tampereen Sähkölaitos toimitti toimipisteen sähköjakeluverkkoon liittyviä teknisiä tietoja, joiden avulla pystyttiin mallintamaan toimipisteen sähköverkkoa.

Opinnäytetyön lopputuloksena saatiin mitoitettua työn tilaajalle kaksi vaihtoehtoista muuntajaa. Muuntajat mitoitettiin ottaen huomioon syöttävän verkon oikosulkutehon ja testattavan taajuusmuuttajan tehon välinen oikosulkusuhte, joka haluttiin pitää arvossa

120. Mitoitettavat muuntajat toteuttavat tämän ehdon, mahdollistaen kuitenkin suurempitehoisten taajuusmuuttajien testauksen, mikäli oikosulkusuhdetta halutaan pudottaa. Huomioitavaa on, että esitetty ratkaisu on mahdollinen ja se voisi lisätä luotettavuutta taajuusmuuttajien testauksessa. Ratkaisu mahdollistaisi suurempitehoisten taajuusmuuttajien testauksen, sähköjakeluverkon oikosulkutehon kasvaessa. Mitoitettu järjestelmä ei kuitenkaan ota huomioon mahdollista suodatusta yliaaltoja vastaan, sillä järjestelmän oletetaan olevan tarpeeksi jäykkä yliaaltoja vastaan. Mahdollisena jatkotutkimuksen aiheena voidaan nähdä esitetyn ratkaisun käyttöönotto ja käytännön testaus. Mitoitetun muuntajan mitoituksen luotettavuutta voitaisiin lisäksi kasvattaa kehittämällä opinnäytetyön ohessa muodostettua simulointimallia, joka toistaiseksi on keskeneräinen.

## LÄHTEET

ABB. 2000. TTT-Käsikirja. Vaasa ABB

ABB. 2001. Nopeussäädettyjen käyttöjen opas. Luettu 14.04.2017  
[https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekni-  
nen\\_opas\\_nro4.pdf](https://library.e.abb.com/public/32f0404329db7689c1256d2800411f0a/Tekni-<br/>nen_opas_nro4.pdf)

ABB. 2001. Vaihtovirtakäyttöjen yliaalto-opus. Luettu 18.01.2017  
[https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekni-  
nen\\_opas\\_nro\\_6.pdf](https://library.e.abb.com/public/9aaf3178627952c7c1256d2800411f8d/Tekni-<br/>nen_opas_nro_6.pdf)

Alberta electric system operator. Prepared by Teshmont Consultants LP. 2014. Trans-  
former Modelling Guide. Luettu 07.01.2017  
[https://www.aeso.ca/assets/linkfiles/4040.002-Rev02-Transformer-Modelling-  
Guide.pdf](https://www.aeso.ca/assets/linkfiles/4040.002-Rev02-Transformer-Modelling-<br/>Guide.pdf)

Aura, L & Tonteri, A. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet.  
Porvoo. WSOY

Broman, M. 2013. Julkisen rakennuksen sähköverkon suunnittelu ja oikosulkutarkas-  
telu. Sähkötönniikan koulutusohjelma. Tampereen ammattikorkeakoulu. Opinnäytetyö.  
[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58010/Broman\\_Mikko.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/58010/Broman_Mikko.pdf?sequence=1)

Danfoss Drives. WWW-sivut. Luettu 20.04.2017  
<http://drives.danfoss.fi/home/#/>

Danfoss Drives. 2016. Haastattelu 20.11.2016.

Del Toro, V. 1985, Electrical machines and power systems. United States of America.  
Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs.

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Amk-Kustannus Oy. Tammertek-  
niikka.

Huotari, K & Partanen, J. 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen,  
Opetusmoniste. Luettu 05.02.2017  
<http://docplayer.fi/2241051-Teollisuusverkkojen-oikosulkuvirtojen-laskeminen.html>

IEC 61000-3-4 Limits – Limitation of emission of harmonic currents in low voltage  
power supply systems for equipment with rated current greater than 16A. IEC Technical  
report. Geneve. 1998.

Kalo, S. 2013. Energy Efficiency in Power Transformers. Department of Electrical En-  
gineering. University of Catalonia. Masters Thesis. Luettu 22.01.2017  
[https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23543/Thesis%20Report-En-  
ergy%20Efficiency%20in%20Power%20Transformer-Sorita%20Kalo-2013-14\\_1.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/23543/Thesis%20Report-En-<br/>ergy%20Efficiency%20in%20Power%20Transformer-Sorita%20Kalo-2013-14_1.pdf)

Korpinen, L. & Mikkola, M. & Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto-opus. Luettu  
28.11.2016  
<http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>

Mattsson, V. 2008. Mittausepävarmuuden määrittäminen taajuusmuuttajan lämpenämestestissä. Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta. Teknillinen korkeakoulu. Diplomityö.

Mohan, N, Undeland, T & Robbins, W. 1995. Power electronics, Converters, Applications and design. United States of America. John Wiley & Sons, Inc.

Nagsarkar, T.K & Sukhija, M. S. 2014. Power system analysis (2nd edition). Oxford University Press. India.

Partanen, J, Pyrhönen, J & Silventoinen, P, ym. 2010. Tehoelektroniikka sähköjake- lussa – Pienjännitteinen tasasähköjako. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Tutki- musraportti. Luettu 29.01.2017

<http://www.lut.fi/documents/10633/138922/Tehoelektroniikka+sahkonjakelussa+Lop- puraportti+2010/639848d0-86c0-47ff-a9fc-057f745ff360>

Reka. 2016. Alumiinivoimakaapelit. Luettu 18.12.2016.

<http://www.reka.fi/voimakaapelit/alumiinivoimakaapelit/>

ST 52.51.03 Sähkön laatu. Harmoniset yliaallot. Luettu 20.04.2017

Sumper, A & Baggini, A. 2012. Electrical energy efficiency, Technologies and applica- tions. John Wiley & Sons, Ltd. United Kingdom.

[https://books.google.fi/books?id=eiN7JEusu\\_EC&printsec=frontcover&hl=fi&source=g bs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.fi/books?id=eiN7JEusu_EC&printsec=frontcover&hl=fi&source=g bs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)

Slemon, R. 1992. Electric Machines and Drives, Addison-Wesley publishing Company.

Sähköalan WWW-sivusto. Luettu 30.01.2017.

[http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/uutiset/uutisarkisto/2009/fi\\_FI/200509\\_puhtaam- paa\\_sahkoa/](http://www.sahkoala.fi/ammattilaiset/uutiset/uutisarkisto/2009/fi_FI/200509_puhtaam- paa_sahkoa/)

Tiainen, E. 2012. D1-2012 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Sähkö- ja teleura- koitsijaliitto STUL ry. Espoo.

Tuusa, H. Sähkötekniikan opus, sähkömoottorikäytöt. Luettu 15.04.2017

[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/11sahkomoottorikaytot.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/11sahkomoottorikaytot.pdf)

Vacon Oyj. Vacon CX/CXL/CXS Jarrukatkojat ja –vastukset. Luettu 04.01.2017.

[http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id\\_3341/cf\\_2/Vacon-CX-Brake-Choppers-Re- sistors-User-Manual-Ud21.PDF](http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id_3341/cf_2/Vacon-CX-Brake-Choppers-Re- sistors-User-Manual-Ud21.PDF)

Vasundevan, K, Sridhara Rao, G & Sasidhara Rao, P. Electrical Machines 1. Luettu 12.12.2017

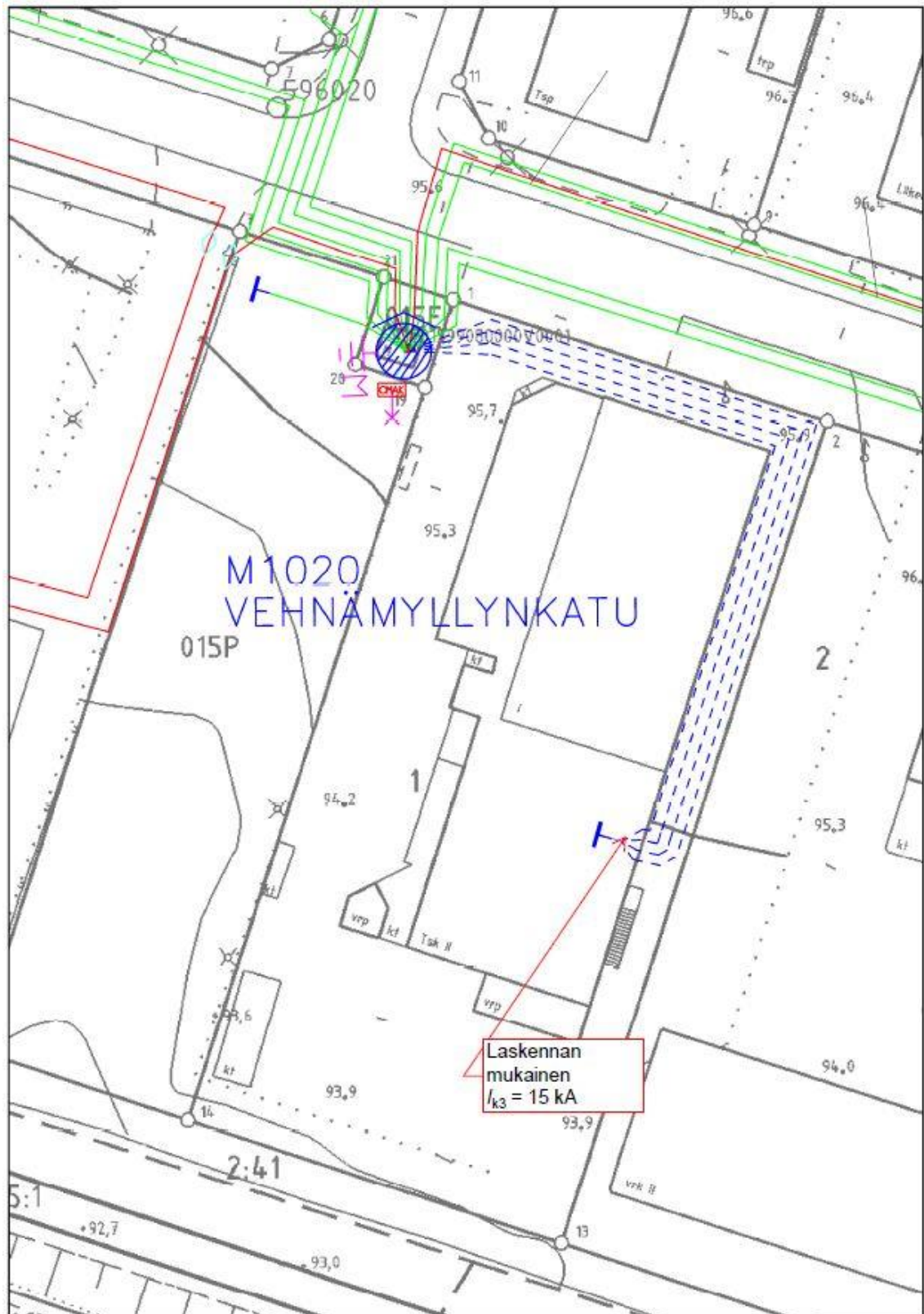
[http://nptel.ac.in/courses/108106071/pdfs/1\\_11.pdf](http://nptel.ac.in/courses/108106071/pdfs/1_11.pdf)

Welling, J. 2010. Elintarviketehtaan sähköverkon selvitys ja kehittämissuunnitelma. Energiatekniikan koulutusohjelma. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Diplomityö.

<http://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/63169/nbnfi-fe201304193278.pdf?se- quence=3>

**LIITTEET**

Liite 1. Kaapelointipiirros Vehnämyllynkatu 18, Tampereen sähkölaitos



## Liite 2. Mitoitettujen muuntajien laskennalliset taulukot


500V erotusmuuntaja (3%) oikosulkuimpedanssilla							
Muuntajan nimellisteho (VA)	Muuntajan nimellisvirta (A)	Muuntajan impedanssi ( $\Omega$ )	Syöttöimpedanssi ( $\Omega$ )	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkuvirta/120 (A)	Oikosulkuteho (VA)	Oikosulkuteho / 120 (VA)
10000	11,5	0,7500	0,0300	370,1	3,1	320504,5	2670,9
25000	28,9	0,3000	0,0300	874,7	7,3	757529,1	6312,7
50000	57,7	0,1500	0,0300	1603,6	13,4	1388732,1	11572,8
87000	100,5	0,0862	0,0300	2483,7	20,7	2150959,1	17924,7
200000	230,9	0,0375	0,0300	4275,4	35,6	3702588,9	30854,9
300000	346,4	0,0250	0,0300	5246,7	43,7	4543775,5	37864,8
400000	461,9	0,0188	0,0300	5919,1	49,3	5126068,1	42717,2
500000	577,4	0,0150	0,0300	6412,1	53,4	5553047,6	46275,4
600000	692,8	0,0125	0,0300	6789,1	56,6	5879541,3	48996,2
700000	808,3	0,0107	0,0300	7086,7	59,1	6137287,3	51144,1
800000	923,8	0,0094	0,0300	7327,6	61,1	6345930,8	52882,8
900000	1039,2	0,0083	0,0300	7526,7	62,7	6518283,2	54319,0
1000000	1154,7	0,0075	0,0300	7693,8	64,1	6663055,5	55525,5

500V säästömuuntaja (0,5%) oikosulkuimpedanssilla							
Muuntajan nimellisteho (VA)	Muuntajan nimellisvirta (A)	Muuntajan impedanssi ( $\Omega$ )	Syöttöimpedanssi ( $\Omega$ )	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkuvirta/120 (A)	Oikosulkuteho (VA)	Oikosulkuteho / 120 (VA)
10000	11,5	0,1250	0,0300	1862,2	15,5	1612691,8	13439,1
25000	28,9	0,0500	0,0300	3607,5	30,1	3124206,3	26035,1
50000	57,7	0,0250	0,0300	5246,7	43,7	4543775,5	37864,8
87000	100,5	0,0144	0,0300	6503,4	54,2	5632135,1	46934,5
200000	230,9	0,0063	0,0300	7959,0	66,3	6892687,3	57439,1
300000	346,4	0,0042	0,0300	8444,0	70,4	7312723,3	60939,4
400000	461,9	0,0031	0,0300	8709,4	72,6	7542542,1	62854,5
500000	577,4	0,0025	0,0300	8876,8	74,0	7687500,4	64062,5
600000	692,8	0,0021	0,0300	8992,0	74,9	7787274,8	64894,0
700000	808,3	0,0018	0,0300	9076,1	75,6	7860142,8	65501,2
800000	923,8	0,0016	0,0300	9140,3	76,2	7915695,0	65964,1
900000	1039,2	0,0014	0,0300	9190,8	76,6	7959448,2	66328,7
1000000	1154,7	0,0013	0,0300	9231,6	76,9	7994800,5	66623,3

690V erotusmuuntaja (3,5%) oikosulkuimpedanssilla							
Muuntajan nimellisteho (VA)	Muuntajan nimellisvirta (A)	Muuntajan impedanssi ( $\Omega$ )	Syöttöimpedanssi ( $\Omega$ )	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkuvirta/120 (A)	Oikosulkuteho (VA)	Oikosulkuteho / 120 (VA)
10000	8,4	1,6664	0,0572	231,1	1,9	276236,9	2302,0
25000	20,9	0,6665	0,0572	550,5	4,6	657859,6	5482,2
50000	41,8	0,3333	0,0572	1020,3	8,5	1219391,3	10161,6
87000	72,8	0,1915	0,0572	1601,8	13,3	1914314,7	15952,6
200000	167,3	0,0833	0,0572	2835,6	23,6	3388896,6	28240,8
300000	251,0	0,0555	0,0572	3534,3	29,5	4223901,2	35199,2
400000	334,7	0,0417	0,0572	4030,9	33,6	4817389,7	40144,9
500000	418,4	0,0333	0,0572	4402,0	36,7	5260906,9	43840,9
600000	502,0	0,0278	0,0572	4689,9	39,1	5604921,6	46707,7
700000	585,7	0,0238	0,0572	4919,6	41,0	5879541,3	48996,2
800000	669,4	0,0208	0,0572	5107,3	42,6	6103839,9	50865,3
900000	753,1	0,0185	0,0572	5263,5	43,9	6290487,8	52420,7
1000000	836,7	0,0167	0,0572	5395,5	45,0	6448230,9	53735,3


690V säästömuuntaja (1,5%) oikosulkuimpedanssilla							
Muuntajan nimellisteho (VA)	Muuntajan nimellisvirta (A)	Muuntajan impedanssi ( $\Omega$ )	Syöttöimpedanssi ( $\Omega$ )	Oikosulkuvirta (A)	Oikosulkuvirta/120 (A)	Oikosulkuteho (VA)	Oikosulkuteho / 120 (VA)
10000	8,4	0,7142	0,0572	516,5	4,3	617253,0	5143,8
25000	20,9	0,2857	0,0572	1162,0	9,7	1388732,1	11572,8
50000	41,8	0,1428	0,0572	1991,9	16,6	2380491,6	19837,4
87000	72,8	0,0821	0,0572	2860,7	23,8	3418860,8	28490,5
200000	167,3	0,0357	0,0572	4289,2	35,7	5126068,1	42717,2
300000	251,0	0,0238	0,0572	4919,6	41,0	5879541,3	48996,2
400000	334,7	0,0179	0,0572	5309,9	44,2	6345930,8	52882,8
500000	418,4	0,0143	0,0572	5575,2	46,5	6663055,5	55525,5
600000	502,0	0,0119	0,0572	5767,4	48,1	6892687,3	57439,1
700000	585,7	0,0102	0,0572	5912,9	49,3	7066645,1	58888,7
800000	669,4	0,0089	0,0572	6027,0	50,2	7202986,9	60024,9
900000	753,1	0,0079	0,0572	6118,8	51,0	7312723,3	60939,4
1000000	836,7	0,0071	0,0572	6194,3	51,6	7402949,5	61691,2

## Liite 3. 300kVa erotusmuuntaja datalehti, Trafotek Oy

		TECHNICAL DATA SHEET			
Description		Date	Prepared by		
Rev. A	Issued for proposal.	29.03.2017	80		
Rev. B	P2090, P3060, P3060, P3070, P3080	29.03.2017	80		
Rev. C	-	-	-		
<b>GENERAL DATA</b>					
P1010	Document number	TRAXX4040627-01			
P1020	Transformer design number (-s)	TBA			
P1030	Project	-			
P1031	Customer reference	-			
P1040	Application	2-winding transformer			
P1050	Transformer type	Vacuum Pressure Impregnated (VPI) Dry Type Transformer			
P1060	Cooling method	AN (Convection cooled)			
P1070	Final location of the transformer	< 1000 m above sea-level			
P1080	Standards	IEC 60076-11			
P1090	Certification	-			
<b>WINDING DATA</b>					
		<b>PRIMARY</b>	<b>SECONDARY</b>		
P2010	Rated power	300 kVA	300 kVA		
P2020	Service factor	S1	S1		
P2030	Connection symbol	D	y11		
P2040	Rated voltage (on no-load)	400 V	690 V		
P2050	Tappings	-	500 V		
P2060	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,96	1,000x Un	674 V		
P2070	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,90	1,000x Un	669 V		
P2080	Rated current	433 A	251 A		
P2090	Material	Aluminium	Copper		
P2100	Temperature rise class	F / 100 K	F / 100 K		
P2110	Insulation class	H / 180°C	H / 180°C		
P2120	Insulation level	AC3	AC3		
P2130	impedance @500	-	3,50 %*		
P2130	impedance @600	-	3,00 %*		
P2140	Technology	Vacuum Press.	Vacuum Press.		
			*) at 300 kVA		
<b>ADDITIONAL TECHNICAL DATA</b>					
P3010	Rated frequency	50 Hz			
P3020	Max ambient temperature	40°C			
P3030	Inrush current	Ip= 6,1 kA, half-life 0,20 s.			
P3040	Noise pressure level	66 dB(A) / 1 m			
P3050	No-load losses (@@490V and @@600V)	2000 W	+15% IEC tol.		
P3060	Load losses (@@490V)	4300 W	+15% IEC tol. (at 120°C, rated power, rated voltage ratio, sine wave)		
P3060	Load losses (@@600V)	4800 W	+15% IEC tol. (at 120°C, rated power, rated voltage ratio, sine wave)		
P3061	Load losses under distorted current (IEC 61370)	-			
P3070	Total losses (@@490V)	6300 W	+10% IEC tol.		
P3070	Total losses (@@600V)	6800 W	+10% IEC tol.		
P3080	Losses to environment (@@490V)	6300 W			
P3080	Losses to environment (@@600V)	6800 W			
P3090	Efficiency (at power factor 1,00)	97,94 % (at 4/4 load)	98,07 % (at 3/4 load)	97,99 % (at 2/4 load)	
P3091	Efficiency (at power factor 0,90)	97,44 % (at 4/4 load)	97,60 % (at 3/4 load)	97,50 % (at 2/4 load)	
P3100	Weight	1400 kg	97,06 % (at 1/4 load)	96,36 % (at 1/4 load)	
<b>ADDITIONAL TECHNICAL DATA FOR APWF TRANSFORMERS (IF APPLICABLE)</b>					
P3210	Water data	Not applicable.			
P3220	Cooler (-s) data	Not applicable.			
P3230	Cooler (-s) materials	Not applicable.			
P3231		Not applicable.			
P3240	Water thermometers	Not applicable.			
P3250	Water leakage detector (-s)	Not applicable.			
<b>ENCLOSURE</b>					
P4010	Protection degree	IP23 for indoor use.			
P4020	Construction	Dismountable sheet steel enclosure. Bolted side panels. Lifting lugs on the top.			
P4030	Surface finishing	RAL 7035, powder painted.			
P4040	General arrangement drawing	GAD_FA230-3312M-A34.1.			
P4050	Overall dimensions (WxDxH)	1400 x 800 x 1340 mm.			
P4060	Cable direction	HV and LV on opposite side of the transformer.			
P4070	Cable entry, primary	From the bottom (long side) of the enclosure.			
P4071	Cable entry, secondary	From the bottom (long side) of the enclosure.			
P4080	Cable gland, primary	Bolted MCT-frame, 1x size S, material: mild steel, without rubbers.			
P4081	Cable gland, secondary	Bolted MCT-frame, 1x size S, material: mild steel, without rubbers.			
<b>ACCESSORIES</b>					
P5010	Auxiliary connection box	ACB1: External IP55 metal enclosure for auxiliary cables with TET-C membrane glands.			
P5020	Earthed screen between windings	Not included.			
P5030	Temperature control for windings	2x Pt-100 (3-wire) / LV winding, total 6 pcs, wired to the ACB1.			
P5040	Temperature control for core	Not included.			
P5050	Air temperature sensor	Not applicable.			
P5060	Local temperature display	Not included.			
P5070	Vibration dampers	Not included.			
P5080	Stand still heaters	Not included.			
P5090	Earthing balls	Not included.			
P5100	Air locks	Not applicable.			
P5110	Starter unit for fan motors	Not applicable.			
P5120	Premagnetizing system	Not included.			
<b>NOTES</b>					
P9010	-				



## Liite 4. 300kVa säästömuuntajan datalehti, Trafotek Oy

		TECHNICAL DATA SHEET			
Rev.	Description	Date	Prepared by		
Rev. A	Issued for proposal	29.03.2017	Si		
Rev. B	P3050, P3060, P3070, P3080	29.03.2017	Si		
Rev. C	-	-	-		
<b>GENERAL DATA</b>					
P1010	Document number	TRA0X4040634-01			
P1020	Transformer design number (-s)	TBA			
P1030	Project	-			
P1031	Customer reference	-			
P1040	Application	Autotransformer			
P1050	Transformer type	Vacuum Pressure Impregnated (VPI) Dry Type Transformer			
P1060	Cooling method	AN (Convection cooled)			
P1070	Final location of the transformer	< 1000 m above sea-level			
P1080	Standards	IEC 60076-11			
P1090	Certification	-			
<b>WINDING DATA</b>					
		<b>PRIMARY</b>	<b>SECONDARY</b>		
P2010	Rated power	300 kVA	300 kVA		
P2020	Service factor	S1	S1		
P2030	Connection symbol	Y	an0		
P2040	Rated voltage (on no-load)	400 V	690 V		
P2050	Tappings	-	500 V		
P2060	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,95	1,000x Un	683 V		
P2070	Voltage on 4/4 load, p.f. 0,80	1,000x Un	681 V		
P2080	Rated current	433 A	251 A		
P2090	Material	Copper	Copper		
P2100	Temperature rise class	F / 100 K	F / 100 K		
P2110	Insulation class	H / 180°C	H / 180°C		
P2120	Insulation level	AC3	AC3		
P2130	Impedance @690	-	1,50 %*	Rx(120°C) 0,51% -Xk 1,41% -Zk 1,54%	
	Impedance @600	-	0,40 %*	Rx(120°C) 0,26% -Xk 0,28% -Zk 0,38%	
P2140	Technology	Vacuum Press.	Vacuum Press. *) at 300 kVA		
<b>ADDITIONAL TECHNICAL DATA</b>					
P3010	Rated frequency	50 Hz			
P3020	Max ambient temperature	40°C			
P3030	Inrush current	Ip= 5,1 kA, half-life 0,20 s.			
P3040	Noise pressure level	59 dB(A) / 1 m			
P3050	No-load losses (@690V and @600V)	1000 W	+15% IEC tol.		
P3060	Load losses (@690V)	1900 W	+15% IEC tol. (at 120°C, rated power, rated voltage ratio, sine wave)		
	Load losses (@600V)	800 W	+15% IEC tol. (at 120°C, rated power, rated voltage ratio, sine wave)		
P3061	Load losses under distorted current (IEC 61376)	-	-		
P3070	Total losses (@690V)	2900 W	+10% IEC tol.		
	Total losses (@600V)	1800 W	+10% IEC tol.		
P3080	Losses to environment (@690V)	2900 W	-		
	Losses to environment (@600V)	1800 W	-		
P3090	Efficiency (at power factor 1,00)	99,04 % (at 4/4 load)	99,09 % (at 3/4 load)	99,03 % (at 2/4 load) 96,53 % (at 1/4 load)	
P3091	Efficiency (at power factor 0,80)	98,81 % (at 4/4 load)	98,86 % (at 3/4 load)	98,79 % (at 2/4 load) 96,17 % (at 1/4 load)	
P3100	Weight	780 kg			
<b>ADDITIONAL TECHNICAL DATA FOR APWF TRANSFORMERS (IF APPLICABLE)</b>					
P3210	Water data	Not applicable.			
P3220	Cooler (-s) data	Not applicable.			
P3230	Cooler (-s) materials	Not applicable.			
P3231		Not applicable.			
P3240	Water thermometers	Not applicable.			
P3250	Water leakage detector (-s)	Not applicable.			
<b>ENCLOSURE</b>					
P4010	Protection degree	IP23 for indoor use.			
P4020	Construction	Dismountable sheet steel enclosure. Bolted side panels. Lifting lugs on the top.			
P4030	Surface finishing	RAL 7035, powder painted.			
P4040	General arrangement drawing	GAD_FA230-2512M-A341.			
P4050	Overall dimensions [WxDxH]	1160 x 800 x 1340 mm.			
P4060	Cable direction	HV and LV on opposite side of the transformer.			
P4070	Cable entry, primary	From the bottom (long side) of the enclosure.			
P4071	Cable entry, secondary	From the bottom (long side) of the enclosure.			
P4080	Cable gland, primary	Bolted MCT-frame, 1x size 5, material: mild steel, without rubbers.			
P4081	Cable gland, secondary	Bolted MCT-frame, 1x size 5, material: mild steel, without rubbers.			
<b>ACCESSORIES</b>					
P5010	Auxiliary connection box	ACB1: External IP55 metal enclosure for auxiliary cables with TET-C membrane glands.			
P5020	Earthing screen between windings	Not included.			
P5030	Temperature control for windings	2x Pt-100 (3-wire) / LV winding, total 6 pcs, wired to the ACB1.			
P5040	Temperature control for core	Not included.			
P5050	Air temperature sensor	Not applicable.			
P5060	Local temperature display	Not included.			
P5070	Vibration dampers	Not included.			
P5080	Stand still heaters	Not included.			
P5090	Earthing balls	Not included.			
P5100	Air locks	Not applicable.			
P5110	Starter unit for fan motors	Not applicable.			
P5120	Premagnetizing system	Not included.			
<b>NOTES</b>					
P9010	-				