



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

HENRI MELVA  
ILMASYDÄMISEN KURISTIMEN KONSTRUKTION OPTIMOINTI  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-  
voston kokouksessa 9. lokakuuta 2013

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**MELVA, HENRI:** Ilmasydämisen kuristimen konstruktion optimointi

Diplomityö, 80 sivua, 4 liitesivua

Joulukuu 2013

Pääaine: Sähköverkot ja sähkömarkkinat

Tarkastaja: professori Seppo Valkealahti

Avainsanat: ilmasydämien kuristin, kuristinten käyttökohteet, teknistaloudellinen optimointi

Vaihtosähköjärjestelmässä virran ja jännitteen tulona saatava näennäisteho jaetaan pätö- ja loistehoon. Loisteho kuvaa magneetti- ja sähkökenttään varastoitunutta energiaa, joka purkautuu jaksollisesti. Magneettikentän muodostamiseen tarvittavaa energiaa kutsutaan induktiiviseksi ja eristeiden sähkökenttiin hetkellisesti varastoituvaa energiaa kapasitiiviseksi loistehoksi. Loistehon on ongelma sähköverkossa, koska se aiheuttaa siirtohäviöitä ja pienentää siirrettävän pätötehon maksimimäärää. Loistehon siirto sähköverkossa pyritään pitämään pienenä asettamalla loistehon kulutukselle rangaistusluonteinen siirtomaksu.

Ilmasydämisiä kuristimia käytetään sähköverkoissa kompensoimaan kapasitiivista loistehoa. Sähköverkoissa esiintyy kapasitiivista loistehoa esimerkiksi maakaapeloinnin yhteydessä tai pitkillä avojohdoilla, jotka ovat pienellä kuormalla. Kompensoinnin lisäksi kuristimia käytetään pienentämään vika- tai kytkentätilanteissa esiintyviä hetkellisiä virtoja. Oikosulku- tai kytkentävirtaa voidaan pienentää syöttävän verkon tai kuorman kanssa sarjaan kytketyllä kuristimella. Maasulkuvirtaa voidaan rajoittaa verkon tähtipisteen ja maan potentiaalın väliin kytketyllä kuristimella.

Tässä työssä tutkitaan ALSTOM Grid oy:n valmistamien ilmasydämisten kuristinten konstruktion optimointia. Ilmasydäminen kuristin suunnitellaan aina asiakkaan tarpeeseen, eli jokainen kuristinkonstruktio on yksilöllinen. Kuristimen konstruktio voidaan suunnitella monella eri tavalla, mutta ainoastaan yksi niistä on optimaalinen. ALSTOM Grid oy valmistaa kuristimia kahdella valmistusteknologialla ja tutkimuksen avulla selvitetään raja-arvo teknologioiden väliselle kannattavuudelle. Tutkimuksessa pyritään myös selvittämään kuristimen optimaalinen konstruktio rajallisten lähtötietojen pohjalta. Konstruktioista käsitellään kuristimen geometrian kannalta tärkeimmät parametrit, joita ovat kuristimen sisähalkaisija ja sähköisen kierroksen rinnakkaisten lankojen lukumäärä, eli käämintänippu ja käämityksen poikkipinta-ala.

Tilastollisesta analyysistä saatujen tulosten pohjalta selviää kuristimen optimaalinen konstruktio ja tärkeimmät tunnusluvut rajallisten lähtötietojen perusteella. Tuloksien avulla voidaan määrittää kuristimen lämpöhäviöt, alustavat valmistuskustannukset, massa, valmistusteknologia ja konstruktio tiedettäessä kuristimen induktanssi ja virta. Tulosten mukaan korrelaatio tutkittujen suureiden välillä on hyvä, ja käyrästöjen avulla voidaan kehittää kuristimien tarjoustoimintaa.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**MELVA, HENRI:** Construction optimization of air-core reactor

Master of Science Thesis, 80 pages, 4 Appendix pages

December 2013

Major: Power systems and market

Examiner: Professor Seppo Valkealahti

Keywords: Air-core reactors, applications of air-core reactors, economical and technical optimization

In alternating current electrical systems apparent power is a product of current and voltage. Apparent power can be divided to active and reactive power. Reactive power describes the energy stored in both magnetic and electric fields. When reactive power is needed to form magnetic fields, it is called inductive. When energy is momentarily stored into electric fields of insulation, reactive power is called capacitive. Transmission of reactive power is a problem in electrical power systems, because it increases losses and reduces the amount of active power that can be transferred. The amount of transferred reactive power is kept as minimum by setting a penalty payment for excessive consumption of reactive power.

Air-core reactors are used in electrical power systems to compensate capacitive reactive power. Capacitive reactive power occurs in power systems for example because of cabling or in a long transmission line with minor load. Air-core reactors are also used to reduce switching or fault current. Switching or fault current can be reduced with a reactor installed in series with the feeding network. Earth fault current can be reduced with a reactor installed between the star point of power system and earth potential.

In this thesis the research concerns construction optimization of air-core reactors manufactured by ALSTOM Grid Ltd. Air-core reactor design is based on the needs of customer, so every construction is individual. The construction of air-core reactor can be designed in many ways, but only one of the constructions is optimal. ALSTOM Grid Ltd. manufactures air-core reactors with two different technologies. At the beginning of the research focus is on the profitability limit between the two technologies. Other key focus area of the research is to solve the optimal construction of air-core reactors based on limited entry parameters. In this thesis construction means the reactor inner diameter, number of individual conductors forming electrical round and the total cross-section of the reactor.

As a result achieved by statistical analysis it is possible to solve the optimal construction and key figures of air-core reactor based on limited entry parameters. The losses, budget manufacturing costs, mass, manufacturing technology and construction can be solved by knowing inductance and current of the reactor. According to results correlation between the studied quantities is good. The results of the thesis can be used to develop the tendering stage of air-core reactors.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ALSTOM Grid oy:lle ja käsittelee ilmasydämisen kuristimen konstruktion optimointia. Työn ohjaajana on toiminut ilmasydämisten kuristimien vastaava suunnittelija Tommi Keikko ja tarkastajana professori Seppo Valkealahti.

Haluan kiittää ohjaajana toiminutta Tommi Keikkoa asiantuntevasta avusta työn tekemisen aikana sekä mielenkiinnosta aihetta kohtaan. Kiitän myös professori Seppo Valkealahtea työn tarkastamisesta. Lisäksi haluan kiittää kaikkia ALSTOM Grid oy:n suunnitteluorganisaation työntekijöitä tuesta työn tekemiseen. Työn tekemisen aikana oli monta hetkeä, jolloin toinen näkökulma oli tarpeen. Työn tekeminen oli kaikkiaan haastava, opettavainen ja mielenkiintoinen prosessi.

Kiitän myös avopuolisoani Taru Seppälää ymmärryksestä työn tekemiseen käytetyn ajan johdosta. Työn tekemiseen käytetty aika on vaatinut ymmärrystä myös tyttäreltämme Amandalta.

Tampereella 3.12.2013

Henri Melva

# SISÄLLYS

1	Johdanto .....	1
2	Ilmasydämisen kuristimen rakenne ja käyttökohteet .....	3
2.1	Kuristimien käyttökohteet .....	3
2.1.1	Rinnakkaiskuristin .....	4
2.1.2	Sarjakuristimet .....	6
2.1.3	Maadoituskuristimet .....	7
2.1.4	Suodatinkuristimet .....	8
2.1.5	Vaimennuskuristimet .....	11
2.1.6	Tasoituskuristimet .....	14
2.1.7	Muut kuristinten tyypilliset käyttökohteet .....	15
2.1.7.1	TC-kuristin .....	15
2.1.7.2	Käynnistyskuristin .....	18
2.1.7.3	Duplex-kuristin .....	19
2.2	Ilmasydämisen kuristimen rakenne .....	20
2.2.1	Kuristimen perusrakenne .....	21
2.2.2	R-tyypin kuristin .....	23
2.2.3	P-tyypin kuristin .....	26
3	Kuristimen mitoituksen kriittiset tekijät .....	28
3.1	Jännite .....	28
3.1.1	Jatkuva jänniterasitus .....	29
3.1.2	Hetkellinen jänniterasitus .....	30
3.2	Virta .....	32
3.2.1	Perustaajuinen virta .....	32
3.2.2	Yliaaltovirta .....	33
3.2.3	Lyhytaikainen virta .....	35
3.3	Asennusolosuhteet .....	37
3.3.1	Ilmastolliset ympäristöolosuhteet .....	37
3.3.2	Asennuspaikan erityisolosuhteet .....	39
3.4	Asiakaslähtöiset vaatimukset .....	40
3.5	Valmistuksen raja-arvot .....	40
4	Tutkimusaineisto .....	43
4.1	R-tyypin kuristimien aineisto .....	43
4.1.1	Kuristimen parametritiedosto .....	44
4.1.2	Spesifikaation ja käämintäohjeen tiedot .....	45
4.1.3	R-tyypin kuristimien aineiston rajaus .....	45
4.2	P-tyypin kuristimien aineisto .....	47
4.2.1	Aineiston kerääminen .....	47
4.2.2	P-tyypin kuristimien aineiston rajaus .....	48
4.3	Tutkimusaineiston yhteenveto .....	50

5	Tulokset ja niiden tarkastelu .....	52
5.1	Tutkimusmenetelmät.....	52
5.2	Valmistusteknologioiden vertailu .....	53
5.2.1	Tarkastelu massan funktiona.....	53
5.2.2	Tarkastelu tehon funktiona.....	56
5.2.3	Valmistusteknologian valinnan optimointi .....	60
5.3	Kuristimen tunnuslukujen ennustettavuus .....	61
5.3.1	P-tyyppin kuristimen budjettihinta.....	62
5.3.2	R-tyyppin kuristimen budjettihinta .....	64
5.3.3	Kuristimen massan ennustettavuus .....	65
5.3.4	Kuristimen häviöiden ennustettavuus .....	67
5.3.5	Kuristinkonstruktion optimointi tunnuslukujen pohjalta .....	68
5.4	Kuristimen geometrian optimointi .....	69
5.4.1	Kuristimen konstruktion suunnittelusekvenssi .....	69
5.4.2	Kuristimen optimaalinen käämintäkeskiö.....	71
5.4.3	Kuristimen käämityksen johtimien poikkipinta-ala.....	75
5.4.4	Kuristimen geometrian optimointi tulosten pohjalta.....	77
6	YHTEENVETO .....	78
	Lähteet.....	80
	Liite 1: R-tyyppin kuristimen parametrien haussa käytetyn ohjelman lähdekoodi	
	Liite 2: P-tyyppin kuristimen parametrien haussa käytetyn ohjelman lähdekoodi	
	Liite 3: R-tyyppin kuristimien rakenteiden haetut parametrit	
	Liite 4: P-tyyppin kuristimien rakenteiden haetut parametrit	

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

$c$	Ylijännitekerroin
$C$	Kapasitanssi
$f$	Nimellistaajuus
$f_0$	Kondensaattoripariston kytkentävirran taajuus
$f_r$	Viritystaajuus
$h$	Korkeus meren pinnasta
$I$	Virta
$I_1$	Perustaajuinen virta
$I_{90}$	90 asteen liipaisukulman virta
$I_a^0$	Nollaverkon maasulkuvirta
$I_a^1$	Myötäverkon maasulkuvirta
$I_a^2$	Vastaverkon maasulkuvirta
$I_{eq}$	Ekvivalenttivirus
$I_k''$	Alkuoikosulkuvirta
$I_k$	Kuristimen toisiopuolen oikosulkuvirta
$I_s$	Sysäysoikosulkuvirta
$I_{TC}$	TC-kuristimen virta
$I_i$	Kuristimen virta taajuudella $i \cdot 50$ Hz
$I_{UB}$	Epäbalanssivirtamuuntaja
$K_a$	Käyttötaajuuden jännitteen korjauskerroin
$L$	Induktanssi
$L_{net}$	Sähköverkon induktanssi
$m_i$	Ilmasto-olosuhteiden kerroin ( $0,5 < m_i < 0,8$ )
$P_{h1}$	Kuristimen perustaajuinen häviöteho
$P_{ref}$	Kuristimen häviöteho referenssilämpötilassa
$P_{tot}$	Kuristimen kokonaishäviöteho
$Q$	Loisteho
$Q_{eq}$	Ekvivalenttinen kompensointiteho
$Q_{TC}$	TC-kuristimen induktiivinen loisteho
$R_1$	Kuristimen resistanssi perustaajuudella
$R_{50Hz}$	Kuristimen resistanssi 50 Hz taajuudella
$R_{AC}$	Kuristimen mitattu vaihtovirtavastus
$R_{DC}$	Kuristimen tasavirtavastus

$R_i$	Kuristimen resistanssi taajuudella $i \cdot 50$ Hz
$R$	Kuristimen resistanssi
$r$	Pearsonin korrelaatiokerroin
$R_{net}$	Verkon resistanssi
$s$	Laplace-operaattori
$S_{k1}$	Oikosulkuteho ennen kuristinta
$S_{k2}$	Oikosulkuteho kuristimen jälkeen
$T_1$	Lämpötila yhden käynnistyksen jälkeen
$t$	Aika
$t_c$	Jäähdytysaika käynnistysten välillä
$T_{mittaus}$	Kuristimen häviöiden mittaustilämpötila
$T_{ref}$	Kuristimen häviöiden referenssilämpötila, yleensä $75 \text{ }^\circ\text{C}$
$T_{ympäristö}$	Ympäristön lämpötila käynnistyshetkellä
$\Delta T$	Käynnistyksen aiheuttama kuristimen keskimääräinen lämpenemä
$U$	Pääjännite
$U_1$	Perustaajuinen jännite
$U_{arit}$	Aritmeettisesti laskettu jännite
$U_C$	Kondensaattorin jännite
$U'_{hv}$	Kuristimen aiheuttaman jännitteenaleneman likiarvo
$U_i$	Perustaajuisen jännitteen kerrannainen
$U_m$	Suurin sallittu jännite
$U_{RSS}$	Jännitekomponenttien neliösumman neliöjuuri
$X_0$	Nollaverkon reaktanssi
$X_1$	Myötäverkon reaktanssi
$X_2$	Vastaverkon reaktanssi
$X_f$	Vikareaktanssi
$X_L$	Kuristimen reaktanssi
$X_{net}$	Verkon reaktanssi
$Z_v$	Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi
$\alpha$	Liipaisukulma
$\kappa$	Sysäyskerroin
$\tau$	Jäähdytysaikavakio
$\varphi$	Virran ja jännitteen välinen vaihesiirtokulma
$\omega$	Kulmataajuus



AN	Luonnollisella ilmankierrolla tapahtuva jäähditys (Engl. Air Natural)
BIL	Syöksyjänniteimpulssitaso (engl. Basic Impulse Level)
$\cos(\varphi)$	Kuormituksen tehokerroin
IEC	Sähköalan kansainvälinen standardoimisjärjestö (engl. International Electrotechnical Commission)
Käämintäkeskiö	Ilmasydäminen kuristimen valmistuksen aikainen tukirakennelma, jonka halkaisija on käämin sisähalkaisija
Käämintäniippu	Sähköisen kierroksen muodostavien rinnakkaisten johdinten lukumäärä
LI	Syöksyjännite (engl. Lightning Impulse)
Litz-köysi	Vuorotteleva johdinköysi
N-tyyppin kuristin	Profiililtaan neliömäisestä massiivisesta johtimesta käämitty ilmasydäminen kuristin
P-tyyppin kuristin	Vuorottelevasta johdinköydestä käämitty ilmasydäminen kuristin
$R_{ac} / R_{dc}$ -kerroin	Kuristimen vaihtojännite- ja tasajänniteresistanssien suhde
RSS	Neliösumman neliöjuuri (engl. Root Sum Squared)
R-tyyppin kuristin	Pyörölangasta käämitty ilmasydäminen kuristin
SVC	Staattinen kompensattori (engl. Static Var Compesator)
TC-kuristin	Tyristorihjattu kuristin (engl. Thyristor Controlled Reactor)

# 1 JOHDANTO

Sähköenergian kulutus lisääntyy vuosi vuodelta. Sähköntuotantolaitokset sijaitsevat tyypillisesti eri paikassa kuin kulutus, joten sähköenergiaa pitää siirtää paikasta toiseen. Sähkön siirto pitkillä johtimilla aiheuttaa ongelmia kytkettäessä verkkoa jännitteelliseksi tai pienen kuormituksen aikana. Siirtoverkon johtimien kapasitanssi aiheuttaa pienillä kuormitusvirroilla negatiivisen jännitehäviön johtimen reaktansseissa. Toisin sanoin jännite nousee siirtojohdon loppupäässä. Saman ilmiön seurauksena jännitteen kytkentä tyhjäkävälle johtimelle aiheuttaa loppupäähän ylijännitteen. Ylijännite voidaan estää kytkemällä johdon loppupäähän kuristin.

Kuristimia käytetään sähköverkoissa myös moniin muihin tarkoituksiin. Sarjakuristimien avulla voidaan rajoittaa oikosulkuvirtaa tai ohjata tehonjakoa kahden rinnakkaisen johtimen välillä. Maadoituskuristimen avulla voidaan rajoittaa maasulun aikaisia vikavirtoja. Vaimennuskuristimen avulla voidaan rajoittaa kondensaattoripariston kytkentähetkien aikana esiintyviä hetkellisiä lataus- ja purkausvirtoja. Kytkemällä kuristin kondensaattorin kanssa sarjaan saadaan muodostettua resonanssiipiiri, jonka impedanssin nollakohta määritetään komponenttiarvojen avulla. Induktanssin ja kapasitanssin arvot sopivasti valitsemalla saadaan resonanssi viritettyä yliaaltovirran kanssa samalle taajuudelle. Näin voidaan tuottaa yliaaltosuodatin sähköverkkoon. Kuristimia käytetään myös tasavirran suodatukseen ja kuristimen tuottamaa induktiivista loistehoa voidaan myös ohjata tyristorien avulla.

ALSTOM Grid oy on valmistanut ilmasydämisiä kuristimia jo vuodesta 1964 alkaen. Kuristimien rakenne on muuttunut vuosien varrella merkittävästi. Aluksi kuristimet valmistettiin kaapelista ja vuonna 1982 siirryttiin valmistamaan lujitemuovikuristimia. Toinen nykyään käytössä olevista valmistusteknologioista on otettu käyttöön vuonna 2000. Tuolloin alettiin valmistaa kuristimia muovieristeisestä vuorottelevasta alumiini-johdinköydestä. Vuonna 2004 otettiin käyttöön toinen nykyisin käytössä olevista valmistusteknologioista, yksittäisistä eristetyistä pyörölangoista koostuva rakenne.

Tämän työn tavoitteena on selvittää ALSTOM Grid oy:n käyttämien kuristinteknologioiden välinen kannattavuusraja ja molempien rakenteiden optimaalinen kuristinkonstruktio. Kuristin suunnitellaan aina tapauskohtaisesti asiakkaan ja käyttötarkoituksen vaatimusten mukaan. Optimaalisen konstruktion löytäminen nykyisillä työkaluilla vaatii useiden eri konstruktioiden vertailua ja siihen kuluu paljon työaika. Työn tavoitteena on tilastollista analyysiä apuna käyttäen tutkia eri parametrien riippuvuuksia kuristimen suunnittelun lähtötietoihin. Tarkoituksena on muodostaa yhtälöitä, joiden perusteella voidaan ennustaa kullekin kuristimelle optimaalinen konstruktio tai hyvä alkuarvaus iteroinnin pohjaksi.

Työ rakentuu kahdesta osasta. Työn teoriaosassa (luvut 2–3) käsitellään kuristimen käyttökohteita sähköverkossa ja ilmiöitä niiden takana. Teoriaosuudessa käsitellään lisäksi ilmasydämisen kuristimen rakenne. Teoria käydään läpi kuristintyypeittäin kes-

kittyen kunkin kuristintyyppin käyttötarkoituksen takana oleviin luonnontieteellisiin ilmiöihin. Tämän jälkeen käydään läpi kunkin kuristintyyppin mitoituksen kannalta kriittisimmät kriteerit. Työn soveltavassa osuudessa (luvut 4–6) käydään läpi tutkimusaineisto ja tutkimusmenetelmät tutkimuksen taustalla. Menetelmien jälkeen käydään läpi tutkimuksessa saavutetut tulokset ja niiden tarkastelu.

Johdannon jälkeisessä luvussa käsitellään ilmasydämisen kuristimen rakenne ja käyttökohteet. Käyttökohteiden käsittelyn yhteydessä käydään läpi ilmiöt kuristimien käyttötarkoitusten takana. Rakenteen osalta käydään läpi kaksi ALSTOM Grid oy:n kuristimien valmistusteknologiaa. Seuraavassa luvussa käsitellään kuristimien mitoitusperusteet ja kriittiset mitoituskijät kuristintyypeittäin. Eri kuristimilla mitoituksen kriittiset tekijät eroavat merkittävästi toisistaan.

Työn soveltavan osuuden alussa esitellään tutkimusaineisto ja kerrotaan mitä parametreja tutkimuksessa käytettiin. Luvussa esitetään myös aineiston keräämiseen käytetyt ohjelmat ja miten aineistoa tutkimuksessa rajattiin. Seuraavassa luvussa esitellään varsinaiset tutkimustulokset. Tutkimustuloksissa esitellään aluksi valmistusteknologian valintaan käytetty aineisto ja menetelmät. Tämän jälkeen esitellään konstruktion optimoinnin tulokset. Työn viimeisessä luvussa tehdään yhteenveto, esitetään työhön liittyvät loppuarviot ja johtopäätökset.

## 2 ILMASYDÄMISEN KURISTIMEN RAKENNE JA KÄYTTÖKOHTEET

Ilmasydämiset kuristimet ovat olennainen osa sähkön siirto- ja jakelujärjestelmää. Sähkön siirto suuressa mittakaavassa ei ole varsinkaan Suomen kaltaisessa pitkien välimatkojen maassa mahdollista ilman kuristimia. Esimerkiksi jännitteen kytkentä johdolle aiheuttaa niin suuria ylijännitteitä, että ilman rinnakkaiskuristimia johdon loppupään komponentit, kuten eristimet, eivät välttämättä kestäisi jännitteen kytkentää vaurioitumatta.

Jakeluverkoissa kuristimia käytetään yleisimmin loistehon kompensointiin käytettävien kondensaattoriparistojen vaimennus- ja suodatinkuristimina. Toinen oleellinen käyttökohteita kuristimille jakeluverkoissa on oikosulkuvirran rajoittaminen. Kuristimen avulla saadaan kojeiston oikosulkutehoa rajoitettua ja sitä kautta voidaan tapauskohtaisesti saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä.

Tässä luvussa käsitellään tarkemmin ilmasydämisen suurjännitekuristimen rakennetta ja käyttökohteita. Käyttökohteet jaotellaan ilmasydämisiä kuristimia koskevan standardin IEC 60076-6 mukaan. Rakenteen osalta käsitellään yleisesti käytetty kuristimen rakenne ja sen pääkomponentit. Lisäksi esitellään ALSTOM Grid Oy:n kahden kuristimen rakenne, jotka eroavat toisistaan lähinnä käytetyn johtimen osalta.

Lopuksi käsitellään kuristimen mitoitusvaikutteita vaikuttavat kriittiset tekijät. Esimerkiksi kondensaattoripariston vaimennuskuristimessa määräävä mitoitusvaikutteita on yleensä oikosulkuvirta ja sen aiheuttamat sisäiset voimat, kun taas rinnakkaiskuristimessa määrääviä tekijöitä ovat yleensä jatkuva jännite ja nimellisvirta. [2]

### 2.1 Kuristimien käyttökohteet

Tässä luvussa kuristimet jaotellaan IEC 60076-6 standardin mukaisiin tyyppisiin ja käsitellään näiden kuristintyyppien käyttökohteet sähkön siirto- ja jakeluverkoissa. Standardissa on esitetty kullekin kuristintyypille omat erikoisvaatimuksensa esimerkiksi toleranssin, tyyppitestien tai häviöiden takuarvon suhteen.

Erilaisten käyttökohteiden vaatimukset eroavat toisistaan käytön luonteen osalta. Esimerkiksi rinnakkaiskuristimien käyttö on jaksollista, eli niitä kytketään päälle ja pois useasti. Toisaalta sarjakuristin on yleensä päällä jatkuvasti. Tasoituskuristimessa taas kuristimen läpi kulkee lähes puhdasta tasavirtaa. Nämä käyttökohteiden erikoispiirteet ovat johtaneet IEC60076-6 mukaiseen jaotteluun. Standardin mukaan ilmasydämiset kuristintyypit jaetaan seuraavasti:

1. Rinnakkaiskuristimet
2. Sarja- ja maadoituskuristimet
3. Suodatin- ja vaimennuskuristimet
4. Tasoituskuristimet

Näiden lisäksi IEC 60076-6 käsittelee maadoitusmuuntajia ja säädettäviä maadoituske-  
loja. Maadoitusmuuntajaa käytetään luomaan tähtipiste esimerkiksi kolmiokytketyn  
muuntajan käämitykseen. Säädettävä maadoituskela taas kompensoi maasulkuvirtoja  
halutun suuruiseksi verkon kytkentätilanteesta riippumatta. Nämä molemmat kuristin-  
tyypit ovat öljyeristeisiä ja jätetään tässä työssä käsittelemättä. [2]

### 2.1.1 Rinnakkaiskuristin

Rinnakkaiskuristimia käytetään sähkön siirtoverkoissa kapasitiivisen loistehon kompen-  
sointiin. Kuristimet sijoitetaan hajautetusti kaikille sähköasemille ja Suomessa ne kytke-  
tään sähköasemien päämuuntajan tertiäärikäämiin. Tämä tarkoittaa muuntajassa olevaa  
kolmatta käämiä, joka on tarkoitettu varta vasten kompensointia varten. Samaan tertiää-  
rikäämiin kytketään myös tehonsiirron kannalta välttämättömät rinnakkaiskondensaatto-  
riparistot. Kuristimet kytketään Suomessa yleisesti tähteen, eli kuristimen yli vaikuttaa  
jatkuvasti vaihejännite.

Rinnakkaiskuristimen kompensointiteho voidaan laskea seuraavasti:

$$Q = \sqrt{3}UI \sin(\varphi) \approx \sqrt{3}UI \quad , \text{ missä} \quad (1)$$

$U$  = Pääjännite

$I$  = Virta

$\varphi$  = Virran ja jännitteen välinen vaihesiirtokulma

$Q$  = Loisteho

Tähtikytketyssä kuristimessa virta saadaan laskettua seuraavasti:

$$I = \frac{U}{\sqrt{3}X_L} = \frac{U}{2\sqrt{3}\pi f L} \quad , \text{ missä} \quad (2)$$

$X_L$  = Kuristimen reaktanssi

$f$  = Nimellistaajuus

$L$  = Induktanssi

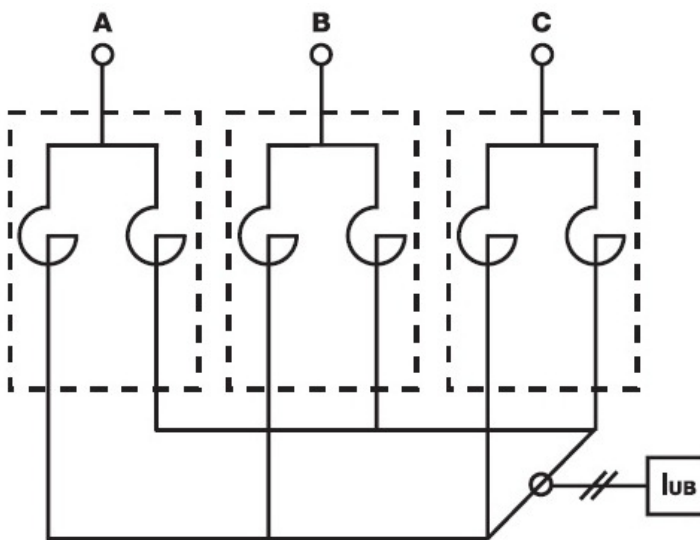
Yhdistämällä yhtälöt (1) ja (2) saadaan:

$$Q = 2\sqrt{3}U \frac{U}{\sqrt{3}} \pi f L = 2U^2 \pi f L \quad (3)$$

Rinnakkaiskuristimen induktanssi saadaan laskettua seuraavasti:

$$L = \frac{U^2}{2\pi f Q} \quad (4)$$

Kuristimet jaetaan Suomessa yleisesti kahteen sisäiseen käämitykseen, jotka kytketään tähtipisteiden jälkeen rinnakkain. Tällaista kytkentää kutsutaan kaksoistähdeksi ja se mahdollistaa kuristimen epäbalanssivirtauksen, kun tähtipisteiden väliin kytketään virtamuuntaja ja mitataan virran muutoksia. Seuraavassa kuvassa on esitettyä tyypillinen rinnakkaiskuristimen kaksoistähkitykentä.



Kuva 1. Rinnakkaiskuristimen kaksoistähkitykentä, missä  $I_{UB}$  on epäbalanssivirtamuuntaja.

Tyypillisiä sähköverkon tilanteita, joissa rinnakkaiskuristimia tarvitaan, ovat pienen kuormitusvirran aikainen jännitteen nousu ja jännitteen kytkentä tyhjäkäyväälle johdolle. Molemmista edellä mainituista tilanteista on kyse Ferranti-ilmiöstä. Ilmiössä siirtoverkon johdon kuormitus on pienempi kuin sen luonnollinen teho. Tämä tarkoittaa, että johdinten maakapasitanssien aiheuttama kapasitiivinen loisteho on suurempi kuin kuormitusvirran johdinten reaktansseissa aiheuttama induktiivinen loisteho. Tässä tilanteessa kapasitiivinen kuormitusvirta aiheuttaa negatiivisen jännitehäviön johdinten reaktansseissa ja johdon loppupään jännitteen itseisarvo nousee alkupäätä suuremmaksi. Tämä aiheuttaa varsinkin tyhjäkäyväällä johdolla loppupäähän vaarallisen suuren ylijännitteen, jota johdon loppupään komponentit, kuten eristimet, eivät välttämättä kestä. Edellä mainitusta tilanteesta päästään eroon kytkemällä johdon loppupäähän rinnakkaiskuristin kuluttamaan maakapasitanssien tuottama loisteho.

Rinnakkaiskuristimet ovat siirtoverkoissa tyypillisesti yksikköteholtaan suuria, koska kompensoitavat johdot ovat tyypillisesti pitkiä. Suomessa yleisesti käytetty rinnakkaiskuristin on teholtaan 63 MVA. Kuristimien tarve vaihtelee sähkönsiirtoverkon kuormitukseen mukaan, joten kuristimia kytketään päälle ja pois toistuvasti. Tämä aiheuttaa kuristimille vaatimuksia mekaanisen kestävyuden suhteen varsinkin Suomen kaltaisessa ilmastossa, missä talvisissa olosuhteissa vesi vuorotellen sulaa ja jäätyy kuormittaen kuristimen rakennetta. [1; 3]

### 2.1.2 Sarjakuristimet

Sarjakuristimia käytetään pääasiassa oikosulkuvirran rajoittamiseen. Siirtoverkoissa oikosulkuvirran rajoittaminen ei ole yleensä mielekäästä, koska se aiheuttaa verkkoon ongelmia kytkentätilanteissa. Jos oikosulkutehoa pienennetään, Ferranti-ilmiö voimistuu. Eli oikosulkuvirran pienentäminen johtaa väistämättä rinnakkaiskuristimien määrän kasvuun siirtoverkossa. Siirtoverkoissa jännitetasot ja siitä johtuen oikosulkuvirrat ovat niin suuria, että tarvittavan kuristimen reaktanssi ja nimellisvirta tulevat väistämättä suuriksi. Tämä johtaa kustannuksiltaan kalliiseen lopputulokseen.

Siirtoverkoissa sarjakuristimia voidaan käyttää tehonjakoon useiden rinnakkaisten johtojen välillä. Eripituisilla johtimilla on erisuuret reaktanssit. Jos johtimet kytketään rinnan, ei kuormitusvirta jakaudu johtimien kesken tasan. Johtimien reaktanssia voidaan tasoittaa kytkemällä pienemmän reaktanssin johdon kanssa sarjaan kuristin. Nämä kuristimet ovat kuitenkin parametreiltaan sellaisia, että niitä ei yleensä tehdä ilmasydäminä.

Jakeluverkoissa sarjakuristimilla voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä kytkinlaitteissa. Syöttävän verkon kanssa sarjaan kytketty kuristin pienentää toisiopuolen oikosulkutehoa ja näin ollen myös toisiopuolen verkon komponenttien oikosulkestoisuusvaatimuksia. Sarjakuristimen toisiopuolen oikosulkuvirta voidaan laskea seuraavasti:

$$I_k = \frac{cU}{\sqrt{3} \cdot (Z_v + X_L)}, \text{ missä} \quad (5)$$

$I_k$  = Kuristimen toisiopuolen oikosulkuvirta

$Z_v$  = Syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi

$c$  = Ylijännitekerroin

Sarjakuristimen impedanssi saadaan määritettyä, kun tiedetään oikosulkuteho ennen ja jälkeen kuristimen. Seuraavassa on esitetty impedanssin laskenta.

$$X_L = U^2 \left( \frac{1}{S_{k2}} - \frac{1}{S_{k1}} \right), \text{ missä} \quad (6)$$

$S_{k1}$  = Oikosulkuteho ennen kuristinta

$S_{k2}$  = Oikosulkuteho kuristimen jälkeen

Sarjakuristimen asentaminen verkkoon aiheuttaa jännitteenalenemaa. jännitteenalenema riippuu kuorman loistehosta. Likiarvo kuristimen aiheuttamalle jännitteenalenemalle voidaan laskea seuraavasti:

$$U'_{hv} = RI \cos(\varphi) + X_L I \sin(\varphi), \text{ missä} \quad (7)$$

$U'_{hv}$  = Kuristimen aiheuttaman jännitteenaleneman likiarvo

$R$  = Kuristimen resistanssi

Kuristimen resistanssi on käytännössä niin pieni, että jännitteenalenemaa laskettaessa voidaan käyttää pelkkää reaktanssia ja jännitteenalenema yksinkertaistuu muotoon:

$$U'_{hv} = X_L I \sin(\varphi) \quad (8)$$

Näin ollen kuristimen jännitteenalenemaan vaikuttaa käytännössä ainoastaan kuormituksen tehokerroin. Täysin resistiivisellä kuormalla ( $\cos(\varphi)=1$ ) kuristimen jännitteenalenema on nolla ja kasvaa tehokertoimen huonontuessa.

Sarjakuristin aiheuttaa myös häviöitä sähköverkossa. Kuristimen häviöt ovat verrannollisia kuormitusvirran toiseen potenssiin ja riippuvat myös kuristimen vaihtojänniteresistanssista. Vaihtojänniteresistanssi määräytyy käämin tasajänniteresistanssin ja vaihtojännitteen aiheuttamista lisähäviöistä. Lisähäviöt koostuvat magneettikentän aiheuttamista pyörrevirtahäviöistä kuristimen metallisissa osissa ja virranahdon aiheuttamasta poikkipinta-alan näennäisestä pienenemisestä. [5]

### 2.1.3 Maadoituskuristimet

Maadoituskuristimia käytetään tehollisesti maadoitetuissa sähkön siirto- ja jakeluverkoissa kompensoimaan maasulkuvirtaa. Maadoituskuristimen avulla sähköverkkoa kuvaavan mallin nollaverkkoon saadaan lisäimpedanssi, jolloin maasulkuvirta pienenee. Tarvittava reaktanssi määritetään tapauskohtaisesti ja määräytyy halutun maasulkuvirran maksimiarvon mukaan. Maasulkuvirta ilman kompensointikuristinta saadaan lasketua verkon symmetristen komponenttien avulla seuraavasti:

$$\underline{I}_a^0 = \underline{I}_a^1 = \underline{I}_a^2 = \frac{U}{jX_1 + jX_2 + jX_0 + 3jX_f}, \text{ missä} \quad (9)$$

$\underline{I}_a^0$  = Nollaverkon maasulkuvirta

$\underline{I}_a^1$  = Myötäverkon maasulkuvirta

$\underline{I}_a^2$  = Vastaverkon maasulkuvirta



$X_0$  = Nollaverkon reaktanssi

$X_1$  = Myötäverkon reaktanssi

$X_2$  = Vastaverkon reaktanssi

$X_f$  = Vikareaktanssi

Kaavasta 9 nähdään, että komponenttiverkot ovat maasulkutilanteessa kytkeytyneet sarjaan. Kun verkkoon lisätään maadoituskuristin, sen impedanssin vaikutus kolminkertaistuu verkkojen sarjakytkenän johdosta. Kuristimen kanssa maasulkuvirta saadaan laskettua:

$$\frac{I_a^0}{I_a} = \frac{I_a^1}{I_a} = \frac{I_a^2}{I_a} = \frac{U}{jX_1 + jX_2 + jX_0 + 3jX_f + 3jX_L} \quad (10)$$

Maadoituskuristimen käyttö on jatkuvaa, mutta normaalissa käyttötilanteessa kuristimen läpi ei kulje juurikaan virtaa, eikä sen yli ole jännitettä. Tämä johtuu siitä, että kuristin sijoitetaan verkon tähtipisteen ja maan väliin. Verkon tähtipiste on normaalitilanteessa lähes maan potentiaalissa, eli kuristimen ensiö- ja toisiopuolien välillä ei ole potentiaaliero. IEC 60076-6 määrittelee virta-arvoksi viisi prosenttia maasulkutilanteen virrasta, ellei asiakas muuta vaadi.

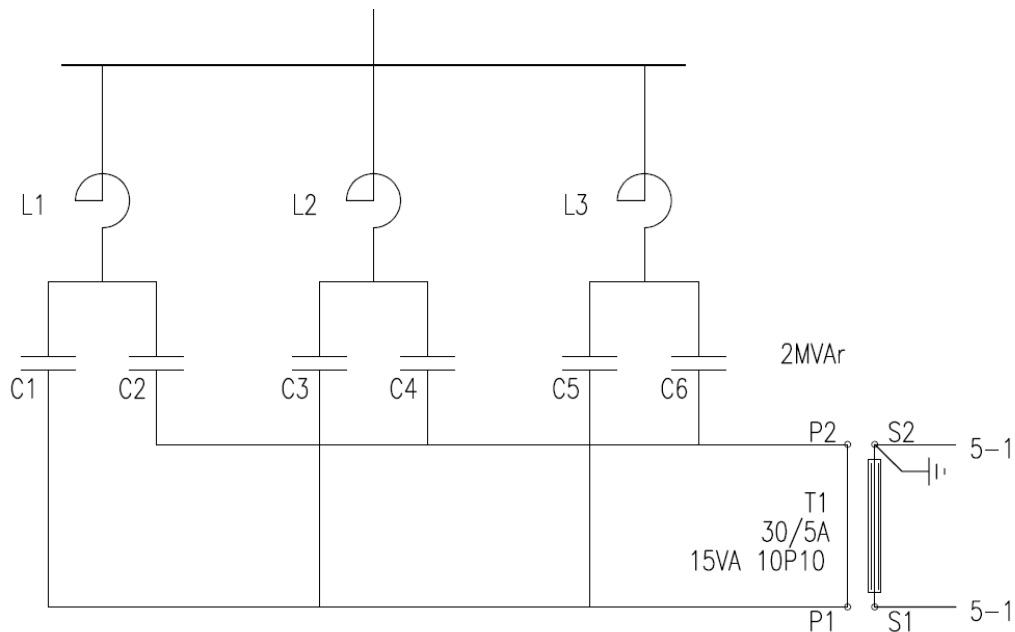
Vikatilanteessa kuristimen yli vaikuttaa jännite, joka saadaan vikavirran ja kuristimen impedanssin tulona. Kuristimen tulee kestää tämä lyhytaikainen jännite vaurioitumatta. Jännitteen kesto on määritelty IEC 60076-6 standardissa kymmeneksi sekunniksi. Standardi määrittelee vikavirran toistuvuudesta, että mikäli useita vikatilanteita tapahtuu lyhyen ajan sisällä, on niiden kesto ja jäähtymisaika vikojen välillä ilmoitettava asiakkaan toimesta.

Maadoituskuristimien eristystaso täytyy mitoittaa lyhytaikaisen jännitteen mukaan vaikka normaalissa käyttötilanteessa jännite onkin todella pieni. IEC 60076-6 asettaa maadoituskuristimen eristystasoksi verkon nimellisjännitteen mukaisen eristystason. Kuristimen tukieristimet voidaan standardiin mukaan valita pienemmälle eristystasolle. [2; 6]

#### 2.1.4 Suodatinkuristimet

Sähköverkoissa esiintyy kuormituksia, jotka kuluttavat loistehoa tai aiheuttavat yliaaltoja. Esimerkiksi prosessiteollisuudessa on yleensä käytössä paljon taajuusmuuttajakäyttöjä, jotka aiheuttavat niin loistehon kulutusta kuin yliaaltoja sähköverkkoon. Loistehon siirto ei ole tehohäviöistä johtuen järkevää, joten sen kompensointi hoidetaan paikallisesti. Suomessa teollisuudelle on asetettu tiukat ehdot siitä, kuinka paljon loistehoa saa kuluttaa suhteessa päätötehoon. Jos loistehoa kulutetaan enemmän kuin sopimuksessa sallitaan, tulee siitä maksettavaksi loistehomaksu. Loistehomaksu on luonteeltaan pikemminkin rangaistus- kuin kulutusmaksu. Tästä johtuen loistehon kompensointiin investoiminen on taloudellisesti erittäin kannattavaa ja takaisinmaksuajat todella lyhyitä.

Loistehon kompensointi yliaaltopitoisessa verkossa ei ole yleensä mahdollista pelkällä rinnakkaiskondensaattoriparistolla. Kondensaattoripariston kapasitanssi voi muodostaa rinnakkaisresonanssiin syöttävän verkon induktanssien kanssa. Jos tämän resonanssiin viritystaajuus osuu verkossa esiintyvän yliaallon kanssa samalle taajuudelle, resonanssi voimistaa yliaaltoa ja näin ollen lisää virta- ja jännitesäröä sähköverkossa. Rinnakkaisresonanssi voidaan välttää kytkemällä kondensaattoripariston kanssa sarjaan oikein mitoitettu kuristin. Kuristimen induktanssi valitaan siten, että sarjaresonanssin viritystaajuus on pienempi kuin alin verkossa esiintyvän yliaallon taajuus. Tätä ratkaisua kutsutaan estokelaparistoksi. Kuvassa 2 on esitettyä estokelapariston kytkentä.



Kuva 2. 2 MVAR Estokelapariston kytkentäkaavio.

Estokelapariston impedanssi on kapasitiivinen viritystaajuutta pienemmillä taajuuksilla ja induktiivinen sitä korkeammilla taajuuksilla. Näin ollen estokelaparisto kompensoi perustaajuisia loistehoa, mutta verkossa mahdollisesti esiintyvät yliaallot eivät aiheuta ongelmia. Yleisin estokelapariston viritystaajuus on 189 Hz, mutta muitakin taajuuksia käytetään. Estokelapariston kuristimen induktanssi saadaan laskettua seuraavasti:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow L = \frac{1}{\omega^2 C}, \text{ missä} \quad (11)$$

$\omega$  = kulmataajuus

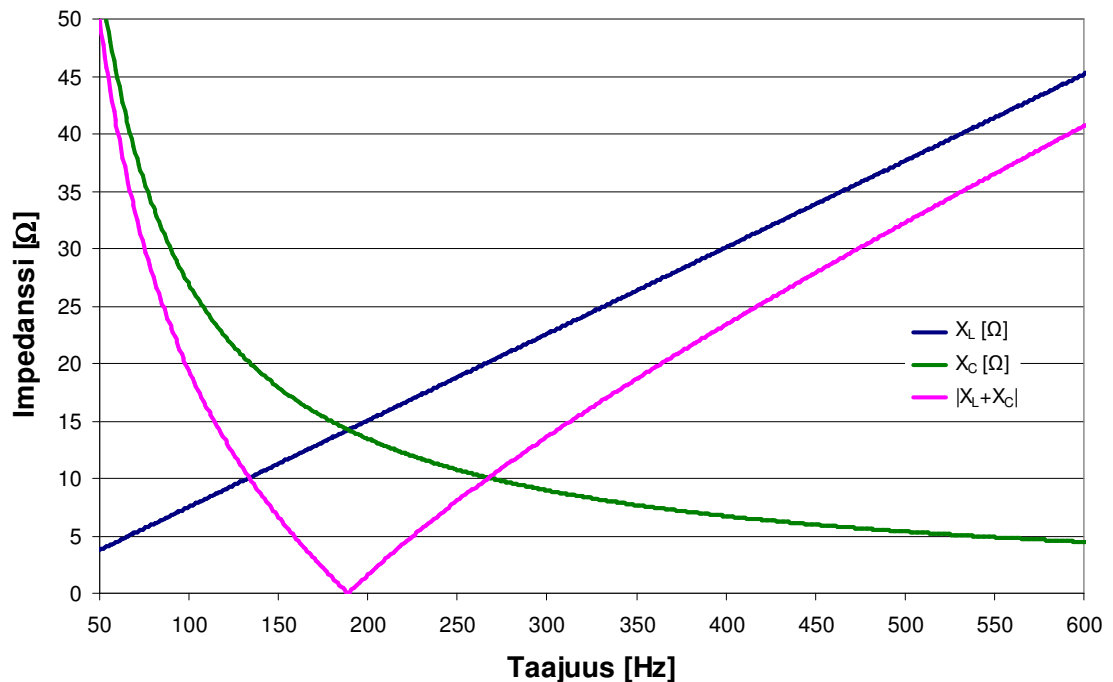
$C$  = Kapasitanssi

Viritystaajuudella pätee:  $\omega = 2\pi f_r$ , joten induktanssiksi saadaan:

$$L = \frac{1}{(f_r 2\pi)^2 C}, \text{ missä} \quad (12)$$

$f_r =$  Viritystaajuus

Estokelapariston impedanssi taajuuden funktiona saadaan esitettyä laskemalla kondensaattorin ja kelan sarjakytkennän impedanssi kaikilla taajuuksilla. Impedanssi muuttuu kapasitiivisesta induktiiviseksi viritystaajuudella. Kuvassa 3 on esitetty impedanssi taajuuden funktiona esimerkkinä 2 MVAr 10 kV estokelaparistolle.



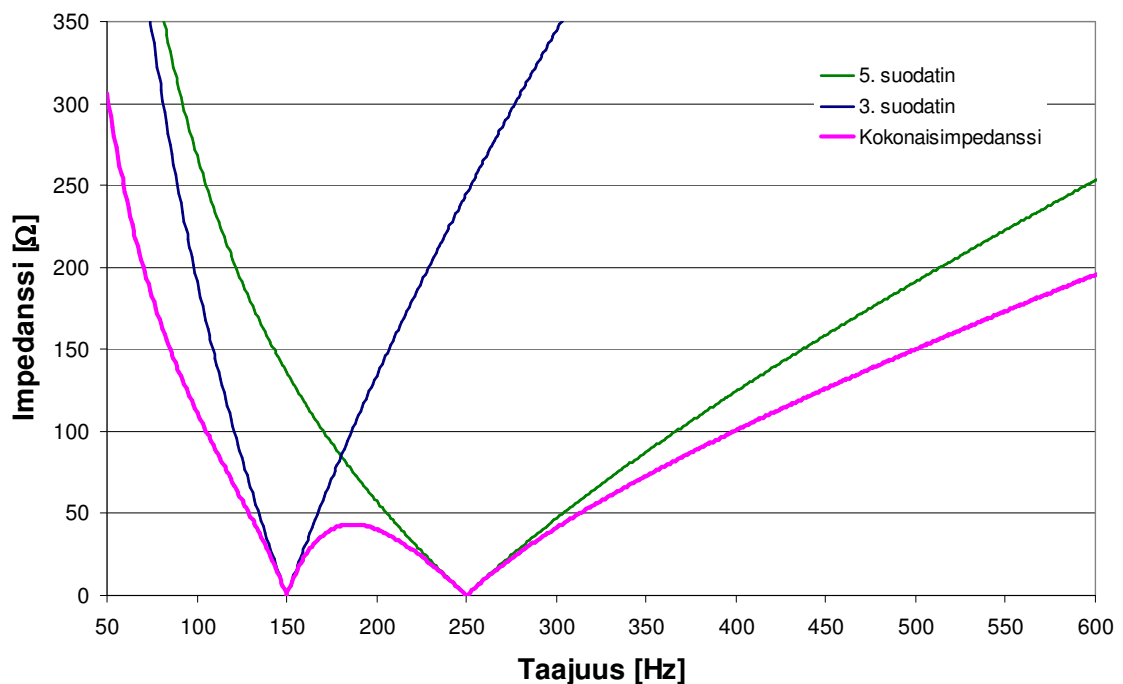
Kuva 3. 10 kV 2 MVAr estokelapaiston impedanssi taajuuden funktiona, missä  $X_C$  on kondensaattorin reaktanssi.

Mikäli sähköverkossa esiintyy paljon yliaaltoja ja jännitesärö on niiden vaikutuksesta suuri, voidaan sähkön laatua parantaa yliaaltosuodattimella. Yliaaltosuodatin koostuu, kuten estokelaparistokin, kondensaattoriparistosta ja sen kanssa sarjaan kytketystä kuristimesta. Kondensaattoripariston kapasitanssi valitaan siten, että se tuottaa halutun määrän loistehoa perustaajuudella. Toisin kuin estokelaparistossa, yliaaltosuodattimessa kuristimen induktanssi valitaan siten, että se muodostaa sarjaresonanssipiirin halutulle yliaaltotaajuudelle.

Yliaaltosuodattimen impedanssi on nolla sarjaresonanssitaajuudella. Tämä tarkoittaa, että verkossa ei voi esiintyä resonanssitaajuuden kanssa samalla taajuudella virtaa, eli yliaaltovirta kulkee suodattimen kautta maahan. Yliaaltosuodatin tulee mitoittaa kestämään perustaajuuden kompensointitehon lisäksi koko yliaaltovirta. Yliaaltosuodatin on kalliimpi kompensoinnin toteutustapa kuin estokelaparisto, sillä verkossa on yleensä useita suodatettavia yliaaltoja ja kukin niistä vaatii oman suodattimensa. Jos sähkön

laatua kuitenkin pitää parantaa, on yliaaltosuodatin edullisempi kuin muut vaihtoehdot. Suodatinkuristimen induktanssi saadaan laskettua kaavalla 12 käyttämällä viritystaajuutena haluttua yliaaltotaajuutta.

Suodattimia voidaan kytkeä useita samaa sähköverkkoon. Tällöin niiden yhteenlasketussa impedanssissa nollakohtien määrä on suoraan verrannollinen eri taajuuksille viritettyjen suodattimien määrään. Esimerkiksi kahden suodattimen yhteisessä impedanssissa on kaksi nollakohtaa. Perustaajuudella molemmat kompensoivat nimellistehonsa verran loistehoa. kuvassa 4 on esitettyä esimerkkinä 2 MVA<sub>r</sub> 35 kV kolmannen ja 2 MVA<sub>r</sub> 35 kV viidennen yliaallon suodattimen yhteenlaskettu impedanssi taajuuden funktiona.



Kuva 4. 2 MVA<sub>r</sub> 35 kV kolmannen ja 2 MVA<sub>r</sub> 35 kV viidennen yliaallon suodattimen yhteenlaskettu impedanssikäyrä.

Erilaiset suodattimet ja estokelaparisto ovat suurjännitekuristinten yleisimpiä käyttökohteita. Tyypillisesti keskijännitteellä loistehoa kompensoitaessa verkossa esiintyy aina yliaaltoja ja rinnakkaisresonanssin mahdollisuus. Tästä johtuen kompensointi toteutetaan yleisesti estokelaparistoilla. Jos ollaan aivan varmoja, että yliaaltoja ei esiinny tai rinnakkaisresonanssin vaaraa ei ole, voidaan kompensointi toteuttaa myös rinnakkaiskondensaattoriparistolla. [8]

### 2.1.5 Vaimennuskuristimet

Mikäli sähköverkossa ei esiinny merkittävästi yliaaltoja ja rinnakkaisresonanssin vaaraa ei ole, voidaan loistehon kompensointi toteuttaa rinnakkaiskondensaattoriparistolla. Kondensaattoripariston kytkentätilanteessa esiintyy kuitenkin kytkentävirtasysäys. Vir-

ta voi kytkentätilanteessa olla niin suuri, että verkon komponentit eivät sitä kestä tai kytkentävirta aiheuttaa häiriöitä sähkön laadulle. Kytkentävirran suuruus riippuu kytkentähetkestä ja mitoitusarvona käytetään suurinta mahdollista arvoa. Suurin arvo saavutetaan, kun kytkentähetkellä jännite on huippuarvossaan. Kytkentävirtaa voidaan pienentää käyttämällä kondensaattoripariston kanssa sarjaan kytkettyjä vaimennuskuristimia.

Sähköverkon nimellistaajuus on paljon pienempi kuin kytkentävirran taajuus, joten sen vaikutus kytkentävirtaan on olemattoman pieni ja voidaan jättää huomioimatta kytkentävirtaa laskettaessa. Kytkentätilanne voidaan kuvata askelmaiseksi jännitteen nousuksi. Kytkentätilanteen jännitteelle voidaan kirjoittaa seuraava yhtälö:

$$u(t) = (L_{net} + L) \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int i(t) dt, \text{ missä} \quad (13)$$

$L_{net}$  = Sähköverkon induktanssi

$t$  = Aika

Kun kytkentähetki osuu jännitteen huippuarvoon, pätee yhtälölle 13:

$$u(t) = 0, \text{ kun } t < 0$$

$$u(t) = \sqrt{2} \frac{U}{\sqrt{3}} = \sqrt{\frac{2}{3}} U, \text{ kun } t > 0$$

Laplace-muunnoksen jälkeen yhtälö 13 voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\frac{u(t)}{s} = (L_{net} + L)[sI(s) - i(t=0)] + \frac{1}{sC} I(s) - \frac{U_C(t=0)}{s}, \text{ missä} \quad (14)$$

$s$  = Laplace-operaattori

$U_C$  = Kondensaattorin jännite

Jotta laskettava kytkentävirta edustaa suurinta mahdollista arvoa, oletetaan kondensaattorin alkutilanteen jännitteen arvoksi nolla. Mikäli kondensaattorin jännite on nolla, on piirin läpi kulkeva virta arvoltaan nolla. Laplace-muunnoksen ja alkuarvojen sijoittamisen jälkeen yhtälö 14 voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\frac{\sqrt{\frac{2}{3}} U}{s} = (L_{net} + L)sI(s) + \frac{1}{sC} I(s) \quad (15)$$

Ratkaisemalla virta yhtälöstä 15, saadaan sille seuraava yhtälö:

$$I(s) = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}U}{s \left[ (L_{net} + L)s + \frac{1}{sC} \right]} = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}U}{(L_{net} + L) \left[ s^2 + \frac{1}{C(L_{net} + L)} \right]} \quad (16)$$

Määritellään  $\omega$  seuraavasti:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{C(L_{net} + L)}} \quad (17)$$

Sijoittamalla  $\omega$  yhtälöön 16, voidaan se kirjoittaa seuraavaan muotoon:

$$I(s) = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}U}{(L_{net} + L)\omega} \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \quad (18)$$

Tekemällä Laplace-käänteismuunnos saadaan ratkaistua aikatazon virta:

$$i(t) = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}}U}{(L_{net} + L)\omega} \sin(\omega t) \quad (19)$$

Sijoittamalla yhtälöön 19 yhtälössä 17 määritelty  $\omega$ , voidaan aikatazon virta kirjoittaa seuraavasti:

$$i(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}U \sqrt{\frac{C}{L_{net} + L}} \sin(\omega t) \quad (20)$$

Kytkeätilanteessa virran maksimi-arvo saadaan yhtälössä 20 kun  $\sin(\omega t)$  saa arvon yksi. Kytkeävirran taajuus saadaan laskettua seuraavasti:

$$f_0 = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{C(L_{net} + L)}}, \text{ missä} \quad (21)$$

$f_0$  = Kondensaattoripariston kytkeävirran taajuus

Yhtälön 20 avulla voidaan laskea tarvittava vaimennuskuristimen induktanssi, kunhan tiedetään syöttävän verkon induktanssi ja suurin sallittu kytkeävirta. Vaimennuskuristimen nimellisvirta määräytyy kondensaattoripariston nimellisvirran mukaan. Standardin IEC 60871-1 mukaan vaimennuskuristimen nimellisvirta tulee olla 1,43-

kertainen kondensaattoripariston nimellisvirtaan verrattuna. Tällä huomioidaan verkossa mahdollisesti esiintyvät yliaallot ja niiden vaikutus kuristimen lämpenemään.

Vaimennuskuristimia käytetään yleisesti suurjännitteellä sähkön siirtoverkossa. Vaaditut eristystasot voivat olla 400 kV jännitetasossa todella suuria. Ilmasydämisillä kuristimilla eristystasosta määritetään kaksi raja-arvoa: yhden minuutin käyttötaajuinen ylijännite ja salamasyöksyjännite. Vaatimus yhden minuutin käyttötaajuiselle ylijännitteelle voi olla jopa 630 kV ja salamasyöksyjännitteelle 1425 kV. Suurilla jännitteillä varsinkin sarjaparistojen kanssa nimellisvirta voi olla todella suuri, tuhansia ampeereja. Vaimennuskuristimet ovat teknisesti haastavia suurien kytkentä- ja oikosulkuvirtojen käämitykseen ja muihin kuristimen rakenteisiin aiheuttamien voimien johdosta. Tyypillisesti vaimennuskuristimien induktanssi on alle yhden millihenryn jakeluverkoissa ja yli yhden millihenryn siirtoverkkojen korkeimmilla jännitetasoilla.

Kuristimia käytetään myös sarjakondensaattoripariston vaimennuskuristimena. Tässä käyttötarkoituksessa vaimennuskuristin ei ole jatkuvasti kytkettynä, eli normaalissa käyttötilanteessa kuormitusvirta ei kulje sen läpi. Kuristin on kytketty sarjakondensaattorin rinnalle kipinävälin kanssa sarjaan. Vikatilanteessa kipinäväli syttyy ja kondensaattoriparisto purkautuu vaimennuskuristimen kautta. Kuristimen tehtävänä on vaimentaa purkauksesta johtuvia värähtelyitä sähköverkossa. Kuristin kuitenkin mitoitetaan sarjapariston nimellisvirran mukaan, koska vikatilanteen jälkeen kondensaattori ohitetaan kuristimen kanssa sarjassa olevan katkaisijan avulla. [2; 8; 9]

### 2.1.6 Tasoituskuristimet

Tasoituskuristimia käytetään tasajännitesähkönsiirrossa. Tasajännitettä käytetään sähkönsiirrossa todella pitkillä siirtoyhteyksillä tai kaapeliyhteyksillä. Pitkillä siirtoyhteyksillä hyöty tulee kokonaistaloudellisemmasta ratkaisusta. Kaapeliyhteyden tapauksessa tasajännite on ainoa mahdollisuus, koska jo muutaman kymmenen kilometrin pituisen kaapelin varausvirta on nimellisvirran suuruinen. Siten kaapeliin kytketty jännite käyttää kaapelin koko siirtokyvyn ilman kuormitusta. Tämä johtuu kaapelin moninkertaisesta maakapasitanssista verrattuna avojohtoon.

Tasoituskuristin kytketään tasasuuntaajan kanssa sarjaan verkon tasajännitepuolelle. Tasoituskuristimella on useita tehtäviä tasajänniteverkossa. Se pienentää tasajännitteessä suuntaamisen seurauksena ilmenevää vaihtojännitettä, eli rippeliä. Tasajännitteen suodatuksella saadaan myös vähennettyä siinä esiintyviä yliaalloja, koska kuristin toimii sarjaimpedanssina. Ilman riittävää suodatusta tasajännitelinja häiritsisi esimerkiksi puhelinverkkoa. Tasoituskuristimen kanssa sarjassa käytetään häiriönpoistoon myös toista kuristinta, joka on pienempi-induktanssinen ja nimenomaan suunniteltu suodattamaan suurtaajuisia häiriöitä.

Suodatustehtävien lisäksi tasoituskuristinta tarvitaan vikatilanteiden varalle. Kuristin pienentää resonanssivaaraa pienitaajuisilla harmonisilla yliaalloilla. Nämä häiriöt ovat peräisin vaihtojänniteverkosta, mutta voivat tasajännitepuolelle päästessään voimistua resonanssitilanteen vaikutuksesta moninkertaisiksi. Resonanssivaaran pienentämisen

lisäksi tasoituskuristin pienentää tasajänniteverkossa esiintyviä vikavirtoja toimien sarjakuristimena.

Tasoituskuristimen suunnittelu perustuu täysin erilaiseen filosofiaan kuin vaihtojännitteellä. Tasajännitteellä kuristimella ei ole reaktanssia, koska  $X_L = j\omega L$  ja tasajännitteellä taajuus on nolla. Näin ollen tasajännitteellä kuristimen johtimien välinen virranjako tapahtuu pelkästään niiden resistanssien perusteella. Toisin sanoen kaikkien johtimien tulisi olla samanpituisia. Vaihtojännitteellä tällainen kuristin ei ole optimaalinen, sillä virranjaon saaminen niin tasa- kuin vaihtojännitteillä kuntoon on mahdotonta.

Jännitteen kannalta tasoituskuristimen yli vaikuttava jännite on tasavirralla hyvin pieni, koska impedanssi koostuu ainoastaan resistanssista. Tasajännitteessä esiintyvät yliaaltovirrat kuitenkin saattavat aiheuttaa suuria jännitteitä kuristimen käämityksen yli. Toinen jänniterasitusta aiheuttava tapahtuma on tasajännitteen katkaisu. Äkillisissä kytkentäilmiöissä tasoituskuristimen käämitykseen kohdistuu suuria nopeita jänniterasituk-  
sia. [4]

### 2.1.7 Muut kuristinten tyypilliset käyttökohteet

Ilmasydämisille kuristimille on olemassa käyttökohteita myös muissa sovellutuksissa kuin mitä IEC 60076-6 määrittää. Nämä ovat kuitenkin johdannaisia standardin sisältämistä kuristintyypeistä, mutta niillä on käyttökohteestaan johtuen erilaisia vaatimuksia kuin jo käsitellyillä kuristimilla. Kuristimia voidaan käyttää myös laboratorioissa moninaisiin käyttökohteisiin. Nämä erikoiskäyttökohteet ovat täysin tilaajan määritettävissä ja niihin ei välttämättä sovelleta standardia sinällään. Esimerkkinä erikoisista laboratoriokäyttösovellutuksista on Glaninger-piiri ja siihen tarvittava kuristin.

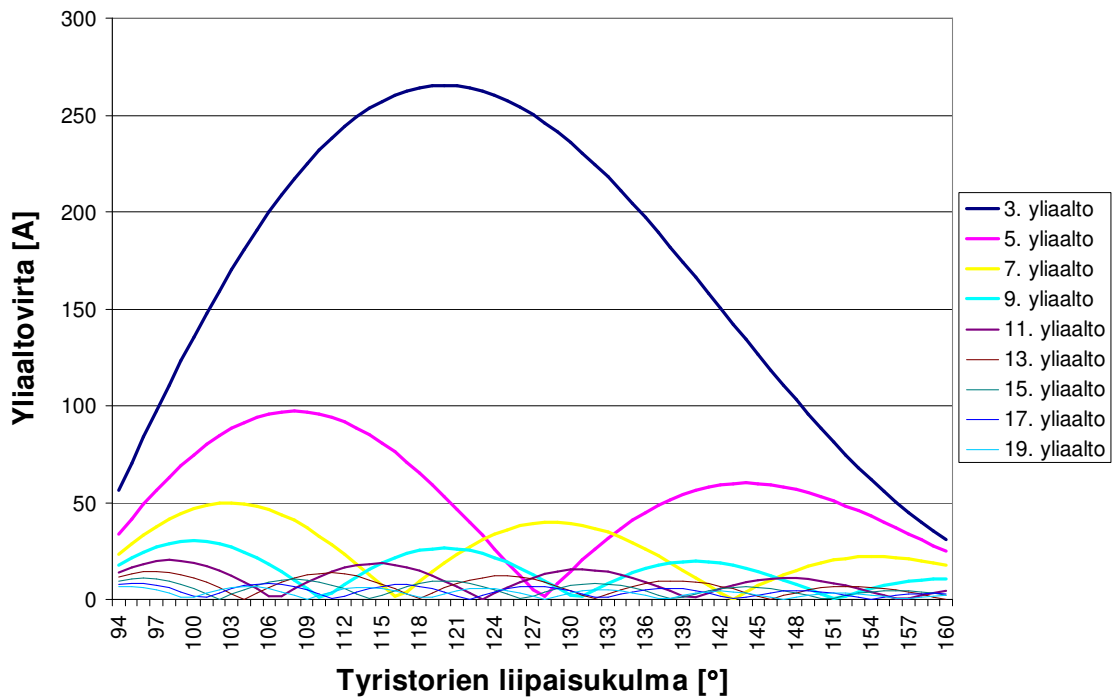
Glaninger-piiri on tavalliseen Marx-tyyppiseen syöksyjännitegeneraattoriin lisättävä piiri, jota tarvitaan pieni-induktanssisien koekappaleiden testauksessa. Piirissä sisäisen vaimennusvastuksen rinnalle kytketään kuristin ja kuorman rinnalle sovitettu resistanssi. Piirin avulla saadaan koejännitteen käyrämuotoa korjattua lähemmäs standardissa esitettyä vaatimusta. Kuristimen rakenteelle on tyypillistä hyvin pieni induktanssi ja suuri eristystaso. Kuristimen käämityksen poikkipinta-alan ei tarvitse olla suuri, koska syöksyjännitepulssi on lyhyt ja kuristinta lämmittävä vaikutus näin ollen pieni.[10]

#### 2.1.7.1 TC-kuristin

Sähköverkkoihin on kytkettynä kuormituksia, joiden loistehotarve muuttuu nopeasti. Suodatinkondensaattoriparistoilla ei välttämättä saavuteta riittävää sähkönlaadun paranemista näissä tapauksissa. Esimerkiksi terästehtaiden valokaariuunit ovat kuormituksina sellaisia, että välkynnälle asetettuja rajoja ei pystytä saavuttamaan perinteisillä kompensointiratkaisuilla. Näissä käyttökohteissa käytetään staattista kompensattoria (Static Var Compensator, SVC). Staattisia kompensattoreita käytetään myös siirtoverkoissa tukemaan verkkoa vikatilanteiden aikana ja parantamaan sen stabiilisuutta.

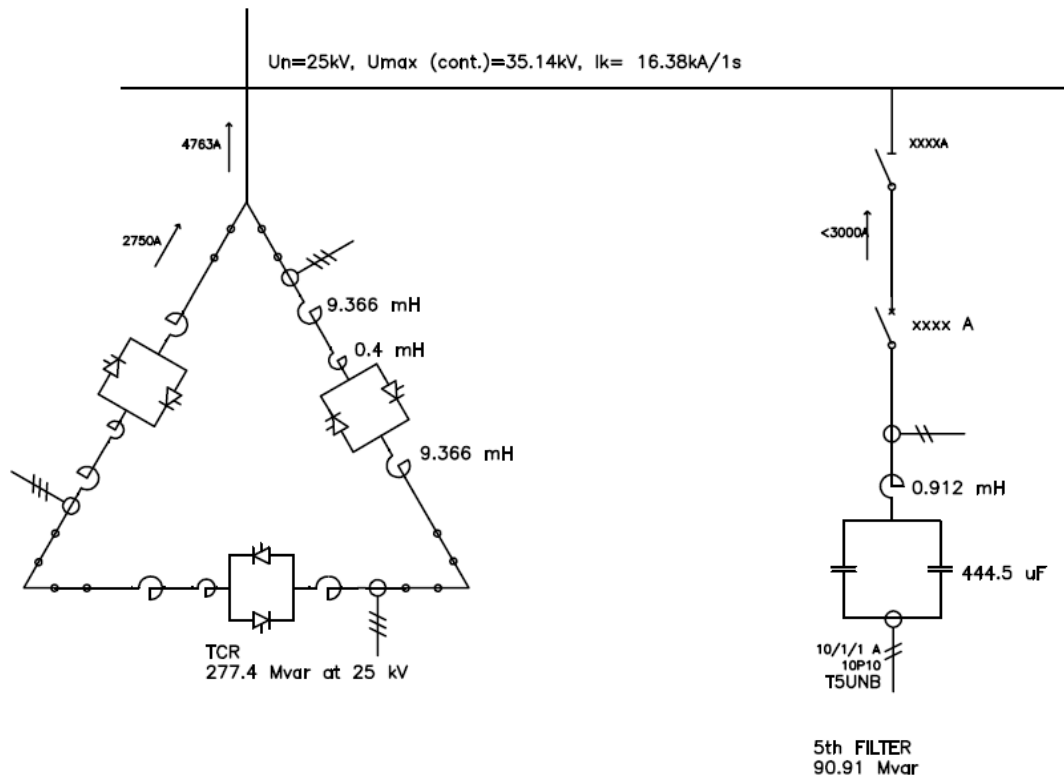


Staattinen kompensattori koostuu säädettävästä kuristimesta, suodatinparistoista ja tarvittaessa tyristorikytketystä rinnakkaiskondensaattoripaistosta. Säädettävästä kuristimesta käytetään nimitystä TC-kuristin (Thyristor Controlled Reactor, TC-reactor). TC-kuristin tuottaa merkittävästi yliaaltoja, koska sitä ohjataan tyristoreilla ja jännitteestä käytetään ainoastaan osa jaksosta, joten jännite on kaukana sinimuotoisesta. Tämän seurauksena staattisissa kompensattorissa on oltava useita suodatinparistoja suodattamassa näitä yliaaltoja. Kuvassa 5 on esitetty 100 MVar, 30 kV TC-kuristimen läpi kulkevat yliaaltovirrat tyristoriventtiilin ohjauskulman funktiona. Tässä esimerkissä 100 MVar kompensointiteho saavutetaan 90 asteen ohjauskulmalla.



Kuva 5. 100 MVar, 30 kV TC-kuristimen tuottamat yliaaltovirrat tyristoriventtiilin liipaisukulman funktiona.

Kuvassa 5 on esitettyä TC-kuristimen tuottamat yliaaltovirrat. Yliaaltovirroista 3. ja 15. yliaalto ei päädy sähköverkkoon, mikäli kuormitus on symmetrinen. TC-kuristin koostuu tyypillisesti kahdesta identtisestä kuristimesta ja niiden väliin kytketystä tyristoriventtiilistä. TC-kuristinta käytetään kompensoimaan suodatinkondensaattoriparistojen tuottamaa loistehoa ja se voidaan tarvittaessa mitoittaa myös suuremmalle teholle, jolloin staattinen kompensattori voi näkyä verkkoon induktiivisena. Verkon kannalta tyhjäkäyntitilanteessa, jolloin kompensattorin tuottama loisteho on nolla, TC-kuristimen virta ei ole nolla, vaan sen on kompensoitava suodatinparistojen loisteho. Kuvassa 6 on esitettyä tyypillisen staattisen kompensattorin pelkistetty yksivaiheinen sijaiskytkentä.



Kuva 6. Tyypillisen SVC:n pelkistetty yksivaiheinen sijaiskytkentä.

TC-kuristimen kompensointitehoa voidaan muuttaa nopeasti ja portaattomasti teoriassa nolasta nimellistehoon saakka. Käytännössä kompensointitehossa on rajoituksia johtuen tyristoriventtiilistä. Jos kompensointiteho asetettaisiin teoreettiseen maksimiin, ei tyristoriventtiilin yli jäisi lainkaan jännitettä. Tyypillisesti tyristoriventtiili ottaa tarvitsemansa tehon suoraan sen yli vaikuttavasta jännitteestä, joten venttiili ei voi toimia tällä teoreettisella maksimiteholla.

TC-kuristin on ohjattava rinnakkaiskuristin. Siihen pätee standardin IEC 60076-6 osuus rinnakkaiskuristimista. TC-kuristimia kuitenkin käytetään täysin eri käyttökohdeissa kuin rinnakkaiskuristimia ja näin ollen ne eivät kuulu suoraan rinnakkaiskuristinten kanssa samaan kategoriaan. Rinnakkaiskuristimen ja TC-kuristimen kytkennässä sähköverkkoon on tyypillisesti erona se, että rinnakkaiskuristimet kytketään tähten jänniterasituksen minimoimiseksi ja TC-kuristimet kytketään kolmioon.

TC-kuristimen tuottama loisteho riippuu tyristoriventtiilin ohjauskulmasta. Koska kuristin on induktiivinen komponentti, on sen jännitteen ja virran välillä 90 asteen vaihesiirto. Tyristoriventtiilin ohjauskulma lasketaan jännitteestä, joten virran kulmaan verrattuna täysin johtavassa tilassa olevan tyristoriventtiilin liipaisukulma olisi 90 astetta, ja täysin suljetun venttiilin liipaisukulma 180 astetta. Ohjauskulma lasketaan jännitteestä, koska sen mittaaminen on helppoa, eikä sen amplitudi vaihtele juurikaan kuormituksen vaihdellessa. TC-kuristimen virta tyristoriventtiilin liipaisukulman funktiona voidaan laskea seuraavasti:

$$I_{TC} = I_{90} \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi}, \text{ missä} \quad (22)$$

$I_{TC}$  = TC-kuristimen virta

$I_{90}$  = 90 asteen liipaisukulman virta

$\alpha$  = Liipaisukulma

Koska kuristimen induktanssi pysyy samana tyristoriventtiilin liipaisukulmasta riippumatta, voidaan sen tuottama induktiivinen loisteho laskea seuraavasti:

$$Q_{TC} = \left( \frac{U}{X_L} \cdot \frac{2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)}{\pi} \right)^2 \cdot X_L = \frac{U^2 (2(\pi - \alpha) + \sin(2\alpha))^2}{X_L \pi^2}, \text{ missä} \quad (23)$$

$Q_{TC}$  = TC-kuristimen induktiivinen loisteho

TC-kuristimen jännitemitoituksessa on käytettävä verkon pääjännitettä. Vaikka kuristin tuottaa harmonisia yliaaltoja ja niiden avulla laskettu jänniterasitus saattaa olla joillakin ohjauskulmilla suurempi kuin pääjännite, ei tyristoriventtiili voi lisätä jännitettä. Eli suurin kuristimen yli vaikuttava jännite on kaikissa tilanteissa verkon pääjännite. [7]

### 2.1.7.2 Käynnistyskuristin

Suurjännitemoottorin kytkentä verkkoon voi olla ongelmallista. Moottori ottaa käynnistyksessä moninkertaisen virran nimelliseen verrattuna ja käynnistys kestä tyypillisesti useita kymmeniä sekunteja. Syöttävä verkko ei välttämättä kestä tällaista tilannetta ilman häiriöitä, kuten suurta jännitteenalenemaa tai stabilisuuden menetystä. Tällaisessa tilanteessa moottori käynnistetään yleensä käynnistyskuristimen avulla. Käynnistyskuristinta käytetään vastuksen sijaan siksi, että kuristimella jännitehäviö tapahtuu induktiivisen reaktanssin vaikutuksesta ja häviöteho jää huomattavasti pienemmäksi. Jos käynnistyksessä käytettäisiin vastusta, olisi vastuksen tehohäviö suoraan laskettavissa  $P = I^2 R$ . Kuristimella reaktanssi on tyypillisesti useita kymmeniä kertoja suurempi kuin resistanssi.

Käynnistyskuristin kytketään sarjaan moottorin kanssa ja sen rinnalle kytketään ohi-tuskatkaisija, joka oikosulkee kuristimen virtapiiristä käynnistyksen tapahduttua. Käynnistyskuristimelle määritellään tapauskohtaisesti haluttu reaktanssi ja käynnistyksen kesto-aika. Lisäksi tulee tietää moottorin käynnistysyksi ja jäähtymisajat syklien välillä. Kuristin mitoitetaan kestäväksi käynnistysyksi ja oikosulkutilanne syklien jälkeen. Mitoituksen kannalta kuristimen aikavakio on tärkeä mitoituskriteeri, koska kuristimen läpi ei kulje lainkaan jatkuvaa virtaa, joten lämpenemää tarkastellaan ainoastaan lyhytaikaisen virran kannalta. Aikavakio tarkoittaa aikaa, jolloin kuristin saavuttaa  $1 - e^{-1}$  osan, eli noin 63 %, lopullisesta lämpenemästään. Aikavakion suuruus riippuu

kuristimen rakenteesta, kuten johtimien määrästä ja sylintereiden paksuudesta. Kuristimen lämpötila yhden käynnistyksen jälkeen saadaan laskettua seuraavasti:

$$T_1 = \Delta T + T_{\text{ympäristö}}, \text{ missä} \quad (24)$$

$T_1$  = Lämpötila yhden käynnistyksen jälkeen

$\Delta T$  = Käynnistyksen aiheuttama kuristimen keskimääräinen lämpenemä

$T_{\text{ympäristö}}$  = Ympäristön lämpötila käynnistyshetkellä

Aikavakion ja yhden käynnistyksen jälkeisen lämpötilan avulla kuristimen lämpötila jäähtymisajan  $t_c$  jälkeen voidaan laskea seuraavasti:

$$T_2 = T_1 - (T_1 - T_{\text{ympäristö}}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{t_c}{\tau}}\right), \text{ missä} \quad (25)$$

$t_c$  = Jäähtymisaika käynnistysten välillä

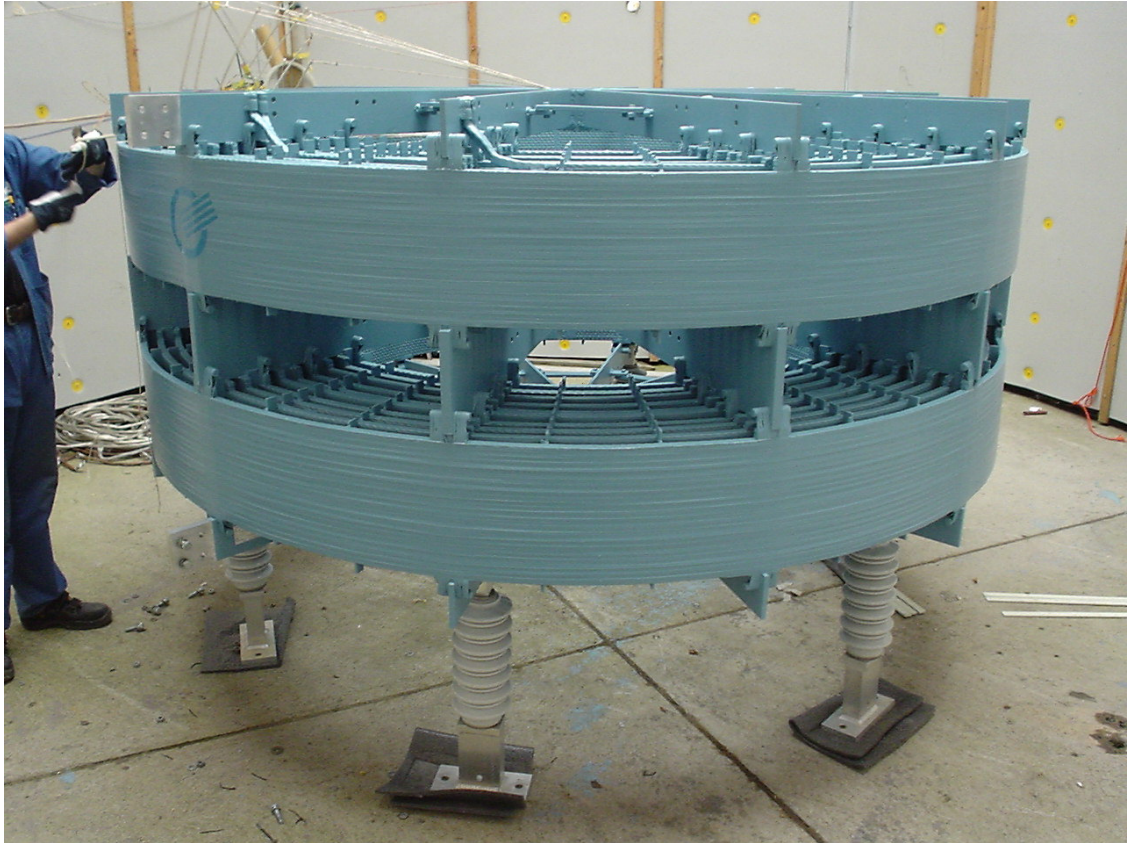
$\tau$  = Jäähtymisaikavakio

Laskemalla edellisten kaavojen avulla koko käynnistysyksi läpi, saadaan kuristimen lopullinen lämpötila selville. Tämän lisäksi on huomioitava oikosulkulämpenemä.

### 2.1.7.3 Duplex-kuristin

Sähköverkoissa on tilanteita, jolloin yhdestä pisteestä syötetään kahta eri lähtöä ja oikosulkuvirtaa halutaan rajoittaa. Näissä tilanteissa voidaan käyttää kuristinta, jossa on kaksi käämiä kytketty siten, että normaalissa käyttötilanteessa niiden keskinäisinduktanssit heikentävät toisiaan. Tästä on se etu, että jännitehäviö muodostuu pienemmäksi kuin kahdella erillisellä kuristimella. Oikosulkutilanteessa keskinäisinduktanssien heikentävä vaikutus katoaa, koska oikosulkutilanteessa vikapaikkaa syöttävän kelan magneettikenttä kasvaa huomattavasti suuremmaksi. Tästä seuraa, että keskinäisinduktanssia ei enää muodostu yhtä paljon molemmissa kuristimissa.

Duplex-kuristin koostuu kahdesta mahdollisimman lähellä toisiaan olevasta samaan rakenteeseen käämitystä kuristimesta. Keskinäisinduktanssien heikentävä vaikutus saadaan aikaiseksi käämimällä toinen osakuristin myötöpäivään ja toinen vastapäivään. Oikosulkuvoimia kelojen välillä saadaan hallittua käyttämällä yhteistä ristikköä käämien välissä. Kuvassa 7 on tyypillinen duplex-kuristin.



Kuva 7. Duplex-kuristin.

Duplex-kuristimen suunnittelussa on huomioitava suuri keskinäisinduktanssivaatimus, tyypillisesti lähes 50 prosenttia. Tämä tarkoittaa, että kuristimen geometriasta ei saa optimaalista. Käämien korkeuden tulee olla huomattavan matala ja tästä johtuen kuristimeen tulee enemmän rinnakkaisia sylintereitä kuin on optimitilanteessa tarpeen. Tämä lisää kuristimen valmistuksen työmäärää ja kustannuksia verrattuna perinteiseen sarjakuristimeen.

## 2.2 Ilmasydämisen kuristimen rakenne

Tässä luvussa käsitellään ilmasydämisen kuristimen rakennetta. Rakenteen tarkastelu perustuu ALSTOM Grid oy:n valmistamiin kahteen kuristintyyppiin, jotka eroavat toisistaan lähinnä mekaaniselta toteutukseltaan. Eroavaisuuksia on myös käytetyissä johtimissa ja materiaaleissa, mutta molemmat kuristimet ovat perusrakenteeltaan toisiaan vastaavia.

Kahden ALSTOM Grid oy:n valmistaman kuristintyyppin suurin eroavaisuus on valmistustavassa. R-tyypin kuristin valmistetaan robotteja ja automaatiota hyödyntäen yksittäisistä eristetyistä alumiinijohtimista ja hartsia tuodaan käämiin sisälle jo kääminän aikana. P-tyypin kela valmistetaan enemmän käsityönä ja sen johtimet koostuvat vuorottelevasta köydestä, joka koostuu yksittäisistä eristetyistä alumiinilangoista. P-tyypin kuristin kyllästetään hartsilla vasta kääminän jälkeen. Seuraavaksi käsitellään ilmasydämisen kuristimen perusrakenne.

## 2.2.1 Kuristimen perusrakenne

Ilmasydämisen kuristimen perustana on käämi, joka koostuu silmukoille käämitystä johdinmateriaalista. Tyypillisiä johdinmateriaaleja ovat alumiini ja kupari. Johdinmateriaalia käämitään silmukoille, jotta silmukan pinta-alan läpäisemä magneettivuo saadaan moninkertaistettua ja näin käämille saadaan suurempi induktanssi kuin yhdellä kierroksella. Käämin johdinsilmukat pyritään saamaan mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta niiden välille saadaan mahdollisimman suuri keskinäisinduktanssi. Näin käämin induktanssi saadaan maksimoitua kierrosmäärän suhteen.

Vaihtojännitteellä kuristimen johtimen poikkipinta-alaa ei kannata suurentaa liiaksi, koska paksussa johtimessa pyörrevirrat lisäävät häviöitä ja aiheuttavat virranahdoksi kutsutun ilmiön, jossa virta jakaantuu epätasaisesti ja tehollinen poikkipinta-ala pienee. Tästä syystä kuristimet tehdään ohuemmista, eristetyistä johtimista, joita kytketään sähköisesti rinnakkain. Yksittäisten johtimien induktanssi on saatava mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta kuristimen sisällä ei kiertäisi virtaa. Koska johtimet kytketään rinnakkain, jo pienikin induktanssin ero johtimissa johtaa suureen virtojen vaihekulman eroon ja kuristimen sisällä alkaa kiertää virtaa. Tämä virta lisää kuristimen vaihtovirtaresistanssia ja lisää häviöitä.

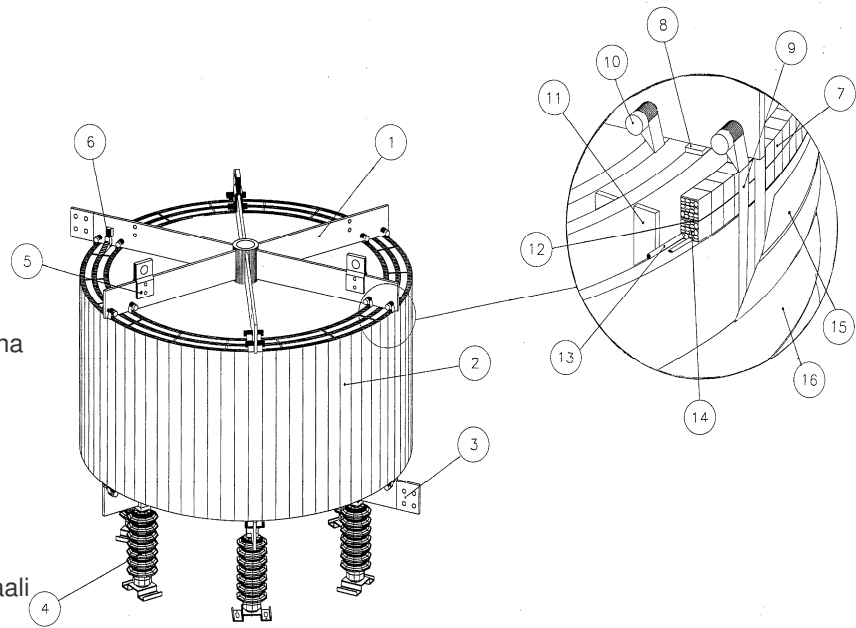
Kuristimen yksittäisen johtimen poikkipinta-ala on tyypillisesti pieni ja kokonaispoikkipinta-ala on merkittävästi sitä suurempi. Koska yksittäisiä johtimia on paljon ja ne on kytketty rinnan, kuristimen johtimien välille jää aina jonkin verran kiertävää virtaa. Kiertävä virta lisääntyy siten poikkipinta-alan kasvaessa, joten kuristimen johtimien virrantiheyttä on pienennettävä poikkipinta-alan kasvaessa. Suuri nimellisvirta siis kasvattaa kuristimen massaa enemmän kuin suoraan verrannollisesti.

Koska suuri nimellisvirta tarkoittaa väistämättä suuria häviöitä, on kuristimen jäähdytys hoidettava tehokkaasti. Kuristimen jäähdytystä parannetaan jakamalla käämitys useampaan rinnankytkettyyn sylinterinmuotoiseen käämiin ja asentamalla näiden sylinterien väliin välirimat. Näin sylinterien väliin jää jäähdytyskanavia, jotka mahdollistavat kuristinta jäähdyttävän ilmankierroksen. Ilmasydämiset kuristimet ovat tyypillisesti luonnollisella ilmankierroksella (Air Natural, AN) jäähdytettyjä.

Kuristimien langat ovat tyypillisesti eristettyjä. Langat on sidottava toisiinsa siten, että eristys ei vaurioidu auringon ultraviolettisäteilystä, mekaanisista rasituksista tai kuristimen värinästä johtuen. Tämä mekaaninen suojaus toteutetaan yleisesti käämimälällä kuristimeen johtimien lisäksi lasikuitua ja kyllästämällä rakenne epoksihartsilla. Kuristin on tämän jälkeen maalattava, koska epoksihartsit itsessään ei kestä ultraviolettisäteilyä. Maalaaminen ja maalauksen vioittuessa sen korjaaminen on kuristimen käyttöön kannalta tärkeää, eikä ole ainoastaan esteettinen seikka.

Käämityksen johtimet on jotenkin liitettävä sähköverkkoon. Tämän vuoksi kuristimissa on virtaliitoksille paikat, päätteet. Päätteet sijaitsevat käämin ylä- ja alapäässä sijaitsevilla alumiinisissa tukiristikoidissa. Käämitykseen johtimet hitsataan tyypillisesti ristikkoihin. Ristikot kiinnitetään käämiin pystysuuntaisilla siteillä, jotka sitovat koko rakenteet yhteen. Kuvassa 8 on esitettyä kuristimen rakenne.

1. Ristikko
2. Käämi / sylinteri
3. Pääte
4. Tukieristimet
5. Nostolenkki
6. KytKentäholkki
7. Sidontanauha
8. Nousupala
9. Rowing sidontanauha
10. Sidetappi
11. Väliirima
12. Täytenauha
13. Yksittäinen johdin
14. Johdinvyyhti
15. Lasikuitunauha
16. Epoksi-harts + maali



Kuva 8. Ilmasydämisen kuristimen rakenne.

Ristikoiden mitoituksessa on huomioitava etenkin oikosulkuvirran aiheuttamat voimavaikutukset. Käämien johtimien virta kulkee ristikkohaaroissa ulkoreunalta kohti sisäreunaa kaikissa muissa haaroissa paitsi päätehaarassa. Päätehaarassa kulkee kaikkien muiden haarojen virta kuristimen keskeltä kohti kaapelipäätettä. Virta aiheuttaa sivulle työntävän voimavaikutukseen ja koska päätehaaraa ja sitä vastakkaisella puolella olevaa haaraa voima työntää samaan suuntaan, vaikutta koko ristikkoon sivulle työntävä voima. Ristikon sidosten ja itse ristikon tulee kestää tämä voima myös oikosulkutilanteissa vaurioitumatta.

Ristikoiden päätehaaroihin kytkettävät kaapelit on tuettava tarvittaessa tukieristimellä, jotta oikosulkutilanteissa kaapeleihin kohdistuva voima ei pääse vaikuttamaan itse kuristimeen. Päätehaara ei kestä sitomistavastaan johtuen suuria voimia varsinkaan sivusuunnassa, joten päätettä ei saa käyttää kaapelitukena.

Kuristimet asennetaan tyypillisesti maahan tukieristimien päälle. Eristimien määrä määräytyy tukieristikon haaramäärän, käämin massan ja oikosulkutilanteen voimien mukaan. Oikosulkutilanteessa vierekkäin asennettujen käämien välille tulee voima, joka pyrkii sivusuunnassa siirtämään kuristinta. Päällekkäin asennetuissa kuristimissa keskimäinen kela käämitään eri suuntaan kuin kaksi muuta, jotta oikosulkuvoimat pyrkisivät puristamaan tornia. Jos kaikki kelat käämitäisiin samaan suuntaan, oikosulkuvoimat pyrkisivät työntämään keloja toisistaan erilleen. Seuraavassa kuvassa on esitetty kuristimen tyypilliset asennustavat.



Kuva 9. Kuristimen yksi- ja kolmivaiheinen asennustapa.

Kuristimen asennuksessa tulee huomioida kuristimen aiheuttama magneettikenttä. Magneettikenttä aiheuttaa pyörrevirtoja etenkin rautaisiin silmukoihin kuristinten läheisyydessä. Perustuksessa betoniraudoitusta tulee välttää, koska rauditusverkko koostuu yhteen hitsatuista terästangoista. Rakenteesta muodostuu suljettuja silmukoita, jotka lämpenevät tehokkaasti kuristimen ollessa käytössä. Kuristimen lähelle asennettavien aitojen ja muiden vastaavien rakenteiden suunnittelussa on myös pyrittävä siihen, että silmukat katkaistaan. Kuristimien tukieristimien maadoitus on myös tehtävä yhdestä pisteestä, jotta vältetään maadoitusjohtimien silmukalta.

### 2.2.2 R-tyypin kuristin

R-tyypin kuristimessa johtimet ovat yksittäisiä, pyöreitä alumiinilankoja, jotka ovat erikseen eristettyjä. Langan päällä on vähintään kaksi kerrosta eristekalvoa ja kalvot limitetään, jotta ryömintämatka lisääntyy. Johtimet kytketään kaikki rinnakkain ylä- ja alaristikon välille. Kuristimen lankakerroksessa olevien johtimien kokonaiskierrosmäärä ei välttämättä vastaa sähköistä kierrosmäärää, koska johtimia voidaan käämiä nippuna.

Kuristimen sähköisten kierrosten määrä, ja samalla käämityksen langoituksen nousu, riippuu nipun korkeudesta. Sähköinen kierros voi muodostua enintään kahdestakymmenestä langasta. Tämä tarkoittaa, että esimerkiksi kahdenkymmenen langan nipulla käämittäessä kymmenen kierrosta kolmen millimetrin langalla, käämityksen korkeudeksi tulee 600 mm.

Kuristimen sylinteri muodostuu useista päällekkäisistä lankakerroksista. Jäähdytysominaisuudet alkavat heikkenemään paksuilla sylintereillä, joten yleisesti ei käytetä yli kymmenen kerroksen sylintereitä. Näin ollen yhdessä kuristimen sylinterissä voi olla enimmillään kaksisataa yksittäistä eristettyä johdinta rinnan kytkettynä. Raja-arvot tule-



vat käämintään käytettyjen robottien rakenteesta ja rajoituksista, eli mitään luonnontieteellistä syytä näille raja-arvoille ei voida esittää.

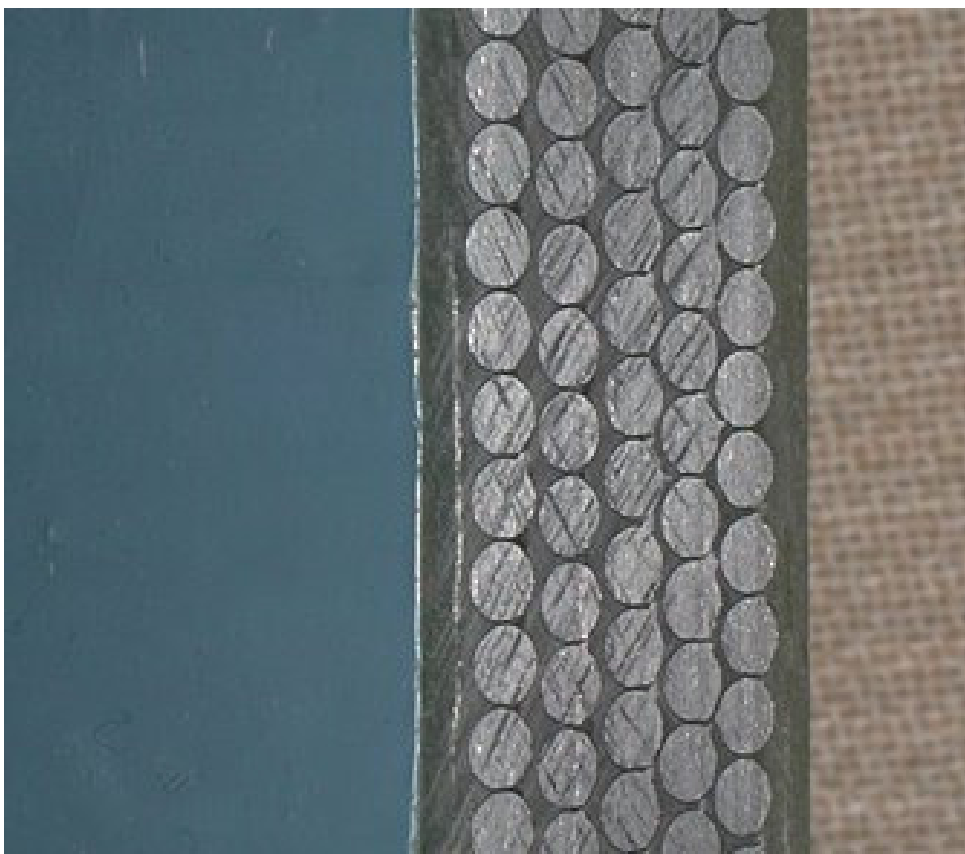
Kuristimen valmistus aloitetaan tekemällä tukirakennelma, niin sanottu käämintäkeskiö, jonka päälle käämitään lasikuitua ja hartsia pohjaksi. Tämän jälkeen käämitään ensimmäinen alumiinikerros. Kerrosten väliin tulee lasikuitua ja hartsia ennen seuraavaa alumiinikerrosta. Tätä jatketaan, kunnes haluttu käämin paksuus on saavutettu. Viimeiseksi sylinteriin tehdään paksumpi pintakerros suojaamaan langoitusta mekaanisesti. Jos kuristimessa on enemmän kuin yksi sylinteri, asennetaan niiden väliin välirimat, jotka muodostavat jäähdytyskanavat. Välirimojen päälle käämitään seuraava sylinteri kuten ensimmäinenkin. Kun koko kuristin on saatu käämittyä, hartsi täytyy vielä kovettaa. Kovettaminen tapahtuu laittamalla kuristin uuniin sen massasta riippuvaksi ajaksi.

Kuristimen käämityksen induktanssi muodostuu sitä pienemmällä kierrosmäärällä mitä suurempi johdinkierroksen halkaisija on. Ilmasydämisessä kuristimessa on useita rinnakkain kytkettyjä johdinkerroksia, joten käytettäessä saman paksuista johdinta, sylinterien johdinkerrosten korkeus pienenee sisältä ulospäin. Sylintereiden välillä käämityksen korkeudessa tapahtuu askelmainen muutos. Tätä korkeuden muutosta tasataan karkeasti johdinnippua kasvattamalla. Nipun kasvattaminen tarkoittaa, että sähköisen kierroksen muodostaa useampi päällekkäinen johdin kuin edellisessä sylinterissä. Esimerkiksi sisimmässä sylinterissä voidaan käyttää viiden johtimen nippua, jolloin käämityksen nousu on kolmen millimetrin johdinta käytettäessä 15 mm kierroksella. Seuraavassa sylinterissä voidaan käyttää kuuden johtimen nippua, jolloin käämityksen nousu kasvaa 18 millimetriin.

Kuristimissa käytetään eri paksuisia johtimia, jotta käämin sylintereiden korkeuksia saadaan tasattua tarkemmin kuin johdinnippua kasvattamalla. Korkeuksia tasataan myös sähköisten kierrosten välistä nousua muuttamalla. Sylinterien tasaaminen helpottaa kuristimen valmistusta ja pienentää ilmastollisten ylijännitteiden aiheuttamia rasituksia sylintereiden välillä. Sylintereiden korkeuksien tasaaminen ei ole kaikissa tilanteissa täysin ongelmatonta. Kierrosten välistä nousua suurentamalla menetetään johtimien välistä keskinäisinduktanssia. Tämä johtaa suurempaan langan pituuteen samalla induktanssiarvolla ja lisää siten langoituksen resistanssia. Resistanssin lisäys taas voidaan havaita kuristimen kasvaneina häviöinä.

Sylinterin sisällä kaikki johdinkerrokset ovat keskenään erikorkuisia. Kuristimen käämitys valmistetaan siten, että kaikkien johdinkerrosten keskipiste pystysuunnassa tulee samalle korkeudelle, eli kerrokset keskitetään pystysuunnassa. Näin toimimalla eri kerrosten samalla korkeudella olevien lankojen välinen jännite-ero saadaan minimoitua.

Johtimien poikkipinta-alaa valitessa tulee huomioida kuristimen magneettikentän muodostuminen. Kentänvoimakkuus on suurimmillaan sisimmän sylinterin kohdalla, joten pyörrevirtahäviöiden minimoimiseksi langan poikkipinta-alan tulee olla sisäsylinterissä mahdollisimman pieni. Tämä johtaa kuristimen langoituksen osalta rakenteeseen, jossa lankojen paksuus kasvaa sisäsylinteristä ulospäin mentäessä. Seuraavassa on esitetty leikkauskuva R-tyypin kuristimen sylinterin rakenteesta.



Kuva 10. R-tyypin kuristimen sylinterin poikkileikkaus.

Kuvasta 10 nähdään hyvin sylinterin pohja- ja pintakerroksen paksuus verrattuna kerrosten väliseen lasikuidun ja hartsin paksuuteen. Pohja- ja pintakerroksessa on huomattavasti enemmän paksuutta, jotta kuristin kestäisi ulkoisia mekaanisia rasituksia. Kerrosten välillä oleva hartsi sitoo langat toisiinsa ja näin ollen johtimet eivät pääse liikkumaan toisiaan vasten käyttötilanteessa. Käämin poikkileikkauksesta on mahdotonta nähdä kuristimen langoituksen sisäistä kytkentää, koska kaikki langat ovat samanlaisia.

Matemaattisesti R-tyypin kuristimen laskenta on haastavaa, koska jokainen johdin on laskettava erikseen. Mikäli käämi koostuu useista langoista, tulee lankojen keskinäisinduktanssien laskennasta monimutkaista, koska keskinäisinduktanssi on laskettava kaikkien muiden yksittäisten johtimien kanssa. Keskinäisinduktanssi taas vaikuttaa kuristimen langan impedanssiin ja sitä kautta johtimien impedanssiin. Koska kaikki langat kytketään kuristimessa sähköisesti rinnan, on impedanssien oltava arvoltaan hyvin tarkkaan samoja kaikkien johtimien kesken. Muuten virta keskittyy vain osaan johtimia ja tällöin kuristimen langat lämpenevät epätasaisesti. Tästä seuraa, että kuristinta ei voi kuormittaa optimivirranjakotilannetta vastaavalla virrantiheydellä ja kuristimen massa ja kustannukset kasvavat optimirakenteeseen nähden.

### 2.2.3 P-tyyppin kuristin

P-tyyppin kuristin käämitään Litz-köydeksi punotuista alumiinilangoista. Kukin lanka on eristytetty erikseen ja tämän jälkeen langat punotaan vuorottelevaksi köydeksi. Vuorottelevassa köydessä kukin lanka on johdinnipun sisällä toisiinsa nähden sähköisesti samanarvoisessa asemassa, eli langat ovat samanpituisia ja niiden keskinäisinduktanssi verrattuna muihin johtimiin on samansuuruinen. Johdinköydet kytketään keskenään sähköisesti rinnan ylä- ja alaristikon välille.

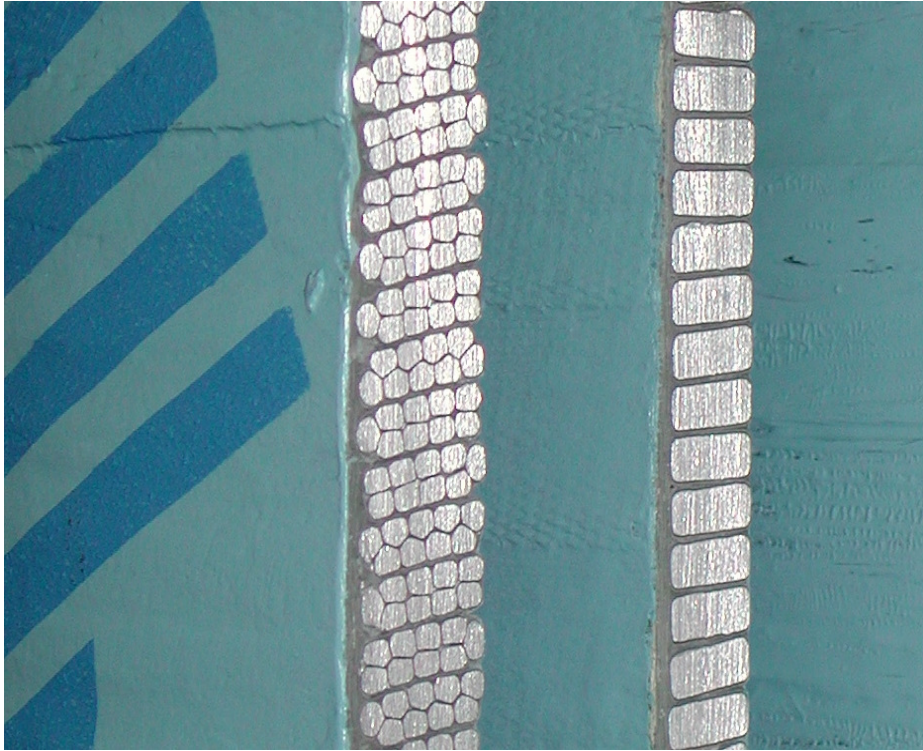
Kuristimen sylinterissä ei ole useita rinnakkain kytkettyjä köysinippuja kuten R-tyyppin kuristimessa, vaan sylinteri muodostuu yhdellä nipulla käämityistä johdinköydistä. Yhteen nippuun voi kuulua useampi köysi, mutta käytännössä nippukoko on rajattu kuuteen köyteen. Näin ollen yksi sähköinen kierros voi koostua kuudesta köydestä, missä kussakin on yhdestätoista kolmeentoista johdinta. Kuristimen sylinterissä voi siis olla maksimissaan 78 yksittäin eristettyä johdinta rinnakkain kytkettynä.

Kuristimen käämin nousua säädellään, kuten R-tyyppin kuristimessa, johdinnipun kokoa muuttamalla. Johdinköysi on kuitenkin paksumpi kuin yksittäinen johdin, joten nousun säätämisessä portaat ovat isompia. Tästä johtuen nousua säädetään myös laittamalla johdinköyсийen väliin täytenauhaa tasaamaan sylintereiden korkeuseroja. P-tyyppin kuristimen valmistuksen kannalta kaikkien sylintereiden korkeus on tasattava, eli kaikki sylinterit ovat keskenään samankorkuisia.

P-tyyppin kuristimen valmistus alkaa käämintäkeskiön rakentamisella. Halutun korkeuinen johdinnippu käämitään keskiön päälle sylinteriksi. Tämän jälkeen asennetaan välirimat ja valmistetaan seuraava sylinteri. Hartsia ei tuoda kuristimeen vielä käämintävaiheessa, joten käämintä suoritetaan kuivana. Kun koko kuristin on saatu valmiiksi, kyllästetään se hartsilla. Tämän jälkeen kuristin laitetaan uuniin, jotta hartsi kovettuu ja kuristin saavuttaa lopullisen mekaanisen lujuutensa.

Induktanssin muodostumisen kannalta R- ja P-tyyppin kuristimissa on eroa. Koska P-tyyppin kuristimessa käämitykseen käytetään vuorottelevaa johdinköyhtä, ei lankojen välinen keskinäisinduktanssi ole niin suuri. Vuorottelevasta köydestä seuraa myös, että sähköisiä kierroksia ei saada samalle käämikorkeudelle yhtä montaa kuin yhdellä langalla R-tyyppin kuristinta käämittäessä. Tästä seuraa, että P-tyyppin kuristin vaatii samalle induktanssille samalla nousulla suuremman kierros määrän tai vaihtoehtoisesti suuremman käämintäkeskiön halkaisijan.

P-tyyppin kuristimessa sylintereiden korkeus pakotetaan samaksi täytenauhaa käyttämällä. Täytenauhan määrä on kuitenkin minimoitava, jotta kuristimen valmistaminen ei muodostuisi hankalaksi. Suuri täytenauhan määrä tekee käämin rakenteesta liian joustavan ennen kyllästystä hartsilla ja kovettamista. Tästä seuraa, että suunnitteluvaiheessa käämin nippujen nousu on syytä laskea mahdollisimman lähelle tarvittua nousua. Kuvassa 11 on esitettyä P-tyyppin kuristimen sylinterin poikkileikkaus.



Kuva 11. P- ja N-tyyppin kuristimien sylintereiden poikkileikkaus, missä P-tyyppin kuristimen sylinteri on vasemmalla.

Kuvassa 11 on esitettyä vasemmalla P-tyyppin kuristimen ja oikealla vanhemman N-tyyppin kuristimen sylinterin poikkileikkaus. Uusien kuristintyyppien valmistuksesta N-tyyppillä on luovuttu, joten sen rakennetta ei tässä työssä käsitellä enempää. N-tyyppin kuristimen rakenne ja valmistustekniikka ovat P-tyyppin kanssa yhteneviä muuten, paitsi johdinköyden osalta. N-tyyppin kuristimessa johdinköysi koostuu yhtenäisestä suorakaitteenmuotoisesta alumiinijohtimesta. Suuremmilla kuristimen tehoilla tämä massiivinen johdin aiheuttaa suuresta magneettikentänvoimakkuudesta johtuen suuremmat häviöt kuin P-tyyppin kuristin. Aiemmin valmistettujen kuristimien tilalle on kuitenkin mahdollista vielä tehdä varaosana N-tyyppinenkin kuristin.

Kuvasta 11 nähdään, että kuristimen johdinköysien välinen täytenauha on imenyt itseensä hartsia ulko- ja sisäpinnan lisäksi. Nämä vastaavat kuristimen sisäisen rakenteen lujuudesta. Koska köysirakenne itsessään on jo tukeva, ja lisäksi yksittäiset köydet sidotaan hartsin avulla yhtenäiseksi rakenteeksi, on P-tyyppin kuristin mekaanisesti vahva. Hartsin ja lasikuidun tehtävänä on myös muodostaa kuristimen ulkoa tulevalle kuormitukselle suoja. Ulkoa kuristinta kuormittaa tyypillisesti ulkoilma ja ilmansaasteet sekä auringonvalo. Hartsi itsessään ei kestä auringonvalon ultraviolettisäteilyä, joten kuristimen pinta on maalattava suojaamaan hartsia.

Matemaattisesti P-tyyppin kuristin on helpompi käsitellä kuin R-tyyppin kuristin. Tämä johtuu johdinrakenteesta. Vuorottelevassa köydessä kaikki johtimet ovat toisiinsa nähden yhtenevässä asemassa, joten johdinköysiä voidaan tarkastella matemaattisesti yhtenä johtimena. Tämä pienentää laskettavien johtimien määrää pahimmillaan R-tyyppin useista sadoista P-tyyppin tyypillisesti suurimmillaan muutamaan kymmeneen.

## 3 KURISTIMEN MITOITUKSEN KRIITTISET TEKIJÄT

Ilmasydämisen kuristimen suunnittelussa on huomioitava erilaisia lähtötietoja ja niiden vaikutusta kuristimen rakenteeseen. Esimerkiksi nimellisvirta määrää osaltaan käämityksen johtimien minimipoikkipinta-alan ja sähköverkon nimellisjännite eristystason ja siten kuristimen minimikorkeuden ja ryömintämatkan. Kuristimen mitoituksen kannalta kriittiset tekijät voidaan karkeasti jaotella viiteen kategoriaan:

1. Jännite
2. Virta
3. Ympäristö-olosuhteet
4. Asiakaslähtöiset vaatimukset
5. Valmistuksen raja-arvot

Mikään näistä kategorioista ei ole niin itsestään selvä, kuin voisi odottaa. Mitoituksen kannalta määrääväksi tekijäksi muodostuu yleensä vain yksi tai korkeintaan muutama tekijä kerrallaan, eli optimaalisen rakenteen hakeminen lähtötietojen perusteella on mahdollista. Jotta optimirakenteeseen voidaan päästä, on ymmärrettävä lähtötietojen vaikutus kuristimen geometriaan ja rakenteeseen. Seuraavissa luvuissa käsitellään edellä mainitut viisi kategoriaa ja niiden vaikutusta eri kuristintyyppeihin. Tarkastelussa keskitytään niihin käyttötarkoituksiin, joita tämä kriteeri eniten koskee.

### 3.1 Jännite

Kuristimen jänniterasitus voidaan jakaa kahteen eri tilanteeseen: Normaalin käyttötilanteen jatkuvaan jänniterasitukseen ja hetkelliseen jänniterasitukseen. Jatkuva jännite on nimensä mukaisesti se jännite, joka voidaan mitata kuristimen navoista sen käytön aikana. Hetkellinen jänniterasitus taas ilmenee vika- tai kytkentätilanteessa, ilmastollisena ylijännitteenä tai esimerkiksi laboratorioissa tarkoituksella aiheutettuna.

Jänniterasitus voidaan molemmissa, jatkuvan jännitteen ja hetkellisen jännitteen, tapauksissa jakaa kahteen eri tarkasteltavaan suureeseen: kuristimen pinnan yli vaikuttavaan ja kierrosten väliseen jännitteeseen. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan ensin jatkuva jännite ja sitten hetkellinen jänniterasitus.

### 3.1.1 Jatkuva jänniterasitus

Kuristimen navoista voidaan mitata sen yli vaikuttava jännite. Jännitteen rasitus kuristimen rakenteelle voidaan laskea joko pintaa pitkin tai kierrosten välille. Pintaa pitkin laskettaessa yksikkönä käytetään V/mm ja kierrosten väliselle jänniterasitukselle V/kierros. Pintaa pitkin laskettavaan jänniterasituksen raja-arvoon vaikuttaa merkittävästi ympäristö-olosuhteet, koska ilmansaasteet ja rannikkoilmastossa esiintyvä suolasumu ovat osittain johtavia. Ympäristö-olosuhteita on käsitelty kattavammin edempänä.

Jatkuvan jännitteen tapauksessa yliaaltovirrat tulee ottaa huomioon, koska kuristimen impedanssi kasvaa taajuuden kasvaessa. Tästä seuraa, että kuristimen yli oleva sekä kierrosten välinen jänniterasitus kasvavat mikäli verkossa esiintyy yliaaltovirtoja. Yliaaltovirtojen aiheuttamia ylijännitteitä voidaan laskea kahdella tavalla: neliösumman avulla tai aritmeettisesti yhteen laskien. Aritmeettisesti yhteen laskien saadaan pahin mahdollinen tilanne, koska kunkin yliaaltovirran muodostaman jännitteen tehollisarvo summataan suoraan yhteen. Aritmeettisesti laskettaessa siis oletetaan, että yliaaltovirtojen vaihesiirtokulmat osuvat siten, että kaikkien huippu esiintyy samalla ajan hetkellä. Käytännössä näin ei koskaan tapahdu, joten jänniterasituksen arvioinnissa käytetään toistakin laskentatapaa.

Toinen käytetty yliaaltojännitteiden laskentatapa on neliösumman neliöjuuri (Root Sum Squared, RSS). Tällöin perustaajuiseen jännitteeseen lisätään neliöjuuri yliaaltovirtojen ja kuristimen resistanssin tulojen neliösummasta. Neliösumman neliöjuurella saadaan tehollisarvo, joka kuvaa paljonko perustaajuista jännitettä pitäisi olla, jotta sähköteho olisi sama. Kuristimen jännitemitoituksen kannalta eri laskentatavat johtavat erilaisiin tuloksiin. Kun jännitekomponentit lasketaan aritmeettisesti yhteen, on laskettu jännite aina arvoltaan suurempi tai yhtä suuri kuin neliösumman neliöjuuren avulla laskettu jännite. Lasketut jännitteet ovat yhtä suuret, mikäli kuristimen virtaspektrissä ei ole yliaaltovirtoja lainkaan. Mitoitettaessa kuristinta riippuu käytetyistä raja-arvoista, kumpaa laskentatapaa käytetään. Seuraavassa on esitettyinä laskentakaavat kummallakin laskentatavalla.

$$U_{arit} = \sum_{i=1}^{\infty} U_i, \text{ missä} \quad (26)$$

$U_{arit}$  = Aritmeettisesti laskettu jännite

$U_i$  = Perustaajuisten jännitteiden kerrannainen

$$U_{RSS} = \sqrt{U_1^2 + \sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}, \text{ missä} \quad (27)$$

$U_{RSS}$  = Jännitekomponenttien neliösumman neliöjuuri

$U_1$  = Perustaajuinen jännite

Jatkuva jänniterasitus on kuristimen mitoituksen kannalta merkittävä kriteeri, jos verkossa esiintyy paljon yliaaltoja ja kuristimen induktanssi on suuri, tai kun kyseessä on rinnakkaiskurisin. Pienellä induktanssin arvolla kuristimen impedanssi, ja siten jännite, jää väistämättä pieneksi. Jatkuva jänniterasitus on merkittävä, ja usein määräävä mitoitustekijä seuraaville kuristintyypeille:

1. Rinnakkaiskuristimet
2. Suodatinkuristimet

Suodatinkuristinten tapauksessa jänniterasitus riippuu verkon yliaaltopitoisuudesta ja mahdollisista resonanssitilanteista. Suodattimen rinnakkaisresonanssissa induktanssin ja kapasitanssin välillä alkaa kiertyä suuri virta ja kuristimeen kohdistuu suuri jänniterasitus. Resonanssin mahdollisuus on olemassa lähinnä laskennallisena, kun verkon oikosulkuimpedanssille annetaan suuri vaihteluväli. Muilla kuristintyypeillä muut mitoituskriteerit määräävät rakenteen ja geometrian. Esimerkiksi vaimennuskuristimilla jatkuva jänniterasitus ei ole koskaan määräävä mitoitustekijä.

### **3.1.2 Hetkellinen jänniterasitus**

Sähköverkossa esiintyy erilaisia hetkellisiä ylijännitteitä. Esimerkiksi rinnakkaiskondensaattoripariston kytkentä tai maasulku voi aiheuttaa verkkoon hetkelliseen ylijännitteeseen. Ilmastolliset ylijännitteet ovat kuitenkin sähköverkon komponenttien kannalta vaarallisimpia, koska niiden jännitteen huippuarvot ovat kaikkein suurimpia. Komponentin eristyksen jännitelujuutta testataan yleisesti syöksyjänniteimpulssilla (Lightning impulse, LI). Jännitepulssin muoto on määritetty standardissa IEC 60060-1. Kuristimen testaaminen ei kuitenkaan ole aina mahdollista standardin mukaisella jännitepulssilla, koska kuristimen induktanssi ja siten impedanssi, voi olla hyvin pieni. Ongelmaksi muodostuu jänniteaallon selän puoliarvoaika, eli aika jolloin aalto on vaimentunut amplitudiltaan puoleen huippuarvostaan. Jänniteaallon selän puoliarvonaika jää pienemmäksi kuin standardissa asetettu 50  $\mu$ s, mikäli syöksyjännitegeneraattorin energiamäärä ei ole riittävä ja testattavan kappaleen impedanssi on pieni.

Jännitteen hetkellinen kestävyys ilmoitetaan kuristimille, ja muillekin sähköverkon komponenteilla, eristystasolla. Eristystaso ilmoitetaan kahdella eri suureella, yhden minuutin käyttötaajuuden jännitteen ja syöksyjännitteen arvolla. Kuristimilla yhden minuutin koe tarkoittaa ainoastaan eristinten testausta, joten sitä ei yleisesti suoriteta. Syöksyjännitteen kestävyysvaatimus määräytyy verkon nimellisjännitteen mukaan. Standardissa IEC 60071-1 on määritetty testijännitteet (Basic Impulse Level, BIL) verkon maksimijännitteiden mukaan. Taulukossa 1 on esitetty testausjännitteet eri nimellisjännitteille.

Taulukko 1. Eristystasojen määrittämät koejännitteet eri maksimijännitteille.

Suurin sallittu jännite $U_m$ [kV]	1 min käyttöaajuinen ylijännite [kV]	Syöksyjänniteaallon huippuarvo [kV]
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 90
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
100	(150) 185	(380) 450
123	(185) 230	(450) 550
145	(185) 230 275	(450) 550 650
170	(230) 275 325	(550) 650 750
245	(275) (325) 360 395 460	(650) (750) 850 950 1050

Taulukossa 1 on määritetty useampia arvoja syöksyjänniteaallon huippuarvolle samalle suurimmalle sallitulle jännitteen arvolle. Myös käyttöaajuiselle ylijännitteelle on esitetty useampi mahdollinen arvo, mikäli suurin sallittu jännite on yli 72,5 kV. Useampi arvo mahdollistaa kustannusoptimoinnin käyttöpaikoissa, missä ei esiinny tyypillisesti suuria ylijännitteitä tai ylijännitteet eivät todennäköisesti aiheuta laitevaurioita. Toinen merkittävä hyöty useasta arvosta on se, että sähköverkko voidaan suunnitella selektiiviseksi. Esimerkiksi voidaan valita siirtojohdon eristimille alempi eristystaso kuin sähköaseman kojeistolle. Tällöin salaman iskiessä johtoon tapahtuu ylilyönti johtimien eristimien yli, eikä aalto pääse etenemään sähköasemalle asti. Johtimien eristimet eivät tyypillisesti vaurioidu ylilyönnistä. Sähköaseman komponenteissa voi tapahtua läpilyönti, jonka jälkeen komponentti on uusittava.



Kuristimen syöksyjännitetesti rasittaa käämitystä monella tavalla. Testi aiheuttaa jänniterasituksen kuristimen koko pinnan yli ja kahden sähköisen kierroksen välille. Lisäksi kuristimen sylintereiden välille aiheutuu jännite-eroa, koska sylintereiden korkeus ja kierrosmäärä eivät ole vakioita. Testi rasittaa käämitystä epätasaisesti, koska jänniteaalto ei tunkeudu käämitykseen syvälle. Tyypillisesti tunkeutuma on muutamia kierroksia ja testi suoritetaan tästä syystä molempiin kuristimen päätteisiin.

Kierrosten välistä eristystä voidaan parantaa lisäämällä eristemuovikerrosten määrää johtimen ympärillä. Eristekerrosten lisääminen lisää eristepaksuuden lisäksi ryömintämatkaa, koska eristekerrokset on kiedottu johtimen ympärille limittäin. Kuristimen käämin korottaminen lisää kuristimen pintamatkaa ja vähentää siten pinnan yli tapahtuvan ylilyönnin mahdollisuutta. Sylintereiden korkeus tulee saattaa mahdollisimman lähelle toisiaan, jotta sylintereiden väliseltä läpilyönniltä vältytään. Lisäksi kuristimen rinnan kytketyt käämit tulee keskittää, jotta jänniterasitus niiden päissä saadaan minimoitua.

Hetkellinen ylijännite on kuristimen mitoituksen kannalta tärkeä tekijä kaikilla kuristintyypeillä. Eristystaso määrää kuristimen pienimmän mahdollisen korkeuden ja kierrosmäärän. Toisaalta tehokas jäähdytys edellyttää matalaa käämiä, joten korkean eristystason kuristimilla virrantiheyttä täytyy pienentää käämin suuren korkeuden johdosta.

## 3.2 Virta

Kuristimen läpi kulkeva virta aiheuttaa käämityksen resistanssissa lämpöhäviöitä. Kuristimen mitoituksen kannalta virta ei ole täysin yksiselitteinen tekijä, koska virta voi olla hetkellistä tai jatkuvaa. Hetkellinen virta voi olla vikatilanteen aiheuttamaa oikosulku- tai maasulkuvirtaa. Vaihtoehtoisesti hetkellinen virta voi olla kuristimen käytötapaan liittyvää, kuten käynnistyskuristimilla.

Kuristimen nimellisvirta voi olla pelkästään perustajuista tai virran spektri voi sisältää yliaaltoja. Kuristimen resistanssi ei pysy vakiona taajuuden funktiona vaan kasvaa taajuuden kasvaessa. Kuristimen häviöiden kasvua taajuuden kasvaessa kuvataan vaihtovirta- ja tasavirtaresistanssin osamääränä,  $R_{ac} / R_{dc}$ -kertoimena.

Kuristimen häviöiden todentamisen kannalta yliaaltokomponentteja sisältävä virta-spektri on vaikea tuottaa, joten häviöiden laskennassa käytetään ekvivalenttivirtaa. Ekvivalenttivirtaa tarvitaan myös nimellistaajuudeltaan 60 Hz kuristimien kanssa, koska Suomessa ei ole yleisesti saatavissa 60 Hz taajuuista jännitettä suurilla tehoilla.

### 3.2.1 Perustaajuinen virta

Kuristimen käämitys koostuu johtimista, joiden materiaalina on yleensä alumiini. Johtimilla on resistanssi, joka tuottaa lämpöhäviöitä virran kulkiessa johtimen läpi. Kuristimen lämpöhäviöt ovat verrannollisia virran toiseen potenssiin, eli viran kaksinkertaistuksessa häviöt nelinkertaistuvat. Johtimien resistanssia pienillä taajuuksilla voidaan pie-

nentää lisäämällä rinnakkain kytkettyjen johtimien määrää, eli lisäämällä kuristimen poikkipinta-alaa. Kuristimen perustaajuiset häviöt saadaan laskettua seuraavasti:

$$P_{h1} = I_1^2 R_1, \text{ missä} \quad (28)$$

$P_{h1}$  = Kuristimen perustaajuinen häviöteho

$I_1$  = Perustaajuinen virta

$R_1$  = Kuristimen resistanssi perustaajuudella

Pelkästään perustaajuutta sisältävällä nimellisviralla kuristimen poikkipinta-ala lisääntyy lähes suoraviivaisesti virran kasvaessa. Kuristimen vaihtovirtaresistanssi kuitenkin kasvaa nimellisvirran ja poikkipinta-alan kasvaessa perustaajuudella, koska kuristimen lankojen välillä kiertävä virta lisääntyy. Kiertävät virrat ovat seurausta johtimien impedanssien epätasaisuudesta. Koska johtimet on kiinnitettävä johonkin kuristimen ristikon haaroista, ei impedanssin arvoa voida säätää portaattomasti. Johdinmäärän lisääntyessä impedanssierojen merkitys kasvaa.

Perustaajuinen virta on kriittinen mitoistustekijä, kun verkossa ei esiinny merkittävästi yliaaltoja. Yleensä perustaajuinen virta määrää kuristimen poikkipinta-alan seuraavilla kuristintyypeillä:

1. Rinnakkaiskuristimet
2. Sarjakuristimet
3. Tasoituskuristimet

### 3.2.2 Yliaaltovirta

Teollisuusverkoissa esiintyy yleisesti kuormituksia, jotka aiheuttavat sähköverkkoon yliaaltovirtoja. Tällaisia kuormituksia ovat esimerkiksi erilaiset suuntaajat. Kuristimelle yliaallot lisäävät lämpöhäviöitä enemmän kuin perustaajuinen virta, koska taajuuden kasvattaminen lisää pyörrevirtahäviöitä. Kuristimen vaihtovirtaresistanssi siis kasvaa taajuuden kasvaessa.

Vaihtovirtaresistanssin kasvamisen lisäksi kuristimen sisällä kiertävien virtojen määrä lisääntyy yliaaltovirtojen lisääntyessä. Mikäli virtaspektri sisältää paljon korkea-taajuisia yliaaltovirtoja, voi kuristimen mitoitus osoittautua mahdottomaksi koska  $R_{ac} / R_{dc}$ -kerroin kasvaa nopeammin kuin poikkipinta-ala. Tästä seuraa tilanne, jossa poikkipinta-alan kasvattaminen lisää kuristimen lämpöhäviöitä.

Yliaaltovirtojen tuottamaa lämpöhäviötä on mahdotonta todentaa mittaamalla kuristinta oikealla virtaspektrillä. Tämä johtuu siitä, että yliaaltovirtalähteitä ei käytännössä ole saatavilla riittäville tehoille. Kuristimen lämpöhäviöt todennetaan käyttämällä ekvivalenttivirtaa.

Ekvivalenttivirta kuvaa sitä perustaaajuista virtaa, joka aiheuttaa samat lämpöhäviöt kuin yliaaltoja sisältävä virta. Ekvivalenttivirtaa määritettäessä mitataan kuristimen resistanssi taajuuden funktiona jokaiselle virran yliaaltokomponentille. Kun resistanssi tiedetään, voidaan laskea kunkin yliaaltokomponentin häviöteho. Summaamalla nämä tehot yhteen saadaan laskettua kuristimen kokonaishäviöteho. Kun tiedetään perustaaajuuden vaihtovirtaresistanssi, voidaan laskea kokonaishäviöitä vastaava ekvivalenttivirta. Seuraavassa on esitettyä ekvivalenttivirran laskenta.

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{P_{tot}}{R_{50Hz}}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2 R_i}{R_{50Hz}}}, \text{ missä} \quad (29)$$

$I_{eq}$  = Ekvivalenttivirta

$P_{tot}$  = Kuristimen kokonaishäviöteho

$R_{50Hz}$  = Kuristimen resistanssi 50 Hz taajuudella

$R_i$  = Kuristimen resistanssi taajuudella  $i \cdot 50$  Hz

$I_i$  = Kuristimen virta taajuudella  $i \cdot 50$  Hz

Ilmasydämisen kuristimen häviötehoa ei yleisesti mitata nimellisvirralla, vaan alennetulla virralla. Koska kuristimen sydänaine, eli ilma, on täysin lineaarinen, häviöt voidaan skaalata vastaamaan nimellisvirtaa. Yliaaltovirtojen aiheuttamat häviöt määritetään mittaamalla kuristimen vaihtovirtaresistanssi taajuuden funktiona siten, että kuristimen virtaspektrin jokaiselle komponentille saadaan määritettyä resistanssi. Summattaessa kaikkien yliaaltokomponenttien häviötehoja yhteen on huomioitava, että lämpötila, jossa resistanssi ilmoitetaan, on sama. Kuristimen häviöt ilmoitetaan standardin IEC 60076-6 mukaan tietyssä referenssilämpötilassa, yleensä 75 °C. Mittauslämpötila on yleensä merkittävästi pienempi, tyypillisesti noin 20 °C. Seuraavassa yhtälössä on esitetty tehon laskenta referenssilämpötilassa huomioiden resistanssien lämpötilakorjaukset:

$$P_{ref} = \left[ \frac{225 \text{ °C} + T_{ref}}{225 \text{ °C} + T_{mittaus}} \cdot R_{DC} + \frac{225 \text{ °C} + T_{mittaus}}{225 \text{ °C} + T_{ref}} \cdot (R_{AC} - R_{DC}) \right] I^2, \text{ missä} \quad (30)$$

$T_{ref}$  = Kuristimen häviöiden referenssilämpötila, yleensä 75 °C

$T_{mittaus}$  = Kuristimen häviöiden mittauslämpötila

$R_{DC}$  = Kuristimen tasavirtavastus

$R_{AC}$  = Kuristimen mitattu vaihtovirtavastus

Kuristimen ekvivalenttivirta siis sisältää yliaaltovirtojen vaikutuksen. Kuristimen mitoituksen kannalta ekvivalenttivirta määrää poikkipinta-alan lähes kaikilla kuristin-

tyypeillä. Vaimennuskuristimilla joko purkaus- tai oikosulkuvirta voi olla nimellisvirran sijaan poikkipinta-alan kannalta määräävä tekijä. Ekvivalenttivirus on pelkkää perustajuutta sisältävälle virtaspektrille sama kuin perustajuinen virta.[13]

### 3.2.3 Lyhytaikainen virta

Sähköverkossa tapahtuvat vika- tai kytkentätilanteet aiheuttavat siihen kytkettyjen komponenttien läpi kulkevia lyhytaikaisia virtoja. Nämä virrat ovat suuruusluokaltaan paljon suurempia kuin komponenttien nimellisvirrat. Suuri hetkellinen virta aiheuttaa suuren lämpöhäviötehon. Kuristin on mitoitettava sitten, että tämä lämpöhäviöteho ei lämmitä kuristinta yli eristemateriaalille sallitun lämpötilan. ALSTOM Grid oy:n valmistamien kuristimien materiaalit muodostavat F-luokan eristeen, jolle suurin sallittu hetkellisen virran aiheuttama lämpötila on 200 °C.

Lyhytaikainen suuri virta aiheuttaa kuristimelle myös mekaanisia rasituksia. Oikosulkuvirta voi sisältää kytkentähetkestä riippuen tasakomponenttia, joten mekaanisia rasituksia aiheuttava virran huippuarvo, sysäysosulkuvirta, voi olla suuri. Oikosulkuvirran laskentamenetelmät on kolmivaihejärjestelmien osalta esitetty standardissa IEC 60909-0. Sysäysosulkuvirran arvoa laskettaessa tarvitaan sysäyskerrointa, jonka arvo riippuu syöttävän verkon resistanssin ja reaktanssin suhteesta IEC 60909-0 mukaan seuraavasti:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3R_{net}}{X_{net}}}, \text{ missä} \quad (31)$$

$\kappa$  = Sysäyskerroin

$R_{net}$  = Verkon resistanssi

$X_{net}$  = Verkon reaktanssi

Sysäyskerroimen avulla voidaan laskea sysäysosulkuvirran arvo, kun tiedetään alkuoikosulkuvirran suuruus:

$$I_s = \sqrt{2} \kappa I_k'', \text{ missä} \quad (32)$$

$I_s$  = Sysäysosulkuvirta

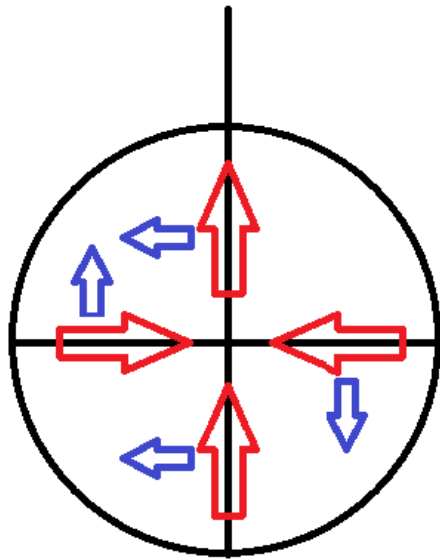
$I_k''$  = Alkuoikosulkuvirta

Kuristimen induktanssin aiheuttaman magneettikentän voimakkuuden arvo suurenee virran kasvaessa. Magneettikentän voimakkuus aiheuttaa johtimiin ja muihin virtateihin voimia, jotka voivat rikkoa kuristimen mekaanisesti. Sysäysosulkuvirran lisäksi mekaanisia rasituksia voi aiheuttaa purkautuva kondensaattoriparisto, mikäli kapasitanssi on suuri. Yleensä tämä tulee vastaan siirtolinjojen kompensointiin käytettyjen sarjakon-

densaattoriparistojen kohdalla tai suurten rinnakkaiskondensaattoriparistojen tapauksessa.

Suuri hetkellinen virta aiheuttaa kuristimen käämitykseen rasiutusta. Voima pyrkii repimään käämityksen johtimia eroon toisistaan. Voima kohdistuu kierrosten ja kerrosten johtimien välille. Kuristimen käämityksen kannalta kriittinen voima riippuu käämin rakenteesta. Kuristimelle voidaan suorittaa IEC60076-6 mukainen oikosulkukoe tyyppikokeena. Tätä testiä ei suoriteta jokaiselle kuristintyypille, koska sen suorittamiseen tarvittavia laitteistoja ei ole maailmanlaajuisesti kovin monessa laboratorioissa.

Kuristimen ristikkoon aiheutuu suuresta virtasäyksestä kiertävää ja sivulle työntävää voimaa. Kaikki virta kulkee kuristimen keskipisteestä kohti päätehaaraa ja muissa haaroissa käämitykseltä kohti keskipistettä. Virran kulkukavio on esitettyä kuvassa 12.



Kuva 12. Ristikossa kulkevien virtojen ja niiden aiheuttamien voimien suunnat, missä virta on esitetty punaisella nuolella ja magneettikentän aiheuttama voima sinisellä nuolella.

Kuvasta 12 nähdään, että mikäli päätehaara jatkuu kuristimen läpi, aiheutuu siihen sivulle työntävä voima. Tämä voima tulee huomioida kuristinta suunniteltaessa ja tarvittaessa on käytettävä jäykempää materiaalia ja tulee tukea ristikko paremmin käämin muuhun rakenteeseen.

Lyhytaikaisen virran aiheuttamat voimat käämitykseen ja kuristimen ristikoihin ovat tärkeä suunnittelukriteeri kaikille kuristintyypeille, paitsi rinnakkaiskuristimille. Rinnakkaiskuristimen yli vaikuttaa jatkuvasti vaihejännite, eli sen toisiopuoli on kytketty jatkuvaan oikosulkuun. Kuristimen reaktanssi vaimentaa oikosulkuvirtaa. Jotta vikatilanteessa kuristimen läpi kulkeva oikosulkuvirta voi kasvaa suureksi, edellytetään joko pientä reaktanssin arvoa tai suurta jännitettä. Kuristimen käämitykseen ja ristikoihin kohdistuvat voimat ovat verrannollisia magneettikentän voimakkuuteen. Suuri magneettikentän voimakkuus edellyttää suurta induktanssia ja suuren induktanssin läpi ei oi-

kosulkutilanteessa voi mennä suurta virtaa pienellä jännitteellä. Siten suuri oikosulkuvoima edellyttää suurta oikosulkuvirtaa sekä suurta jännitettä.[12]

### 3.3 Asennusolosuhteet

Ilmasydämiset kuristimet asennetaan yleisesti ulos, joten ne täytyy suunnitella kestävästi ulkoilman rasitukset, kuten lämpötila, saasteet ja tuuliolosuhteet. Asennusolosuhteet käsittävät myös asennuskorkeuden aiheuttamat vaatimukset ja maanjäristysalueiden mekaaniset rasitukset. Ympäristöolosuhteet vaikuttavat moneen kuristimen osaluueeseen. Kuristimen oikean mitoituksen kannalta onkin tärkeää tietää tarkkaan asennuspaikalla vallitsevat olosuhteet.

#### 3.3.1 Ilmastolliset ympäristöolosuhteet

Asennuspaikan lämpötila vaikuttaa kuristimen käämityksen virrantiheyteen ja siten tarvittavaan poikkipinta-alaan. Kuristimessa käytetyt eristemateriaalit määräävät kuristimen lämpötilaluokan. ALSTOM Grid oy:n valmistamilla kuristimilla lämpötilaluokka on F, joka tarkoittaa suurimmillaan 100 °C keskimääräistä lämpenemää ja 155 °C kuumimman pisteen lämpötilaa. Näitä raja-arvoja ei saa ylittää missään käyttöolosuhteessa, johon kuristin asennetaan. Siten esimerkiksi 40 °C maksimilämpötilassa kuumimman pisteen lämpenemä saa olla 15 °C enemmän kuin 55 °C ympäristönlämpötilassa. Tämä edellyttäen, että 100 °C keskimääräistä lämpenemää ei ylittä.

Kuristimessa käytetyistä materiaaleista epoksihartsit ei kestä auringon ultraviolettisäteilyä, joten hartsia on suojattava ulkoasennuksessa. Suoja saavutetaan maalaamalla kuristin ultraviolettisäteilyä kestäväällä maalilla. Maalipinta onkin tarkastettava säännöllisesti ja huollettava sen vioittuessa.

Asennuspaikan ilmansaasteet vaikuttavat kuristimen pinnalta ja tukieristimiltä vaadittuun ryömintämatkaan. Jos asennuspaikalla esiintyy suolaa tai muita ilmansaasteita on kuristimen pintamatkaa lisättävä. Saasteet aiheuttavat kuristimen pinnalle huonosti johtavan kalvon, jossa alkaa kulkea virta. Tämä virta aiheuttaa pintavirtaeroosiota ja kuluttaa kuristimen käämitystä suojaavaa materiaalikerrosta. Pintamatkaa lisäämällä eroosiota saadaan pienennettyä, mutta samalla kuristimen jäähdytysominaisuudet heikenevät. Kuristimen poikkipinta-ala, ja kustannuksia, on lisättävä. Kuristimen korottamiselle on olemassa vaihtoehtona pölysuojat ja kuristimen pinnan käsittely lian tarttumista heikentävällä erikoispinnoitteella. Kuvassa 13 on esitettyä kuristimen pölysuoja.



Kuva 13. Kuristin varustettuna pölysuojalla.

Tuuliolosuhteet aiheuttavat kuristimen tukirakenteisiin voimia. Tuulen suunnassa tukieristimiin kohdistuu vetävä voima ja tuulensuuntaa vasten olevalla sivulla puristava voima. Jos tuulensuunta ei ole suorassa eristimiä vasten, kohdistuu kaikkiin eristimiin vielä kiertävää voimaa. Voiman suuruus riippuu kuristimen projektiopinta-alasta ja korkeudesta. Tuuli aiheuttaa eristimille ja kuristimen rakenteelle erityisiä vaatimuksia lähinnä päällekkäin asennettujen kolmivaiheisten kuristinten tapauksessa. Päällekkäin asennettuna kuristimesta tulee korkea, joten alimpiin eristimiin kohdistuvat voimat muodostuvat suuriksi. Jos tuuliolosuhteet eroavat sisämaan tyypillisistä arvoista, on kuristinta suunniteltaessa huomioitava, että syntyvät voimat eivät ole liikaa kuristimen rakenteelle.

Kylmyyden aiheuttamat lumi- ja jääkuormat aiheuttavat kuristimen rakenteelle tiiviysvaatimuksia. Mikäli rakenteeseen pääsee sisälle vettä, se vuoroin jäätyy ja sulaa kylmässä. Tämä saattaa vioittaa eristysrakennetta ja johtaa vaurioihin. Kuristimen alle kertyvä lumi saattaa aiheuttaa tukieristimien ylilyönnin. Lumisissa olosuhteissa kuristimen tukieristimien alle asennetaan tukirakenteet, joiden korkeus on enemmän kuin odotettu lumikuorma. Lumi ja jää eivät aiheuta ongelmia kuristimen ollessa käytössä, koska kuristimen lämpöhäviöt sulattavat ne tehokkaasti. Ongelma muodostuu, mikäli kuristimen käyttö on jaksollista ja se saattaa olla pois käytöstä pikiä aikoja.

Kuristimen mitoituksen kannalta tärkein vaikutus on ryömintämatkan lisääntyminen saasteiden lisääntyessä. Ryömintämatkan lisääminen edellyttää korkeilla jänniterasituskilla todella korkeaa käämirakennetta. Jäähdytysominaisuudet heikkenevät enemmän

kuin suoraan verrannollisesti, joten poikkipinta-alaa täytyy kasvattaa todella runsaasti. Tämä johtaa suoraan kasvaviin kustannuksiin. Muut ympäristöolosuhteet eivät vaikuta yhtä merkittävästi kuristimen kustannuksiin.

### 3.3.2 Asennuspaikan erityisolosuhteet

Kuristimen asennuspaikka voi olla korkealla merenpinnasta, jolloin ohut ilma aiheuttaa omat erityisvaatimuksensa. Toisaalta asennuspaikalla voi esiintyä maanjäristyksiä, jotka tulee huomioida rakennetta suunniteltaessa. Asennuspaikalla voi olla Suomessa tuntemattomia eläimiä tai eläinten käyttäytyminen voi olla poikkeavaa pohjolan oloihin.

Ilma ohenee merenpinnan tasosta korkeammalle noustaessa. Ilman oheneminen, eli ilmanpaineen pieneneminen tulee huomioida ilmapäleissä ja jäähditysominaisuuksissa. Ilmavälit kasvavat noustaessa yli 1000 metrin korkeuteen merenpinnasta 1,4 % jokaista sataa metriä kohden. Kiskostojen virtamitoituksessa suurinta sallittua virtaa pienennetään 0,2 % jokaista 100 metriä kohden. Eristimien käyttötaajuinen jännitemitoitus kasvaa noustaessa 1000 m korkeudesta ylöspäin standardin IEC 60071-1 mukaan seuraavasti:

$$K_a = e^{\frac{m_i(h-1000m)}{8150m}}, \text{ missä} \quad (33)$$

$K_a$  = Käyttötaajuuden jännitteen korjauskerroin

$m_i$  = Ilmasto-olosuhteiden kerroin ( $0,5 < m_i < 0,8$ )

$h$  = Korkeus meren pinnasta

Yhtälössä 33 kerroin  $m_i$  kuvaa ilmasto-olosuhteiden vaikutusta. Mitä saasteisempi ilmasto, sitä pienempi on käytetty kerroin. Yhtälöllä kuvataan ilman ohenemista ja sen vaikutusta ilmaeristykseen.

Maanjäristykset tulee huomioida kuristimen mekaanisessa rakenteessa. Maanjäristyksiä koskevien vaatimusten seurauksena kuristimen tukieristimet on valittava tarvittaessa vahvemmiksi kuin ilman vaatimuksia. Kuristimen sisäiseen rakenteeseen tulee myös kiinnittää huomiota. Sylinterit sidotaan ristikkoihin useammalla pystysiteellä, kuin mitä tehtäisiin normaalissa tilanteessa. Tarvittaessa rakenne mallinnetaan ja sille suoritetaan lujuuslaskenta. Laskenta suoritetaan, jotta voidaan olla varmoja että kuristin kestää mekaanisesti sille asetetut vaatimukset. Kun laskenta suoritetaan etukäteen, on rakennetta vielä helppo tarvittaessa muuttaa ennen valmistusta ja asiakkaalle toimitusta.

Eläimien aiheuttamat ongelmat tulee huomioida kaikkien sähkölaitteiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Esimerkiksi päällekkäin asennettujen kuristimien välieristimien yli vaikuttaa pääjännite. Mikäli on odotettavissa, että asennuspaikalla on lintuja, ja linnut hakeutuvat kuristimen lähelle esimerkiksi lämpöä tai varjoa hakiessaan, tulee välieristimet valita riittävän pitkiksi. Linnut aiheuttavat ongelmia myös ulosteillaan, jotka voivat aiheuttaa suurina määrinä jopa ylilyönnin mahdollisuuden.



Käärmeet voivat myös aiheuttaa sähkölaitteille ongelmia. IP00-kotelointiluokan sähkölaitteissa on jännitteisiä osia vailla mitään kosketussuojausta. Asennuspaikat, kuten sähköasemat, on suojattu suuremmilta maaeläimiltä, mutta käärmeet pääsevät pienistäkin raoista kulkemaan laitteen lähelle. Mikäli käärmeen nousemista ei ole estetty eristimien käärmesuojilla, voi kuristimen pintaa pitkin nouseva käärme oikosulkea ylä- ja alaristikon välin. Tämä aiheuttaa esimerkiksi rinnakkaiskuristimella maasulun ja voi tuhota kuristimen.[11]

### 3.4 Asiakslähtöiset vaatimukset

Ilmasydämisen kuristimen rakenteille ja testeille, joilla vaatimuksia todennetaan, on asetettu tiettyjä rajoja kansainvälisissä standardeissa. Kaikkiin käyttötarkoituksiin ja kaikille asiakkaille standardin vaatimukset eivät riitä. Syynä voi olla kokemukseen perustuvat erikoisvaatimukset tai tarve varmistua kriittisen komponentin suunnitteluparametreista. Esimerkiksi siirtoverkon rinnakkaiskuristimille on tärkeää, että häviöteho minimoidaan. Toisaalta asennuspaikka voi olla lähellä asutusta, jolloin äänitason pitää olla matala.

Asiakslähtöiset vaatimukset ovat yleisiä suurille siirtoverkonhaltijoille, joille käyttövarmuus ja käytettävyys ovat kustannuksia tärkeämpiä. Teollisuudessa standardista poikkeavat vaatimukset ovat harvinaisempia johtuen kustannusvaikutuksista. Mikäli rakennetta muutetaan asiakkaan vaatimuksesta, on standardin taso aina minimitasona. Standardin vaatimuksista poiketaan vain ylöspäin.

Jännitemitoituksessa asiakas voi määrittää haluamiaan raja-arvoja tai jännitteen laskentatapaa. Virtamitoituksessa asiakas voi vaatia tiettyä poikkipinta-alaa tai virrantiheyttä. Toisaalta asiakkaalla voi olla tiedossa suurimmat kuristimelle sallitut lämpöhäviöt. Lämpöhäviöiden määrä on kriittinen sisäasennuksissa, joissa tilan jäähditys on hoidettava koneellisesti.

Kuristimen mitoituksen kannalta asiakkaan vaatimukset voivat viedä kuristimen rakennetta kauas kustannusten kannalta optimaalisesta. Vaatimukset tulee huomioida ja niihin suhtautua vakavasti, sillä todistustaakka vaatimusten täyttymisestä on toimittajalla. Todistaminen suoritetaan testaamalla kyseinen vaatimus soveltuvassa laboratoriossa. Asiakslähtöiset vaatimukset voivat pitää sisällään lähes mitä tahansa ja ne yleensä nostavat kustannuksia.

### 3.5 Valmistuksen raja-arvot

Kuristimen mitoituksessa asennuspaikalle ominaiset tai sähkötekniset vaatimukset eivät ole ainoita rakennetta ohjaavia tekijöitä. Kuristimet valmistetaan teollisesti käyttäen apuna koneita. Koneilla on aina raja-arvoja. Koneiden raja-arvot johtuvat kompromisseistä, joita joudutaan tekemään investointikustannusten pitämiseksi kohtuullisina. Esimerkiksi ei ole taloudellisesti järkevää tehdä konetta, jolla pystyy valmistamaan 100

metriä korkean käämin. Raja-arvot eivät aina riipu kuristimien käämintään liittyvistä koneista. Suurimman massan voi määrittää esimerkiksi nostolaitteiden nostokyky.

Käämintään käytetyistä koneista johtuvia raja-arvoja ovat:

1. Käämin korkeus
2. Käämin massa
3. Käämin ulko- ja sisähalkaisija
4. Kierrosmäärä

Käämin korkeus rajoittaa kuristimen jännitteenkestoa ja vaikuttaa sen tuottamaan äänitehoon. Kuristimen sylintereillä on jokin luonnollinen värähtelytaajuus. Virran taajuuden, tai sen kerrannaisen, osuessa luonnolliselle taajuudelle muodostuu resonanssi. Resonanssissa kuristimen sylinterin värähtelyn amplitudi kasvaa merkittävästi verrattuna resonoimattomaan tilanteeseen. Kuristimen sylintereiden resonanssitaajuus riippuu niiden geometriasta. Koska korkeudelle on olemassa konekannasta riippuva raja-arvo, ei äänitasoa voida optimoida vapaasti.

Hetkellinen ja jatkuva jänniterasitus ovat riippuvia käämin korkeudesta. Käämintäkoneiden raja-arvoista johtuen tarvittavaa korkeutta ei ole aina mahdollista toteuttaa. Kuristimen jännitteenkestoa voidaan parantaa jakamalla kuristin kahteen osaan. Tällöin molemmat osakuristimet valmistetaan käämintäkoneiden raja-arvojen mukaan. Kahteen osaan jakaminen aiheuttaa ongelmia suurilla sysäysoikosulkuvirran arvoilla, sillä osakuristimien välille muodostuu magneettikentästä johtuen voimavaikutus. Koska kuristimet ovat keskenään identtisiä, pyrkii voima työntämään niitä eroon toisistaan.

Kuristimen käämin suurin mahdollinen massa määrää suurimman mahdollisen poikkipinta-alan tietyllä induktanssin arvolla. Koska isompi induktanssi vaatii enemmän kierroksia, kuristimen kääminnän nippua pienennetään. Tällöin sylinteriin ei saada yhtä suurta poikkipinta-alaa kuin pienemmällä nipulla käämittäessä. Poikkipinta-ala määrää myös kuristimen suurimman mahdollisen nimellisvirran. Kuristimen nimellisvirtaa ei yleisesti nosteta kytkemällä kuristimia rinnan. Rinnankäytössä on aina ongelmia kuristimen välisen virranjaon kanssa, koska kuristimet eivät ole täysin identtisiä. Poikkipinta-alan kasvattaminen pienentää kuristimen lämpöhäviöitä, mikäli virtaspektrissä ei ole satoja ampeereja korkeataajuisia virtakomponentteja.

Käämin pieni ulkohalkaisija pienentää käämiin ja ristikoihin vaikuttavaa oikosulusta johtuvaa voimaa. Suurilla oikosulkuvirran arvoilla on taloudellisesti edullista käyttää pienintä mahdollista käämintäkeskiötä. Ilmasydämisen kuristimen Induktanssin muodostumisessa kierrosmäärä ja käämin halkaisija ovat tärkeimmät tekijät. Kierrosmäärää voidaan siis lisätä halkaisijaa pienentämällä. Kierrosmäärän lisäämisellä voidaan pienentää kierrosten välistä jänniterasitusta.

Käämin suurin mahdollinen ulkohalkaisija määrää yhdessä maksimikorkeuden kanssa suurimman mahdollisen induktanssin arvon. Koska tietyn induktanssiarvon vaatima kierrosmäärä pienenee halkaisijan kasvaessa, voidaan suuremmalla käämintäkeskiöllä käyttää suurempaa nippukokoa. Nippukoon suurentamisesta seuraa, että kuristimen

sylinteriin saadaan enemmän poikkipinta-alaa ja sylinterien määrä pienenee. Sylinterimäärän vähentäminen pienentää kuristimen valmistukseen käytettävää aikaa. Sylintereihin on käämittävä lasikuidusta ja epoksihartsista pinta- ja pohjakerros ja niiden välille on asennettava jäähdytysrimat. Sylinterimäärän pienentäminen vähentää näihin työvaiheisiin käytettyä aikaa.

Kuristimen maksimikierrosmäärä määräytyy kuristimen maksimikorkeuden mukaan. Kierroksia saadaan mahtumaan samaan korkeuteen enemmän ohentamalla johtimia. Maksimikierrosmäärä riippuu siten käämin suurimmasta mahdollisesta korkeudesta sekä ohuimmasta käytettävissä olevasta johtimesta. Johtimen minimipaksuus määräytyy käytettävästä valmistustekniikasta. Johtimiin kohdistuu kääminnäissä mekaanisia rasituksia, joten johtimen halkaisijaa ei voi pienentää rajatta.

Valmistusteknologia asettaa lisäksi raja-arvoja esimerkiksi ristikkohaarojen pituudelle, ristikoiden alumiiniprofiilin korkeudelle ja käämin sisäisille materiaaleille. Käämin sisällä on tietyn tyyppistä lasikuitukudosta, jota voidaan käytettävällä koneella sille helposti käämiä. Mikäli lasikuidun tyyppiä vaihdetaan, on valmistusprosessia mahdollisesti muutettava. Eri lasikuitutyypit kyllästyvät eri määrästä hartsia, joten vähintäänkin hartsin määrä on säädettävä uudelleen materiaalin vaihtuessa.

## 4 TUTKIMUSAINEISTO

Tässä työssä tutkimusaineisto koostuu ALSTOM Grid oy:n vuoden 2008 jälkeen valmistamista kuristimista. Kuristimet jaetaan valmistusteknologian mukaan kahteen tyyppiin: P- ja R-tyyppin kuristimiin. Aineistona käytettiin valmistettuja kuristimia, koska niiden konstruktioiden voidaan olettaa esittävän lokaaleja minimejä valmistuskustannusten suhteen. Tämä oletus voidaan perustella sillä, että näillä konstruktioilla on voitettu tarjouskilpailussa kilpailevat tuotteet.

Kuristimen valmistuskustannukset riippuvat sen geometriasta. Esimerkiksi pienestä käämintäkeskiöstä ja korkeasta käämistä seuraa huonojen jäähdytysominaisuuksien johdosta tarpeettoman kallis konstruktio. Jotta tuotteita saataisiin myytyä asiakkaille, on kuristimen konstruktio pystyttävä laskemaan mahdollisimman tarkasti ja edulliseksi jo tarjousvaiheessa. Optimaalinen konstruktio on siis edellytys tuotteiden myymiselle ja liiketoiminnan harjoittamiselle.

Valmistettujen kuristimien tiedot ja rakenteen parametrit sijaitsivat tietoverkossa useissa eri tiedostoissa ja tiedostoformaateissa. Jotta aineisto saatiin kerättyä, oli tietojen hakemista varten kehitettävä sopivat työkalut. Kerättyä aineistoa ja hakutyökaluja on tarkoitus käyttää myöhemmin tietojen hakemiseen erilaisiin tarkoituksiin, joten työkalut tehdään yrityksestä löytyvien tavallisten toimisto-ohjelmien pohjalle. Ohjelmointi suoritettiin Visual Basic- kielellä, jolloin ohjelmien integrointi Microsoft Officen kanssa on helppoa.

### 4.1 R-tyyppin kuristimien aineisto

R-tyyppin kuristimia on valmistettu ALSTOM Grid oy:n tehtaalla vuodesta 2004 alkaen. Käämikoneita oli aluksi vain yksi ja seuraavat kaksi saatiin käyttöön vuonna 2006. Kaikki viisi käämikonetta olivat käytössä vuonna 2008.

R-tyyppin kuristimien tiedot sijaitsivat kolmessa eri kohteessa. Kaksi tiedostoista, spesifikaatio ja käämintäohje, ovat Excel-formaatissa. Laskentaparametrit ovat teksti-tiedostossa. Toiminnanohjausjärjestelmästä saadun listauksen mukaan kuristinkonstruktiota on 596 kpl. Ensimmäinen rajausta tehtiin tarkistamalla, onko konstruktiosta olemassa kaikki tarvittavat tiedot, eli onko sitä oikeasti valmistettu. Järjestelmässä on myös erilaisia testaukseen tai vastaaviin käyttötarkoituksiin laskettuja konstruktiota.

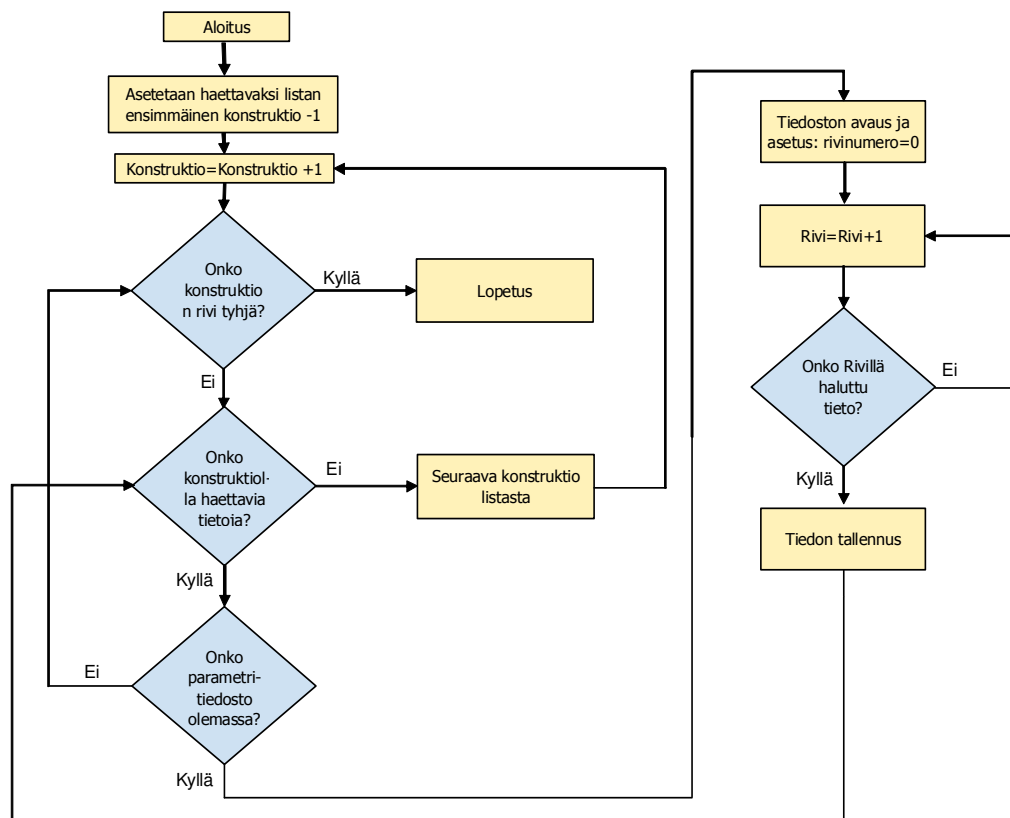
Konstruktiota, joista oli saatavissa kaikki tarvittavat tiedot, löytyi 525 kpl. Jokaisesta konstruktiosta haettiin 74 eri parametria, joten hakutoiminto automatisoitiin. Automatisointi piti tehdä osissa, sillä tietoja oli useassa lähteessä. Haetut parametrit on listattuna liitteessä 3.

Liitteessä 3 esitetyistä parametreista numero 45 sisältää useita haettuja tietoja. R-tyypillä käämintänippu voi olla 20 lankaa ja sylinterissä voi olla kymmenen kerrosta ja siten 200 lankaa. Jokaisesta kuristimen sylinteristä on haettu kolme eri tietoa, eli tietoja on yhteensä 30 kappaletta.

#### 4.1.1 Kuristimen parametritiedosto

Kuristimen laskentatiedot tallennetaan suunnitteluohjelmalla tekstitiedostoon. Tutkimuksen alussa parametritiedoston rakenne ei ollut selvillä. Rakenteen selvityksessä ilmeni, että kaikki tutkimuksessa käytetyt tiedot löytyvät jokaisesta parametritiedostosta samalta rivinumerolta. Parametrien hakemisen automatisointia varten haluttujen tietojen rivinumerot oli ensin selvitettävä. Selvitystyö tehtiin avaamalla parametritiedosto suunnitteluohjelmalla ja hakemalla tekstitiedostosta ohjelmasta nähtyjä lukuarvoja. Oikea rivinumero tarkastettiin vielä usealla muullakin kuristinkonstruktioilla, jotta voitiin olla varmoja arvon oikeellisuudesta.

Parametritiedoston tietojen hakuun kehitettiin ohjelma, joka lukee tekstitiedostoa rivi kerrallaan ja vertaa rivinumeroa halutun tiedon rivinumeroon. Kun haluttu rivinumero on löydetty, rivin tieto tallennetaan Excel-taulukkoon sille varattuun soluun. Samaa sekvenssiä jatketaan, kunnes kyseisestä konstruktiosta on haettu kaikki kiinnostavat tiedot. Tämän jälkeen siirrytään seuraavaan konstruktion. Ohjelma hakee tietoja, kunnes kaikki listatut konstruktiot on käyty läpi. Kuvassa 14 on esitetty ohjelman vuokavio:



Kuva 14. Parametritiedoston hakuohjelman vuokavio.

Parametritiedoston tietojen hakuohjelma ohjelmoitiin Visual Basic-ohjelmointikielellä ja ohjelman lähdekoodi on esitetty liitteessä 1. Tiedostosta saatiin ohjelmalla haettua liitteen 3 tiedoista parametrit 1-26. Ohjelma toteutettiin siten, että sitä on helppo muokata tulevaisuudessa muidenkin tietojen hakemiseen.

#### 4.1.2 Spesifikaation ja käämintäohjeen tiedot

Kun kuristimen lopullinen suunnittelu on valmis, ja konstruktio on valmis tuotantoon, luodaan spesifikaatio ja käämintäohje. Nämä tiedostot ovat Excel-formaatissa ja jokaiselle konstruktioille löytyy molemmat tiedostot. Excel-tiedostoja on olemassa niin suuri määrä, että tietojen hakeminen on pakko hoitaa ohjelmallisesti.

Koska haettavana oli Excel-tiedostossa olevia tietoja ja tiedostoja ei haluttu avata ajan säästämiseksi, täytyi kehittää keino tietojen hakemiseksi suljetuista tiedostoista. Excelin omiin komentoihin kuvattua hakumenetelmää ei kuulu, joten haku oli suoritettava jollakin toisella tavalla.

Kaikki tiedostot ovat rakenteeltaan samanlaisia, ja tiedot sijaitsevat kaikissa samoissa soluissa. Tietojen hakemiseen ei välttämättä tarvita omaa ohjelmaansa, koska haku voidaan toteuttaa Exceliin saatavalla laajennuksella.

Tarkoitukseen löytyy Excelin päälle asennettava Morefunc-sovellus. Sovelluksen avulla voidaan hakea tietoa suljetuista tiedostoista. Morefunc-sovelluksessa on komento INDIRECT.EXT, jota tässä käytettiin. Komennon avulla saadaan ulkoisessa työkirjassa olevaa tietoa käytettyä kuten samassa työkirjassa olevaa. Lisäksi tiedoston nimeä ja polkua voidaan käyttää muuttujina, joten komento sopii tähän tiedon hakuun täydellisesti.

Ensin selvitettiin kunkin halutun tiedon sijainti työkirjoissa ja kirjoitettiin tiedon hakeva komento hakutyökirjaan. Kun kaikki tiedot oli haettu, kopioitiin hakuun käytetyt solut kaikille haettaville nimikkeille. Tämän jälkeen ohjelma haki tarvittavat tiedot automaattisesti. Seuraavassa on esitetty esimerkki INDIRECT.EXT-komennon käytöstä.

```
=INDIRECT.EXT("""&$A$2& "["&$A5&"s.xls]RSP"!T20")
```

Edellä esitetty komento hakee solussa A2 olevasta hakemistosta solussa A5 nimetyn tiedoston RSP-välilehdeltä solun T20 tiedon.

#### 4.1.3 R-tyypin kuristimien aineiston rajaus

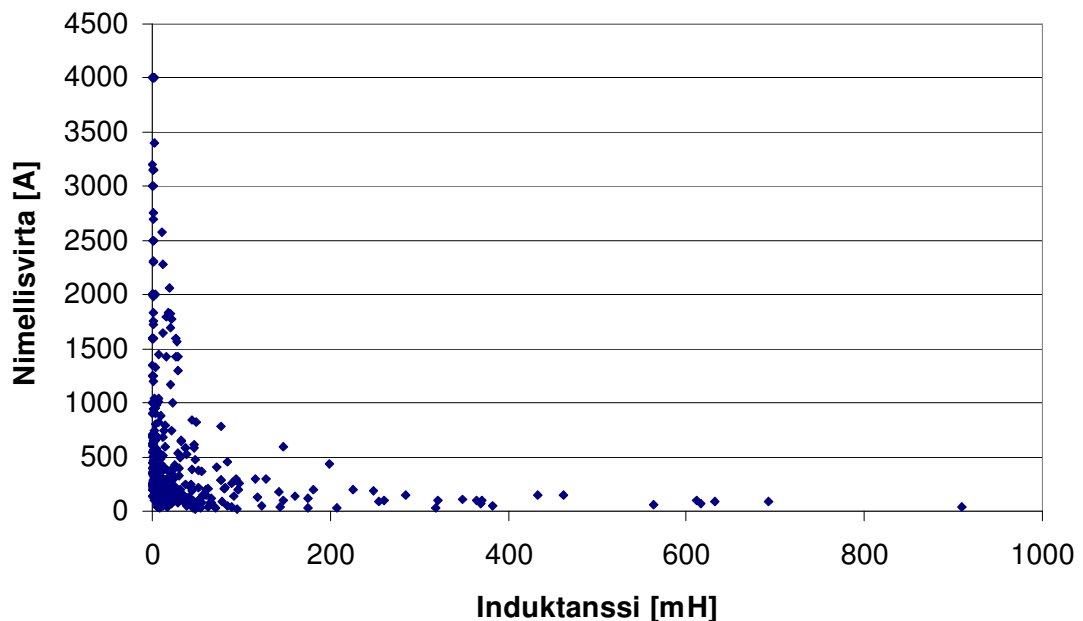
Aineistosta rajattiin pois kaikki rakenteet, joille kaikkia haluttuja tietoja ei löytynyt. Toiminnanohjausjärjestelmästä saadussa listassa on mukana myös kuristimia, joita ei ole koskaan valmistettu. Valmistamattomia konstruktioita on suunniteltu esimerkiksi peruuntuneisiin tilauksiin tai yrityksen sisäiseen testauskäyttöön.

Kuristintyypeistä tarkastelusta jätettiin pois moottoreiden käynnistyskuristimet, taosituskuristimet ja muut erikoiskuristimet. Nämä jätettiin pois, koska niiden suunnittelukriteerit ovat hyvin erilaiset muihin tyyppeihin verrattuna. Käynnistyskuristimilla on

suuri nimellisvirta, mutta käyttö ei ole jatkuvaa, joten poikkipinta-ala ei ole verrattavissa esimerkiksi sarjakuristimiin. Tasoituskuristimilla viranjako perustuu tasavirtavastukseen ja muutenkin kuristimen parametrit eroavat merkittävästi vaihtovirtakuristimista. Erikoiskuristimissa mitoitusperusteet voivat olla lähes mitä tahansa. Esimerkiksi Tampereen teknilliselle yliopistolle toimitetussa Glaninger-kuristimessa käytetty käämityksen nousu on lähes 100-kertainen normaaliin konstruktion verrattuna.

Vuosiluvun mukaan rajausta tehtiin vuodesta 2008 alkaen, koska tuolloin kaikki viisi R-tyypin kuristimien käämikoneita oli toiminnassa. Aiemmissa kuristinkonstruktioissa valmistettu rakenne ei välttämättä edusta kustannusten kannalta lokaalia minimiä, koska rajoituksia esiintyi käämikoneiden puolelta. Esimerkiksi käämin massa oli rajoitettu 2000 kg:aan alle 1500 mm käämintäkeskiöillä. Myös käämikorkeudessa oli rajoitteita pienillä käämintäkeskiöillä. Rajoitteet ohjasivat käyttämään painavilla kuristimilla liian suurta käämintäkeskiötä, ja näin ollen kustannusmielessä epäoptimaalista rakennetta.

Rajausten jälkeen tutkimuksen aineisto koostui 408 kuristinkonstruktioista. Kuvassa 15 on esitettyä R-kelejen aineisto, missä x-akselilla on kuristimen induktanssi ja y-akselilla kuristimen nimellisvirta.



Kuva 15. R-tyypin kuristimien nimellisvirta induktanssin funktiona.

Kuvasta 15 nähdään, että aineisto keskittyy suhteellisen pienitehoisiin kuristimiin. Tyypillinen kuristin on induktanssiltaan alle 100 mH ja virraltaan alle 1000 A. Tästä haarukasta poikkeavat konstruktiot ovat aineistossa vähemmistönä ja niiden osalta on vaikea arvioida optimaalista rakennetta. Optimaalisen rakenteen etsiminen tilastollisin menetelmin edellyttää riittävän laajaa otosta. Esimerkiksi 4000 A nimellisvirralla löytyy ainoastaan yksi kuristin, joten optimirakenteen ennustaminen jollekin toiselle 4000 A konstruktiolle käyttäen virtaa parametrina on mahdotonta.

Aineistossa on pieni määrä todella pieni-induktanssisia ja toisaalta todella suuri-induktanssisia kuristimia. Koska otos on pieni, ei tutkimustuloksia voi käyttää näiden

konstruktioiden arviointiin hyvällä tarkkuudella. Konstruktioiden arvioinnissa ja korrelaatioiden etsimisessä keskitytään pääjoukkoon. Käyrästöjä ei ole mielekästä ulottaa aineiston ääripäihin, koska tulosten epätarkkuus lisääntyy merkittävästi. Tuloksia käsiteltäessä arvioidaan tapauskohtaisesti kunkin parametrin käyttöalue. Esimerkiksi R-tyyppin teknologialla on mahdollista valmistaa 2000 mH induktanssinen kuristin. Tuloksista ei ole tähän apua, koska aineistossa ei ole niin suuri-induktanssisia kuristimia.

## 4.2 P-tyyppin kuristimien aineisto

P-tyyppin kuristimia on valmistettu ALSTOM Grid oy:n tehtaalla vuodesta 2000 saakka. Tätä ennen kuristimia on valmistettu vastaavalla rakenteella, mutta langan eristys on ollut erilainen. Vuodesta 1989 vuoteen 2000 johtimet oli eristetty emalilla ja vuoden 2000 jälkeen muovikalvolla.

Kustakin kuristinkonstruktioista haettiin erilaisia parametreja 73 kpl. Haetut parametrit olivat samoja kuin liitteessä 3 esitetyt R-tyyppin kuristimien parametrit muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. P-tyyppin kuristimille ei ole saatavissa lämpenemiä koskevia tietoja. Edellä mainittujen lisäksi P-tyyppin kuristimilla haettiin tieto väliotoista.

P-tyyppin kuristimiin on mahdollista tehdä väliottoja, joita ei R-tyyppin kuristimiin ole mahdollista tehdä. Kuristimen tiedosta haettiin, kuuluuko konstruktion väliottoja. Väliotollisten kuristimien valmistuskustannukset ovat korkeammat kuin ilman väliottoja, joten ne vääristäisivät kustannusten arviointia. Väliottoja sisältävät kuristimet on joka tapauksessa valmistettava P-tyyppin kuristimiksi ja tietyt raja-arvot huomioiden, joten niiden tarkastelu optimoinnin näkökulmasta ei ole mielekästä. Esimerkiksi väliottojen tuominen usean sylinterin läpi sisimmästä sylinteristä kuristimen päätteeseen on todella hankalaa. Tästä syystä kuristin on suunniteltava siten, että sylinterimäärä minimoidaan.

P-tyyppin kuristimien aineistoon haetut parametrit on esitetty liitteessä 4. Parametrit ovat lähes yhteneviä R-tyyppin kuristimien kanssa. Kuristimien rakenteet eroavat toisistaan lähinnä käämitykseen käytettyjen johtimien osalta.

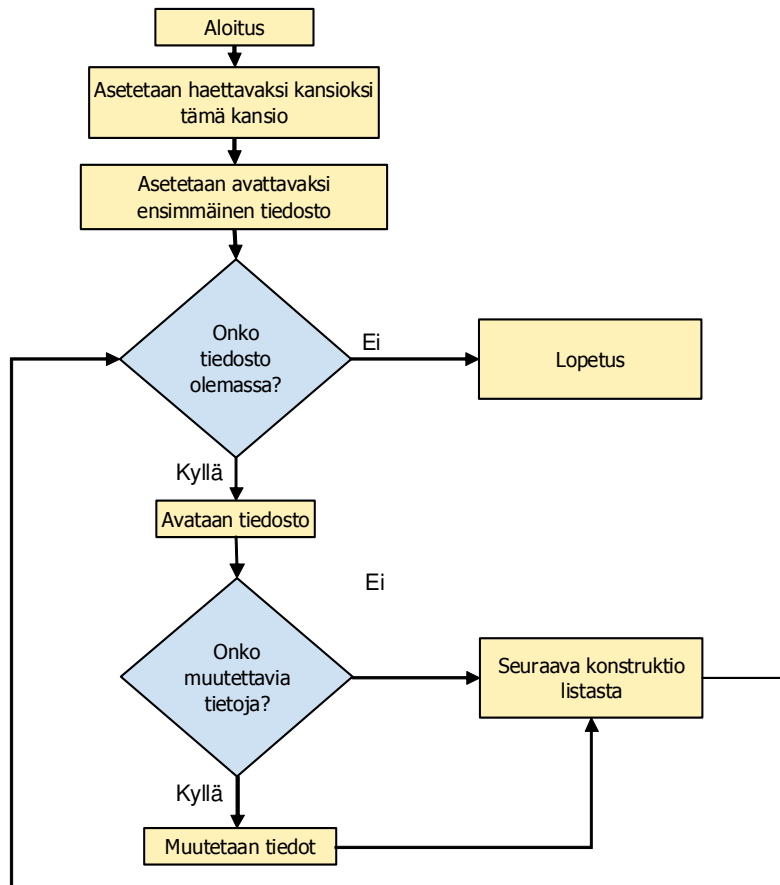
### 4.2.1 Aineiston kerääminen

P-tyyppin kuristinkonstruktio on valmis tuotantoon, kun suunnittelu on saatettu loppuun. Tässä vaiheessa kuristinkonstruktioista luodaan käämintäohje ja spesifikaatio. P-tyyppin kuristimen suunnitteluun käytettävä ohjelmisto on vanhempi kuin R-tyyppin vastaava. P-tyyppin ohjelmisto ei talleta tietoja mihinkään, vaan laskentatiedot tulostetaan ja arkistoidaan kuristimen muiden asiakirjojen kanssa. Koska paperiasiakirjojen läpikäynti olisi ollut liian hankalaa, haettiin tiedot käämintäohjeesta ja spesifikaatiosta. R-tyyppin kuristimiin verrattuna tiedoista ei jäänyt saamatta kuin käämin lämpenemää koskevat tiedot.

Käämintäohje ja spesifikaatio ovat Excel-tiedostoja ja niiden rakenne on sama kaikissa kuristinkonstruktioissa. Samat tiedot löytyvät kaikkien konstruktioiden tiedostoista samoista soluista. Tietojen hakuun käytettiin samaa Excel-laajennusta kuin R-tyyppin kelankin tietojen hakemiseen. Ohjelman toiminta on jo kuvattu luvussa 4.1.2, joten sitä ei tarkemmin tässä esitellä.



spesifikaatioiden tiedot olivat työkirjassa välilehdellä, joka oli nimetty monella eri tavalla. INDIRECT.EXT-komento ei pysty hakemaan tietoa, jos välilehden nimi ei ole tiedossa. Välilehtien uudelleen nimeämistä varten oli suunniteltava Visual Basic-ohjelmointikielillä ohjelma. Välilehden nimeäminen edellyttää tiedoston avaamisen ja vertailun ja tarvittaessa itse toimenpiteen ennen tiedoston tallentamista ja sulkemista. Laaditun ohjelman vuokaavio on esitettyä seuraavassa:



Kuva 16. P-tyyppin kuristimien spesifikaatioiden välilehtien uudelleen nimeämiseen käytetyn ohjelman vuokaavio.

Välilehtien nimien muokkauksen jälkeen aineiston hakemiseen voitiin käyttää samoja komentoja kuin R-tyyppin kuristimellakin, koska spesifikaatiot olivat yhtenevät. Välilehtien muokkaamiseen käytetyn ohjelman lähdekoodi on esitetty liitteessä 2.

#### 4.2.2 P-tyyppin kuristimien aineiston rajaus

P-tyyppin kuristimien aineistosta rajattiin pois kaikki konstruktiot, joille käämintäohjetta ja spesifikaatiota ei löytynyt. Tilastollinen analyysi Excelillä vaatii, että tiedoissa ei ole tyhjiä arvoja. Jotta analysointiin voitiin käyttää Exceliä, jätettiin nämä konstruktiot suoraan pois tarkastelusta.

P-tyyppin kuristimien tiedot sijaitsevat kahdessa Excel-työkirjassa, käämintäohjeessa ja spesifikaatiossa. Toiminnanohjausjärjestelmästä saadun listauksen mukaan P-tyyppin

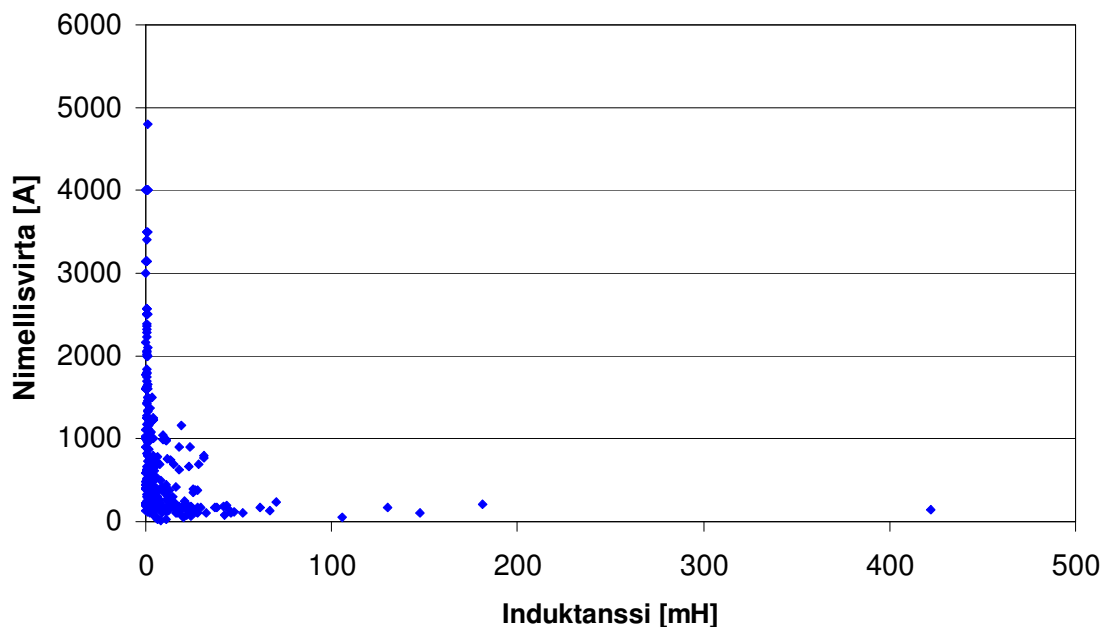
kuristinkonstruktioita on 732 kpl lähtien vuodesta 2002. Konstruktioita ei löydy aikaisemmilta vuosilta, koska toiminnanohjausjärjestelmä on vaihdettu vuonna 2002. Ensimmäinen rajausta tehtiin kuten R-tyyppin kuristimilla, eli tarkastettiin onko konstruktioita oikeasti koskaan valmistettu. Tämän rajauksen jälkeen kuristinkonstruktioita löytyi 672 kpl.

Seuraava rajausta tehtiin jättämällä aineistosta pois kaikki käynnistys-, tasoitus- ja erikoiskuristimet. Näiden kuristimien mitoitusperusteet eivät ole yhteneviä muiden kuristintyyppien kanssa.

Aineistosta rajattiin pois myös kuristimet, joissa on väliottoja. Näiden kuristinten parametreilla on toteutustavasta johtuvia raja-arvoja, joten niiden konstruktio ei ole välttämättä kustannusten kannalta optimaalinen verrattuna ilman väliottoja oleviin kuristimiin. Näitä konstruktioita tulisi verrata keskenään, mutta otos jää pieneksi.

Valmistusajankohdan mukaan rajausta tehtiin vuoteen 2006. Näin rajaamalla otos saatiin riittävän suureksi. Jos rajausta olisi tehty vuoteen 2008, kuten R-tyyppin kuristimilla, olisi otos ollut pieni. R-tyyppin käämintä alkoi toden teolla vuonna 2006 ja samalla P-tyyppin kuristimien uusien konstruktioiden määrä laski merkittävästi. Rajaamalla valmistusajankohta aikaan ennen R-tyyppin kuristimien tehtaan valmistumista, saadaan P-tyyppin aineistoon merkittävästi lisää konstruktioita.

Rajauksen jälkeen P-tyyppin kuristimia on aineistossa 353 kpl. Kuvassa 17 on esitettyä P-tyyppin aineisto siten, että x-akselilla on induktanssi ja y-akselilla nimellisvirta.



Kuva 17. P-tyyppin kuristimien nimellisvirta induktanssin funktiona.

Kuvasta 17 nähdään, että P-tyyppin kuristimien aineisto keskittyy pienehköihin kuristimiin. P-tyyppin kuristimilla suuren induktanssin tai poikkipinta-alan tekeminen tulee kalliimmaksi kuin R-tyyppin kuristimilla. R-tyyppillä käämintänapu voi olla yhden langan korkuinen, jolloin nousu on yhtä suuri kuin langan paksuus. P-tyyppillä sähköinen

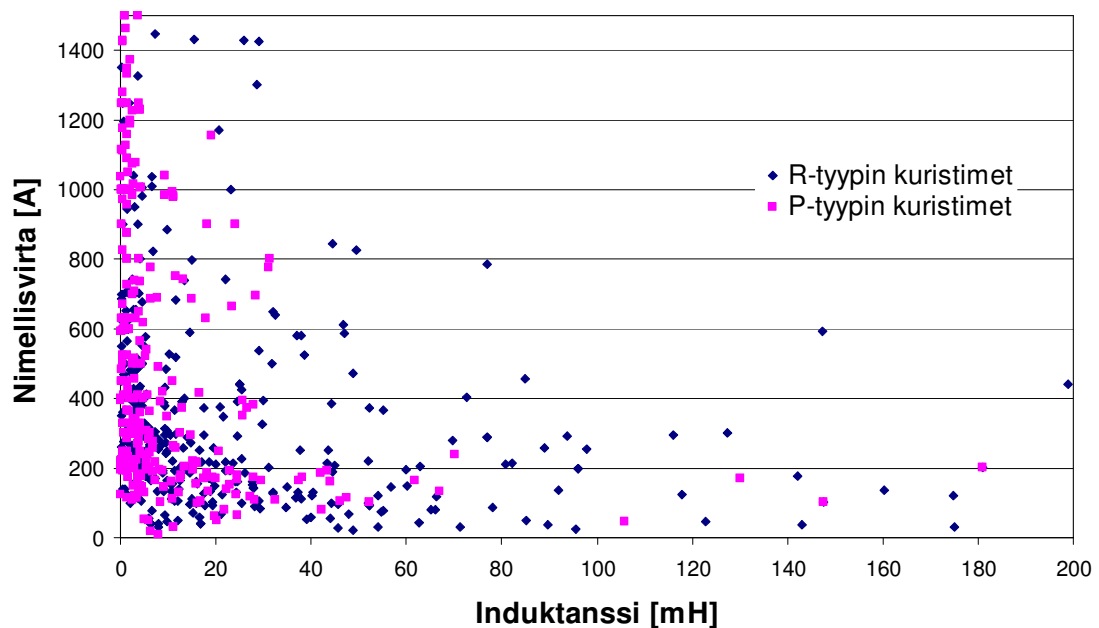
kierros muodostuu aina vähintään yhdestä köydestä. Nousu on minimissään puolitoista-kertainen verrattuna langan paksuuteen.

P-tyyppin kuristimilla sylinteri voi muodostua korkeintaan kuudesta köydestä, joissa kussakin on 13 johdinta. Näin ollen johtimien maksimimäärä sylinterissä on 78 kpl. Suuren poikkipinta-alan valmistamiseen vaaditaan vähemmän sylintereitä ja siten vähemmän käämintä-aikaa. Johdinmateriaali on R-tyypillä myös edullisempaa kuin P-tyypin kuristimilla.

### 4.3 Tutkimusaineiston yhteenveto

Tutkimuksessa käytettävä aineisto koostuu 353 P-tyypin ja 408 R-tyypin kuristinkonstruktioista. Aineisto kuvaa kattavasti ALSTOM Grid oy:n kuristintyyppit. Rajauksien avulla aineisto saatiin sellaiseen muotoon, että tiedoissa ei ole tyhjiä soluja. Tämä on edellytys tilastolliseen analyysiin Microsoft Excel-ohjelmalla.

Aineisto sisältää pienen otoksen kuristimia, joilla on suuri induktanssi tai suuri nimellisvirta. Jotta saadaan parempi käsitys suurimman volyymin kuristimista, seuraavassa kuvassa rajataan pois molempien asteikoiden ääripäät. Rajattu aineisto on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Aineiston kuristimen nimellisvirta induktanssin funktiona, josta on rajattu pois kuristimet, joilla on yli 1500 A nimellisvirta tai yli 200 mH induktanssi.

Kuvasta 18 nähdään, että koottu aineisto keskittyy teholtaan pieniin ja keskisuuriin kuristimiin. Teholtaan suurien kuristimien aineistossa otos ei ole riittävä analyysin tekemiselle. Etenkin eri valmistusteknologioiden vertailu on mahdotonta, sillä P-tyypin kuristimilla kompensointiteholtaan suuria konstruktioita on todella vähän. Tämä johtuu

siitä, että materiaalikustannus nousee kompensointitehon kasvaessa P-tyyppin rakenteella nopeammin kuin R-tyypillä.

Kuristimen valmistusteknologian valintaan vaikuttaa muutkin seikat kuin pelkästään kustannustehokkuus. Esimerkiksi varaosakuristin tuhoutuneen tilalle valmistetaan aina samalla teknologialla kuin alkuperäinen. Toinen syy teknologian vaihtamiseen on kuristimien valmistuksen kuormitustilanne. Kiireellisellä aikataululla toisella teknologialla valmistaminen voi olla mahdotonta tuotantolinjan kuormituksesta johtuen.

## 5 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELO

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksessa käytetyt menetelmät ja niiden avulla saadut tulokset. Tulokset ja niiden merkitys sekä tarkkuus käydään läpi kunkin luvun lopussa. Tuloksissa esitellään merkittävimmät ja samalla kiinnostavimmat yhteydet eri parametrien välillä. Tutkimusvaiheessa yhteyksiä haettiin monien eri parametrien välillä, ja kaikissa ei ollut havaittavissa korrelaatiota. Nämä tapaukset jätetään tässä työssä käsittelemättä.

### 5.1 Tutkimusmenetelmät

Tutkimus tehtiin Microsoft Excel-ohjelmalla. Ohjelma asettaa tiettyjä rajoitteita tilastolliseen analysointiin. Käytetyt funktiot eivät kata kaikkia tilastollisen analyysin mahdollisuuksia. Ohjelmaksi valittiin Excel, koska se on yleisesti käytetty ja näin ollen tuloksia pystytään helposti käyttämään myöhemmin eri tarkoituksiin.

Parametrien välisiä riippuvuuksia arvioitiin alustavasti varianssianalyysillä. Kun riippuvuussuhteet oli löydetty, voitiin keskittyä niiden tutkimiseen. Eri parametrien välisiä riippuvuussuhteita haettiin tekemällä kuvaajia ja pyrkimällä korrelaation avulla näkemään mahdolliset riippuvuudet. Aineisto on laaja ja siihen kuuluu moneen eri käyttötarkoitukseen suunniteltuja konstruktioita. Eri parametrien väliset korrelaatiot eivät parhaassakaan tapauksessa ole arvoltaan yksi, koska eri tapauksissa ei ole sama määräävä mitoituskijä. Tulosten korrelaatiota heikentää myös aineistossa esiintyvä hajonta, sillä kuristinkonstruktion suunnittelussa raja-arvot perustuvat erilaisiin syihin. Osa johtuu koneiden rajoitteista ja osa sähköisistä raja-arvoista. Toisaalta esimerkiksi käänintäkeskiöitä on olemassa portaittain 100 mm välein.

Korrelaatioiden arvioimisen käytettiin Excelin omaa korrelaatiokerrointa. Ensin tutkittavasta aineiston osasta tehtiin kuvaaja, jossa tutkittavien parametrien arvot ovat omilla akseleillaan. Esimerkiksi edellä esitetyssä kuvassa 18 x-akselilla on kuristimen induktanssi ja y-akselilla kuristimen nimellisvirta. Vastaavia kuvaajia muodostettiin eri parametreista tutkimuksen aikana. Aineiston avulla piirrettiin trendikäyrä ja selvitettiin sen yhtälö ja korrelaatiokerroin. Excelin korrelaatiokerroin on Pearsonin korrelaatiokerroimen neliö, ja se määritetään seuraavasti:

$$r^2 = \left( \frac{n \cdot \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{\left( \left[ n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 \right] \left[ n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2 \right] \right)^{\frac{1}{2}}} \right)^2, \text{ missä} \quad (34)$$

$r$  = Pearsonin korrelaatiokerroin

Korrelaatiokertoimen avulla nähdään, onko esitettyjen tietoalkioiden välillä riippuvuutta. Kerroin kuvaa kuinka hyvin annettu trendikäyrä kuvastaa koko tietojoukkoa. Toisin sanoin korrelaatiokertoimen avulla voidaan esittää arvio siitä, kuinka tarkasti joukon arvot vastaavat sovituksen avulla laskettuja. Riippuvuuksia tutkittaessa on varmistettava, että tutkittavat suureet eivät ole lineaarisesti riippuvia toisistaan. Tämä tarkoittaa, että toinen ei voi olla toisen syy tai seuraus. Esimerkiksi kuristimen induktanssilla ja reaktanssilla on hyvä laskennallinen korrelaatio, koska ne riippuvat toisistaan lineaarisesti.

Aineistoa voidaan myös rajata lisää tarvittaessa. Aineistossa voi esimerkiksi olla tietyn rajan ylittäviä tietoalkioita niin vähän, että ne vääristävät tulosta. Aineiston perusteella voidaan siis saada aikaan tuloksia, jotka pätevät hyvällä korrelaatiolla tiettyyn raja-arvoon saakka. Aineiston rajaamisen tarpeellisuus tulkitaan kuvaajasta ja tehdään, mikäli tarpeellista.

Eri kuristimen valmistusteknologioiden välinen valmistuskustannusten vertailu tehdään muodostamalla molemmille teknologioille oma trendikäyrä. Trendikäyrien leikkauskohta kuvaa sitä pistettä, jossa valmistusteknologiaa kannattaa tutkittavien parametrien osalta vaihtaa. Toisaalta mikäli käyrät eivät leikkaa, ei raja-arvoa ole olemassa. Tällöin toinen valmistusteknologia on koko aineiston osalta parempi vaihtoehto tarkastelluilla parametreilla.

## 5.2 Valmistusteknologioiden vertailu

Yksi tutkimuksen tärkeimmistä tavoitteista oli muodostaa raja-arvo eri valmistusteknologioiden välille. Aikaisemmin konstruktioita suunniteltaessa oli aina tarvittaessa tehtävä vertailulaskelmat molemmilla teknologioilla. Tämä ei ole tehokasta ajankäyttöä, joten taloudellisen rajan löytäminen oli tärkeää.

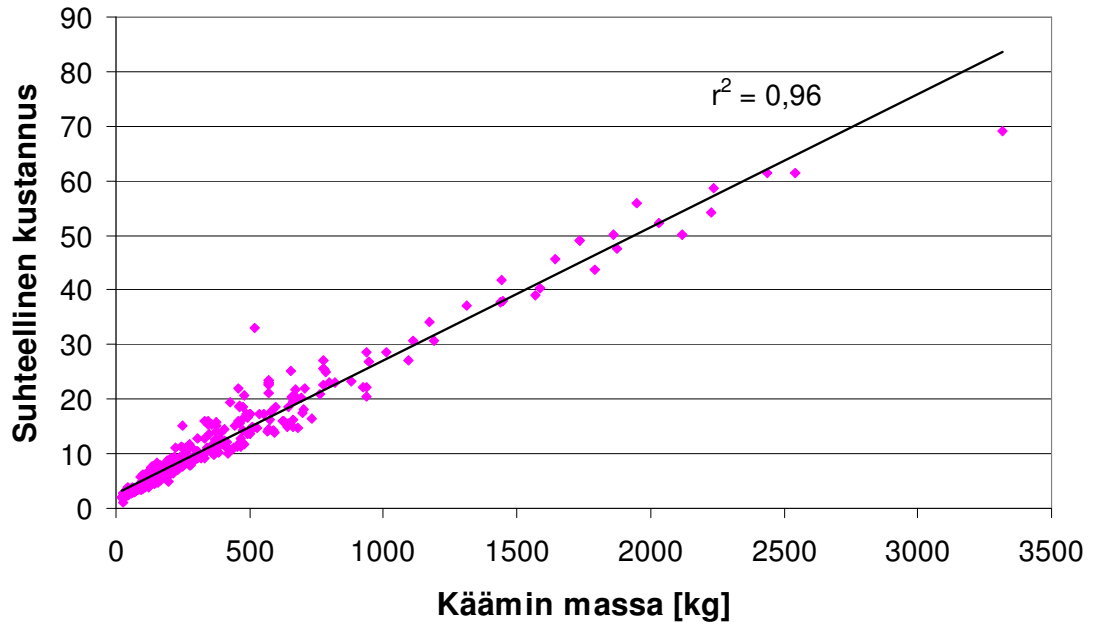
Vertailu aloitettiin muodostamalla tiedoista taulukot molempien valmistusteknologioiden kuristinkonstruktioille. Taulukoissa oli jokaiselle konstruktioille liitteiden 3 ja 4 mukaiset parametrit. Taulukoista pyrittiin löytämään parametrit, joilla raja-arvo saadaan määritettyä riittävällä tarkkuudella. Koska eri valmistusteknologioiden kuristimien käämityksissä käytetyt johtimet eroavat toisistaan huomattavasti, keskityttiin molemmille teknologioille yhteisiin parametreihin, kuten tehoon, massaan ja valmistuskustannuksiin.

Raja-arvon tulisi olla johdettavissa kuristimen alustavassa suunnittelussa käytettävissä olevista tiedoista. Lisäksi raja-arvoon tulisi päästä käsiksi mahdollisimman pienellä työllä, jotta tarjoustoiminnan tehokkuutta saadaan lisättyä. On tarpeetonta laskea kaikkia mahdollisia konstruktioita molemmilla teknologioilla, joten kahteen kertaan laskettavat konstruktioit tulisi rajata vain raja-arvon välittömään läheisyyteen.

### 5.2.1 Tarkastelu massan funktiona

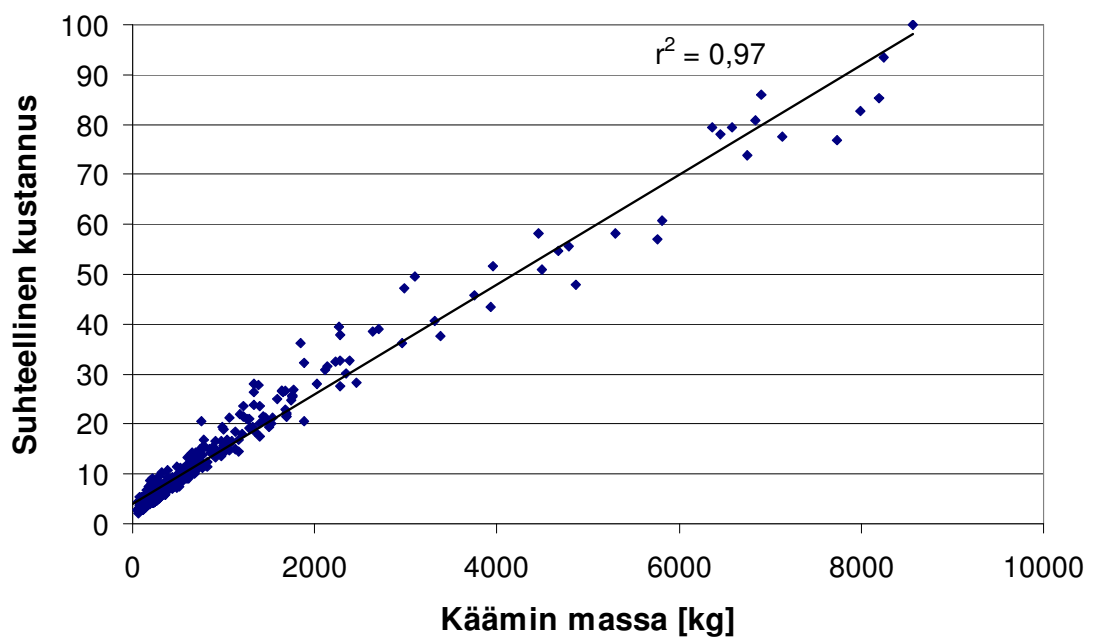
Aineistosta paras korrelaatio saatiin kuristimen massan ja valmistuskustannusten välille. Valmistuskustannukset riippuvat aineiston perusteella molemmilla valmistusteknologi-

oilla lineaarisesti kuristimen massasta. Massan avulla saadaan määritettyä raja-arvo, jonka jälkeen kuristimen valmistusteknologia kannattaa vaihtaa P-tyypistä R-tyyppiin. Kuvassa 19 on esitettyä P-tyypin kuristimien käämin suhteelliset valmistuskustannukset käämin massan funktiona.



Kuva 19. P-tyypin kuristimien suhteelliset valmistuskustannukset massan funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvassa 20 on esitettyä R-tyypin kuristimien suhteelliset valmistuskustannukset kuristimen käämin massan funktiona.



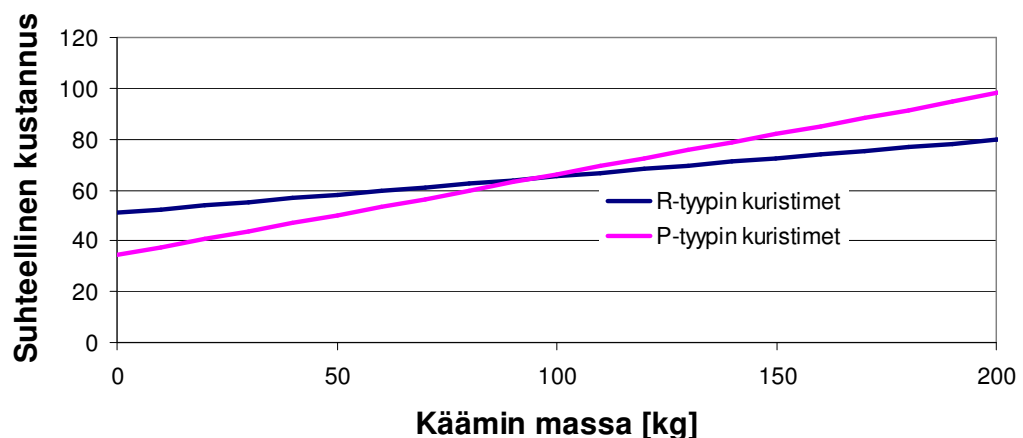
Kuva 20. R-tyypin kuristimen suhteelliset valmistuskustannukset käämin massan funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvissa 19 ja 20 y-akselin asteikkona on käytetty kuristimen suhteellista valmistuskustannusta. Suhteellinen kustannus on saatu jakamalla kaikkien aineiston kuristimien kustannukset vakiokertoimella. Asteikon muuttaminen ei muuta tutkimustuloksia. Absoluuttisen kustannustiedon ilmoittaminen ei anna tutkimustuloksille lisäarvoa, koska kustannukset ovat toteutuneita kustannuksia ja niitä käytetään ainoastaan riippuvuuksien hakemiseen.

Kuvista 19 ja 20 nähdään, että kuristimen massan avulla voi hyvällä tarkkuudella ennustaa kuristimen valmistuskustannukset. Korrelaatio arvojen välillä on lähes täydellinen, joten arvojen välillä on hyvällä tarkkuudella riippuvuussuhde. Sovitteen ongelmana on suurehko hajonta pienellä kuristimen massalla. Tämä aiheuttaa epävarmuutta tulokseen, koska raja-arvo eri valmistusteknologioiden välillä sijoittuu pienien kuristimien alueelle.

Hajonta johtuu kuristimien parametrien portaista. Esimerkiksi käämintäkeskiön halkaisijaa ei voida valita vapaasti, vaan 100 mm portain. Myös käytetty johdinnippu täytyy valita joko johtimen ja köyden kerrannaisena. Tämä on loogista, sillä esimerkiksi puolentoista johtimen nippu ei ole käytännössä mahdollinen. Hajontaan vaikuttaa myös kuristimen eristimien kustannukset. Koska toiminnanohjausjärjestelmästä saadut kustannukset sisältävät kaikki kuristimen materiaalit, kalliit eristimet näkyvät suurempina kustannuksina.

Vaihto valmistusteknologiasta toiseen kannattaa tehdä Kuvien 19 ja 20 trendikäyrien leikkauskohdassa. Kuvassa 21 on esitettyinä molempien teknologioiden trendikäyrät ja käyrien leikkauspiste.



Kuva 21. P- ja R-tyypin valmistusteknologian kannattavuusraja tarkastelemalla valmistuskustannuksia käämin massan funktiona koko aineistolle.

Kuvasta 21 nähdään, että kustannusmielessä teknologian vaihto kannattaa tehdä varsin pienellä kuristimen massalla. Käyrien leikkauspisteeksi saadaan 96 kg. Todellisuudessa valmistusteknologian vaihtoon vaikuttavat muutkin seikat, kuten tehtaan val-



mistuslinjojen kuormitus, väliottojen tarve ja asiakkaasta johtuvat tilavaatimukset. P-tyypin kuristimilla ei ole valmistusteknologiasta riippuvia raja-arvoja, joten kuristimien geometria on vapaasti valittavissa. Mikäli kuristin asennetaan ahtaisiin sisätiloihin, on P-tyypin kuristimesta mahdollista tehdä ulkomitoiltaan pienempi kuin R-tyypin kuristimista.

Kannattavuus voi vaihdella eri ajanjaksoina johtuen käämin materiaalin ja työkuksannusten muutoksista ja aineistossa on hajontaa pienillä kuristimilla. Siten tarkan raja-arvon määrittäminen on mahdotonta. P-tyypin kuristimien työvoima- sekä materiaali-kustannukset kasvavat jyrkemmin kuristimen massan kasvaessa kuin R-tyypin kuristimilla. Aineiston pohjalta voidaan kuitenkin määrittää, että suuruusluokka-arvio raja-arvolle on 100 kg. Virhemarginaali on tässä arviossa todella suuri hajonnasta johtuen. Tulosten perusteella jatkotutkimukset kannattaa keskittää pieniin, alle 500 kg kuristimiin.

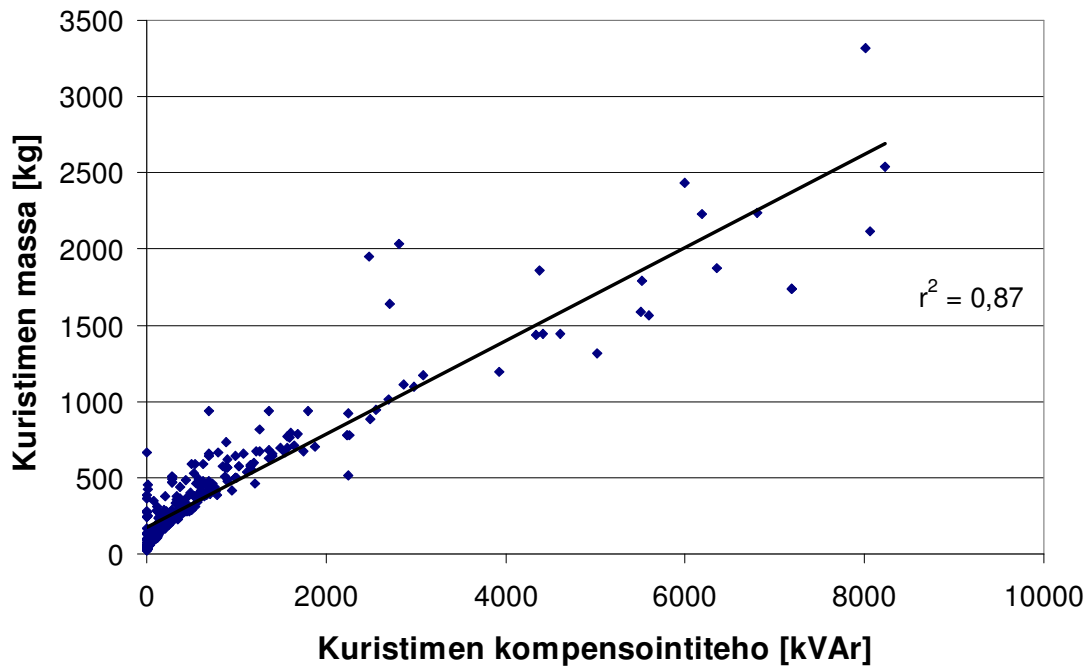
### 5.2.2 Tarkastelu tehon funktiona

Eri valmistusteknologioiden vertailu kuristimen kompensointitehon funktiona tehdään käyttämällä ekvivalenttista tehoa. Ekvivalenttinen teho saadaan laskettua kuristimen kokonaislämpöhäviöiden avulla yhtälöllä 29. Ekvivalenttinen teho on valittu tarkastelualueksi, koska siinä otetaan huomioon yliaaltojen vaikutus. Mikäli virran spektri sisältää yliaaltoja, niiden vaikutus kuristimen lämpöhäviöihin on suurempi kuin perustajuisen virran. Yliaaltovirtojen ollessa lähellä perustajuisen virran arvoa, neliösumman neliöjuuri virtakomponenteista tai perustajuinen virta ei kerro luotettavasti kuristimen lämpöhäviöitä.

Kuristimen massan funktiona tarkasteltuna raja-arvoksi saatiin 96 kg. Koska raja-arvo on pieni, keskitytään myös tässä tarkastelussa massaltaan pieniin kuristimiin. Johdinmateriaalin kustannusten johdosta on selvää, että suuret kuristimet kannattaa valmistaa R-tyypin konstruktiolla, eikä sitä ole mielekästä tutkia. Aineiston rajaaminen tähän tarkasteluun tehdään siten, että saadaan mahdollisimman hyvä korrelaatio massaltaan pienille kuristimille.

Kompensointiteholtaan pienet kuristimet jätettiin tarkastelusta pois, koska niiden kustannusrakenne on erilainen kuin suurempien kuristimien. Kaikkein pienimmissä, alle 10 kVAr kuristimissa tukieristimet, ristikot ja työn osuus näyttelevät paljon merkittävämpää osaa kustannuksista kuin suuremmissa kuristimissa. Pienikin virhe esimerkiksi työkuksannuksissa heijastuu merkittävänä kuristimen kokonaiskuksannuksiin. Koska aineistossa on käytössä toteutuneet kuksannukset, saattaa aineistossa olla mukana kuristimia, joiden valmistuksessa on ollut ongelmia. Tästä johtuu, että työkuksannuksissa voi olla eroja samanlaisten konstruktioiden välillä. Tarkastelujoukosta jätettiin pois kaikki alle 10 kVAr tehoiset kuristimet.

Tarkastelujoukon rajaamisen kannalta selvitettiin seuraavaksi P-tyypin kuristimen massan ja tehon välinen korrelaatio alle 1000 kVAr ja alle 500 kg kuristimille. Kuvassa 22 on esitettyä P-tyypin kuristimien koko aineiston käämin massa kompensointitehon funktiona.



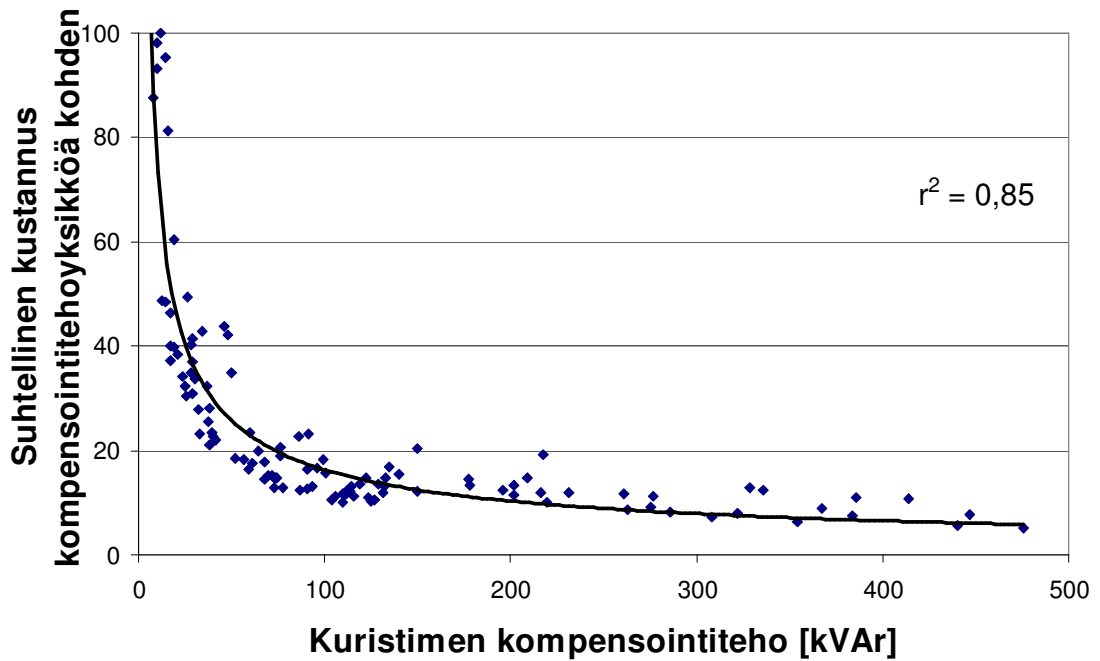
Kuva 22. P-tyypin kuristimen massa kompensointitehon funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 22 nähdään, että tarkastelussa kannattaa keskittyä pieniin, massaltaan alle 500 kg kuristimiin, jotka toisaalta ovat teholtaan yli 10 kVAr ja alle 500 kVAr. Kuristimen tehon ja valmistuskustannusten välisellä riippuvuudella paras korrelaatio saatiin kuvaamalla valmistuskustannus kompensointitehon funktiona. Tässä tarkastelussa kompensointitehona käytettiin ekvivalenttisen virran avulla laskettua tehoa.

Kun on tiedossa, että vastaava induktanssi vaatii P-tyypin konstruktiolla enemmän kierroksia kuin R-tyypin konstruktiolla jätetään tästä tarkastelusta pois maadoitus- ja rinnakkaiskuristimet. Niiden induktanssi on tyypillisesti suuri, ja niiden valmistus ei ole taloudellisesti kannattavaa P-tyypin konstruktiolla.

Raja-arvoa haetaan tässä tutkimuksessa sarja- ja suodatinkuristimille. On jo tiedossa, että vaimennuskuristimet kannattaa yleensä tehdä P-tyypin teknologialla. Poikkeuksena ovat suuren nimellisjännitteen kuristimet. Suuri nimellisjännite tarkoittaa suurta eristystasoa ja P-tyypin kuristimissa kierrosten välistä eristystä ei voida parantaa eristerroksia lisäämällä. Tästä seuraa, että suurilla eristystasoilla P-tyypin kuristimien kierrosten välinen eristys ei ole riittävä.

Kuvassa 23 on esitettyä P-tyypin kuristimien valmistuskustannus kompensointitehon funktiona.

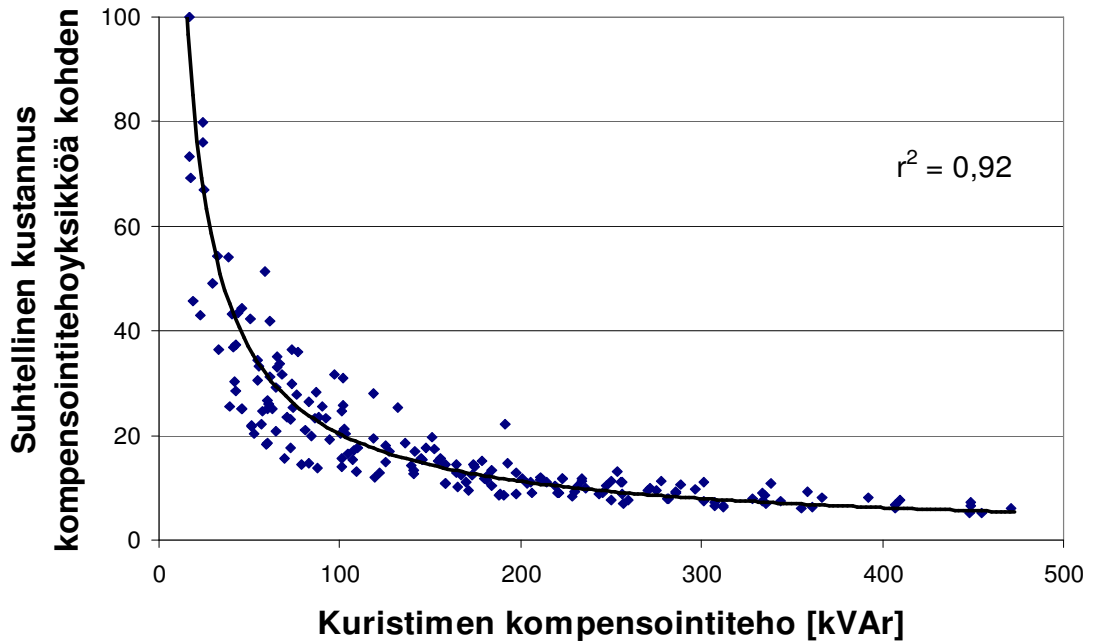


Kuva 23. P-tyypin kuristimien valmistuskustannus kompensointitehoyksikköä kohden kompensointitehon funktiona alle 500 kVAr teholuokassa, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvassa 23 y-akselin asteikkona käytetään suhteellista valmistuskustannusta. Suhteellinen arvo antaa aineistosta täysin vastaavan kuvan kuin absoluuttisen arvon käyttö. Suhteellisarvojen käyttö ei vaikuta tutkimuksen tuloksiin.

Kuvasta 23 nähdään, että sovitteen korrelaatio tutkimusaineiston kanssa on hyvä. Kuristimen massaan pohjautuvien tulosten perusteella valmistusteknologia kannattaa vaihtaa jo 96 kg käämin massalla P-tyypistä R-tyyppiin. Koska raja-arvo vastaa suhteellisen pientä kuristinta, täytyy tarkastelujoukkoon saada mahdollisimman hyvä korrelaatio juuri pienille kuristimille. Koska aineistoa on rajattu tietylle tehoalueelle, sovitteet eivät ole käyttökelpoisia koko kuristinten valmistusalueelle. Eri valmistusteknologioiden välisen kannattavuusraja-arvon määrittämisen kannalta supistetulla aineistolla tehtävä tarkastelu antaa tarkemman tuloksen, koska sovitte sopii juuri raja-arvon läheisyydessä olevaan aineiston osaan.

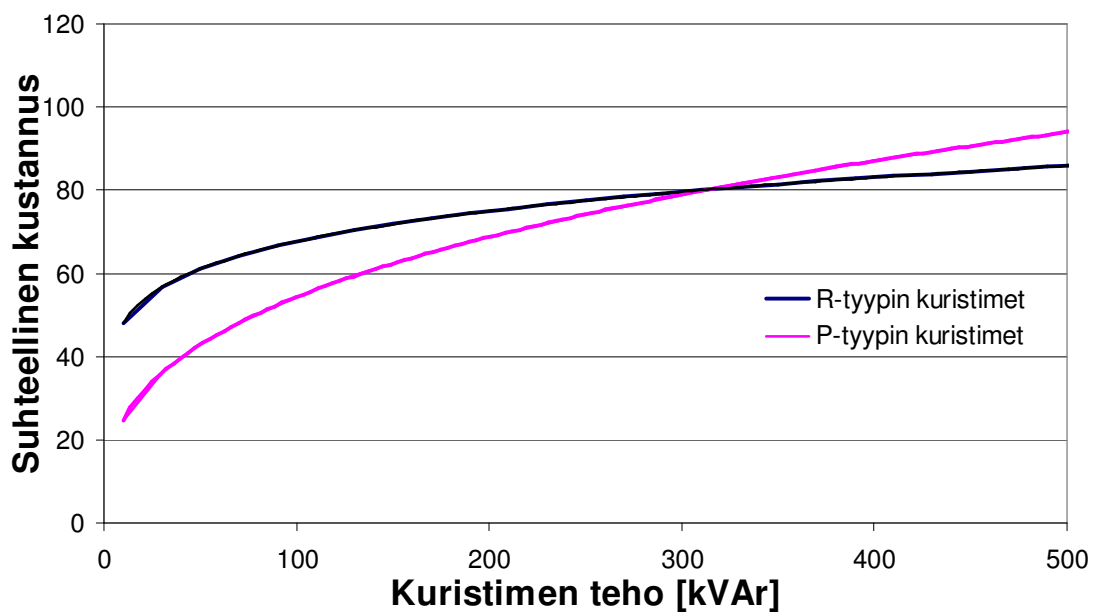
Kuvassa 24 on esitetty R-tyypin kuristimien suhteellinen valmistuskustannus kompensointitehon funktiona.



Kuva 24. R-tyypin kuristimien valmistuskustannus kompensointitehoyksikköä kohden kompensointitehon funktiona alle 500 kVAR teholuokassa, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 24 nähdään, että kuvatulla tehoalueella kuristimen tehosta saadaan hyvällä korrelaatiolla selville kuristimen valmistuskustannukset. Kuvan 24 sovitteella saadaan hyvä korrelaatio ainoastaan 10 – 500 kVAR tehoalueella.

Yhdistämällä kuvien 23 ja 24 sovitteiden avulla lasketut kustannukset samaan kuvaan, saadaan graafisesti esitettyä raja-arvo, jossa valmistusteknologiaa kannattaa vaihtaa. Kuvassa 25 on esitettynä raja-arvo graafisesti.



Kuva 25. Kuristintyyppien kannattavuusraja tehon mukaan laskettuna.

Aineiston perustella valmistusteknologiaa kannatta vaihtaa P-tyypistä R-tyyppiin 314 kVAr kompensointiteholla. R-tyypin aineistossa on kuitenkin hajontaa pienillä kompensointitehoilla, joten voi olla kannattavaa käyttää R-tyypin konstruktiota tapauskohtaisesti pienemmilläkin tehoilla. Tässä tarkastelussa käytetty aineisto oli kuitenkin rajattu siten, että saataisiin määritettyä mahdollisimman luotettava raja-arvo.

### 5.2.3 Valmistusteknologian valinnan optimointi

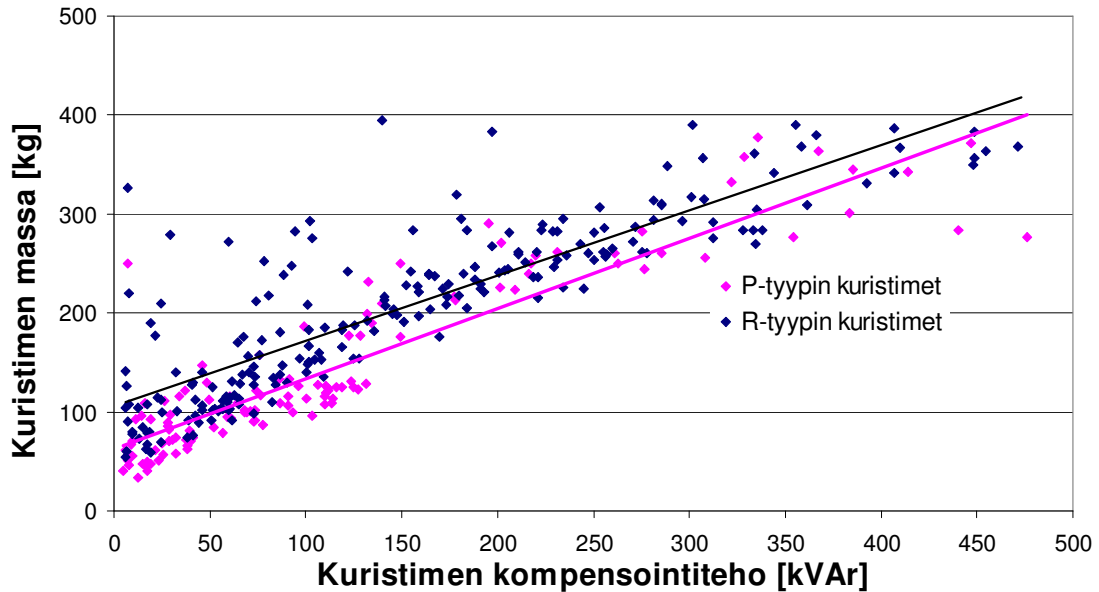
Tässä työssä tutkittiin kahta ALSTOM Grid oy:n valmistamaa ilmasydämistä kuristin-konstruktiota. Yksi tärkeä tavoite oli löytää kannattavuusraja-arvo eri kuristintyyppien välille. Raja-arvo tulisi olla johdettavissa kuristimen alustavaan kustannuslaskentaan tarvittavista parametreista, jotta itse kuristinta ei tarvitsisi suunnitella molemmilla valmistusteknologioilla.

Kuristimen valmistuskustannuksia vertailtiin kahdella tavalla, koko aineistoa hyödyntäen kustannukset massan funktiona ja rajatulla aineistolla kustannukset tehon funktiona. Massan funktiona saatiin karkea arvio siitä, että raja-arvo saavutetaan jo varsin pienillä kuristimilla. Aineistossa on kuitenkin hajontaa pienillä kuristimilla johtuen tukirakenteiden suuresta suhteellisesta osuudesta massassa. Esimerkiksi tukieristimien vaihtaminen toiseen tyyppiin tai kuristimien asentaminen jalustalle saattaa vaikuttaa pienen kuristimen massaan kymmeniä prosentteja. Tukirakenteet ovat kuitenkin tyyppillisesti edullisia pienillä kuristimilla, joten kustannus massayksikköä kohden vääristyy.

Koska raja-arvo sijoittuu pienille kuristimille ja siten massan funktiona tarkasteltaessa tulos ei ole tarkka, tehtiin tarkastelu myös tehon funktiona. Suoraan sovittamalla aineistoon kuristimen kustannukset tehon funktiona ei saatu Excelin työkaluilla hyvää sovitetta. Sovite määritettiin kuristimen kustannuksista kompensointitehoyksikköä kohden kompensointitehon funktiona ja sille saatiin hyvä korrelaatio. Aineistosta myös rajattiin pois pienet, alle 5 kVAr kuristimet sekä suuret, yli 500 kg kuristimet. Vertailu tehtiin ainoastaan suodatin-, vaimennus- ja sarjakuristimille.

Tässä tutkimuksen osassa aineisto käsitti 135 P-tyypin ja 214 R-tyypin kuristinkonstruktiota. Vaikka aineistoa rajattiin tietylle tehoalueelle ja tiettyihin kuristintyypeihin, on aineisto riittävän kattava johtopäätöksien tekemiseen. Rajaamalla aineisto raja-arvon läheisyyteen saadaan raja-arvo määritettyä tarkemmin.

Tuloksena saatiin raja-arvoksi 312 kVAr. Raja-arvo vastaa paljon suurempaa kuristinta kuin massan funktiona tarkasteltaessa. Kuristimen massan ja tehon välinen riippuvuus on korrelaatioltaan hyvä käytetyssä aineistossa. Samantehoisen, eri valmistusteknologialla valmistetun kuristimen massa ei kuitenkaan ole sama. Tämä johtuu valmistuksessa käytetyn hartsin ja lasikuidun määrästä. R-tyypin kuristimissa lasikuidun ja hartsin määrä on suurempi. Kuvassa 26 on esitetty tarkastelussa käytetyn aineiston massan ja tehon riippuvuus.



Kuva 26. Kuristimen massa kompensointitehon funktiona molemmilla kuristintyypeillä.

Kuvasta 26 nähdään, että tutkimuksessa raja-arvoksi saatu 312 kVAr teho vastaa P-tyyppin kuristimilla 284 kg massaa ja R-tyyppin kuristimilla 312 kg massaa. Kuvan molemmilla sovitteilla on hyvä korrelaatio, mutta aineistossa on hajontaa. Hajonnan seurauksena massa ei ole tarkka suure tarkasteltaessa kannattavuutta kuristinten valmistusteknologioiden välillä.

Aineiston pohjalta voidaan asettaa raja-arvoksi 300 kVAr. Raja-arvon läheisyydessä tulee tarkastella molempia kuristimen valmistusteknologioita taloudellisemman vaihtoehdon määrittämiseksi. On kuitenkin selvää, että suodatin-, vaimennus- ja sarjakuristimilla tehon ollessa alle 200 kVAr P-tyyppin teknologia on taloudellisesti kannattavampaa. Tarkastelu rajoittuu valmistuskustannuksiin ja raja-arvo saattaa vaihdella, mikäli työ- tai materiaalikustannukset muuttuvat. Kustannusten suhde ei todennäköisesti kuitenkaan muutu niin merkittävästi, että alle 200 kVAr kuristimet kannattaisi tehdä R-tyyppin konstruktiolla.

### 5.3 Kuristimen tunnuslukujen ennustettavuus

Kompensointilaitteiden markkinoilla investoinnit ovat yleensä suuria. Loistehon kompensointiin käytettävien laitteiden takaisinmaksuaika on yleensä lyhyt. Investointi pitää yleensä sisällyttää asiakkaan budjettiin etukäteen. Budjetointi on tärkeää myös laitteistokustannuksia pienentävien teknisten ratkaisujen kanssa, kuten sarjakuristimilla. Yleisesti suuria investointeja täytyy suunnitella etukäteen.

Suuri osa kompensointilaitteiden tarjouskyselyistä koskee alustavaan kustannuslaskentaan tarvittavia budjettihintoja. Hinnan ei tarvitse olla aivan tarkka, eikä myöskään myyjää sitova. Osa tarjouslaskentaan käytettävästä työpanoksesta kuluu budjettihintojen laskemiseen. Tässä työssä kerätyn aineiston pohjalta olisi tutkittava, onko mahdollista

muodostaa kuvaaja ja yhtälö kuristimen valmistuskustannusten ja jonkun kuristimen perustiedon välille.

Tutkimuksen pohjalta aineistossa paras korrelaatio saatiin kuristimen ekvivalenttisen kompensointitehon ja valmistuskustannusten välille. Ekvivalenttinen kompensointiteho saadaan laskettua yhtälön 29 avulla seuraavasti:

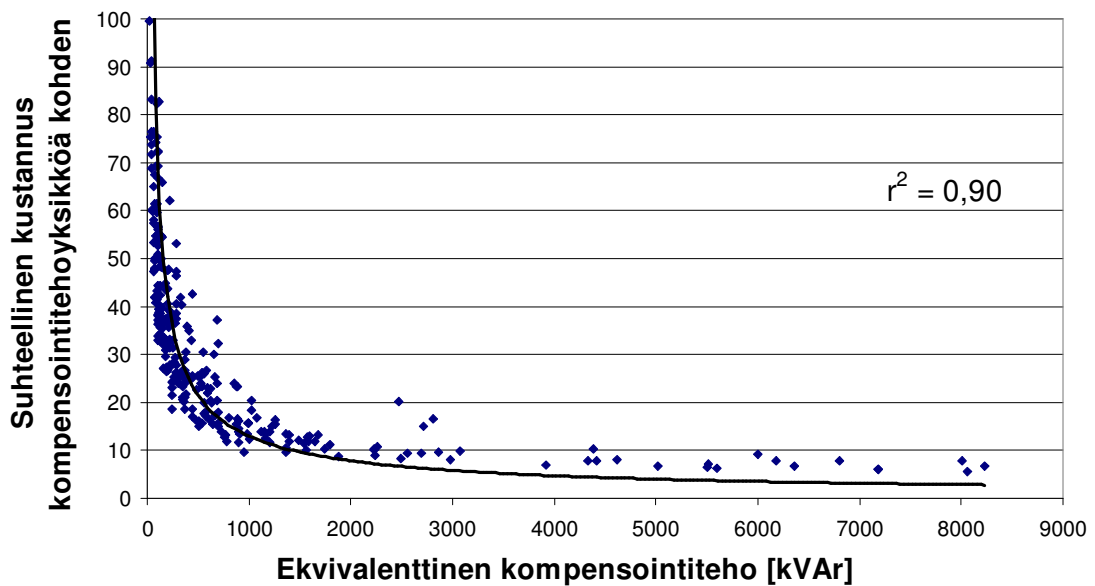
$$Q_{eq} = X_L I_{eq}^2 = X_L \frac{\sum_{i=1}^{\infty} I_i^2 R_i}{R_{50Hz}}, \text{ missä} \quad (35)$$

$Q_{eq}$  = Ekvivalenttinen kompensointiteho

Aineiston pohjalta löydettiin myös yhteys kuristimen kokonaislämpöhäviöille ja massalle ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona. Aineiston perustella voidaan esittää alustavalla budjetointiin soveltuvalla tarkkuudella kuristimen konstruktioista kolme tärkeintä parametria: Kustannukset, massa ja häviöt. Kaikki kolme parametria saadaan määritettyä tietämällä ainoastaan kuristimen ekvivalenttinen kompensointiteho.

### 5.3.1 P-tyypin kuristimen budjettihinta

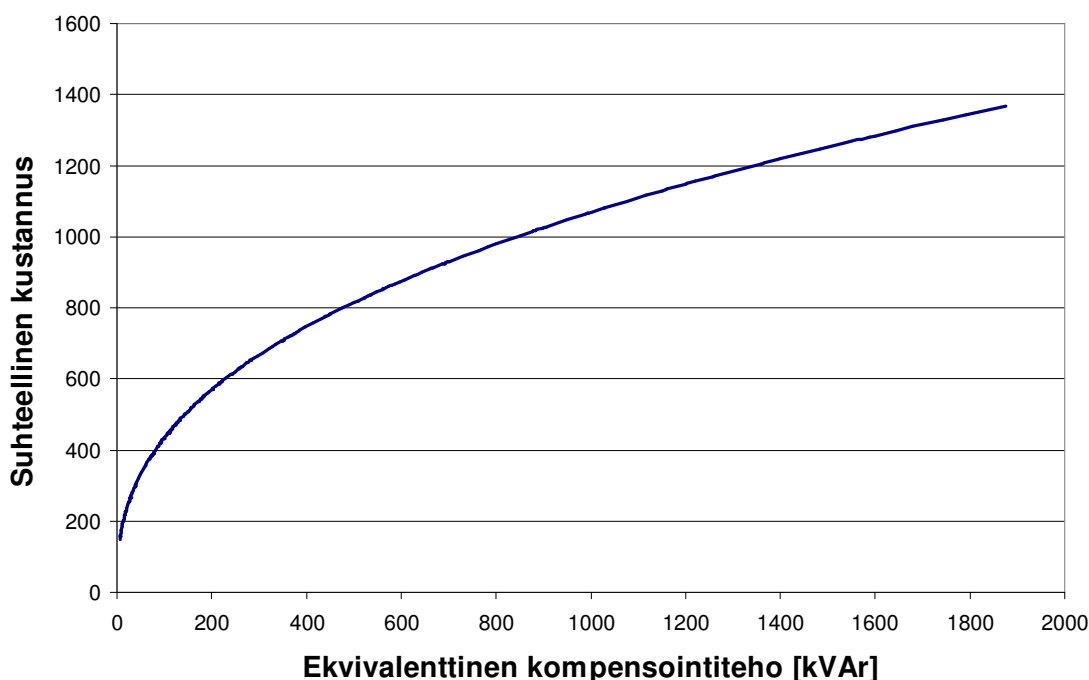
Valmistuskustannusten ja kuristimen kompensointitehon välinen riippuvuus voidaan määrittää käyttäen erilaisia tehon määritelmiä. Kuristimen poikkipinta-alan kannalta paras tapa on käyttää ekvivalenttista tehoa, koska siinä otetaan huomioon virran yliaaltosisältö. Korrelaatioltaan paras riippuvuussuhde saatiin kuvaamalla kuristimen valmistuskustannus ekvivalenttista tehoyksikköä kohden ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona. Kuvassa 27 on esitetty P-tyypin kuristimille edellä mainittu kuvaaja.



Kuva 27. P-tyypin kuristimien valmistuskustannus kompensointitehoyksikköä kohden kompensointitehon funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvassa 27 y-akselin yksikkönä on käytetty suhteellista valmistuskustannusta kompensointitehoyksikköä kohden. Suhteellisarvojen käyttö ei muuta tutkimustuloksia, tai haittaa tulosten ymmärtämistä.

Kuvasta 27 nähdään, että aineistossa oleva otos on pieni yli 2000 kVAr kompensointitehoisilla kuristimilla. Yli 2000 kVAr kompensointitehoisen kuristimen yksikkökustannus on niin suuri, että se kannattaa laskea aina tapauskohtaisesti. Aineistosta on myös poistettu alle 5 kVAr kuristimet, jotta virhe tehoasteikon alkupäässä saadaan pysymään pienenä. Alle 5 kVAr kuristimet ovat todella pieni osuus ilmasydämisten kuristinten markkinoista, sillä tämä kokoluokka valmistetaan yleisemmin rautasydämisenä. Kuvassa 28 on esitettyä kuristimen valmistuskustannus kompensointitehon funktiona rajattuna alle 2000 kVAr, mutta yli 5 kVAr teholuokkaan.



Kuva 28. P-tyyppin kuristimien valmistuskustannus ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona.

Kuvasta 28 nähdään, että kuristimen valmistuskustannukset eivät riipu lineaarisesti kompensointitehosta. Laskettujen arvojen korrelaatio todellisiin valmistuskustannuksiin saadaan laskettua Excelin correl-funktiolla. Correl-funktio antaa kahden joukon välisen korrelaation Pearsonin korrelaatiokertoimen. Korrelaatiokertoimen arvo on 0,93.

Tulosten perusteella voidaan hyvällä tarkkuudella antaa alustava kustannus kuristimelle rajatulla tehoalueella. Kuvissa ilmenevä hajonta johtuu valmistustekniikan rajoitteista ja ympäristö- tai asiakaslähtöisistä vaatimuksista. Esimerkiksi ilmastollisten rasiusten ollessa suuret, tulee kuristimen korkeutta lisätä. Korkeuden kasvattamisella lisätään kuristimen pintamatkaa ja siten ryömintätien pituutta.

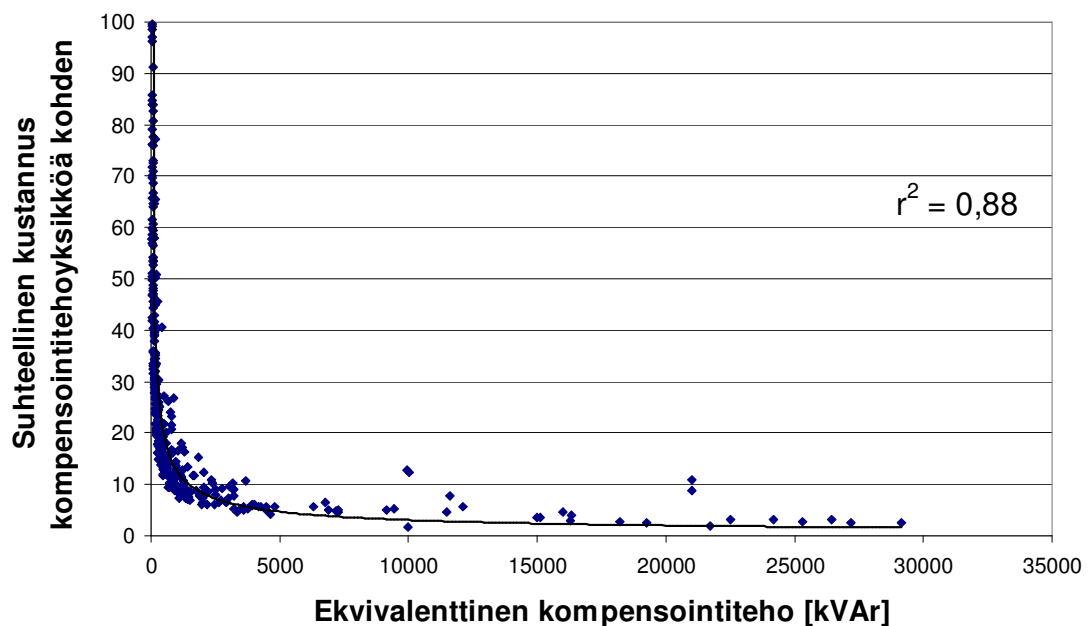
Mikäli kuristimen vaatimukset poikkeavat oleellisesti tyypillisistä ympäristöolosuhteiden, mekaanisten vaatimusten, oikosulkuvirran tai yliaaltopitoisuuden suhteen,



tulee konstruktio laskea alustavassa vaiheessa tarkemmin. Tässä annettu arvio kuristimen hinnasta perustuu tilastolliseen analyysiin ja edustaa keskimääräistä tilannetta.

### 5.3.2 R-tyypin kuristimen budjettihinta

R-tyypin kuristimilla käytettiin tehon määrittelemisessä P-tyypin kuristimen tavoin ekvivalenttisen virran avulla laskettua ekvivalenttista tehoa. R-tyypin kuristimilla paras korrelaatio valmistuskustannusten ja kuristimen tehon välillä saavutettiin laskemalla valmistuskustannus ekvivalenttista kompensointitehoyksikköä kohden ekvivalenttisen tehon funktiona. Kuvassa 29 on esitettyä edellä mainittu kuvaaja.



Kuva 29. R-tyypin kuristimien valmistuskustannus kompensointitehoyksikköä kohden tehon funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

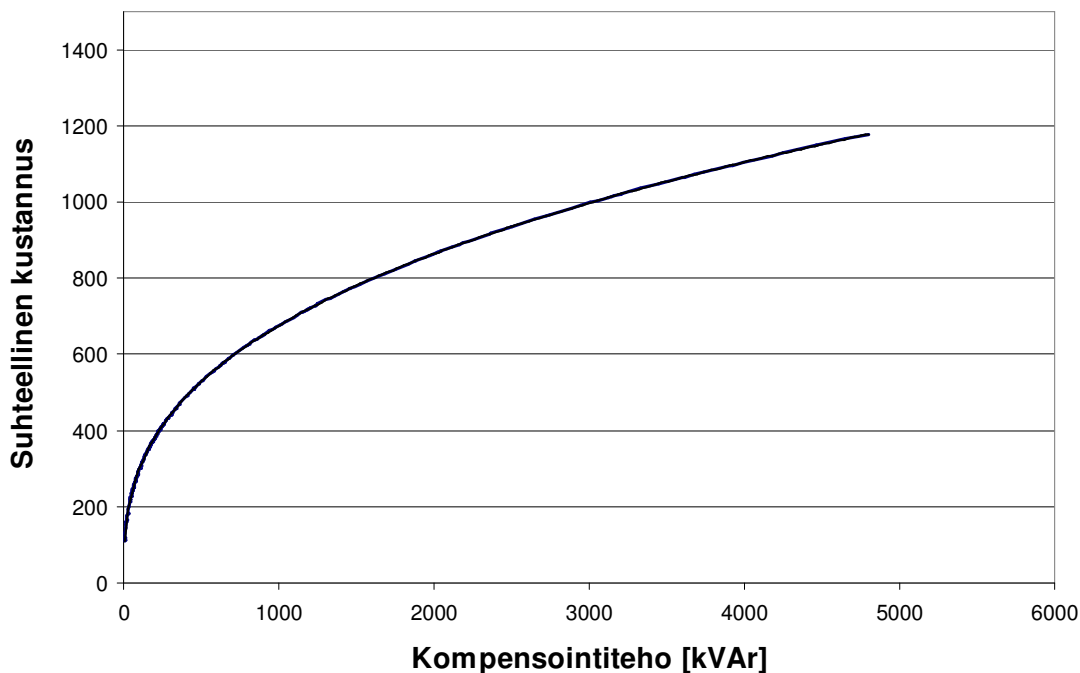
Kuvasta 29 nähdään, että R-tyypin kuristimien tehoalue on laajempi kuin P-tyypin kuristimilla. Tämä johtuu siitä, että alkuperäisessä aineiston rajauksessa on jätetty pois kaikki vanhemmat kuristinkonstruktio. Kun R-tyypin kuristimien valmistus alkoi, loppui suurien P-tyypin kuristimien valmistus.

R-tyypin kuristimien aineistossa hajontaa on pienillä tehoalueilla. Suuremmilla, yli 5000 kVAr kompensointitehoilla otos on niin pieni, että aineiston luotettavuus ei ole hyvä. Hajonnan pienillä kompensointitehoilla aiheuttaa kuristimen erikoisvaatimukset, samoin kuin P-tyypin kuristimilla. Toinen merkittävä hajonnan aiheuttaja on erikoisemmat kuristintyypit, kuten maadoituskuristimet. Maadoituskuristimien nimellisvirta on pieni, ja poikkipinta-ala mitoitetaan lyhytaikaisen virran mukaan. Tämä näkyy vääristyneinä kustannuksina nimelliseen kompensointitehoon verrattuna.

Kuvasta 29 nähdään, että aineisto on kattava 5000 kVAr kompensointitehoon saakka. Koska suuremmat lukemat vääristävät tuloksena saatavaa yhtälöä pienillä kompen-

sointitehoilla, jätetään ne tarkastelusta pois. Vastaavasti jätetään pois alle 5 kVAr tehoiset kuristimet. Aineiston rajaamisella tavoitellaan sitä, että saatava yhtälö olisi mahdollisimman tarkka pienillä kuristintehoilla, koska hinnoittelua ei ole mielekäästä tehdä sovitteeseen perustuen suuremmilla ja kalliimmilla kuristimilla.

Kuvassa 30 on esitettyä kuristimen valmistuskustannus kompensointitehon funktiona rajattuna alle 5000 kVAr, mutta yli 5 kVAr teholuokkaan.



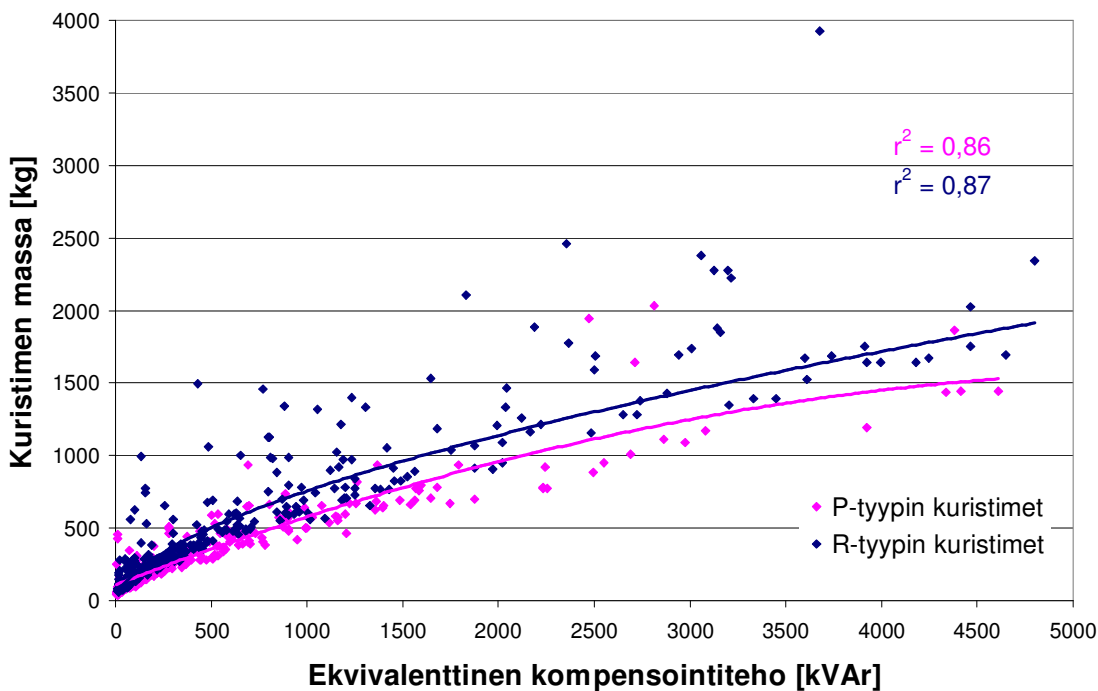
Kuva 30. R-tyyppien kuristimien valmistuskustannus ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona.

Kuvassa 30 esitetyn kuvaajan korrelaatio verrattuna toteutuneisiin kustannuksiin on 0,86. Käyrän voidaan siis olettaa kuvaavan kuristimen kustannuksen kompensointitehon funktiona hyvällä tarkkuudella. Aineiston hajonta kuvaa hyvin valmistusteknologiasta johtuvia muutoksia kustannustasossa. Esimerkiksi käämintäkeskiöiden porrastus on R-tyyppillä osassa vaihteluväliä jopa 400 mm. On selvää, että näin suurella porrastuksella joudutaan tekemään kompromisseja kustannusmielessä optimaalisimpaan rakenteeseen verrattuna.

### 5.3.3 Kuristimen massan ennustettavuus

Kuristimen massan ennustettavuus jo budjetointivaiheessa on tärkeää esimerkiksi perustusten suunnittelun ja mekaanisten voimien arvioinnin kannalta. Kuristimen perustuksen on kestävä kuristimen massan aiheuttamat rasitukset. Massan tietäminen on tärkeää myös arvioitaessa rahtikustannuksia ja muita logistiikkaan liittyviä kysymyksiä. Massa on otettava huomioon esimerkiksi asennuspaikalle johtavan tien kantavuutta arvioitaessa tai kuristimen nostamiseen tarvittavaa laitteistoa valittaessa.

Erityisesti massan tapauksessa ekvivalenttinen teho on paras suure arviointiin. Ekvivalenttinen teho lasketaan yhtälön 35 mukaan ekvivalenttisen virran ja kuristimen reaktanssin avulla. Ekvivalenttinen virta kuvaa parhaiten tarvittavaa käämityksen johtimien poikkipinta-alaa ja siten myös massaa, koska siinä huomioidaan virran yliaaltosisältö. Kuvassa 31 on esitettyä molempien kuristimien valmistusteknologioiden massan ja ekvivalenttisen kompensointitehon välinen riippuvuus.



Kuva 31. P- ja R-tyyppin kuristimen massa ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 31 nähdään, että kuristimen massa on hyvällä tarkkuudella johdettavissa kuristimen kompensointitehosta. Koska käyrästä arvioitavat kuristinkonstruktio sijoittuvat kokoasteikon alkupäähän, on tässä tarkastelussa rajattu pois kaikki yli 5000 kVAr tehoiset kuristimet. Suurten kuristinten sisällyttäminen tarkasteluun huonontaa sovitteiden tarkkuutta asteikon alkupäässä.

Kuvassa esiintyvä hajonta johtuu erikoisista kuristinkonstruktioista. Osassa nimellisjännite on niin suuri, että tarvittava pintamatka ja kuristimen korkeus kasvavat suuriksi. Suuri kuristimen käämin korkeus tarkoittaa huonoja jäähdytysominaisuuksia. Suuri jännite edellyttää myös suuria ja painavia eristimiä. Toisaalta meluvaatimukset saattavat edellyttää korkeaa kuristinta, jotta kuristimen sylintereiden mekaaninen resonanssitaajuus saadaan nostettua korkeammalle taajuudelle.

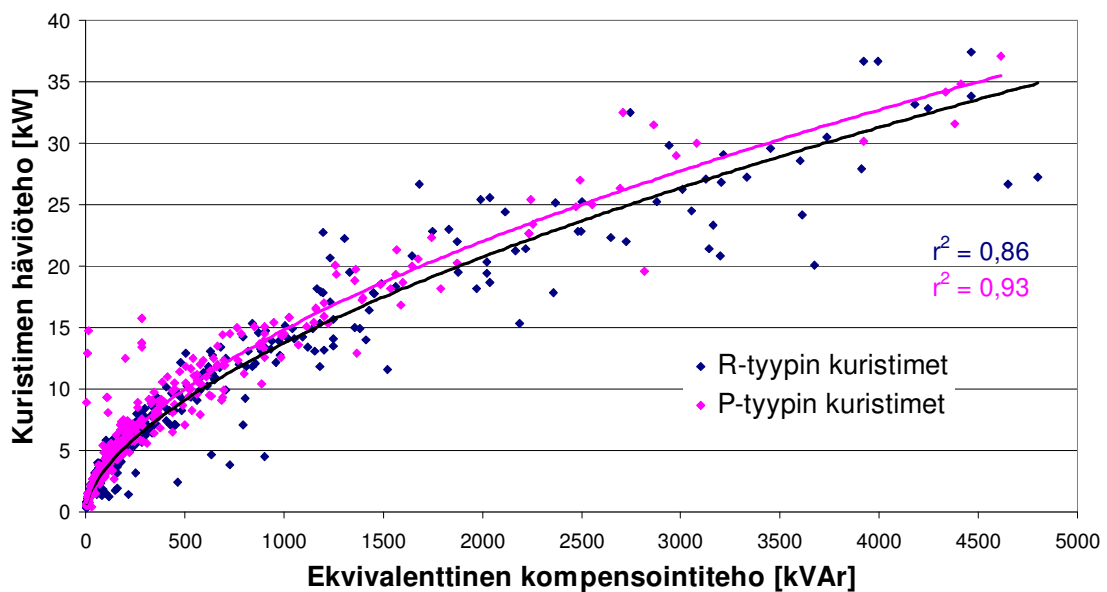
Lopputuloksena kuristimen massan ja kuristimen kompensointitehon välinen yhteys on olemassa ja sen korrelaatio on hyvä. Käyrästä voidaan hyvällä tarkkuudella arvioida kuristimen massa. Käyrästä ei tule käyttää todella suurilla kuristimilla tai kuristimilla joiden tekniset vaatimukset poikkeavat tyypillisistä.

### 5.3.4 Kuristimen häviöiden ennustettavuus

Kuristimen lämpöhäviöteho on tärkeä tieto jo alustavassa suunnitteluvaiheessa. Kuristimen käytönaikaiset kustannukset riippuvat sen lämpöhäviöistä. Tyypillisesti sähkön siirto- ja jakeluliiketoiminnassa häviöillä on suuri merkitys. Teollisuudessa häviötehon suuruus ei ole yleensä merkittävä, vaan tärkeämpää on saada tarvetta vastaava tuote mahdollisimman pienillä investointikustannuksilla.

Kuristimen lämpöhäviöteho on merkittävä myös sisäasennuksessa. Jos kuristin asennetaan suljettuun tilaan, on tilan ilmanvaihdon toteutus suunniteltava huolellisesti. Ilmanvaihdon tulee pitää tilan lämpötila kuristimelle sopivana. Kuristimelle on sopimusvaiheessa määritetty suurin sallittu käyttölämpötila, jota ei saa ylittää.

Lämpöhäviöitä ennustettaessa käytettiin hyväksi ekvivalenttista tehoa, koska siinä huomioidaan yliaallot. Jokaiselle kuristinkonstruktioille oli saatavissa suunnitteluvaiheessa määritetyt laskennalliset lämpöhäviöt. Aineistosta jätettiin pois alle 5 kVAr ja yli 5000 kVAr kuristimet, jotta sovitte kuvaisi mahdollisimman hyvin haluttua joukkoa. Kuvassa 32 on esitetty kuristimen häviöteho ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona.



Kuva 32. P- ja R-tyypin kuristimien häviöteho ekvivalenttisen kompensointitehon funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 32 nähdään, että kuristimien lämpöhäviötehon ja kuristimen kompensointitehon välillä on selvä riippuvuus ja sen korrelaatio on hyvä. Budjettihinnoittelua varten käyrä kattaa tarpeellisen laajan tehoalueen. Suuremmilla tehoilla kuristin on laskettava tarkemmin, jotta häviötehoa voidaan arvioida tarvittavalla tarkkuudella.

Kuvassa 32 voidaan havaita hajontaa molempien valmistusteknologioiden kuristimien arvoissa. Hajonta on seurausta häviöarvostuksista ja erikoisista kuristinkonstruktioista. Mikäli asiakkaalla on ollut tarpeena saada pidettyä kuristimen lämpöhäviö mahdollisimman pienenä, näkyy tämä kuvassa tavallista pienempinä häviöinä. Kompensoin-

titehoon nähden sovitteita merkittävästi suuremmat häviöt esiintyvät kuristimilla, joilla on huomattavan pieni induktanssi ja suuri virta. Lämpöhäviöt ovat suoraan verrannollisia virran toiseen potenssiin, joten virran kasvaminen suurentaa häviötehoa merkittävästi. Kuristimen vaihtovirtaresistanssi kasvaa rinnakkaisten johtimien määrän kasvaessa. Häviöteho kasvaa enemmän kuin virran neliöön verrannollisesti vaihtovirtaresistanssin kasvun johdosta.

### 5.3.5 Kuristinkonstruktion optimointi tunnuslukujen pohjalta

Tulosten perusteella ilmasydämisen kuristimen konstruktion tunnusluvut voidaan määrittää suunnittelun lähtötietojen perusteella hyvällä tarkkuudella pienille ja keskisuurille kuristimille. Kuristimen suunnitteluun tarvittavien parametrien pohjalta voidaan ennustaa konstruktion kustannukset, häviöt ja massa. Tietoja voidaan käyttää alustaviin tarjouskutsuihin ja varsinaisen tarjouksen optimointiin.

Kuristin mitoitetaan aina asiakkaan vaatimusten mukaan. Kaikki kuristinkonstruktiot ovat yksilöllisiä, eikä samaa konstruktioita yleensä valmisteta tai tarjota kahdesti. Kun asiakkaalle lasketaan kuristimesta tarjous, täytyy suunnittelu aloittaa aina alusta. Koska valmistettujen kuristimien konstruktioita voidaan pitää lokaaleina optimeina, aineiston voidaan olettaa esittävän optimaalisia konstruktioita. Oletus aineiston konstruktioiden optimaalisuudesta perustuu siihen, että asiakas on valinnut kyseisen kuristinkonstruktion tarjouskilpailun perusteella. Konstruktio on siis ollut kustannuksiltaan tai teknisesti kilpailijoiden tuotteisiin verrattuna parempi. Markkinataloudessa kustannukset ovat kuitenkin yleensä määräävä tekijä, joten voidaan olettaa, että aineiston kuristimet edustavat kustannusten kannalta optimaalista konstruktioita.

Tunnuslukujen pohjalta määritettyjen käyrästöjen pohjalta on mahdollista tarkistaa, sopiiko laskettu konstruktio käyrille. Mikäli kuristimelle ei ole erityisvaatimuksia, merkittävä poikkeama käyrästön arvoista ylöspäin merkitsee vähemmän optimaalista rakennetta. Kuristimen konstruktioita on syytä muuttaa siten, että päädytään lähemmäs käyrästön arvoja. Käyrästöjen avulla myös vähemmän kokenut suunnittelija voi verrata konstruktion tunnuslukuja optimaalisten konstruktioiden joukkoon. Vertailun avulla voidaan päätellä, onko suunnittelussa konstruktiossa parannettavaa.

Suunnittelun konstruktion ja käyrästöjen välinen vertailu kannattaa rajoittaa keskijännitekuristimiin, alle 35 kV jännitetasoon. Suurjännitteellä kuristimen käämistä on tehtävä korkea. Korkea käämi heikentää kuristimen jäähdytysominaisuuksia ja siten suurentaa tarvittavaa poikkipinta-alaa. Suurjännitekuristimista tulee aina kalliimpia kuin keskijännitekuristimista. Aineiston hajonta johtuu osittain juuri tästä seikasta. Toinen rajoite on suuri kuristimen kompensointiteho. Käyrästöjä ei voi soveltaa kuristimiin, joiden kompensointiteho on yli 5 MVar. Yhteenvetona käyrästöjen avulla saavutetaan paras tulos suodatin-, vaimennus- ja sarjakuristimille keskijännitteellä.

Analyysointi tehtiin Microsoft Excelillä, jotta aineiston päivittäminen olisi tulevaisuudessa helpompaa. Saadut käyrästöt voidaan päivittää helposti tuomalla uudet kustannustiedot toiminnanohjausjärjestelmästä. Käyrästöjen helppo päivitettävyyden on edellytys tutkimustietojen hyödyntämiseen ALSTOM Grid oy:n liiketoiminnassa.

## 5.4 Kuristimen geometrian optimointi

Ilmasydäminen kuristin suunnitellaan aina tapauskohtaisesti asiakkaan vaatimusten mukaan. Normaalisti samaa kuristinkonstruktioita ei käytetä kahta kertaa alustavassa tarjousvaiheessa tai lopullisessa tuotantovaiheessa. Koska konstruktio on aina suunniteltava tapauskohtaisesti, on tärkeää löytää konstruktion parametrien ja asiakkaalta saatavien lähtötietojen välinen riippuvuussuhde.

Riippuvuussuhteiden tulee olla sellaisia, että tyypillisten lähtötietojen avulla saadaan määritettyä kuristimen lopullisen rakenteen tärkeimmät parametrit. Aineiston kuristimet edustavat omalta osaltaan optimaalisia konstruktioita, joten niiden avulla määritettyjen yhtälöiden avulla voidaan olettaa saavutettavan ainakin osittain optimoitu lopputulos.

Konstruktion geometrian kannalta tärkeimmät parametrit ovat kuristimen käämintäkeskiön halkaisija ja käytetty käämintänippu sekä käämin poikkipinta-ala. Jos edellä mainitut parametrit tiedetään, voidaan esittää aineiston perusteella parhaat vaihtoehdot kuristimen konstruktioiksi. Tulosten perusteella ei voida määrittää konstruktioita yksikäsitteisesti, sillä käämintänipun lankamäärä ja käämintäkeskiön halkaisija riippuvat molemmat induktanssista.

Optimoinnin tarkoituksena on auttaa oikean käämintäkeskiön ja nipun valinnassa sekä vähentää suunniteltujen konstruktioiden hajontaa. Koska samoilla lähtötiedoilla voidaan päätyä hyvinkin erilaisiin geometrioihin, on yhtenäistämislle tarvetta. Optimoinnin keskeisin tavoite on kuristimen taloudellisimman geometrian valinnan helpottaminen.

### 5.4.1 Kuristimen konstruktion suunnittelusekvenssi

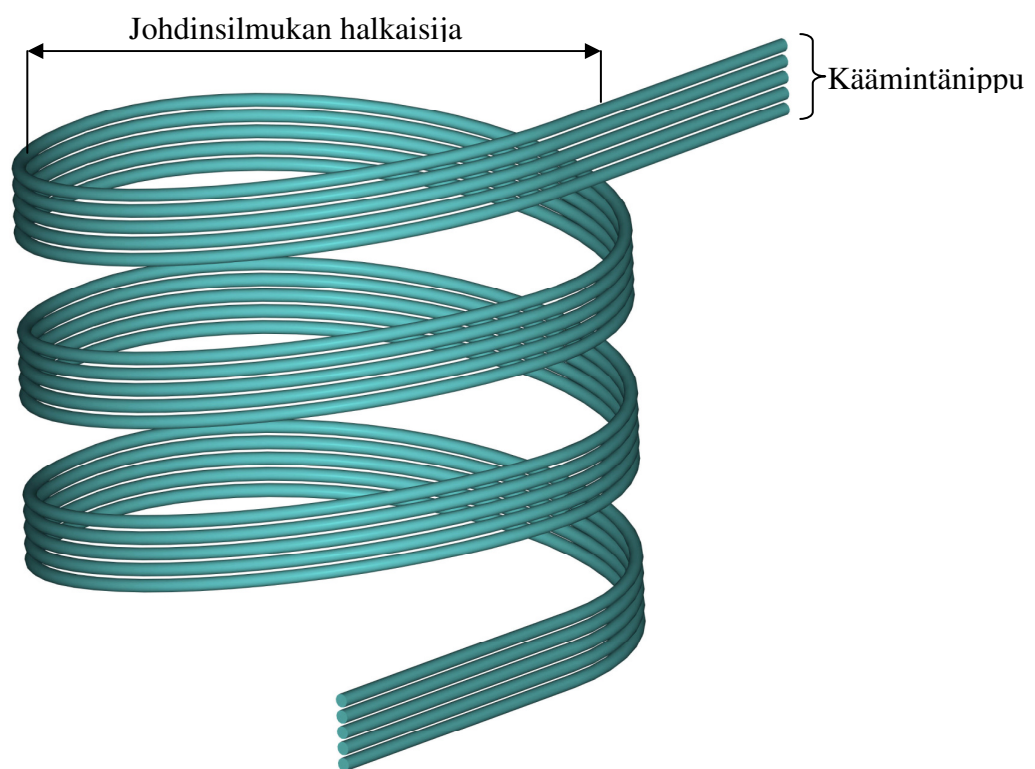
Kuristimen konstruktion suunnitteluun tarvitaan asiakkaalta tietyt kaikille tyypeille yhteiset lähtötiedot. Tässä keskitytään kaikille kuristintyypeille yhteisiin parametreihin ja lähtötietoihin, koska optimointi tehdään koko aineiston pohjalta. Jos keskityttäisiin joihinkin tiettyihin kuristintyypeihin, jäisi aineisto pieneksi ja optimoinnin tulos ei olisi riittävän kattava.

Kaikille kuristintyypeille yhteisiä konstruktion geometriaa määrääviä parametreja ovat induktanssi, nimellisvirta ja nimellisjännite. Induktanssi riippuu kuristimen käämin halkaisijasta ja kierrosmäärästä. Halkaisijaa suurentamalla kuristimen induktanssin muodostamiseen tarvittava kierrosmäärä vähenee ja samaan käämikorkeuteen vaaditaan suurempi nousu. Nousua muutetaan käämintänipun lankamäärää muuttamalla. Nimellisvirta määrää kuristimen rinnakkaisten johtimien määrän, eli poikkipinta-alan.

Nimellisjännite määrittää kuristimen eristystason. Kuristimen johdinten eristemateriaali kestää tietyn hetkellisen ylijännitteen ennen läpilyöntiä. Eristystaso määrää suurimman hetkellisen ylijännitteen suuruuden ja kuristimen testauksessa käytettävän koejännitteen. Kuristimen käämin korkeus on oltava riittävän suuri, jotta sen yli ei tapahdu ylilyöntiä eristystason määräämällä jännitteellä. Toisaalta kuristimen käämissä on oltava riittävä määrä kierroksia, jotta kierrosten välille ei muodostu liian suuria ylijännitteitä ja läpilyöntiä.

Kuristimen käämin kierrosmäärä määräytyy halutun induktanssin ja käämityksen johdinsilmukan halkaisijan mukaan. Jos kuristimen käämityksessä on useita päällekkäisiä johdinkerroksia, on johdinsilmukan halkaisija sisäkerroksissa pienempi kuin ulkokerroksissa. Johdinsilmukan halkaisijan kasvaessa saman induktanssin muodostumiseen tarvittava kierrosmäärä vähenee. Näin ollen käämityksen johdinkerrosten korkeus suurempi sisäkerroksissa kuin ulkokerroksissa.

Kuristimen käämin korkeus riippuu paitsi kierrosmäärästä, myös käämityksen noususta. Nousua voidaan muuttaa karkeasti muuttamalla käämintänippua. Kuvassa 33 on esitetty pelkistetty kuristimen käämityksen rakenne, josta selviää mitä käämintänipulla tarkoitetaan. Kuvassa sähköisten kierrosten johtimien väliä on liioiteltu havainnollisuuden lisäämiseksi.



Kuva 33. Pelkistetty kuva kuristimen käämistä, jossa sähköisen kierroksen muodostaa neljän johtimen käämintänippu.

Kuristimen konstruktion suunnittelu aloitetaan valitsemalla käämintäkeskiö, eli kuristimen sisähalkaisija ja käytettävä käämintänippu, eli kuristimen sähköisessä kierroksessa rinnakkain kytkettyjen johtimien lukumäärä. Ensimmäiseksi tehdään alkuarvaus käämintäkeskiölle sekä käämintänipulle. Seuraavaksi suoritetaan geometrian optimointi iteroimalla. Iteroinnissa vaihdellaan käämintäkeskiön halkaisijaa ja käämintänipun johtimien määrää, kunnes tulokseksi saadaan taloudellisin parametrien yhdistelmä. Tulokseksi saadun konstruktion tulee täyttää jännitteen asettamat ehdot, eli käämin korkeuden ja kierrosmäärän on oltava riittävän suuret. Tässä vaiheessa käämintäkeskiön halkaisija ja käämintänippu eivät vielä ole lopullisia.

Kun kuristimen käämintäkeskiön halkaisija ja nipun johtimien lukumäärä on alustavasti valittu, lisätään kuristimen käämityksen poikkipinta-alaa, kunnes käämin lämpenemät asettuvat IEC 60076-6 asettamiin rajoihin. Kuristimen käämi jaetaan sylintereihin jäähditysominaisuuksien parantamiseksi. Koska kuristimen halkaisija kasvaa sisältä ulospäin ja käämissä on jäähditysvälejä, täytyy kuristimen käämintänipun lankojen määrää muuttaa sylintereittäin. Sisemmissä sylintereissä on enemmän kierroksia kuin ulommissa.

Kun käämityksen johtimien poikkipinta-ala, käämintäkeskiön halkaisija ja käämintänippujen johdinten lukumäärät sylintereittäin on valittu, lasketaan kuristimen johtimien kierrosmäärät tarkemmin. Näin laskettu konstruktio on valmis iterointiin. Käämintäkeskiön halkaisijaa ja nipun johdinmäärää vaihtelemalla pyritään löytämään kustannuksiltaan kaikkein edullisen konstruktio. Käsien tehtävään lopulliseen kustannusoptimointiin tilastollisella analyysillä on mahdotonta saada apua, mutta alustavan konstruktion parametrien saaminen suoraan lähtötiedoista säästää aikaa ja yhtenäistää tarjottujen konstruktioiden parametreja.

#### 5.4.2 Kuristimen optimaalinen käämintäkeskiö

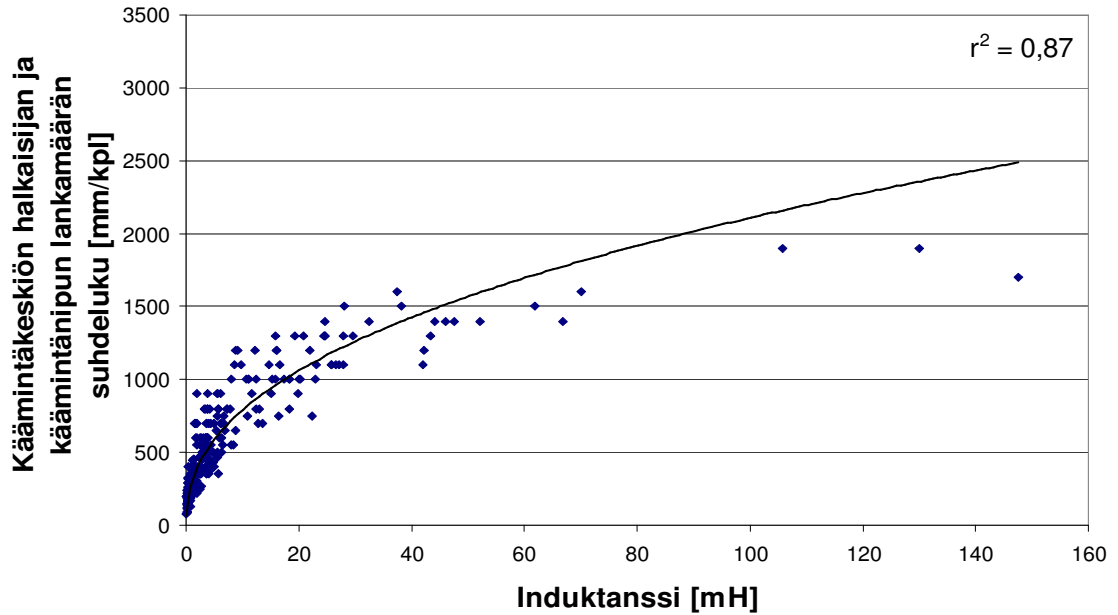
Aineiston pohjalta pyrittiin määrittämään kuristimen optimaalinen käämintäkeskiön halkaisija. Käämintäkeskiön halkaisija riippuu kuristimen induktanssista ja käämintänipun johdinmäärästä. Tutkimuksen mukaan induktanssin avulla voidaan määrittää kuristimen mahdolliset käämintänipun johdinten lukumäärän ja käämintäkeskiön halkaisijan yhdistelmät. Parametrit riippuvat toisistaan ja tapauskohtaisesti raja-arvot, kuten jännite, voivat sulkea pois tiettyjä yhdistelmiä. Aineiston avulla ei voida määrittää taloudellisinta vaihtoehtoa suoraan, mutta mahdolliset vaihtoehdot voidaan kartoittaa.

Paras korrelaatio saatiin käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun johtimien lukumäärän suhdeluvulle induktanssin funktiona. Seuraavassa on määritelty tutkimuksessa käytetty suhdeluku.

$$\text{Suhdeluku} = \frac{\text{Käämintäkeskiön halkaisija}}{\text{Käämintänipun johdinmäärä}} \quad (36)$$

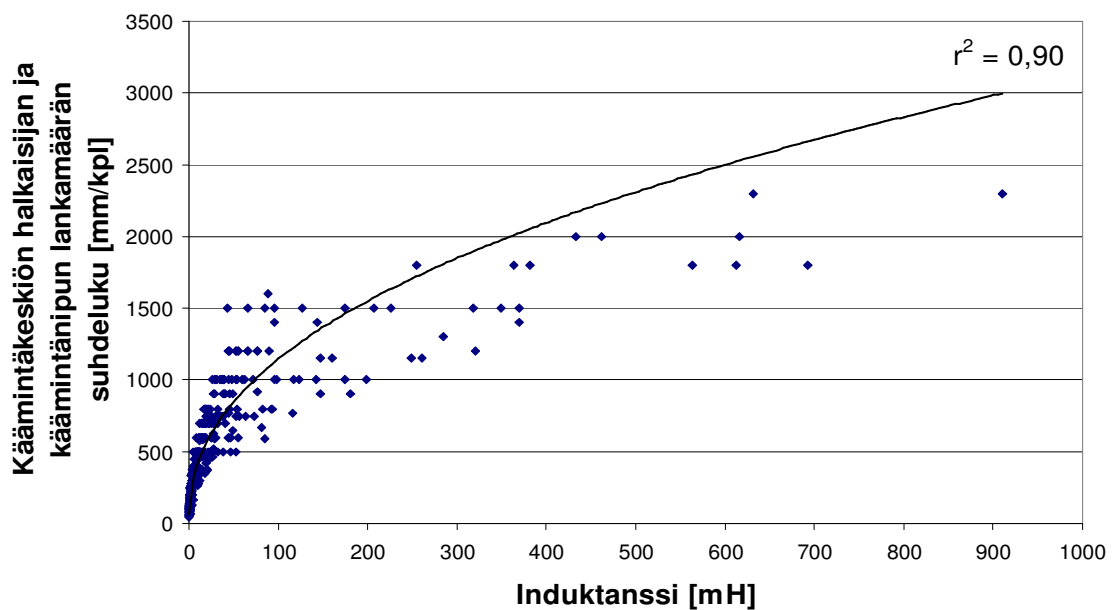
Kuvassa 34 on esitetty P-tyypin kuristimen käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun johdinten lukumäärän osamäärä induktanssin funktiona.





Kuva 34. P-tyypin kuristimen käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintäniipun johdinten lukumäärän suhdeluku induktanssin funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 34 nähdään, että kuristimen käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintäniipun lankojen määrän suhdeluvulla on vahva riippuvuus induktanssista. Riippuvuudet on löydetävissä myös R-tyypin kuristimille. Kuvassa 35 on esitetty R-tyypin kuristimien käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintäniipun lankojen määrän suhdeluku induktanssin funktiona.



Kuva 35. R-tyypin kuristimen käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintäniipun johdinten lukumäärän suhdeluku induktanssin funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 35 nähdään, että R-tyypin kuristimen käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun lankojen määrän suhdeluvulla on vahva riippuvuus induktanssista. Kuvien 34 ja 35 y-akselin arvoista voidaan määrittää kuristimen mahdolliset käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun lankojen lukumäärän vaihtoehdot. Mahdolliset vaihtoehdot riippuvat toisistaan ja ne voidaan määrittää yhtälön 36 avulla. Esimerkiksi suhdeluvun ollessa 1000 mm/kpl vaihtoehdot ovat: 1000 mm käämintäkeskiön halkaisija yhden johtimen nipulla, 2000 mm käämintäkeskiön halkaisija kahden johtimen nipulla tai 4000 mm käämintäkeskiön halkaisija neljän johtimen nipulla.

Aineistossa esiintyvää hajontaa aiheuttavat monet eri parametrit. Hajonta heikentää yksikäsitteisen optimaalisen tuloksen saavuttamista, mutta korrelaation ollessa hyvä voidaan olettaa, että tulos on niin lähellä optimaalista kuin aineiston pohjalta on mahdollista. Rajaamalla aineistoa voidaan hajontaa pienentää rajatulle tarkastelujoukolle, mutta tässä työssä keskitytään kokonaisuuden optimointiin, eli rajausta ei tehdä.

Tutkimuksessa käytetty menetelmä aiheuttaa lähtökohtaisesti tuloksiin hajontaa. Käämintänipuna käytetään kuristimen kaikkien sylinterien johdinnippujen keskiarvoa, vaikka todellisuudessa nipun johtimien määrä muuttuu sylinterien välillä. Keskimääräinen nippu aiheuttaa tuloksiin monisynterisillä käämeillä liian suuren suhdeluvun. Tämä näkyy kuvissa 34 ja 35 aineiston kasaantumisenä sovitteen yläpuolelle pienten induktanssien alueella. Vaikutus on suurin juuri pienillä induktanssin arvoilla, koska silloin käämintänipun lankojen määrä ja nipun koon vaihtelu sylinterien välillä on suurimmillaan.

P-tyypin kuristimilla johdinköysi koostuu 9, 10 tai 11 johdinlangasta. Kaikki köysi-vaihtoehdot ovat korkeudeltaan erilaisia, joten sama käämintänipun johdinten määrä ei välttämättä tarkoita samaa nousua kaikissa konstruktioissa. R-tyypin kuristimissa käytetään eripaksuisia johdinlankoja, joten sama käämintänipun johdinten lukumäärä tarkoittaa eri kuristinkonstruktioissa erilaista nousua. Johdinlankojen vaihtelu näkyy tuloksissa hajontana. Suurilla induktanssinarvoilla kuvasta 34 havaittava hajonta sovitteen alapuolella johtuu juuri pienemmästä johtimen halkaisijasta.

Nimellisjännite aiheuttaa hajontaa, koska käämin yli vaikuttava jännite ja kierrosten välinen jännite voi rajata mahdollisia käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun johdinten lukumäärän yhdistelmiä pois. Ilmastolliset ympäristöolosuhteet voivat vaatia kuristimelta normaalia suurempaa ryömintämatkaa ja pienennettyä jänniterasitusta. Kuristimesta tulee siten normaalia korkeampi, eikä käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun johdinmäärän suhde ole koko aineiston perusteella optimaalinen.

Lyhytaikainen virta, kuten oikosulkuvirta, voi aiheuttaa käämiin suuria mekaanisia rasituksia. Rasituksia voidaan pienentää valitsemalla kuristimen käämintäkeskiön halkaisija tavallista pienemmäksi ja suunnittelemalla kuristin normaalia korkeammaksi. Tällöin kuristimen konstruktio ei välttämättä sovi koko aineistoa kuvaavaan sovitteeseen, mikä näkyy tuloksissa hajontana.

Asiakaslähtöiset vaatimukset voivat edellyttää optimaalisesta poikkeavaa konstruktiota. Esimerkiksi kuristimen äänitasoon liittyvät vaatimukset johtavat normaalista poikkeavaan konstruktion. Äänitasoa minimoitaessa kuristimen mekaaninen resonans-

sitaajuus tulee saattaa mahdollisimman kauas yliaaltotaajuuksista ja niiden kerrannaisista. Tämä tarkoittaa yleensä pientä käämintäkeskiön halkaisijaa ja suurta käämikorkeutta. Tällöin kuristimen resonanssitaajuus saadaan mahdollisimman suurelle taajuudelle, ja siten kauas sähköverkossa yleensä esiintyvistä yliaaltotaajuuksista. Äänitason minimoinnista johtuva epäedullinen kuristinkonstruktio näkyy tuloksissa hajontana.

Kuristimen asennuspaikalla voi olla tilavaatimuksia. Tällöin kuristimen konstruktio on suunniteltava siten, että kuristin sopii sille asetettuun tilaan. Asennustilan rajoitteista johtuen kuristin voidaan joutua suunnittelemaan tavallista pienemmäksi. Tämä johtaa optimirakenteeseen verrattuna pieneen käämintäkeskiön halkaisijaan ja suureen sylinterimäärään.

Kuristimen asennustapa aiheuttaa myös tuloksiin hajontaa. Pällekkäin asennettaessa kuristimen konstruktio pitää suunnitella matalammaksi kuin asennettaessa kuristimet maahan kukin vaihekuristin erikseen. Torniksi asennettuna kuristimen tukieristimiin kohdistuu tuulen vaikutuksesta suuremmat rasitukset kuin asentamalla kuristin maahan kukin vaihekuristin erikseen. Pällekkäin asennus karsii vaihtoehdoista pienimmät käämintäkeskiön halkaisijat pois.

Kuristimien valmistuksessa käytetyt käämintäkoneet ja niiden rajoitteet aiheuttavat oman osansa hajonnasta. Kaikilla käämintäkoneilla ei ole mahdollista valmistaa kaikkia mahdollisia variaatioita. Käämintäkoneilla on rajoitteina esimerkiksi kuristimen massa. Kuristimen massan ollessa suuri, ei kuristimen käämintäkeskiön halkaisija voi olla pieni. Mahdolliset käämintäkeskiövaihtoehdot ovat rajalliset nippujen johdinmäärän ollessa toinen määräävä parametri.

Käämintäkeskiön halkaisija voi olla muuhun aineistoon sopimaton myös tuotannon optimoinnin seurauksena. Suurta sarjaa valmistettaessa on eduksi, että kuristin sopii mahdollisimman monelle käämintäkoneelle. Tämä asettaa käämintäkeskiön halkaisijan valinnalle omat rajoitteensa sillä eri koneiden käämintäkeskiövaihtoehdot ovat ainoastaan osittain limitetyt. Toisaalta käämintäkoneiden kuormitustilanteesta johtuen kuristimen konstruktioita voidaan joutua muuttamaan, jotta käämintäkoneetta tai tuotantoteknologiaa voidaan vaihtaa toiseen.

Taloudellisimman kuristinkonstruktio lopullinen valinta iteroimalla eri käämintäkeskiövaihtoehtojen ja käämintänippujen lankamäärien välillä voi johtaa erilaisilla lähtötiedoilla erilaiseen konstruktioon. Jos esimerkiksi suurentamalla käämintäkeskiötä saavutetaan yksisylinterinen konstruktio kaskisylinterisen sijaan, saavutetaan yleensä taloudellisempi lopputulos. Käämintäkeskiön suurentaminen tarpeettomasti aiheuttaa kuitenkin kuristimen käsittelyyn ongelmia ja lisää valmistukseen käytettävää aikaa. Työn yksikköhinnan muutokset voivat myös muuttaa optimaalisen konstruktion geometriaa ohjaten joko suurempaan tai pienempään käämintäkeskiön halkaisijaan.

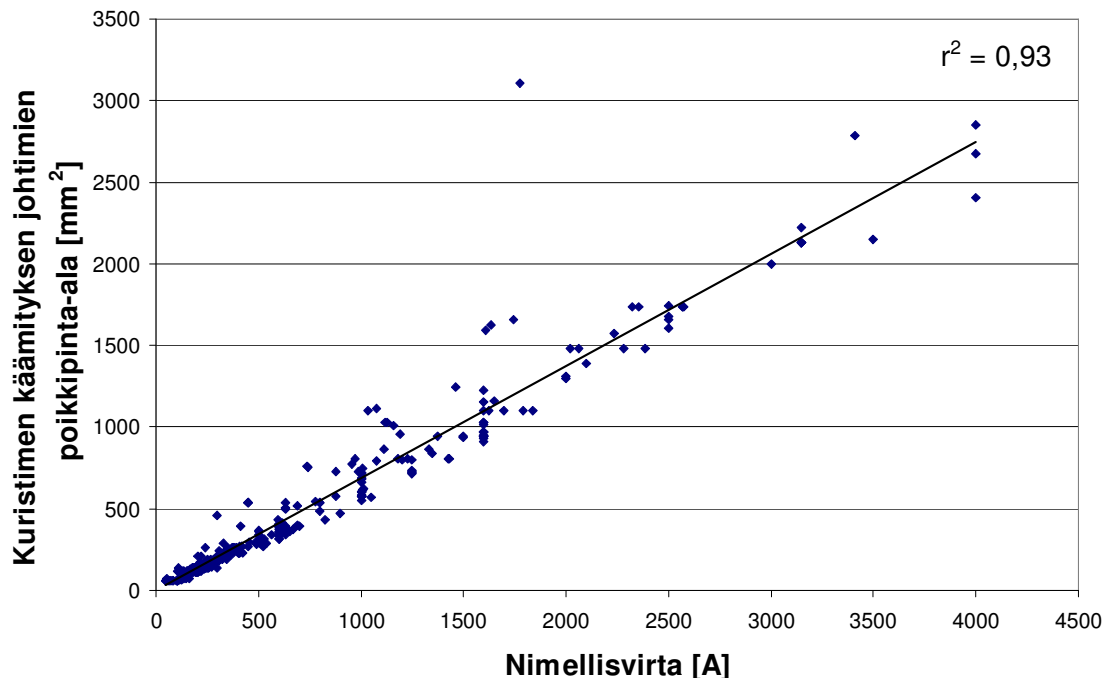
Optimaalisen käämintäkeskiön halkaisijan valintaan tilastollisen materiaalin pohjalta liittyy monia epävarmuustekijöitä. Aineiston perusteella voidaan kuitenkin määrittää käämintäkeskiön halkaisijan ja käämintänipun lankojen lukumäärän vaihtoehdot hyvällä tarkkuudella. Kuvista 34 ja 35 nähdään, että sovitteiden korrelaatio on hyvä ja hajonta ei siten estä johtopäätöksien tekemistä aineiston pohjalta.

### 5.4.3 Kuristimen käämityksen johtimien poikkipinta-ala

Kuristimen käämityksen johtimien poikkipinta-alan ja nimellisvirran välillä on oltava riippuvuus. Kuristimen läpi kulkeva virta määrää yhdessä käämityksen resistanssin kanssa kuristimen lämpöhäviötehon. Koska kuristimen pinnasta pystyy siirtymään ainoastaan tietty määrä lämpöhäviötehoa ympäröivään ilmaan, on häviötehon määrää pystytävä kontrolloimaan jollain parametrilla. Virtaa ei voida pienentää, joten ainoastaan käämin resistanssia pienentämällä voidaan häviötehoon vaikuttaa. Käämityksen resistanssia voidaan pienentää kytkemällä useampi johdin rinnakkain, eli suurentamalla käämityksen poikkipinta-alaa.

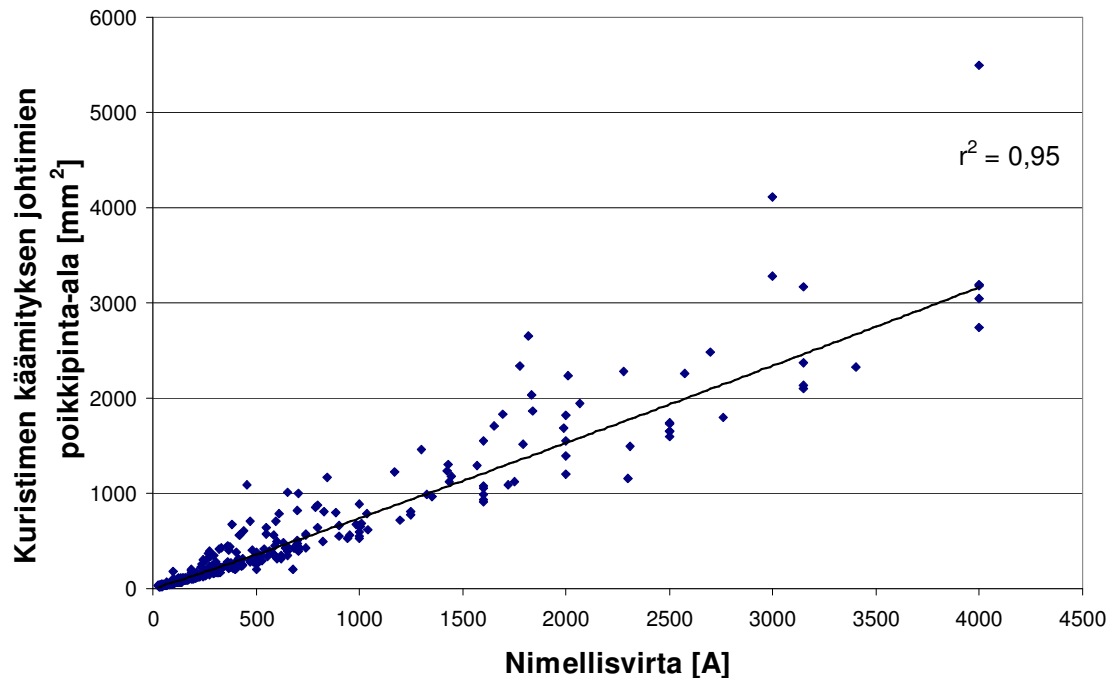
Lähtökohtaisesti käämityksen poikkipinta-alan määrittäminen nimellisvirran funktiona aiheuttaa tuloksiin epävarmuutta. Kuristimien poikkipinta-ala ei ole riippuvainen ainoastaan nimellisvirrasta. Esimerkiksi lyhytaikainen vikatilanteen virta voi määrätä käämityksen johtimien poikkipinta-alan nimellisvirran sijaan. Toisaalta asiakaslähtöisillä vaatimuksilla on oma vaikutuksensa. Kuristimen lämpöhäviöille asetetut vaatimukset voivat edellyttää kustannusten kannalta liian suurta käämityksen johtimien poikkipinta-alaa. Tällöin nimellisvirrasta seuraa muuhun tarkastelujoukkoon verrattuna liian suuri käämityksen johtimien poikkipinta-ala.

Käämityksen johtimien poikkipinta-alan ja nimellisvirran välillä on lineaarinen riippuvuus. Riippuvuus voidaan selvästi havaita aineiston avulla. Kuvassa 36 on esitetty P-tyypin kuristimien käämityksen poikkipinta-ala nimellisvirran funktiona.



Kuva 36. P-tyypin kuristimien käämityksen johtimien poikkipinta-ala nimellisvirran funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokertoimen neliö.

Kuvasta 36 nähdään, että P-tyyppin kuristimien poikkipinta-ala riippuu lineaarisesti nimellisvirrasta, kuten teorian pohjalta voidaan odottaa. Kuvassa 37 on esitettyä R-tyyppin kuristimien käämityksen johtimien poikkipinta-ala nimellisvirran funktiona.



Kuva 37. R-tyyppin kuristimien käämityksen johtimien poikkipinta-ala nimellisvirran funktiona, missä  $r^2$  on pearsonin korrelaatiokerroimen neliö.

Kuvasta 37 nähdään, että R-tyyppin kuristimien johtimien poikkipinta-ala riippuu lineaarisesti nimellisvirrasta. Kuvien 36 ja 37 sovitteiden korrelaatiokerroin on hyvä. Voidaan olettaa, että uuden kuristinkonstruktion johtimien poikkipinta-alan tulee osua kuvattujen sovitteiden välittömään läheisyyteen. Mikäli poikkipinta-alassa on merkittävä poikkeama valmistettuihin kuristimiin verrattuna, on poikkeamalle löydettävä jokin selitys. Tyypillisesti kuristimen johtimien poikkipinta-alaa kasvattavat erilaiset asiakaslähtöiset vaatimukset, kuten melu- tai häviövaatimukset. Toisaalta suuri nimellisjännite tai asennuspaikan saasteisuus voivat edellyttää kuristimelta suurta pintamatkaa. Kuristimen pintamatka edellyttää korkeaa käämiä, joka huonontaa jäähdytysominaisuuksia ja lisää siten tarvittava poikkipinta-alaa.

Kuvissa 36 ja 37 esiintyvä hajonta sovitteiden arvoista ylöspäin johtuu pääasiassa häviövaatimuksista. Toinen selittävä seikka on kuristimen käämin korkeus. Mikäli käämi on poikkeuksellisen korkea, on käämin johtimien poikkipinta-ala suurempi kuin matalammalla käämillä. Kuristimen käämiltä vaaditaan poikkeuksellista korkeutta suurella eristystasolla tai äänitasoa optimoitaessa. Kuristimen käämin korkeuden lisääminen kasvattaa sen mekaanista resonanssitaajuutta. Koska merkittävimmät yliaaltovirtojen taajuudet ovat yleensä pieniä, alle 500 Hz, ovat niiden tuottamat äänet taajuudeltaan alle

1000 Hz. Käämin korkeuden lisääminen pienentää äänitasoa, koska tyypillisesti mekaaninen resonanssitaajuus saadaan siirrettyä yli 1000 Hz alueelle.

Pienillä nimellisvirta-arvoilla hajonta selittyy vaimennuskuristimien oikosulkulämpenemällä. Vaimennuskuristimilla on tyypillistä, että käämityksen johtimien poikkipinta-alan määrää oikosulkutilanteen, eikä nimellisvirran aiheuttama lämpenemä. Toisin sanoin kuristimessa on nimellisvirtaan verrattuna liian suuri poikkipinta-ala.

#### 5.4.4 Kuristimen geometrian optimointi tulosten pohjalta

Tulosten perusteella ALSTOM Grid oy:n valmistamien ilmasydämisten kuristimien konstruktio on ennustettavissa hyvällä tarkkuudella suunnittelun lähtötietojen perusteella. Tuloksissa on hajontaa, mutta hajonnan syyt pystytään selittämään. Tuloksina saatujen sovitteiden korrelaatio aineiston kanssa on niin hyvä, että alustavassa vaiheessa voidaan konstruktion tunnuslukuja arvioida ilman tarkempaa suunnittelua.

Tulosten perusteella voidaan kuristimen optimaaliselle konstruktiolle asettaa tietty käämintäkeskiön ja käämintänipun suhde. Suhdeluvun avulla voidaan suunnittelun lähtötiedoksi valita mahdollisimman taloudellinen vaihtoehto. Suhdeluvun avulla ei voida yksikäsitteisesti valita optimaalista käämintäkeskiötä, mutta optimirakenteen hakemiseen käytetty iterointiprosessi helpottuu merkittävästi. Toinen merkittävä etu on, että eri suunnittelijoiden suunnittelemat konstruktio tulevat olemaan lähempänä toisiaan. Ilmasydämisen kuristimen konstruktio voidaan suunnitella monella eri tavalla, joten taloudellisimman vaihtoehdon löytäminen on haastavaa.

Kuristimen käämityksen johtimien poikkipinta-ala voidaan ennustaa tarkasti kuristimen nimellisvirran perusteella. Poikkipinta-alaa ei voida ennustaa tämän tutkimuksen tulosten pohjalta, mikäli kuristimelle asetetut vaatimukset poikkeavat merkittävästi tavanomaisista. Esimerkiksi vaatimus matalasta äänitasosta tai pienistä lämpöhäviöistä johtaa poikkipinta-alan kannalta epäoptimaaliseen konstruktiin. Kuristimen virran epätyypillinen spektri voi myös edellyttää aineistoon verrattuna poikkeavaa poikkipinta-alaa. Kuristimen vaihtovirtaresistanssi kasvaa eksponentiaalisesti taajuuden kasvaessa, joten korkeilla taajuuksilla esiintyvät virtakomponentit aiheuttavat suuria lämpöhäviöitä. Koska virtaspektriä ei voida muuttaa, lämpöhäviöiden pienentämiseksi kuristimen resistanssia on pienennettävä. Resistanssin pienentäminen edellyttää poikkipinta-alan kasvattamista.

Kokonaisuutena kuristimen konstruktio voidaan normaalitapauksessa selvittää varsin tarkasti tilastojen pohjalta. Kuristimen optimirakenne näkyy tilastoista selvästi ja kaikkien tutkittujen riippuvuuksien korrelaatio on hyvä. Tuloksissa esiintyvä hajonta on seurausta erilaisista erikoisvaatimuksista ja epäjatkuvista parametreista, kuten kuristimen käämintäkeskiöstä ja käämintänipusta.

## 6 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin ALSTOM Grid oy:n valmistamia ilmasydämiä kuristimia tilastollisella analyysillä. Tarkastelu tehtiin Microsoft Excel ohjelmiston avulla. Työn tarkoituksena oli löytää valmistettujen kuristimien parametrien avulla riippuvuussuhteita valmistettujen kuristimien ja suunnittelun lähtötietojen välille. Tarkastelussa keskityttiin erityisesti kahden eri valmistusteknologian kannattavuusraja-arvon selvittämiseen ja kuristimen konstruktion optimointiin. Konstruktiosta pyrittiin saamaan selville optimaalinen geometria induktanssin ja kuristimen virran funktiona. Saavutettujen tulosten ja sovitteiden yhtälöiden avulla oli tarkoituksena saavuttaa työkalu kuristimen optimaalisen konstruktion määrittämiseen rajatuilla lähtötiedoilla.

Tutkimuksessa käytetyn aineiston keräämiseen kului työssä huomattavan paljon aikaa. Aineiston tietoja ei ollut saatavissa yhdestä lähteestä, vaan tietoja jouduttiin hakemaan monista eri tiedostoista. Tiedostojen hakuun käytettyjen ohjelmien luominen asetti myös omat haasteensa. Aineiston keräämisen jälkeen seuraava haastava toimenpide tutkimuksessa oli aineiston rajaaminen. Aineistoa pyrittiin rajaamaan siten, että se vastaisi kunkin tutkimuksen osa-aluetta mahdollisimman tarkasti.

Riippuvuussuhteiden löytäminen aineistosta osoittautui haastavaksi. Koska aineisto koostuu useista eri tarkoituksiin valmistetuista kuristimista, kaikkien parametrien välillä ei ole riippuvuussuhteita. Riippuvuussuhteiden alustavaan tutkimukseen käytettiin varianssianalyysiä ja lopullisten tulosten määrittämiseen Excelin tilastollisia työkaluja. Aineistossa esiintyy hajontaa kaikissa tutkituissa tapauksissa, mutta työn tuloksissa esitettyjen riippuvuussuhteiden korrelaatiokertoimet ovat hyviä. Aineistossa esiintyy hajontaa, koska eri käyttötarkoitukseen valmistettujen kuristimien kriittiset mitoitusmekanismit eroavat toisistaan. Hajontaa aiheuttaa myös se, että osa kuristimien konstruktion parametreista ei ole jatkuvia. Esimerkiksi käämintäkeskiön halkaisijaa ei voida valita portaattomasti, vaan portaittain.

Mikäli saavutettuja tuloksia haluttaisiin tarkentaa, täytyisi tarkastelujoukko rajata tarkemmin. Tämä johtaisi väistämättä paloittain määriteltyihin funktioihin. Yhtälöiden tarkkuutta voitaisiin parantaa esimerkiksi jakamalla tarkasteltavat konstruktiot massan tai kompensointitehon mukaan tiettyihin määrittelyalueisiin. Jakamalla aineisto osiin saataisiin parempi korrelaatio tarkasteluvälille. Tarkasteluvälien päätepisteisiin voi kuitenkin muodostua epäjatkuvuuskohtia tai kasvanutta virhettä. Toinen tapa tarkentaa tuloksia olisi jättää aineistosta pois kaikki tavallisuudesta poikkeavat konstruktiot. Tämä edellyttää lisätutkimuksia aineistosta ja epätyypillisten konstruktioiden löytämisestä. Kuristimen konstruktion määrääväksi mitoitusmekanismiksi voi olla esimerkiksi vaatimus ääni-

tasosta tai häviöistä. On selvää, että mikäli mitoitusperusteet eroavat muusta tarkastelujoukosta, näkyy tämä tuloksissa hajontana.

Tutkimuksessa saatujen tulosten pohjalta on mahdollista määrittää kuristimen optimaalinen konstruktio ja valmistusteknologia lähes yksikäsitteisesti suunnittelun lähtötietojen perusteella. Tutkimustulosten perusteella tarvittavat lähtötiedot ovat kuristimen induktanssi ja nimellisvirta. Lähtötietojen perusteella voidaan hyvällä tarkkuudella arvioida kuristimen häviöt, massa, käämintäkeskiön ja käämintänpun suhde, poikkipinta-ala sekä valmistusteknologia.

Tutkimuksessa saavutettiin sille alussa asetetut keskeiset tavoitteet. Oli yllättävää, että kuristimen konstruktio voidaan määrittää todella tarkasti hyvinkin rajallisilla lähtötiedoilla. Kuristimien käyttötarkoitukset ja käyttöolosuhteet eroavat merkittävästi toisistaan, mutta analyysi on silti mahdollista koko aineistosta tietyillä rajauksilla. Tulosten pohjalta kuristimien alustavaa suunnittelua ja konstruktion optimointia voidaan kehittää edelleen. Tutkimuksessa kehitetyt aineiston hakuun käytetyt ohjelmat on toteutettu siten, että niitä on helppo muokata tulevaisuudessa eri tarkoituksiin. Tutkimustulosten pohjalta kehitetään kuristimen optimaalisen konstruktion hakemista auttava työkalu, jota voidaan päivittää parametrien hakuun kehitettyjen ohjelmien avulla.



## LÄHTEET

- [1] Application note: Shunt reactors for voltage control. Esite. Tampere 2006, Nokian Capacitors. 3 s.
- [2] IEC 60076-6. Power transformers – Part 6: Reactors. Genova 2007, International Electrotechnical Commission. 117 s.
- [3] Air-Core Reactors – Dry Type. Esite. 2008, ALSTOM Grid. 8 s.
- [4] Partanen, J. Tasasähkövoimansiirto. Luentomoniste. Lappeenranta 2011, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 33 s.
- [5] Nousiainen, K. Sähkövoimajärjestelmän perusteet. Opetusmoniste. Tampere 2012, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [6] Bastman, J. Sähkövoimajärjestelmän mallintaminen ja analyysi. Luentomuis-tiinpanot. Tampere 2013. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [7] University of Idaho. Thyristor controlled reactor [WWW]. 2013. [Viitattu 13.10.2013]. Saatavissa: [www.ee.uidaho.edu/ee/power/EE529/Lectures/L10/L10.pdf](http://www.ee.uidaho.edu/ee/power/EE529/Lectures/L10/L10.pdf)
- [8] Yliaallot ja kompensointi. Tampere 2006, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 120 s.
- [9] Tarkka, P. & Hietalahti, L. Piirianalyysi 2. Helsinki 2004, Edita. 284 s.
- [10] High volt. Glaninger circuit [WWW]. 2013. [Viitattu 13.10.2013]. Saatavissa: <http://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/3-32-2.pdf>
- [11] IEC 60071-1. Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principales and rules. Genova 2006, International Electrotechnical Commission. 69 s.
- [12] IEC 60909-0. Short-Circuit Currents in Three-phase a.c. Systems - Calculation of Currents. Genova 2001, International Electrotechnical Commission. 137 s.
- [13] IEC 60076-2. Power transformers – Part 2: Temperature rise. Genova 1993, International Electrotechnical Commission. 57 s.

## LIITE 1: R-TYYPIN KURISTIMEN PARAMETRIEN HAUSSA KÄY- TETYN OHJELMAN LÄHDEKOODI

```
Sub haku()

Dim retstring, file_path As String
Dim I As Long
Dim g
Dim b
Dim nimike

    With Application
        .Calculation = xlManual
        .MaxChange = 0.001
    End With
    ActiveWorkbook.PrecisionAsDisplayed = False
    b = 5
    Do While Cells(b, 1).Value <> 0
        g = 2
        Do While Cells(1, g).Value <> 0

            Set fs = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
            file_path = Cells(1, 1).Value & "\ " & Cells(b, 1).Value & ".krp"

            If (fs.fileExists(file_path) = True) Then
                Set A = fs.OpenTextFile(file_path, 1, False)
                I = 1
                Do While A.AtEndOfStream <> True
                    If (I = Cells(1, g).Value) Then
                        Cells(b, g).Value = A.readline

                    Exit Do
                    Else
                        retstring = A.readline
                    End If
                    I = I + 1
                Loop
                A.Close
            End If

            g = g + 1
        Loop

        b = b + 1
    Loop

    With Application
        .Calculation = xlAutomatic
        .MaxChange = 0.001
    End With
    ActiveWorkbook.PrecisionAsDisplayed = False

End Sub
```

## LIITE 2: P-TYYPIN KURISTIMEN PARAMETRIEN HAUSSA KÄY- TETYN OHJELMAN LÄHDEKOODI

```
Sub välilehti()
Application.ScreenUpdating = False

On Error Resume Next
With Application.FileSearch
    .LookIn = ThisWorkbook.Path
    .FileType = msoFileTypeExcelWorkbooks
    .SearchSubFolders = True
    .Execute
    For i = 1 To (.FoundFiles.Count - 1)
        Workbooks.Open .FoundFiles(i)

        Sheets("3VAIHE").Name = "RSP"
        Sheets("TCRUK").Name = "RSP"
        Sheets("SPEK3SF").Name = "RSP"
        Sheets("SPEK3D").Name = "RSP"
        Sheets("SPEK1SF").Name = "RSP"
        Sheets("SPEK1D").Name = "RSP"
        Sheets("SPEK3UK").Name = "RSP"
        Sheets("SPEK1UK").Name = "RSP"

        ActiveWorkbook.Save
        ActiveWorkbook.Close False
    Next
End With

Application.ScreenUpdating = True

End Sub
```

## LIITE 3: R-TYYPIN KURISTIMIEN RAKENTEIDEN HAETUT PARAMETRIIT

Parametri	Parametrin kuvaus
1	Nimikenumero toiminnanohjausjärjestelmästä
2	Induktanssi [mH]
3	Nimellistaajuus [Hz]
4	Nimellisvirta perustaaajuudella [A]
5	Nimellisjännite [kV]
6	Oikosulkuteho kuristimen ensiöpuolella [MVA]
7	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta kuristimen toisiopuolella [kA]
8	Sysäysoikosulkuvirta kuristimen toisiopuolella [kA]
9	Alin mahdollinen ympäristönlämpötila [°C]
10	Ylin mahdollinen ympäristönlämpötila [°C]
11	Nimellinen ryömintämatka [mm/kV]
12	Käyttötaajuinen 1 min ylijännite [kV]
13	Syöksyjännitekokeen jännite [kV]
14	Kuristimen käämin tasavirtaresistanssi [ $\Omega$ ]
15	Ekvivalenttinen virta [A]
16	Nimellisvirta [A]
17	Kuristimen käämin keskimääräinen lämpenemä [°C]
18	Kuumimman pisteen lämpötila [°C]
19	Oikosulkulämpenemä [°C]
20	Kuristimen käämikorkeus [mm]
21	Kuristimen halkaisija [mm]
22	Käämintäkeskiön halkaisija [mm]
23	Kuristimen haaramäärä [kpl]
24	Ristikon haaraprofiilin korkeus [mm]
25	Ristikon päätehaaran paksuus [mm]
26	Kuristimen sylinterimäärä [kpl]
27	Yhden kuristimen induktanssi, jos useita osakeloja [mH]
28	Kuristimen vaihtovirtaresistanssi referenssilämpötilassa [ $\Omega$ ]
29	Referenssilämpötila [°C]
30	Kuristimen käämin tasavirtaresistanssi referenssilämpötilassa [ $\Omega$ ]
31	Kuristimen Rac/Rdc-suhde
32	Häviöt nimellistaajuudella [kW]
33	Kokonaishäviöt [kW]
34	Aritmeettisesti laskettu jänniterasitus [V/mm]
35	Neliösummalla laskettu jänniterasitus [V/mm]
36	Käämin paino [kg]
37	Kuristimen piirustuksen numero
38	Kuristimen valmistusvuosi
39	Kuristimen käyttötarkoitus
40	Käämin poikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
41	Käämin virrantiheys [A/mm <sup>2</sup> ]
42	Kuristimen eristimien ja jalustan korkeus [mm]
43	Kuristimen käämin korkeus [mm]
44	Kuristimen kokonaiskorkeus [mm]
45	Käämin johdintiedot: nipun koko, langan paksuus ja kerrosmäärä sylintereittäin
46	Kuristimen materiaalikustannukset
47	Kuristimen valmistuksen työkustannukset

## LIITE 4: P-TYYPIN KURISTIMIEN RAKENTEIDEN HAETUT PARAMETRIIT

Parametri	Parametrin kuvaus
1	Nimikenumero toiminnanohjausjärjestelmästä
2	Induktanssi [mH]
3	Nimellistaajuus [Hz]
4	Nimellisvirta perustaaajuudella [A]
5	Nimellisjännite [kV]
6	Oikosulkuteho kuristimen ensiöpuolella [MVA]
7	Jatkuvan tilan oikosulkuvirta kuristimen toisiopuolella [kA]
8	Sysäysoikosulkuvirta kuristimen toisiopuolella [kA]
9	Alin mahdollinen ympäristönlämpötila [°C]
10	Ylin mahdollinen ympäristönlämpötila [°C]
11	Nimellinen ryömintämatka [mm/kV]
12	Käyttötaajuinen 1 min ylijännite [kV]
13	Syöksyjännitekokeen jännite [kV]
14	Kuristimen käämin tasavirtaresistanssi [ $\Omega$ ]
15	Ekvivalenttinen virta [A]
16	Nimellisvirta [A]
17	Kuristimen käämikorkeus [mm]
18	Kuristimen halkaisija [mm]
19	Käämintäkeskiö [mm]
20	Kuristimen haaramäärä [kpl]
21	Ristikon haaraprofiilin korkeus [mm]
22	Ristikon päätehaaran paksuus [mm]
23	Kuristimen sylinterimäärä [kpl]
24	Yhden kuristimen induktanssi, jos useita osakeloja [mH]
25	Kuristimen vaihtovirtaresistanssi referenssilämpötilassa [ $\Omega$ ]
26	Referenssilämpötila [°C]
27	Kuristimen käämin tasavirtaresistanssi referenssilämpötilassa [ $\Omega$ ]
28	Kuristimen Rac/Rdc-suhde
29	Häviöt Nimellistaajuudella [kW]
30	Kokonaishäviöt [kW]
31	Aritmeettisesti laskettu jänniterasitus [V/mm]
32	Neliösummalla laskettu jänniterasitus [V/mm]
33	Käämin paino [kg]
34	Kuristimen piirustuksen numero
35	Kuristimen valmistusvuosi
36	Kuristimen käyttötarkoitus
37	Käämin poikkipinta-ala [mm <sup>2</sup> ]
38	Käämin virrantiheys [A/mm <sup>2</sup> ]
39	Kuristimen eristimien ja jalustan korkeus [mm]
40	Kuristimen käämin korkeus [mm]
41	Kuristimen kokonaiskorkeus [mm]
42	Käämin johdintiedot: Käytetyt johdinköydet ja niiden määrät sylintereittäin
43	Kuristimen materiaalikustannukset
44	Kuristimen valmistuksen työkuustannukset
46	Väliottojen määrä [kpl]