



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

SAMI KALLIOMÄKI
LOISTEHON KOMPENSOINTIRATKAISUJEN MITOITUSPERUS-
TEET YLI 1000 V JÄNNITTEELLE
Diplomityö

Tarkastaja: TkL Antti Mäkinen
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-
neuvoston kokouksessa 4. joulukuuta
2013

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

KALLIOMÄKI, SAMI: Loistehon kompensointiratkaisujen mitoitusperusteet yli 1000 V jännitteelle

Diplomityö, 104 sivua

Heinäkuu 2014

Pääaine: Sähköverkot ja markkinat

Tarkastaja: TkL Antti Mäkinen

Avainsanat: loisteho, loistehon kompensointiratkaisu, harmoniset yliaallot, yliaaltojen suodatus

Sähköverkkojen siirtokapasiteetin tarpeeseen vaikuttaa näennäisteho, joka muodostuu pätö- ja loistehosta. Pätöteholla kuvataan järjestelmässä muuhun energiamuotoon muuttuvan sähköenergian määrää. Magneetti- ja sähkökenttään varastoitunutta energiaa kutsutaan loistehoksi. Loistehoa tarvitaan laitteissa, joiden toiminta perustuu magneettikentän välityksellä siirtyvään energiaan. Loistehon siirtäminen pienentää sähköverkkojen pätötehon siirtokapasiteettiä, jota voidaan kuitenkin kasvattaa oikein toteutetulla loistehon kompensoinnilla. Epälineaariset kuormitukset ottavat verkosta epäsinimuotoisen kuormitusvirran, jonka seurauksena syöttävän verkon jännite säröytyy. Verkkojännitteen säröytyminen voidaan estää suodattamalla syntyvät yliaallot yliaaltosuodattimen avulla.

Tämän työn tarkoituksena on esitellä yli 1000 V nimellisjännitteellä toteutettavan loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen suodattamisen laiteratkaisuja. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus voidaan toteuttaa monella eri laiteratkaisulla. Työssä esitellään eri ratkaisujen etuja, haittoja sekä määritellään niille optimaalisimmat käyttökohteet. Loistehon kompensointiratkaisun määrittäminen on vaativa operaatio, jossa tulee huomioida nykytilanteen lisäksi myös tulevaisuudessa tapahtuvat kuormitusten vaihtelut.

Työssä esitetään mitoitusperusteita ALSTOM Grid Oy:n valmistamille loistehon kompensointi- ja yliaaltojen suodatusratkaisuille. Loistehon kompensointi- ja yliaaltojen suodatinlaitteet suunnitellaan aina asiakkaan tarpeiden ja vaatimusten mukaisesti eli jokainen kompensointiratkaisu on yksilöllinen. Loistehon kompensointiratkaisuihin käytettävien komponenttien suunnittelua, valmistusta ja testausta ohjeistetaan IEC- ja IEEE-standardeissa, joiden ohjeistus tulee huomioida kompensointiratkaisua suunniteltaessa. ALSTOM Grid Oy:n toiveesta työstä muodostui kirjallisuusselvitys, johon on koottu myös loistehon kompensointi- ja yliaaltojen suodatusratkaisujen mitoittamisessa tarvittavia mitoitusyhtälöitä.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical engineering

KALLIOMÄKI, SAMI: Design principles of power factor correction equipment for voltages above 1000 volts

Master of Science Thesis, 104 pages

July 2014

Major: Power systems and market

Examiner: Lic.Sc. Antti Mäkinen

Keywords: reactive power, reactive power compensation solution, harmonics, harmonic filtering

Capacity of energy transfer in electric power systems is described with an apparent power. Apparent power can be divided to active and reactive power. When energy is transferred from one form to another, for example from electric energy to heat in resistor it is called active power. Energy stored in magnetic and electric fields is called reactive power. Reactive power is needed when operation of equipment is based on energy transferred through magnetic field. Transmission of reactive power reduces the amount of active power that can be transferred through the transmission lines. Capacity of energy transfer can be increased by effective reactive power compensation. Nonlinear loading will cause a voltage distortion because of non-sinusoidal loading current. Distortion of line voltage can be prevented by using a harmonic filter.

The aim of this thesis is to introduce equipment solutions that are used in reactive power compensation and harmonic filtering in medium and high voltage electric systems. Reactive power compensation and harmonic filtering can be carried out in many different ways. In this thesis, advantages and disadvantages of each type of reactive power compensation and filtering solution are described. Optimal usage target of each solution is also explained based on the theory of alternating current networks. Determination of the optimal reactive power compensation solution is a demanding operation. When designing such a solution it has to be taken into account the present state of system as well as the variation of the loading in the future.

In this thesis, an instruction is prepared for optimal dimensioning of reactive power compensation and harmonic filtering solutions manufactured by ALSTOM Grid Ltd. Design of reactive power compensation and harmonic filtering equipment is based on the needs of customer therefore every compensation solution is unique. Designing, manufacturing and testing of components used in compensation solution is guided in IEC and IEEE standards. Guiding of standards must be taken in consideration when designing optimal compensation solution. Because of request of ALSTOM GRID Ltd. this thesis is formed as a literature research, including equations that are needed for optimal dimensioning of reactive power compensation and harmonic filter solutions.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty ALSTOM Grid Oy:lle ja työ käsittelee loistehon kompensointiratkaisujen mitoitusperusteita yli 1000 V jännitteelle. Työn ohjaajana on toiminut diplomi-insinööri Risto Huuska ja tarkastajana tekniikan lisensiaatti Antti Mäkinen.

Haluan kiittää Risto Huuskaa ja Heikki Tuovilaa asiantuntevista neuvoista sekä ohjeista diplomityön aikana. Kiitän myös Antti Mäkistä työn ohjaamisesta sekä tarkastamisesta.

Tampereella 24.07.2014

Sami Kalliomäki

SISÄLLYS

1	Johdanto.....	1
2	Loissähkö ja yliaallot	3
	2.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot	3
	2.2 Yleistä loistehosta ja yliaalloista	7
	2.3 Loistehosta ja yliaalloista johtuvia ongelmia.....	10
	2.4 Loistehon kompensoinnin tekniset vaikutukset	11
	2.4.1 Sarja- ja rinnakkaisresonanssi	14
	2.4.2 Kytkevävirta	17
3	Loistehon kompensointilaitteiden perusratkaisut	18
	3.1 Kompensointilaitteen pääkomponentit.....	18
	3.1.1 Kondensaattoriyksikkö	19
	3.1.2 Kuristin	21
	3.1.3 Vastus.....	22
	3.2 Rinnakkaiskondensaattoriparisto	23
	3.3 Estokelaparisto	24
	3.4 Yhdelle taajuudelle viritetty suodatin.....	26
	3.5 Kahdelle taajuudelle viritetty suodatin.....	28
	3.6 Laajakaistasuodatin	31
	3.7 C-tyypin suodatin	33
4	Kompensointilaitteiden mitoittaminen.....	35
	4.1 Kompensoinnin toteuttaminen	35
	4.1.1 Kompensointilaitteen valinta	36
	4.1.2 Kompensointilaitteen mitoittamisen lähtötiedot	38
	4.1.3 Kompensointilaitteiston mitoittamista ohjeistavat standardit.....	39
	4.2 Sähköiset ja ympäristötekniset mitoitusperusteet	43
	4.2.1 Jännite	43
	4.2.1.1 Jatkuva jänniterasitus.....	43
	4.2.1.2 Hetkellinen jänniterasitus.....	44
	4.2.2 Loisteho.....	45
	4.2.3 Virta	46
	4.2.4 Taajuuspoikkeama ja kaistanleveys	46
	4.2.5 Suodatinpariston hyvyysluku	47
	4.2.6 Syöttävän verkon impedanssin vaikutus.....	49
	4.2.7 Ympäristöolosuhteiden huomioiminen.....	51
	4.3 Kondensaattoriyksikön jännitemitoitus	52
	4.4 Kuristimen virta- ja jännitemitoitus	53
	4.5 Vastuksen virta- ja tehomitoitus.....	54
	4.6 Rinnakkaiskondensaattoripariston mitoittaminen	55

4.7	Estokelapariston mitoittaminen.....	55
4.8	Yhdelle taajuudelle viritetty suodatin.....	59
4.9	Kahdelle taajuudelle viritetty suodatin.....	63
4.10	Laajakaistasuodatin	72
4.11	C-tyypin suodatin	77
5	Kompensointilaitteen suojaus.....	83
5.1	Kondensaattoriyksikön suojaus.....	83
5.1.1	Sulakkeeton kondensaattoriyksikkö	84
5.1.2	Sulakkeellinen kondensaattoriyksikkö	84
5.2	Kompensointilaitteen sisäinen suojaus.....	84
5.2.1	Y-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus	85
5.2.2	Y-Y-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus.....	87
5.2.3	H-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus	88
5.2.4	Ylivirtasuojaus	90
5.2.5	Suojareleiden valinta	90
5.3	Kompensointilaitteen ulkoinen suojaus.....	91
5.3.1	Verkossa esiintyvät ylijännitteet	91
5.3.2	Metallioksidilylijännitesuojan ominaisuuheet.....	92
5.3.3	Metallioksidilylijännitesuojan nimellisarvojen valinta.....	95
5.3.4	Kompensointilaitteen ylijännitesuojauksen toteuttaminen	98
6	YHTEENVETO.....	100
	Lähteet.....	101

LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

a	Neljannen asteen yhtälön kerroin
b	Neljannen asteen yhtälön kerroin
BW	Kaistanleveys
c	Neljannen asteen yhtälön kerroin
C	Kapasitanssi
C_1	Kondensaattoriryhmän C_1 kapasitanssi
C_2	Kondensaattoriryhmän C_2 kapasitanssi
C_t	Terveen osatähden vaihekapasitanssi
C_x	Viallisen osatähden vaihekapasitanssi
ΔC	Kapasitanssin muutos
D	Säröteho
d	Neljannen asteen yhtälön kerroin
e	Neljannen asteen yhtälön kerroin
f	Taajuus
f_1	Perustaajuus
f_n	Taajuus nf_1
f_r	Resonanssitaajuus
f_s	Kaksoisviritetyn suodattimen sarjaresonanssitaajuus
f_{rr}	Kaksoisviritetyn suodattimen rinnakkaisresonanssitaajuus
f_{s1}	Kaksoisviritetyn suodattimen viritystaajuus
f_{s2}	Kaksoisviritetyn suodattimen viritystaajuus
Δf	Taajuuden muutos
g	Varmuuskerroin
I	Virta
I_0	Epäbalanssivirta
I_1	Perustaajuinen virta
I_{1L}	Kuristimen virta taajuudella f_1
I_{1LC}	Kondensaattorin ja kuristimen läpi kulkeva perustaajuinen virta
I_{c2}	Kondensaattoriryhmän C_2 läpi kulkeva virta
I_{ekvL1}	Kuristimen L_1 ekvivalenttivirta
I_{ekvL2}	Kuristimen L_2 ekvivalenttivirta
I_{h1}	Yliaaltolähteen tuottama virta taajuudella n_1f_1
I_{h2}	Yliaaltolähteen tuottama virta taajuudella n_2f_1
I_{kok}	Kokonaistehollisvirta
I_{kv}''	Alkuoikosulkuvirta
I_{L2}	Kuristimen L_2 läpi kulkeva virta
I_{Ln}	Kuristimen virta taajuudella nf_1
I_{Leqv}	Kuristimen ekvivalenttivirta
I_n	Virran tehollisarvo taajuudella nf_1
I_{n1}	Kaksoisviritetyn suodattimen suodattama virta taajuudella n_1f_1

I_{n2}	Kaksoisviritetyn suodattimen suodattama virta taajuudella $n_2 f_1$
I_{n1L}	Kuristimen L virta taajuudella $n_1 f_1$
I_{n1R}	Vastuksen R virta taajuudella $n_1 f_1$
I_{n1C2}	Kondensaattoriryhmän C_2 virta taajuudella $n_1 f_1$
I_{n1L2}	Kuristimen L_2 virta taajuudella $n_1 f_1$
I_{n2C2}	Kondensaattoriryhmän C_2 virta taajuudella $n_2 f_1$
I_{n2L2}	Kuristimen L_2 virta taajuudella $n_2 f_1$
I_{n1LC1}	Kondensaattoriryhmän C_1 ja kuristimen L virta taajuudella $n_1 f_1$
I_p	Pätövirta
I_q	Loisvirta
I_R	Vastuksen R virta
I_{UB}	Epäbalanssivirta
I_v	Virran tehollisarvo
I_{v1}	Perustaajuuden virran tehollisarvo
I_{vh}	Yliaaltovirran tehollisarvo
I_{vn}	Virran tehollisarvo taajuudella $n f_1$
\hat{i}	Virran huppuarvo
k	Kuristimen aiheuttama jännitteennousu
L	Induktanssi
L_1	Kuristimen L_1 induktanssi
L_2	Kuristimen L_2 induktanssi
L_v	Sähköverkon induktanssi
ΔL	Induktanssin muutos
n	Yliaallon järjestyysluku
n_1	Yliaallon järjestyysluku
n_2	Yliaallon järjestyysluku
P	Pätöteho
P_h	Kolmivaiheiset pätötehohäviöt
P_R	Vastuksen tehohäviöt
PT	Vastuksen energiahäviöt
Q	Loisteho taajuudella f
Q_1	Perustaajuinen loisteho
Q_c	Kapasitiivinen loisteho
Q_L	Induktiivinen loisteho
Q_m	Pariston mitoitusloisteho
Q_{mc1}	Kondensaattoriryhmän C_1 mitoitusloisteho
Q_{mc2}	Kondensaattoriryhmän C_2 mitoitusloisteho
Q_r	Laajakaistaisen suodattimen hyvyysluku
Q_s	Yhdelle taajuudelle viritetyn suodattimen hyvyysluku
g	Varmuuskerroin
R	Resistanssi
R_1	Resistanssi
R_o	Osatähden sisäisten rinnankytkentöjen määrä

R_{L1}	Kuristimen L_1 resistanssi perustaajuudella
R_{L1n1}	Kuristimen L_1 resistanssi taajuudella $n_1 f_1$
R_{L1n2}	Kuristimen L_1 resistanssi taajuudella $n_2 f_1$
R_{L2}	Kuristimen L_2 resistanssi perustaajuudella
R_{L2n1}	Kuristimen L_2 resistanssi taajuudella $n_1 f_1$
R_{L2n2}	Kuristimen L_2 resistanssi taajuudella $n_2 f_1$
R_{Ln}	Kuristimen resistanssi taajuudella $n f_1$
R_L	Kuristimen resistanssi
R_{kv}	Verkon resistanssi
S	Näennäisteho
S_o	Osatähden sisäisten sarjaankytkentöjen määrä
S_{kv}''	Verkon oikosulkuteho
T	Käyttötaajuuden ylijännitteen kestoisuus kerroin
t	Ajanhetki
U	Pääjännite
U_0	Tähtipisteen jännite
U_{DC}	Jännitteen tasakomponentti
U_1	Perustaajuinen jännite
U_a	Verkon jännitteenalenema
U_{arit}	Aritmeettisesti laskettu jännite
U_c	Kondensaattorin mitoitusjännite
U_{c1}	Kondensaattorin yli vaikuttava perustaajuinen jännite
U_{cn}	Kondensaattorin yli vaikuttava jännite taajuudella $n f_1$
U_{cov}	Ylijännitesuojan suurin sallittu jatkuva käyttöjännite
U_m	Pariston mitoitusjännite
U_{mc}	Kondensaattoriryhmän C mitoitusjännite
U_{mc1}	Kondensaattoriryhmän C_1 mitoitusjännite
U_{mc2}	Kondensaattoriryhmän C_2 mitoitusjännite
U_{max}	Suurin käyttöpaikalla esiintyvä jatkuva käyttöjännite
U_{maxp}	Ylijännitesuojan yli vaikuttava suurin jatkuva käyttöjännite
U_n	Jännitteen tehollisarvo taajuudella $n f_1$
U_r	Ylijännitesuojan mitoitusjännite
U_{rss}	Jännitekomponenttien neliösumman neliöjuuri
U_{th}	Yliaaltojänniteprosentti
$u(t)$	Jännitteen hetkellisarvo
U_v	Vaihejännitteen tehollisarvo
U_{v1}	Perustaajuuden vaihejännitteen tehollisarvo
U_{vh}	Yliaaltojännitteen tehollisarvo
U_{vn}	Vaihejännitteen tehollisarvo taajuudella $n f_1$
\hat{u}	Jännitteen huippuarvo
$\bar{U}_{L1, L2, L3}$	Vaihejännite
W	Kondensaattoripariston energia
$W_L(t)$	Kuristimeen varastoitunut energia

W_y	Ylijännitesuojan energian käsittelykyky
W_{MO}	MO-suojan kautta purkautuva energia
X	Reaktanssi
\bar{X}	Terveen vaiheen reaktanssi
X_c	Kapasitiivinen reaktanssi taajuudella f_1
X_{cn}	Kapasitiivinen reaktanssi taajuudella nf_1
X_{kok}	Kokonaisreaktanssi taajuudella f_1
X_{kokn}	Kokonaisreaktanssi taajuudella nf_1
X_k	Verkon oikosulkureaktanssi taajuudella f_1
X_{kn}	Verkon oikosulkureaktanssi taajuudella nf_1
X_{kv}	Verkon reaktanssi
X_L	Kuristimen induktiivinen reaktanssi taajuudella f_1
X_{Ln}	Kuristimen induktiivinen reaktanssi taajuudella nf_1
X_r	Reaktanssi resonanssitaajuudella
X_s	Reaktanssi sarjaresonanssitaajuudella
$\bar{X} + \Delta\bar{X}$	Vioittuneen vaiheen reaktanssi
Z	Impedanssi
z	Jännitekerroin
Z_{kv}	Verkon oikosulkuimpedanssi
Z_{n1}	Suodattimen impedanssi taajuudella n_1f_1
Z_{n1v}	Verkon impedanssi taajuudella n_1f_1
Z_{n2}	Suodattimen impedanssi taajuudella n_2f_1
Z_{n2v}	Verkon impedanssi taajuudella n_2f_1
Z_{nkv}	Verkon impedanssi taajuudella nf_1
$Z(\omega)$	Suodattimen impedanssi kulmataajuudella ω
$Z(\omega_1)$	Suodattimen impedanssi perustaajuudella
$Z(\omega_{rr})$	Impedanssi kulmataajuudella ω_{rr}
$Z(\omega_s)$	Impedanssi kulmataajuudella ω_s
$Z_r(\omega)$	Rinnakkaisresonanssiin impedanssi kulmataajuudella ω
$Z_s(\omega)$	Sarjaresonanssiin impedanssi kulmataajuudella ω
$Z_{kok}(\omega_1)$	Impedanssi taajuudella ω_1 kuristimien resistanssit mukana
α	Neljannen asteen yhtälön juuri
α_n	Jännitteen vaihekulma taajuudella nf_1
β	Neljannen asteen yhtälön juuri
γ	Neljannen asteen yhtälön juuri
ε	Neljannen asteen yhtälön juuri
φ_1	Vaihesiirtokulma ennen kompensointia
φ_2	Vaihesiirtokulma kompensoinnin jälkeen
φ	Virran ja jännitteen välinen vaihesiirtokulma
ω	Kulmataajuus
ω_1	Kulmataajuus perustaajuudella f_1
ω_n	Kulmataajuus yliaaltotaajuudella nf_1
ω_r	Resonanssikulmataajuus

ω_{rr}	Kaksoisviritetyn suodattimen rinnakkaisresonanssikulmataajuus
ω_s	Kaksoisviritetyn suodattimen sarjaresonanssikulmataajuus
ω_{s1}	Kaksoisviritetyn suodattimen virityskulmataajuus $n_1 f_1$
ω_{s2}	Kaksoisviritetyn suodattimen virityskulmataajuus $n_2 f_1$
η	Kuormituksen hyötysuhde
δ	Taajuuden poikkeama
BIL	Syöksyjänniteimpulssitaso (Basic Impulse Level)
$\cos\varphi$	Kuormituksen tehokerroin (Power Factor)
IEEE	Tekniikan alan kansainvälinen standardoimisjärjestö (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IEC	Sähköalan kansainvälinen standardoimisjärjestö (International Electrotechnical Commission)
RSS	Neliösumman neliöjuuri (Root Sum Squared)
THD	Jännitteen harmoninen kokonaissärö (Total Harmonic Distortion)
THD – F	Jännitteen harmoninen kokonaissärö suhteessa perustaajuiseen jännitteeseen
THD – R	Jännitteen harmoninen kokonaissärö suhteessa jännitteen tehollisarvoon

1 JOHDANTO

Sähkönkulutuksen kasvun ja sähköverkkojen ikääntymisen seurauksena, verkkojen siirtokyvystä on muodostunut maailmanlaajuinen ongelma. Sähkönkulutuksen kasvu on seurausta ihmisten elintason noususta. Elintason nousun myötä ihmiset hankkivat enenemissä määrin kulutushyödykkeitä, joiden valmistaminen ja käyttö kuluttavat sähköä. Siirtokyvyn varmistamiseksi sähköverkkoa täytyy vahvistaa ja investointi kustannukset ovat merkittäviä. Verkostoinvestointien suunnittelu on teknistaloudellinen optimointitehtävä, jonka avulla pyritään saavuttamaan paras mahdollinen tekninen ratkaisu taloudellisten reunaehtojen puitteissa. Sähköverkon siirtokyvyn kasvattaminen uutta verkkoa rakentamalla tai vanhaa vahvistamalla on kallista. Tämän vuoksi nykyään yhä enemmän kiinnitetään huomioita siihen, miten sähköverkkojen siirtokykä saataisiin kasvatettua ilman arvokkaita investointeja.

Sähköverkoissa siirretään pätötehon lisäksi myös loistehoa, joka kuormittaa siirtoverkkoa ja rajoittaa johdolla siirrettävän pätötehon määrää. Monet laitteet kuten esimerkiksi moottorit ja muuntajat tarvitsevat magneettikentän muodostamiseen loistehoa. Loistehoa kuluttavien laitteiden määrä kasvaa koko ajan, joten sähköverkot kuormittuvat yhä enemmän loistehon siirrosta. Loistehon siirrosta voidaan välttyä tuottamalla laitteiden kuluttama loistetehto paikallisesti, käyttöpaikkaan sijoitetun kompensointilaitteiston avulla. Näin välttyään loistehon siirrosta, jonka seurauksena sähköverkkojen pätötehon siirtokykä kasvaa ja häviöt pienenevät virtojen pientymisen vuoksi. Sähköverkoissa esiintyvien yliaaltojännitteiden ja -virtojen osuus on kasvanut ja kasvun taustalla on epälineaaristen kuormitusten lisääntyminen. Epälineaarinen kuormituksen ottama epäsinimuotoinen virta säröyttää verkkojännitteen, joka saattaa aiheuttaa ongelmia ja häiriötilanteita herkimmille laitteille. Yliaaltojen aiheuttamilta ongelmilta voidaan välttyä sijoittamalla yliaaltosuodatin mahdollisimman lähelle yliaaltolähdettä, näin estetään yliaaltojen kulkeutuminen syöttävään verkkoon.

Tämän työn tavoitteena oli laatia mitoitusperusteet ALSTOM Grid Oy:n valmistamien yli 1000 V nimellisjännitteellä käytettävien passiivisten kompensointilaitteiden mitoittamiseksi. Tässä työssä käsiteltävät laitetypit ovat rinnakkaiskondensaattoriparisto, estokelaparisto, yhdelle ja kahdelle taajuudelle viritetyt suodattimet, laajakaisetasuodatin sekä C-typin suodatin. Laiteratkaisut mitoitetään aina tapauskohtaisesti käyttöpaikan asettamien vaatimusten mukaisesti. Optimaalisimman laiteratkaisun löytäminen vaatii hyvät lähtötiedot käyttöpaikan sähköverkosta sekä ympäristöolosuhteista ja niiden tutkimiseen menee yleensä runsaasti aikaa.

Työ rakentuu kolmesta osiosta. Ensimmäisessä osassa eli luvussa 2 käsitellään loistehon ja yliaaltojen syntyminen sekä niiden aiheuttamia ongelmia. Toinen osa muodostuu luvuista 3 ja 4. Luvussa 3 käydään läpi kompensointilaitteiden pääkomponentit, rakenne ja eri laitetypit sekä niiden käyttökohteet. Kompensointilaitteiden mitoittamis-

ta käsitellään luvussa 4. Alstom Grid Oy:n toiveena oli, että laitteiden mitoittamisessa käytettävät yhtälöt esitellään laitekohtaisesti. Mitoituksessa käydään läpi kunkin laitetyyppin kannalta kriittisimmät tekijät. Viimeinen osio luku 5 käsittelee laitteiden suojausta, joka on tässä työssä jaettu sisäiseen ja ulkoiseen suojaukseen. Luku 6 on yhteenveto työstä ja siinä esitellään työn aikana esiin nousseet kriittisimmät huomiot ja johtopäätökset laitteistojen mitoittamiseen ja suojaukseen liittyen.

2 LOISSÄHKÖ JA YLIAALLOT

Sähkönjakelu- ja siirtoverkoissa siirretään pätötehon lisäksi myös loistehoa. Puhdasta pätötehoa verkosta ottavia laitteita ovat muun muassa hehkulamppu, sähkölämmitin ja sähkökiuas. Merkittävimpiä sähköverkkoon kytkettäviä loistehoa kuluttavia laitteita ovat moottori, suuntaajakäyttö, purkauslamppu, muuntaja sekä tyristoriohjattu kuormitus. Loistehoa tarvitaan moottoreissa ja muuntajissa magneettikentän muodostamiseen sekä ylläpitämiseen. Pätötehon ohella sekä kapasitiivista että induktiivista loistehoa voidaan tuottaa generaattoreiden avulla. Ideaalitapauksessa generaattorilla tuotetaan ainoastaan pätötehoa ja tarvittava kapasitiivinen loisteho kondensaattoreiden sekä induktiivista loistehoa kuristimien avulla. Loistehon siirto kuormittaa jakelujen siirtoverkkoja, jonka vuoksi loisteho kannattaa tuottaa mahdollisimman lähellä kuormituspistettä. Näin loistehoa ei tarvitse siirtää jakeluverkossa ja siten pätötehon siirtokapasiteetti kasvaa. Sähkökuluttajan kannalta paikallisesti toteutettavaan loistehon kompensointiin ohjataan sähköntoimitusehdoissa määritellyn loistehomaksun avulla. Ilmaisosan ylittävää loistehoa hinnoitellaan siten että loistehoa tarvitsevan kuluttajan kannattaa pyrkiä toteuttamaan loistehon kompensointi paikallisesti.

[1; 2]

Sähkönjakeluverkoissa esiintyvien yliaaltojännitteiden osuus on kasvanut merkittävästi viime vuosien ja vuosikymmenien aikana ja kasvun odotetaan jatkuvan myös tulevaisuudessa. Syynä jakelu- ja siirtoverkkojen jännitteen säröytymiselle on verkkoihin kytketyt epälineaariset kuormitukset, jotka ottavat tai syöttävät verkkoon virtoja, joiden taajuus poikkeaa verkon perustaajuudesta. Yliaaltoja tuottavia laitteita löytyy muun muassa prosessiteollisuudesta ja elektroniikkaa vaativilta toimialoilta. Yliaaltopitoista virtaa verkosta ottavat esimerkiksi, tietokoneet, tasavirtakäytöt, hitsauskoneet ja taajuusmuuttajat. [3]

Tässä luvussa käsitellään loistehon, yliaaltojännitteiden ja -virtojen syntymisen taustalla olevaa teoriaa sekä esitellään niiden aiheuttamia ongelmia. Luvussa käsitellään myös loistehon kompensointilaitteiden ja yliaaltosuodattimien teknisiä vaikutuksia syöttävän verkon näkökulmasta.

2.1 Harmoniset ja epäharmoniset yliaallot

Vaihtojännitteen ja vaihtovirran kuvaamisessa käytetään yleisesti sinimuotoisia käyriä, jotka soveltuvat kuvaamaan tilannetta, jossa verkossa ei ole yliaaltoja aiheuttavaa kuormitusta. Verkkojännitteen poiketessa sinimuotoisesta käyrästä, sanotaan jännitteen olevan säröytynyttä. Suomen sähkönjakeluverkon nimellistaajuus on 50 Hz, jota käytetään yleiseen sähkönjakeluun. Säröytynyt verkkojännite sisältää verkon perustaajuudesta poikkeavia taajuuksia. Säröytynyt verkkojännite syntyy, kun epälineaarinen kuormi-

tus ottaa tai syöttää verkkoon virran, joka on muodoltaan epäsinimuotoista. Kulkiessaan verkon impedanssien kautta epäsinimuotoinen virta aiheuttaa jännitehäviötä. Jännitehäviöt aikaansaavat puolestaan verkkojännitteen säröytymisen. [4]

Yliaaltopitoisessa verkossa jännitteen ja virran käyrämuodot säröytyvät ja näin ollen ne eroavat sinimuodosta, mutta silti niitä voidaan yleensä käsitellä jaksollisesti vaihtelevina suureina. Epäsinimuotoinen jännite tai virta voidaan esittää matemaattisesti muodostamalla Fourier'n sarjakehitelmä. Fourier'n sarjakehitelmä muodostetaan siten että säröytynyt epäsinimuotoinen käyrämuoto esitetään useasta eritaajuisesta komponentista muodostuvana matemaattisena sarjana. Näin ollen epäsinimuotoinen käyrämuoto voidaan pilkkoa eritaajuisiin komponentteihin ja summata sen jälkeen yhteen. Epäsinimuotoisesta käyrämuodosta voidaan erottaa tasakomponentti, perustaajuinen komponentti ja harmoniset yliaaltokomponentit. Jännitekomponenttien summaaminen on esitetty yhtälössä 1, jossa kukin edellä mainittu taajuuskomponentti on määritetty huippuarvonsa ja vaihekulmansa mukaisesti. Yliaaltosisältöisen jännitteen hetkellisarvo ajanhetkellä t voidaan kirjoittaa seuraavan yhtälön mukaisesti: [4]

$$u(t) = U_{DC} + \sum_{n \neq 0}^{\infty} [\sqrt{2} U_n \sin(n2\pi f_1 t + \alpha_n)] \quad (1)$$

jossa

$u(t)$ = jännitteen hetkellisarvo

U_n = jännitteen tehollisarvo taajuudella nf_1

U_{DC} = jännitteen tasakomponentti

f_1 = perustaajuus

t = ajanhetki

α_n = jännitteen vaihekulma taajuudella nf_1

Mikäli verkon oletetaan olevan säröytynyt, voidaan yliaaltoanalysointorin avulla tutkia sisältääkö verkko yliaaltoja. Säröytyneestä verkosta voidaan mittaamalla havaita verkon perustaajuuden monikertoja eli 50 Hz harmonisia sekä epäharmonisia yliaaltoja, joiden taajuus ja monikerrat poikkeavat verkon nimellistaajuudesta. Säröytynyt verkkojännite aiheuttaa epäsinimuotoisia virtoja lineaarisissakin kuormituksissa.

Jännitesäröllä kuvataan jakelujännitteen laatua ja sitä käsitellään standardissa ”SFS-EN 50160 yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet” [5]. Standardissa SFS-EN 50160 yliaaltojännitteet jaetaan harmonisiin ja epäharmonisiin. Kyseinen standardi määrittelee viitteelliset arvot harmonisille yliaaltojännitteille keski- ja suurjännitteen liittämiskohdassa. Keskijännitteen nimelliseksi tehollisarvoksi SFS-EN 50160 standardi määrittelee yli 1 kV ja maksimissaan 36 kV. Suurjännitteen nimelliseksi tehollisarvoksi edellä mainittu standardi määrittää yli 36 kV ja maksimissaan 150 kV. Keskijännitteen liittämiskohdassa esiintyvien harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut viitteelliset arvot on esitetty taulukossa 1. Epäharmonisille yliaaltojännitteille SFS-EN 50160 standardi ei määrittele tarkkoja arvoja, joiden alapuolella yliaaltopitoisuuden tulisi olla keski- ja suurjännitteen liittämispisteessä. [5]

Taulukko 1. SFS-EN 50160 määrittämät yksittäisten harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot keskijännitteen liittämiskohdassa järjestyslukuun 40 saakka prosentteina perustajuisesta jännitteestä. [5]

Parittomat yliaallot						Parilliset yliaallot		
Kolmella jaottomat			Kolmella jaolliset					
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U _h)		Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U _h)		Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U _h)	
	KJ [%]	SJ [%]		KJ [%]	SJ [%]		KJ [%]	SJ [%]
5	6	5	3	5	3	2	2	1,9
7	5	4	9	1,5	1,3	4	1	1
11	3,5	3	15	0,5	0,5	6...24	0,5	0,5
13	3	2,5	21	0,5	0,5			
17	2							
19	1,5							
23	1,5							
25	1,5							

Taulukossa 1 esiteltyjen arvojen lisäksi keskijännitteen kokonaissärökerroin THD saa SFS-EN 50160 standardin mukaan olla maksimissaan 8 %, kun mukaan lasketaan kaikki harmoniset yliaallot järjestyslukuun 40 asti. Suurjännitteelle edellä mainittu standardi ei aseta kokonaissärörajaa, jonka alapuolella liittymispisteen jännitesärön tulee olla. SFS-EN 50160 standardin määrittelemät harmoniset yliaalto prosentit liittymispisteessä eroavat myöhemmin tässä luvussa esiteltävistä IEC 61000-3-6 ja IEEE 519-1992 standardien asettamista arvoista.

Taulukossa 2 on esitetty IEC 61000-3-6 standardin määrittelemät suuntaa antavat harmonisten yliaaltojännitteiden mitoitustasot keski- ja suurjännitteelle. Keskijännitteen nimelliseksi tehollisarvoksi IEC 61000-3-6 standardi määrittelee yli 1 kV ja maksimissaan 35 kV. Suurjännitteen nimelliseksi tehollisarvoksi IEC 61000-3-6 standardi määrittelee yli 35 kV. [6] IEC 61000-3-6 standardissa suurjännite jaetaan vielä kahteen ryhmään eli suurjännitteeseen ”high voltage” ja erittäin suureen jännitteeseen ”extra high voltage” tässä työssä molemmista ryhmistä käytetään nimitystä suurjännite.

Taulukko 2. IEC 61000-3-6 standardin määrittämät harmonisten yliaaltojännitteiden mitoitustasot keski- ja suurjännitteellä. [6]

Kolmella jaottomat			Kolmella jaolliset			Parilliset		
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U _h)		Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U _h)		Järjestysluku h	Suhteellinen jännite (U _h)	
	KJ [%]	SJ [%]		KJ [%]	SJ [%]		KJ [%]	SJ [%]
5	5	2	3	4	2	2	1,8	1,4
7	4	2	9	1,2	1	4	1	0,8
11	3	1,5	15	0,3	0,3	6	0,5	0,4
13	2,5	1,5	21	0,2	0,2	8	0,5	0,4
17≤h≤49	1,9(17/h)-0,2	1,2(17/h)	21≤h≤45	0,2	0,2	10≤h≤50	0,25(10/h)+0,22	0,19(10/h)+0,16

IEC 61000-3-6 standardi määrittelee suuntaa antaviksi kokonaissärökertoimen THD arvoiksi keskijännitteellä 6,5 % ja suurjännitteellä 3 %. IEEE 519–1992 standardin määrittämät yksittäisten harmonisten yliaaltojännitteiden suhteelliset prosentit ja jännitteen harmoninen kokonaissärö liittymispisteessä on esitelty taulukossa 3.

Taulukko 3. IEEE 519-1992 standardin määrittämät yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen ja kokonaissärökertoimen sallitut arvot liittämiskohdassa prosentteina perustajuudesta jännitteestä. [7]

Jännitetaso	Yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen suhteellinen jännite (%)	Jännitteen harmoninen kokonaissärö THD (%)
≤ 69kV	3,0	5,0
69-161kV	1,5	2,5
≥ 161kV	1,0	1,5

Standardin SFS-EN 50160 mukaan jakelujännitettä tarkastellaan normaaleissa käyttöolosuhteissa siten, että kunkin viikon pituisen mittausjakson aikana 95 % jakelujännitteen kunkin yksittäisen harmonisen yliaaltojännitteen 10 minuutin tehollisarvoista saa olla korkeintaan taulukossa 1 annetun arvon suuruinen. Standardi määrittelee järjestyslukuun 25 asti suhteellisen jänniteprosentin, mutta jättää määrittelemättä tarkkoja arvoja järjestysluvultaan yli 25, sillä ne ovat tavallisesti pieniä sekä arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi. [5]

Tärkeä sähköverkon tilaa kuvaava suure on jännitteen harmoninen kokonaissärö THD, joka saadaan määritettyä yliaaltoanalysointilaitteella suoritetulla mittauksella. Verkon yliaaltoja määritettäessä jännitteen harmonisen kokonaissärön lisäksi täytyy mitata myös yliaaltovirtojen arvot. Käytännön mittauksissa analysointilaitteeseen asennetaan yleensä viikoksi mittaamaan tarkasteltavan kohteen verkkoa eri kuormitusolosuhteissa, jonka jälkeen data analysoidaan. Ennen kompensointilaitteen lopullista valintaa tulee selvittää verkossa esiintyvät harmoniset yliaallot ja niiden määrä mahdollisimman tarkasti, jotta vältytään resonanssitilanteelta. Mittaamalla saadaan selvitettyä kuormituksen perustajuinen tehollisarvo sekä muiden harmonisten taajuuksien tehollisarvot suhteessa perustajuuteen nähden. [1; 3]

Jännitteen harmoninen kokonaissärö THD kuvaa harmonisten yliaaltojen määrää suhteessa perustajuiseen komponenttiin THD-F tai jännitteen tehollisarvoon THD-R. THD, THD-F ja THD-R saadaan määritettyä yhtälöiden 2-4 mukaisesti: [4]

$$\text{THD} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_{vh})^2} \quad (2)$$

jossa

THD = jännitteen harmoninen kokonaissärö

$$\text{THD-F} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_{vh})^2}}{U_{v1}} \quad (3)$$

jossa

THD – F = jännitteen harmoninen kokonaissärö suhteessa perustaajuiseen jännitteeseen

$$\text{THD-R} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (U_{vh})^2}}{U_v} \quad (4)$$

jossa

THD – R = jännitteen harmoninen kokonaissärö suhteessa jännitteen tehollisarvoon

Standardissa SFS-EN 50160 esitetyn jakelujännitteen kokonaissärökertoimen laskemisessa sovelletaan yhtälössä 2 esitettyä laskentatapaa. Standardeissa IEC 61000-3-6 ja IEEE 519-1992 käytettävät jakelujännitteen kokonaissärökertoimen laskentatavat poikkeavat SFS-EN 50160 standardissa käytetystä tavasta ja ne löytyvät mainituista standardeista.

Liittymispisteessä esiintyville yliaaltovirroille asetetaan sekä kansallisissa, että kansainvälisissä julkaisuissa erinäisiä suositusrajoja joiden ala puolella virran harmonisen kokonaissärön ja yksittäisten harmonisten yliaaltovirtojen täytyy referenssivirtaan nähdessä pysyä. Mikäli liittymispisteessä mitatut virrat ylittävät kulloinkin asetetun raja-arvon sähkökäyttäjän täytyy joko pienentää aiheuttamia yliaaltovirtoja suodattamalla tai on sovittava verkonhaltijan kanssa suuremmasta siirtokapasiteetista. Virtayliaalloille asetettuja suositusrajoja löytyy IEEE 519-1992 standardista sekä kotimaisesta julkaisusta ”Loistehon kompensointi ja yliaaltojen rajoittaminen”.

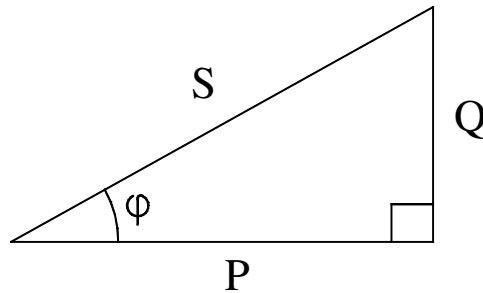
2.2 Yleistä loistehosta ja yliaalloista

Loistehoa siirtyä vaihtovirtapiireissä virran ja jännitteen välisen vaihesiirtokulman poikkeuksella nollasta. Jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma eroaa käytännössä aina nollasta, koska sähköverkkojen kuormitus on hyvin harvoin puhtaasti resistiivinen. Vaihesiirtokulmaero syntyy kun sähköverkkoon kytketään kapasitiivinen tai induktiivinen komponentti. [2]

Kapasitiivinen komponentti varastoi hetkellisesti sähköenergiaa sähkökenttäänsä hidastaen jännitteen nousua ja tämän seurauksena jännite jää virtaa jälkeen. Induktiivinen komponentti sen sijaan varastoi energiaa sen läpi kulkevan virran synnyttämään magneettikenttään. Näin ollen induktiivisen kuormituksen ottama virta on jännitettä jäljessä. [8]

Sähköverkkoa kuormittava kokonaisvirta määräytyy verkossa siirrettävästä näennäistehosta. Näennäisteho S muodostuu pätötehosta P ja loistehosta Q kuvan 1 mukai-

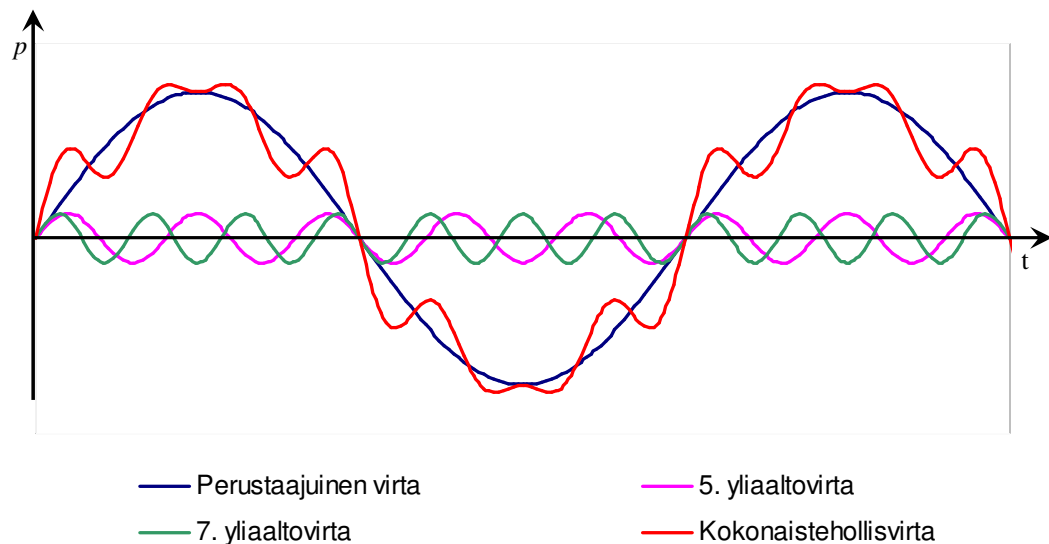
sesti. Näennäisteho saadaan laskettua Pythagoraan lausetta käyttäen pätötehon ja loistehon neliösumman neliöjuuresta. [2]



Kuva 1. Tehokolmion muodostuminen perustaajuisille suureille

Sähköverkossa siirrettävä loisteho kasvattaa johtimien ja muuntajien läpi kulkevaa kokonaisvirtaa. Loistehon siirron aiheuttaman kokonaisvirran kasvun seurauksena johtimien ja muuntajien käämitysten lämpeneminen kasvaa. Lämpenemisen vaikutuksesta komponenteissa syntyvät häviöt lisääntyvät. [2]

Yliaaltopitoisessa verkossa jännite ja virta sisältävät perustaajuisen komponentin lisäksi myös perustaajuudesta poikkeavia yliaaltokomponentteja. Kuvassa 2 esittää miten sinimuotoinen perustaajuisen virta sekä 5. ja 7. yliaaltovirta summautuvat muodostaen säröytyneen kokonaistehollisvirran. [4]



Kuva 2. Virran säröytyminen yliaaltojen vaikutuksesta.

Sähköverkkoa kuormittava 1-vaiheinen tehollisvirta kuvan 2 mukaisessa tilanteessa saadaan ratkaistua yhtälön 7 avulla, jossa I_{vh} tarkoittaa yliaaltovirran tehollisarvoa. Mikäli jännitteen tehollisarvo sisältää perustaajuisen jännitteen lisäksi myös yliaaltojännitteitä, tällöin jännitteen tehollisarvo on ratkaistavissa yhtälöllä 5. Yhtälössä 6 U_{vh} tarkoittaa yliaaltojännitteen tehollisarvoa. [4]

$$U_v^2 = \sum_{n=0}^{\infty} U_{vn}^2 = U_{v1}^2 + U_{vh}^2 \quad (5)$$

jossa

$$U_{vh}^2 = \sum_{n \neq 1}^{\infty} U_{vn}^2 \quad (6)$$

U_v = vaihejännitteen tehollisarvo

U_{vn} = vaihejännitteen tehollisarvo taajuudella nf_1

U_{v1} = perustaajuisen vaihejännitteen tehollisarvo

U_{vh} = yliaaltojännitteen tehollisarvo

n = yliaallon järjestysluku

$$I_v^2 = \sum_{n=0}^{\infty} I_{vn}^2 = I_{v1}^2 + I_{vh}^2 \quad (7)$$

jossa

$$I_{vh}^2 = \sum_{n \neq 1}^{\infty} I_{vn}^2 \quad (8)$$

I_v = virran tehollisarvo

I_{vn} = virran tehollisarvo taajuudella nf_1

I_{v1} = perustaajuisen virran tehollisarvo

I_{vh} = yliaaltovirran tehollisarvo

Yhtälöiden 5 ja 7 avulla saadaan ratkaistua 1-vaiheinen näennäisteho. Näennäisteho muodostuu jännitteen ja virran tehollisarvojen tulona seuraavan yhtälön mukaisesti: [4]

$$S^2 = (U_v I_v)^2 = (U_{v1} I_{v1})^2 + (U_{v1} I_{vh})^2 + (U_{vh} I_{v1})^2 + (U_{vh} I_{vh})^2 \quad (9)$$

jossa

S = näennäisteho

Yhtälön ensimmäinen termi $U_{v1} I_{v1}$ ilmaisee kuormituksen perustaajuisen näennäistehon osuuden. Yliaaltotaajuinen näennäisteho voidaan jakaa kolmeen loistehoa sisältävään osatekijään, joista ensimmäinen $U_{v1} I_{vh}$ tarkoittaa virtasärötehoa, toinen $U_{vh} I_{v1}$ jännitesäröä ja kolmas $U_{vh} I_{vh}$ harmonista ja epäharmonista näennäistehoa.

Yliaaltopitoisen verkon säröteholle D esiintyy kansainvälisesti useita eri esitysmuotoja. Yhtälössä 10 on esitetty myös toinen yleisesti käytetty määritelmä särötehon ratkaisemiseksi. [3]

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (10)$$

jossa

D = säröteho

P = pätöteho

Q_1 = perustaajuinen loisteho

Puhtaasti sinimuotoiselle vaihtosähkölle on käytössä kaksiulotteinen tehokolmio, joka muodostuu perustaajuisista näennäis-, pätö- ja loistehoista. Yliaaltopitoisessa verkossa tehokolmio muodostuu särötehosta johtuen kolmiulotteiseksi. [3]

2.3 Loistehosta ja yliaalloista johtuvia ongelmia

Pätötehon tavoin loistehoa siirretään tuotantopaikasta sitä käyttävälle laitteelle siirto- ja jakeluverkon välityksellä. Loistehoa voidaan tuottaa voimalaitoksien generaattoreiden avulla mutta loistehon siirtäminen kasvattaa johtimissa kulkevaa virtaa rajoittaen johtojen pätötehon siirtokykyä ja samalla kasvattaen johdoissa syntyviä häviöitä. Johtojen lisäksi loistehon siirto aiheuttaa jännite-, teho- ja energiahäviöitä muuntajissa, joka on seurausta loisvirran aiheuttamasta käämitysten lämpenemisestä. Edellä mainituista syistä johtuen loisteho on kannattavinta tuottaa mahdollisimman lähellä kulutuspaikasta. [1]

Jakeluverkonhaltijalla on oikeus periä loistehomaksua sähkökäyttäjältä, jonka loistehonkulutus ylittää ilmaisosuuden rajan. Loissähkön hinnoittelun tavoitteena on vähentää loissähkön ottoa siirto- ja jakeluverkosta ja ohjata loissähkön tuottamiseen paikallisesti. Liiallinen loistehon kompensointi on myös haitallista jakelu- ja siirtoverkkoyhtiön kannalta. Verkon ollessa pienessä kuormassa tyhjäkäyviin johtojen maakapasitanssit tuottavat kapasitiivista loistehoa, mikä puolestaan saattaa nostaa verkkojännitteen yli standardissa SFS-EN 50160 määritellyn tason. [1; 9]

Yliaaltoja verkkoon tuottavien laitteiden määrä kasvaa edelleen ja laitteiden kirjo laajenee laajenemistaan. Kuormat, joiden verkosta ottama virta ei ole sinimuotoista, tuottavat verkkoon yliaaltoja. Esimerkkeinä tällaisista yliaaltolähteistä voidaan pitää muun muassa taajuusmuuttajia, tyristoriohjattuja kuormia, hitsauskoneita, tietokoneita, televisioita, purkauslamppuja, muuntajia sekä valokaariuuneja. Loistehon kompensointiin käytettävä rinnakkaiskondensaattoriparisto eli paristo jota ei ole viritetty jollekin tietylle viritystaajuudelle, ei sisällä esto- tai suodatinkuristinta. Rinnakkaiskondensaattoriparisto saattaa muodostaa syöttävän verkon induktanssin kanssa haitallisen resonanssiin vahvistaen verkossa ilmeneviä yliaaltoja. [1; 4]

Yliaalloista aiheutuu sekä teknisiä että taloudellisia ongelmia sähköverkonhaltijalle ja joissakin tapauksissa häiriöt saattavat levitä sähköverkon välityksellä kuluttajalta toiselle. Yliaaltovirrat kuormittavat muuntajia lisäten kuparihäviöitä ja hajakenttien aiheuttamia häviöitä. Yliaaltojännitteet taas puolestaan lisäävät muuntajissa syntyviä rautahäviöitä. Loistehon tavoin yliaallot lisäävät johtimissa syntyviä lämpöhäviöitä kasvattaen kuormituksen aiheuttamia kokonaishäviöitä. Yliaallot lisäävät moottoreiden mekaanista

värähtelyä ja lämpöhäviöitä. Suuritaajuisista yliaalloista johtuvia ongelmia voi ilmetä myös ohjaus- ja telelaitteissa. Suuritaajuiset yliaallot saattavat aiheuttaa kaapeleissa, kiskoissa sekä muuntajissa meluongelmia. Yliaallot aiheuttavat ylijännitteitä, jotka kuormittavat laitteiden ja johtimien eristyksiä aikaistaen laitteiden vaurioitumista sekä johtimien eristysten pettämistä. [1]

2.4 Loistehon kompensoinnin tekniset vaikutukset

Kantaverkkoyhtiö pyrkii ohjaamaan paikalliset verkkoyhtiöt huolehtimaan oman jakelualueensa loistehon tarpeesta loistehon hinnoittelun avulla. Paikalliset verkkoyhtiöt pyrkivät loistehon hinnoittelun avulla rajoittamaan loistehon siirtoa ja ottamista jakeluverkosta. Jakeluverkon haltijoiden asettama loistehon hinnoittelu ohjaa siihen suuntaan, että loistehoa kuluttavien asiakkaiden kannattaa hankkia oma kompensointilaitteensa ja tuottaa sillä tarvitsemansa loisteho. Kompensoimalla loisteho mahdollisimman lähellä syntypistettä jäävät loistehon siirrosta aiheutuvat kuormitushäviöt siirto- ja jakeluverkossa mahdollisimman pieniksi. Sähköverkon siirtokyky ilmoitetaan yleensä näennäistehon avulla. Näennäisteho voidaan ratkaista yhtälöstä 11 käyttäen apuna kuvan 1 mukaista tehokolmiota. [2]

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (11)$$

Sähköverkkoon kytketyn kuormituksen ottama kokonaisvirta on tärkeä lähtötieto verkostosuunnittelussa. Kokonaisvirta voidaan määrittää näennäistehon ja jännitteen avulla seuraavasta yhtälöstä: [10]

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (12)$$

jossa

$$U = \text{pääjännite}$$

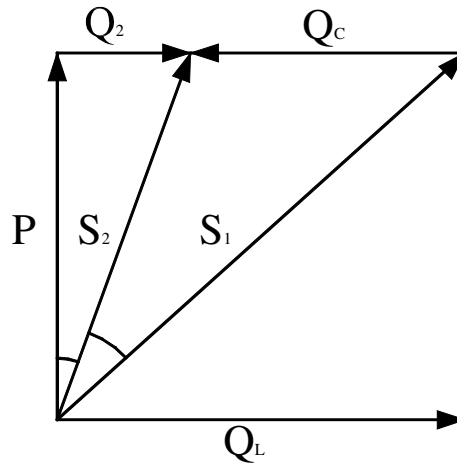
Sähköverkkoon kytkettävän laitteen tehokerroin $\cos\varphi$ kuvaa laitteen verkosta ottaman pätötehon määrää suhteessa näennäistehoon. Tehokerroin saadaan laskettua perustaajuisen pätötehon ja perustaajuisen näennäistehon avulla seuraavasti: [10]

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (13)$$

jossa

$$\cos\varphi = \text{kuormituksen tehokerroin}$$

Tehokertoimen arvolla $\cos\varphi = 1$ kuormitus on täysin resistiivistä eli verkossa kulkee ainoastaan puhdasta pätötehoa. Kuvassa 3 on esitetty näennäistehon muodostuminen ilman loistehon kompensointia ja loistehon kompensoinnin kanssa.



Kuva 3. Tehokolmion muodostuminen perustajuisille suureille

Kuvan 3 tilanteessa induktiivista loistehoa Q_L kompensoidaan kondensaattorin avulla jonka tuottama kapasitiivinen loisteho on Q_c . Kondensaattorin vaikutuksesta verkkoa kuormittava näennäisteho pienenee arvosta S_1 arvoon S_2 , jolloin verkon kuormitettavuus kasvaa näennäistehon muutoksen verran. [10]

Tehokerroin ilmoitetaan yleensä esimerkiksi moottorien arvokilvessä ja tehokerroimen avulla voidaan määrittää moottorin verkosta ottaman loistehon suuruus. Taulukossa 4 on esitelty tyypillisiä tehokertoimia eri kuormituksille. Kuormituksen tehokerroimen tunteminen on välttämätöntä valittaessa kompensointiratkaisua uudiskohteisiin, joista mittaustietoa ei ole vielä saatavilla. [10]

Taulukko 4. Kuormitusten tyypillisiä tehokertoimia [10]

Kuorma	$\cos\varphi$ tehokerroin (W / VA)	$\tan\varphi$ loistehon tarve (VAR / W)
Moottorit	0,7...0,85	1,0...0,62
Loisteputkivalaisimet		
-kompensoitamattomat	0,5	2
-kompensoidut	0,9	0,5
Tyristorikäytöt	0,4...0,75	2,3...0,9
Taajuusmuuttajat	0,9...0,98	0,5...0,2
Resistiivinen kuorma	1	0

Loistehon kompensoinnin määrä saadaan laskettua, kun kuormituksen hyötysuhde, pätöteho, kompensoitavan laitteen tehokerroin sekä tavoitetehtokerroin tunnetaan. Tarvittavan kompensoinnin määrä voidaan ratkaista yhtälöllä 14, jossa $\varphi_1 = \cos^{-1}\left(\frac{P}{S_1}\right)$ on vaihesiirtokulma ennen kompensointia ja $\varphi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{P}{S_2}\right)$ vaihesiirtokulma kompensoinnin jälkeen, tilannetta selventää kuva 3. [10]

$$Q = \frac{P}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (14)$$

jossa

- η = kuormituksen hyötysuhde
- φ_1 = vaihesiirtokulma ennen kompensointia
- φ_2 = vaihesiirtokulma kompensoinnin jälkeen

Loistehon kompensoinnilla saadaan kasvatettua verkon pätötehon siirtokapasiteettia. Pätötehon siirtokapasiteettia voidaan kasvattaa myös rakentamalla uusi siirtoyhteys olemassa olevan yhteyden rinnalle. Tällaisissa kohteissa onkin syytä suorittaa vertailu kumpi vaihtoehdoista olisi vielä vuosienkin päästä teknistaloudellisesti kannattavampi investointi.

Loistehon kompensoinnin avulla saadaan yhtälössä 11 esitetty näennäisteho pienemmäksi, kun loistehon osuus kuormituksesta poistuu tai pienenee riippuen kompensointiasteesta. Loistehon kompensoinnin myötä kuormituksen ottama virta pienenee, koska loistehon kompensoinnin vaikutuksesta loisvirta ei enää kuormita johtimia. Kuormitusvirran pienentyessä pätötehon siirtokapasiteetti kasvaa ja häviöt pienenevät.[9] Kokonaisvirran pienenemisellä on suuri merkitys verkossa syntyviin häviöihin, sillä syntyneet kolmivaihehäviöt lasketaan seuraavasti:

$$P_h = 3I^2R \quad (15)$$

jossa

- P_h = kolmivaiheiset pätötehohäviöt
- R = resistanssi

Loistehon kompensointi tukee verkkojännitettä pienentäen verkossa syntyvää jännitteenalenemaa U_a . Jännitteenalenema muodostuu usein rajoittavaksi tekijäksi pitkillä siirtoyhteyksillä ja vikatilanteissa. Sarjakondensaattoripariston avulla jännitteenalenema ja verkon vian kestoisuutta voidaan parantaa. Verkossa syntyvä jännitteenalenema U_a saadaan laskettua yhtälöstä 16. Loisvirran I_q pienentyessä kompensoinnin seurauksesta pienenee myös verkon jännitteenalenema. Kondensaattoreita käytetään Suomessa verkkojen paikallissäätöön siten, että niillä kompensoidaan 110 kV verkon loistehonkulutus ja minimoidaan loistehon siirto 110 kV verkossa. [9]

$$U_a = RI_p + XI_q \quad (16)$$

jossa

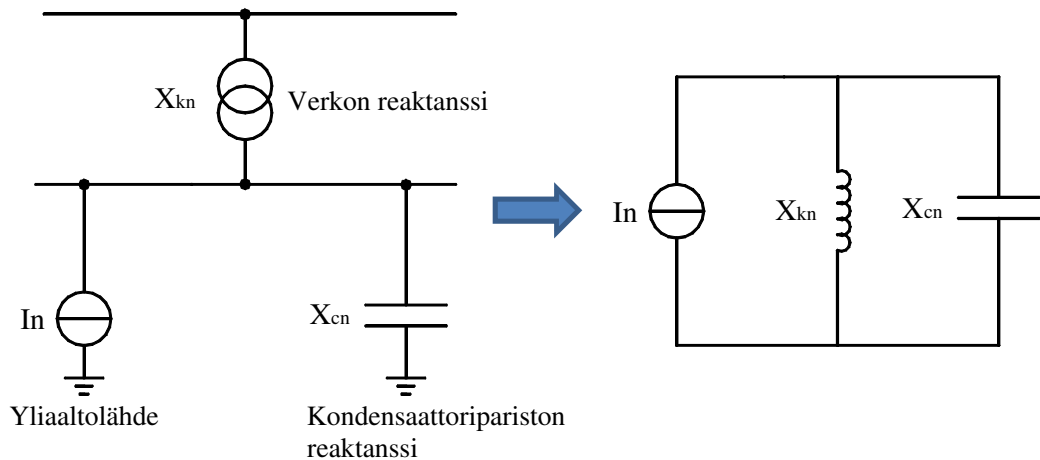
- U_a = verkon jännitteenalenema
- X = reaktanssi
- I_p = pätövirta
- I_q = loisvirta

Verkossa ilmeneviä yliaaltoja voidaan suodattaa luvussa 3 esiteltävillä ratkaisuihin, joiden avulla sähkön laatu paranee ja verkko täyttää standardin SFS-EN 50160 asetta-

mat vaatimukset. Yliaaltojen suodattamisella jännitesärö THD pienenee, jonka seurauksena laitevaurioiden ja häiriöiden riski pienenee. Suodattamalla yliaallot pois verkosta, verkon kalliiden ja riskialttiiden pääkomponenttien ylikuormittumisen riski vähenee. [1]

2.4.1 Sarja- ja rinnakkaisresonanssi

Kytettäessä ilman kuristinta oleva rinnakkaiskondensaattoriparisto kuorman kanssa rinnan muodostavat syöttävän verkon induktanssi ja kondensaattorin kapasitanssi muuntajan alapuolelta katsottuna kuvan 4 mukaisen rinnakkaisresonanssipiirin. [4; 11]



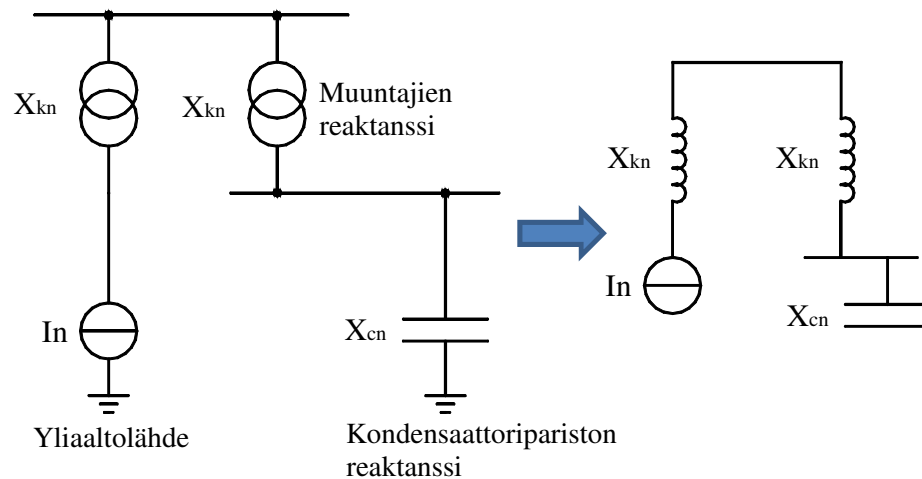
Kuva 4. Verkon reaktanssi ja kondensaattoripariston reaktanssi muodostavat rinnakkaisresonanssipiirin.

Rinnakkaisresonanssipiirin vaikutuksesta yliaaltovirrat voivat vahvistua keskijännitteellä jopa 20-kertaiseksi, riippuen siitä kuinka kaukana resonanssitaajuus on kyseisestä yliaaltotaajuudesta. [4]

Resonanssitilanteessa yliaalto jää värähtelemään kondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välille. Yliaaltojen voimistuminen on seurausta syntyneestä rinnakkaisresonanssipiiristä. Yliaaltolähteestä saapuva yliaalto saa verkon induktansseissa aikaan muuttuvan magneettikentän. Muuttuva magneettikenttä indusoi virran, joka puolestaan varaa kondensaattorin sähkökentän. Varautunut sähkökenttä synnyttää kondensaattorin yli vaikuttavan jännitteen, joka yliaaltojen vuoksi voi olla suurempi kuin nimellisjännite. Kondensaattorin varauksen purkautuminen saa aikaan virran, joka aiheuttaa verkon induktansseissa muuttuvan magneettikentän. [11; 12] Syöttävän verkon resistanssi-/reaktanssisuhteella on myös vaikutusta yliaaltojen vahvistumisen suuruuteen. Rinnakkaisresonanssipiirin aiheuttamaa yliaaltojen vahvistumista vaimentaa, mikäli verkko on resistiivisesti kuormitettu. [11]

Sarjaresonanssipiirin muodostavat kondensaattorin kapasitanssi ja muuntajan induktanssi, kun tilannetta tarkkaillaan muuntajan yläpuolelta. Muodostuneen sarjaresonanssipiirin impedanssi on sarjaresonanssitaajuudella hyvin pieni. Tämän seurauksena sarjaresonanssitaajuuden läheisyydessä esiintyvät yliaaltovirrat kulkevat muuntajan ylä-

jännitepuolelta alajännitepuolella sijaitsevaan kondensaattoriparistoon säröyttäen alajännitepuolen jännitteen. Muuntajan induktiivisen reaktanssin ja kondensaattoripariston kapasitiivisen reaktanssin muodostama sarjaresonanssiipiiri ja sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 5. [4; 11]



Kuva 5. Muuntajien reaktanssi ja kondensaattoripariston reaktanssi muodostavat yliaaltoja vahvistavan sarjaresonanssiipiirin.

Syöttävän verkon induktiivisen reaktanssin ja kondensaattoripariston kapasitiivisen reaktanssin muodostaman rinnakkaisresonanssiipiirin resonanssitaajuus voidaan laskea seuraavasti. Syöttävän verkon induktiivinen reaktanssi perustaaajuudella saadaan lasketua verkon oikosulkutehon avulla yhtälöstä 17 kun jätetään huomiotta syöttävän verkon resistanssi ja kapasitanssi. [4; 11]

$$X_k = \frac{U^2}{S_{kv}''} \quad (17)$$

jossa

S_{kv}'' = verkon oikosulkuteho

X_k = verkon oikosulkureaktanssi taajuudella f_1

Kondensaattoripariston perustaaajuinen kapasitiivinen reaktanssi saadaan määritettyä kapasitiivisen loistehon avulla seuraavasta yhtälöstä: [11]

$$X_c = \frac{U^2}{Q_1} \quad (18)$$

jossa

X_c = kapasitiivinen reaktanssi taajuudella f_1

Ottamalla huomioon reaktanssien taajuusriippuvuus voidaan yhtälö 17 kirjoittaa yhtälön 19 mukaisesti. Taajuuden kasvaessa n -kertaiseksi induktiivinen reaktanssi kasvaa n -kertaiseksi. [11]

$$X_{kn} = n \frac{U^2}{S_{kv}''} \quad (19)$$

jossa

$$X_{kn} = \text{verkon oikosulkureaktanssi taajuudella } nf_1$$

Kapasitiivinen reaktanssi pienenee n :een osaan, kun taajuus kasvaa n -kertaiseksi. Näin ollen yhtälö 18 voidaan kirjoittaa yhtälön 20 mukaisesti, kun huomioidaan kapasitiivisen reaktanssin taajuusriippuvuus. [11]

$$X_{cn} = \frac{U^2}{nQ_1} \quad (20)$$

jossa

$$X_{cn} = \text{kapasitiivinen reaktanssi taajuudella } nf_1$$

Resonanssitaajuudella syntyy yliaaltojännitteitä vahvistava rinnakkaisresonanssipiiri. Resonanssipiirin syntymiselle voidaan kirjoittaa seuraavan lausekkeen mukainen ehto. [11]

$$n \frac{U^2}{S_{kv}''} = \frac{U^2}{nQ_1} \Rightarrow Q_1 = \frac{S_{kv}''}{n^2} \quad (21)$$

Merkitään verkon perustaaajuutta f_1 ja muodostuvaa resonanssitaajuutta f_r , joten $n = \frac{f_r}{f_1}$. Näin ollen resonanssitaajuudelle voidaan kirjoittaa yhtälön 22 mukainen lauseke. Lausekkeesta saadaan ratkaistua resonanssitaajuus, jolla syöttävän verkon induktiivinen reaktanssi ja kondensaattoripariston kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret. [11]

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_{kv}''}{Q_1}} \quad (22)$$

jossa

$$f_r = \text{resonanssitaajuus}$$

2.4.2 KytKentävirta

KytKentäessä kondensaattoreita sähköverkkoon kytKentähetkellä verkkoon syntyy kytKentäsäysvirta. KytKentäsäysvirta muodostuu, kun varautumaton kondensaattori ottaa verkosta virran, joka synnyttää kondensaattorielementteihin varauksen. KytKentäsäysvirta on erittäin nopea ilmiö ja sen kesto on yleensä ainoastaan millisekuntien luokkaa. IEC 60871-1 standardissa määritellään, että kondensaattoripariston kytKennästä aiheutuvan kytKentäsäysvirran arvo saa maksimissaan olla 100-kertainen kytKentävän pariston nimellisvirtaan nähden. [13]

KytKentäsäysvirta tulee ottaa huomioon mitoitettaessa kytkinlaitteita kondensaattoriparistoihin. KytKentäessä useampia kondensaattoriparistoja samaan kiskostoon tulee paristoihin asentaa vaimennuskuristimet, sillä ilman vaimennuskuristimia kondensaattorien kytKentäsäysvirta saattaa voimistua jopa 200–400-kertaiseksi pariston nimellisvirtaan verrattuna. [14; 15]

3 LOISTEHON KOMPENSOINTILAITTEIDEN PERUSRATKAISUT

Loistehon kompensoinnissa ja yliaaltojen suodattamisessa käytettävät laiteratkaisut riippuvat syöttävän verkon yliaaltopitoisuudesta. Yliaaltopitoisessa verkossa loistehon kompensointi suositellaan toteuttavaksi estokelapariston avulla, sillä rinnakkaiskondensaattoripariston käyttö saattaa aiheuttaa resonanssitilanteen syöttävänverkon induktiivisen reaktanssin ja kondensaattoripariston kapasitiivisen reaktanssin välille. Mikäli verkon yliaaltopitoisuus ylittää standardin tai sähköverkonhaltijan asettamat yliaaltopitoisuusrajat, tulee syntyneet yliaallot suodattaa mielellään mahdollisimman lähellä niiden syntymispaikkaa. [1]

Tässä luvussa käsitellään loistehon kompensoinnissa ja yliaaltojen suodattamisessa käytettävät pääkomponentit ja esitellään yleisimmin käytetyt laitetypit. Lisäksi vertaillaan laitetyyppien välisiä eroja ja käyttökohteita. Laiteratkaisujen mitoittamista käsitellään luvussa 4, jossa esitellään komponenttien mitoittamisessa käytettävät yhtälöt.

3.1 Kompensointilaitteen pääkomponentit

Kompensointilaitteella tarkoitetaan yleisesti kondensaattoriyksiköistä, kuristimista, vastuksista, ylijännitesuojista sekä epäbalanssivirtamuuntajista muodostuvaa laitekokonaisuutta. Kompensointilaitteen rakenne ja käytetyt komponentit mitoitetaan ja valitaan aina tapauskohtaisesti kytkettävän verkon kompensointitehon ja suodatusvaatimusten täyttämiseksi.

Kompensointilaitteen pääkomponentteja ovat kondensaattoriyksiköt, kuristimet ja vastukset. Kondensaattoriparistoissa kondensaattoriyksiköt asennetaan teräs- tai alumiinitelineisiin kuvan 6 mukaisesti. Kondensaattoreita kytketään sarjaan ja rinnan, jotta saavutetaan tarvittava kompensointiteho ja jännitekestoisuus. Kuvan 6 kondensaattoriparisto on toisen asteen 3-vaiheinen laajakaistasuodatin. Kuvan laajakaistasuodatin muodostuu rinnankytketyistä suodatinkuristimesta ja vastuksesta sekä näiden kanssa sarjaan kytketyistä kondensaattoreista. Kondensaattoripariston suojaus on toteutettu kuvan oikeassa laidassa näkyvällä epäbalanssivirtamuuntajalla sekä vasemmassa laidassa näkyvillä ylivirtamuuntajilla.



Kuva 6. Toisen asteen laajakaistasuodatin, viritystaajuus 650 Hz, kompensointiteho 6.2 Mvar mitoitusjännite 37,97 kV, nimellistaajuus 50 Hz. Valmistaja Alstom Grid Oy.

Keskijännitelajakaistasuodattimen rakenne on normaalisti kuvan 6 kaltainen. Suodattimen alle asennettujen jalustojen tarkoituksena on nostaa komponentit irti perustuksista, jotta ne eivät peittyisi lumeen talvella. Komponenttien rungot ovat jännitteelliset, jonka vuoksi jännitteellisten osien erottamisessa käytetään tukieristimiä. Komponenttien väliset johdotukset tehdään tinatulla kuparilangalla.

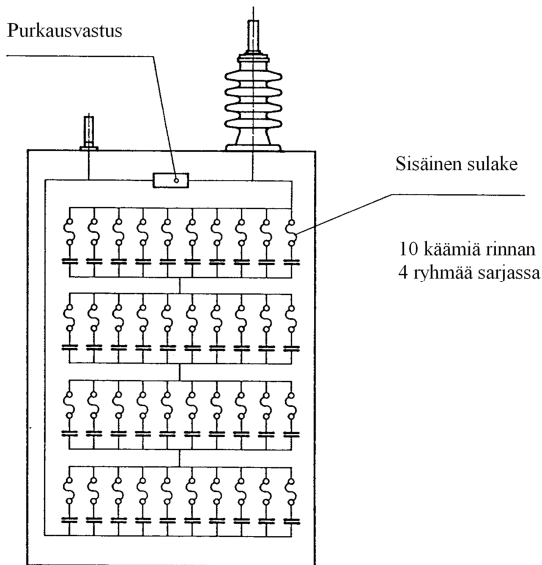
3.1.1 Kondensaattoriyksikkö

Kondensaattoriyksiköitä käytetään kapasitiivisen loistehon tuottamiseen. Kondensaattoriyksikön toiminta perustuu kahden eristeaineella erotetun elektrodin väliin muodostuvaan sähkökenttään. Tässä työssä elektrodiparista ja eristeaineesta muodostuvasta komponentista käytetään nimitystä käämielementti, koska se on vakiintunut nimitys kondensaattorivalmistuksessa. Sähkökenttä syntyy, kun kondensaattorin napojen väliin kytketään jännite tällöin elektrodit varautuvat synnyttäen elektrodien välille sähkökentän. Kondensaattori varastoi ja purkaa sähköenergiaa sähkökentästään tasaten verkossa esiintyviä jännitevaihteluja. [9]

Kuvassa 7 on esitetty öljyeristeisen kondensaattoriyksikön yksinkertaistettu rakenne, yksikön sisäinen kytkentä on neljä käämielementtiä sarjassa ja kymmenen rinnan. Kondensaattoriyksikön sisäinen rakenne, kuten käämielementtien sarjaan ja rinnankytkentöjen määrä riippuu kondensaattorin nimellis- ja mitoitusjännitteestä sekä mitoitus-

loistehosta. Kondensaattorin tuottaman loistehon määrä on suoraan verrannollinen kondensaattoriyksikön kapasitanssiin ja neliöllisesti verrannollinen jännitteeseen. Kondensaattoriyksikön käämielementtien maksijännite on noin 2300 V. Sisäisillä sulakkeilla varustetussa yksikössä, voidaan kytkeä maksimissaan 6 käämielementtiä sarjaan. Tällöin yksikön maksimijännitteeksi muodostuu 13800 V. Kondensaattoriyksikön maksimiloistehoa rajoittaa kondensaattoripurkin maksimikorkeus ja kondensaattoriyksikön virtaliitoksien virran kestävyys. Edellä esitellyt tekijät rajaavat yksikön maksimiloistehon noin 1000 kVA:iin.

Käämielementtien ja eristeöljyn lisäksi yksikön pääkomponentteja ovat läpivientieristin, sisäinen sulake ja purkausvastus.



Kuva 9. Öljyeristeisen suurjännitekondensaattoriyksikön rakenne.

Suurjännitekondensaattoriyksiköt ovat öljyeristeisiä tai kuivia. Nykyään suuret valmistajat suosivat öljyä eristeaineena. Kondensaattorin pääraaka-aineet ovat alumiini, polypropyleenikalvo ja kyllästysöljy. Kondensaattori muodostuu käämielementeistä, jotka valmistetaan käämimällä alumiinista ja polypropyleenikalvosta sylinterimäisiä rullia, jotka käämin jälkeen painetaan litteiksi levyiksi. Käämielementtejä kytetään juottamalla sarjaan ja rinnan halutun tehon sekä jännitekestoisuuden saavuttamiseksi. Sulakkeellisessa yksikössä jokaisen käämielementin kanssa sarjaan kytetään sulake, joka muodostuu prespaanipaperista ja sulakelangasta. Sulakkeen tehtävä on erottaa vioittunut tai läpilyönyt käämielementti muuten ehjästä käämielementtipakasta ilman käyttökatoa. Öljyn lisäksi kondensaattorin eristyksessä käytetään prespaanipahvia ja -paperia, joita käytetään eristämään käämielementit teräsastiasta. Käämielementit, sulakkeet ja purkausvastus juotetaan valmiiksi elementtipakaksi, jonka jälkeen elementtipakka työnnetään teräsastiaan ja kansi läpivientieristimiseen hitsataan paikalleen. Tämän jälkeen kondensaattorin paperieristyksissä oleva kosteus kuivataan ja yksikkö täytetään kyllästysöljyllä kyllästysprosessin aikana. [17]

Kytettäessä kondensaattori irti verkosta kondensaattoriin jää varaus, joka täytyy purkaa hallitusti purkausvastuksen avulla. Sähköturvallisuusmääräysten ja standardin

IEC 60871-1 mukaan purkausvastukset tulee mitoittaa siten, että kondensaattoriyksikön jäännösvaraus alenee kymmenessä minuutissa alle 75 volttiin. Joissakin maissa sähköturvallisuusmääräykset asettavat rajoiksi viidessä minuutissa varausjännitteen purkaantumisen alle 50 volttiin.

Kondensaattoriyksikön tulee läpäistä standardin IEC 60871-1 asettamat rutiinitestit sekä tyyppitestit. IEC 60871-1 Standardin vaatimuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.3. Ympäristönlämpötila tulee ottaa huomioon erityisen tarkasti etenkin gradientin valinnassa. Gradientti ilmaisee kondensaattorielementin eristykseen kohdistuvaa jänniterasitusta. Mitoituksessa käytettävä gradientti vaihtelee ympäristöolosuhteista johtuen normaalisti välillä $50\text{--}70 \frac{\text{V}}{\mu\text{m}}$. [13; 17]

3.1.2 Kuristin

Suurjännitteellä käytettävät kuristimet ovat pääsääntöisesti rautasydämissä ja keskijännitteellä ilmasydämissä. Keskijännitteellä on saatavissa myös rautasydämissä kuristimia, joiden maksimi nimellisjännite on tällä hetkellä 36 kV. Alstom Gridin Oy valmistaa ilmasydämissä kuristimia Tampereen tehtaalla, joten tässä luvussa käsitellään ainoastaan ilmasydämissä kuristimia. Kuristimet voidaan jakaa kuristin standardin IEC 60076-6 mukaan seuraaviin ryhmiin: [18]

- Rinnakkaiskuristimet
- Sarjakuristimet
- Maadoituskuristimet
- Vaimennuskuristimet
- Suodatinkuristimet
- Tasoituskuristimet

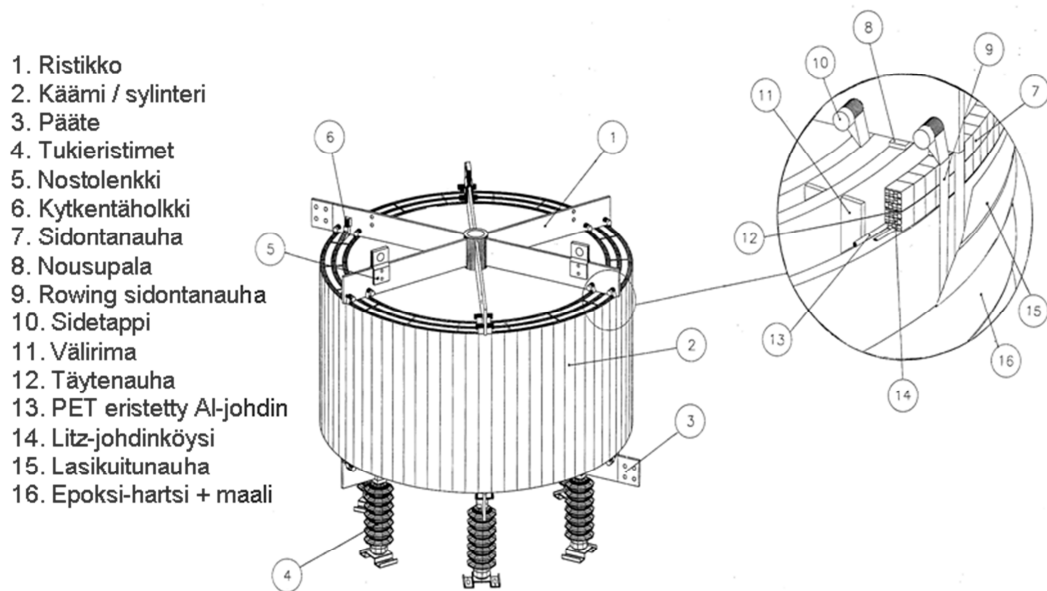
Rinnakkaiskuristimia käytetään kompensoimaan kapasitiivista loistehoa pienen kuormituksen aikana voimansiirtolinjoissa. Rinnakkaiskuristimet kytketään katkaisijalla ja ne on kytketty yleensä muuntajan tertiäärikäämiin. Kuristimia on saatavissa 36 kV jännitetasolle ja 100 MVA tehoon asti. [18]

Sarjakuristimia eli virranrajoituskuristimia käytetään pääasiassa rajoittamaan oikosulkuvirtaa eli estämään laitevahinkoja. Sarjakuristin kytketään sarjaan niiden laitteiden kanssa joita sillä halutaan suojata. Sarjakuristimen ansiosta verkossa voidaan käyttää pienemmälle oikosulkuteholle mitoitettuja katkaisijoita, kaapeleita ja laitteita, mikä merkitsee säästöä. Sarjakuristin koostuu kolmesta vaihekuristimesta asennettuina päällekkäin tai vierekkäin. Sarjakuristimet ovat pääsääntöisesti ilmasydämissä, jolloin kuristimen reaktanssi saadaan virrasta riippumattomaksi vakioksi. [18]

Maadoituskuristin kytketään kolmivaihejärjestelmän tähtipisteeseen. Maadoituskuristimen tarkoituksena on rajoittaa maasulkuvirta maasulkusuojaukselle sopivaan arvoon.

Kondensaattoripariston kytkentävirran rajoittamiseen käytetään ilmasydämissiä vaimennuskuristimia, joiden tehtävä on vaimentaa kondensaattorin kytkentähetkellä syntyvä kytkentäsysäysvirta. Vaimennuskuristimet ovat verrattavissa sarjakuristimiin, joissa on pieni induktanssi. Vaimennuskuristimen induktanssi lasketaan tapauskohtaisesti ja yleensä induktanssin arvoksi riittää 50–500 μH . [18]

Suodatinkuristimia käytetään yliaaltosuodattimissa, joilla on kaksi tehtävää tuottaa loistehoa perustaajuudella sekä suodattaa yliaaltoja. Suodattimella on pieni impedanssi vaiheiden ja tähtipisteen välillä tai vaiheiden välillä suodatettavalla taajuudella. Rautasydämissen kuristimen etuna voidaan pitää sen suurempaa induktanssia suhteessa vastaavaan ilmasydämiseen, mutta samalla sen induktanssi on myös jännitteestä riippuva. Ilmasydämissen kuristimen induktanssi on vakio jännitteen vaihteluista huolimatta. Kuvasssa 8 on esitetty ilmasydämissen kuristimen rakenne sekä valmistusmateriaalit. [18]



Kuva 8. Ilmasydämissen kuristimen rakenne ja materiaalit.

Kuristimen pääraaka-aineet ovat alumiinilanka ja alumiinilatta, harts, lasikuitu ja polyesterinauha. Kuristimen johdinmateriaalina käytetään yleensä eristettyä alumiini-johdinta. Kuristin muodostuu yhdestä tai useammasta rinnankytketystä sylinteristä, joiden johdinpoikkipinnat pyritään valitsemaan siten että eri sylinterit lämpenevät tasaisesti. [18]

3.1.3 Vastus

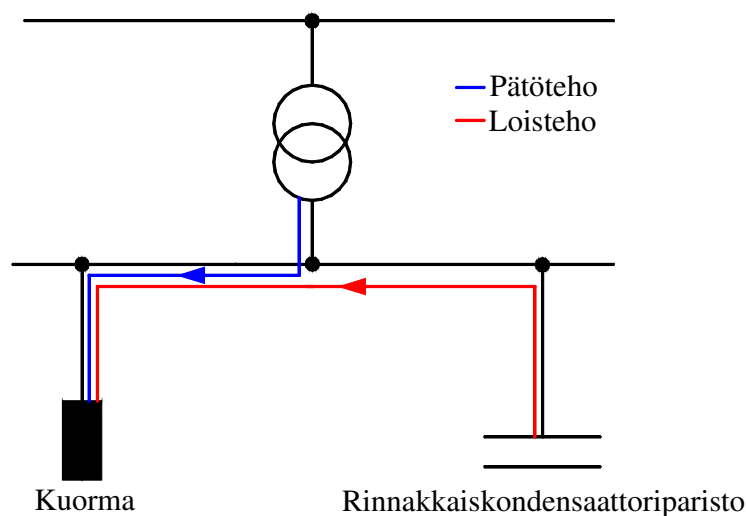
Vastuksia käytetään laajakaistasuodatinparistoissa impedanssikäyrän loiventamiseen ja suodatusalueen laajentamiseen. Vastuksen avulla kondensaattoripariston ja kuristimen muodostamaa impedanssikäyrää voidaan loiventaa kytkemällä vastus kuristimen rinnalle. Vastus koostuu rinnan ja sarjaan kytketyistä vastuselementeistä sekä kotelosta, jonka

tehtävä on estää sateen, roskien ja eläinten pääsy vastuselementtien väliin. Kotelointi-luokka valitaan ympäristöolosuhteiden ja vastuksen häviöiden mukaan. [1]

3.2 Rinnakkaiskondensaattoriparisto

Rinnakkaiskondensaattoriparistoa käytetään loistehon tuottamiseen kohteissa joissa verkon yliaaltopitoisuus on vähäinen. Rinnakkaiskondensaattoriparisto kytketään kompensoitavan kuorman rinnalle ja se koostuu kondensaattoriyksiköistä, kytkinlaitteista, ylijännitesuojista, ylivirtamuuntajista, epäbalanssivirtamuuntajista sekä suojureleistä. Kondensaattorien lukumäärä, kytkentä ja teho riippuvat verkon jännitteestä ja tarvittavan loistehon määrästä. Kytkinlaitteiden valinnassa tulee huomioida, että kytkettävä virta on kapasitiivista, sillä kapasitiiviselle virralle kytkinlaitevalmistajat määrittävät huomattavasti alhaisemmat kytkentävirrän arvot kuin resistiiviselle virralle. Keski-jännitteellä rinnakkaiskondensaattoriparistojen kytkinlaitteina käytetään katkaisijoita ja kontaktoreita. Rinnakkaiskondensaattoriparisto voi muodostua yhdestä tai useammasta portaasta, joita kytketään verkkoon loistehon tarpeen mukaan loistehonsäätimellä. Portaiden koko ja lukumäärä valitaan tapauskohtaisesti mutta niiden määrä pyritään aina minimoimaan, sillä keski- suurjännitekytkinlaitteet ovat arvokkaita komponentteja. Pariston ulkoinen suojaus käsittää yleensä ylivirta- ja ylijännitesuojauksen. Sisäinen suojaus epäbalanssisuojauksen, joka toteutetaan yleensä epäbalanssivirtamuuntajan ja suojureleen avulla. Suojauksen toimintaa ja valintaa käsitellään tarkemmin luvussa 5. [19]

Kuvassa 9 on esimerkki tilanteesta, jossa rinnakkaiskondensaattoriparisto on kytketty loistehoa kuluttavan kuorman rinnalle. Kuorman tarvitsema loisteho tuotetaan kondensaattorilla ja ainoastaan pätöteho otetaan jakelu- tai siirtoverkosta. Näin ollen loistehon siirto ei kuormita verkkoa eikä aiheuta lisähäviöitä muuntajassa.



Kuva 9. Kuorman tarvitseman loistehon tuottaminen rinnakkaiskondensaattoripariston avulla.

Rinnakkaiskondensaattoripariston kanssa sarjaan kytketään usein myös vaimennuskuristin, jonka tehtävä on vaimentaa kondensaattoripariston kytkennän synnyttämää kytkentäsysäysvirtaa. Vaimennuskuristimen induktanssin arvoksi riittää usein 50–500 μH . [19]

Keskijännitteelle on saatavissa avoparistojen lisäksi myös koteloituja rinnakkaiskondensaattoriparistoja, jotka kotelointiluokasta riippuen voidaan asentaa sisälle tai ulos. Koteloitujen paristojen etu tulee siitä, etteivät ne tarvitse erillistä suojaetäisyyttä ympärilleen, vaan ne voidaan asentaa esimerkiksi sähkötilaan tai yleiseen puistoon. Koteloitu kondensaattoriparisto on kompakti ratkaisu, joka räätälöidään asiakkaan vaatimusten mukaan ja se sisältää yleensä kaiken tarvittavan suojauksen ja ohjauksen. [19]

Rinnakkaiskondensaattoriparistojen kapasitanssit ja syöttävän verkon induktanssit saattavat muodostaa rinnakkaisresonanssiipiirejä, joiden vaikutuksesta yliaaltovirrat voivat vahvistua. Tämän vuoksi rinnakkaiskondensaattoriparistoa ei suositella käytettäväksi yliaaltopitoisessa verkossa, koska sillä on virtasäröä ja jännitesäröä vahvistava vaikutus. [4]

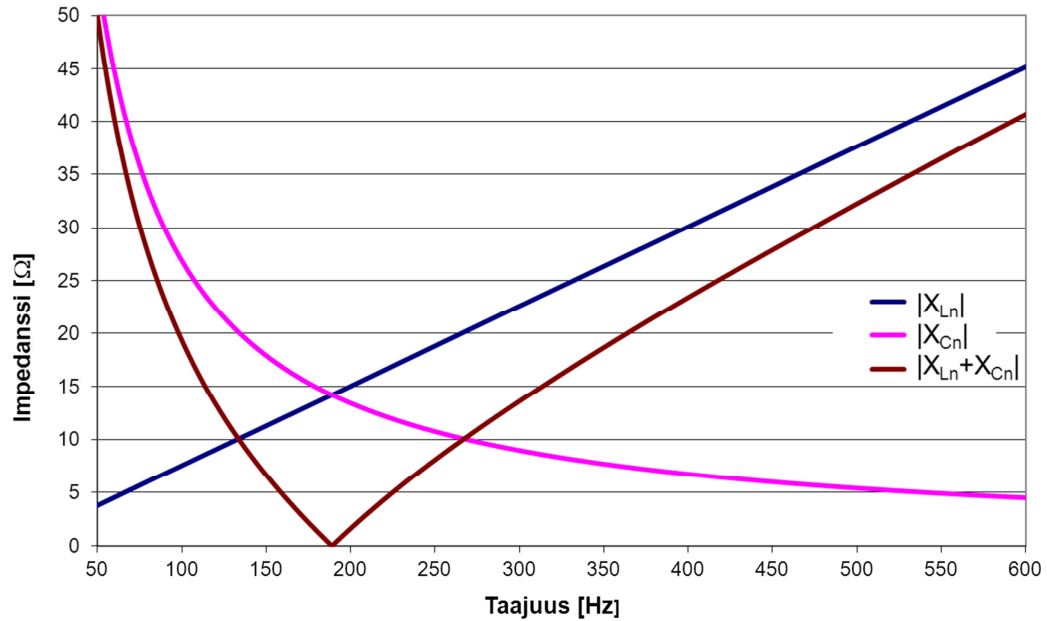
3.3 Estokelaparisto

Loistehon kompensoinnissa käytetään yhä enemmän estokelaparistoja, jotka soveltuvat loistehon tuottamiseen yliaaltopitoisissa verkoissa. Loistehon kompensointi suositellaan toteutettavaksi estokelaparistolla rinnakkaiskondensaattoripariston sijaan, mikäli jännitteen harmoninen kokonaissärö on yhdestä viiteen prosenttia. [1]

Estokelaparisto poikkeaa rakenteeltaan rinnakkaiskondensaattoriparistosta siten, että kondensaattorien kanssa sarjaan kytketään estokela. Estokelaparistossa kondensaattorien kapasitanssi ja estokelan synnyttämä induktanssi muodostavat sarjaresonanssiipiirin. Kondensaattorien kapasitanssit ja estokelan induktanssi valitaan siten, että sarjaresonanssiipiiri viritetään alemmalle taajuudelle kuin verkossa esiintyvä pienin harmoninen yliaaltotaajuus ja näin estetään yliaaltoja vahvistavan resonanssiipiirin syntyminen. [19; 20]

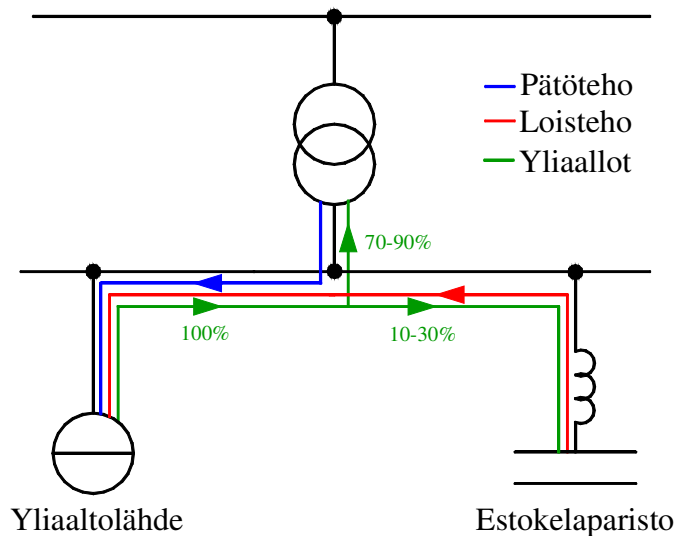
Viritystaajuus valitaan tapauskohtaisesti ja yleisiä viritystaajuuksia 50 Hz verkossa ovat 189, 204 ja 210 Hz. Estokelapariston viritystaajuutta valittaessa täytyy huomioida myös, ettei pariston viritystaajuus osu liian lähelle verkkokäskysignaaliajua, sillä estokelaparisto saattaa vaimentaa ja aiheuttaa ongelmia signaalien välityksessä. Verkkoyhtiöt määrittävät mille taajuudelle heidän hallinnoimaan verkkoon kytketyt estokelaparistot viritetään.

Kuvassa 10 on esitetty estokelapariston impedanssin käyttäytyminen taajuuden funktiona, kun estokelapariston viritystaajuudeksi on valittu 189 Hz. [20]



Kuva 10. 20 kV 8 MVar estokelapariston impedanssi taajuuden funktiona, kun viritystaajuudeksi on valittu 189 Hz.

Estokelapariston impedanssi muodostuu induktiivisen reaktanssin ja kapasitiivisen reaktanssin summan itseisarvona kuvan 10 mukaisesti. Viritystaajuuden alapuolella estokelaparisto tuottaa kapasitiivista loistehoa ja viritystaajuuden yläpuolella induktiivista loistehoa. Loistehon tuottamisen lisäksi estokelaparistolla voidaan suodattaa myös yliaaltoja. Kuvassa 11 esitetty estokelapariston liittäminen loistehoa kuluttavan ja yliaaltoja tuottavan kuormituksen rinnalle.



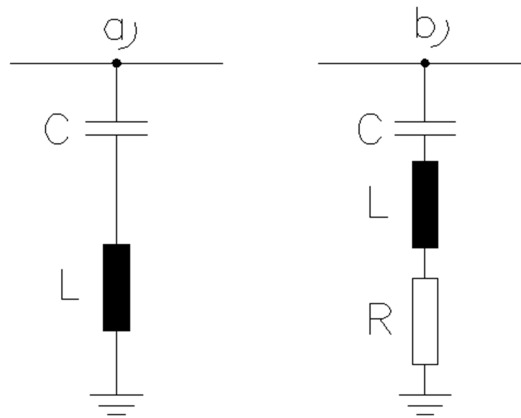
Kuva 11. Loistehon tuottaminen yliaaltopitoisessa verkossa estokelapariston avulla.

Estokelapariston suodatusominaisuuksiin vaikuttaa pariston kompensointiteho sekä viritystaajuuden valinta. Yleensä estokelaparisto suodattaa 10–30 % viidennen yliaaltovirran arvosta, kun pariston viritystaajuus on 189 Hz. Estokelaparisto voi muodostua useasta eri- tai samansuuruisesta portaasta, joita ohjataan kytkinlaitteilla tarvittavan kompensointitehon saavuttamiseksi.[4]

3.4 Yhdelle taajuudelle viritetty suodatin

Yhdelle taajuudelle viritetty suodatinparisto soveltuu loistehon tuottamiseen yliaaltojoissa verkossa ja sen avulla voidaan myös suodattaa verkkoa kuormittavia yliaaltoja. Loistehon kompensointi suositellaan toteutettavaksi suodatinparistolla rinnakkaiskondensaattoripariston ja estokelapariston sijaan, mikäli verkon jännitteen harmoninen kokonaissärö on yli viisi prosenttia. [19]

Suodatinparisto muodostuu yleensä kondensaattoreista ja kondensaattorien kanssa sarjaan kytketyistä suodatinkuristimista, kuten kuvassa 12 a) on esitetty. Joissakin suodatussovelluksissa kondensaattorien ja suodatinkuristimien kanssa sarjaan kytketään myös vaimennusvastuksia, kuten kuvassa 12 b) on esitetty. Vaimennusvastuksen tehtävänä on muokata suodattimen impedanssi käyrää loivemmaksi ja laajentaa suodatuskaistanleveyttä. [19]



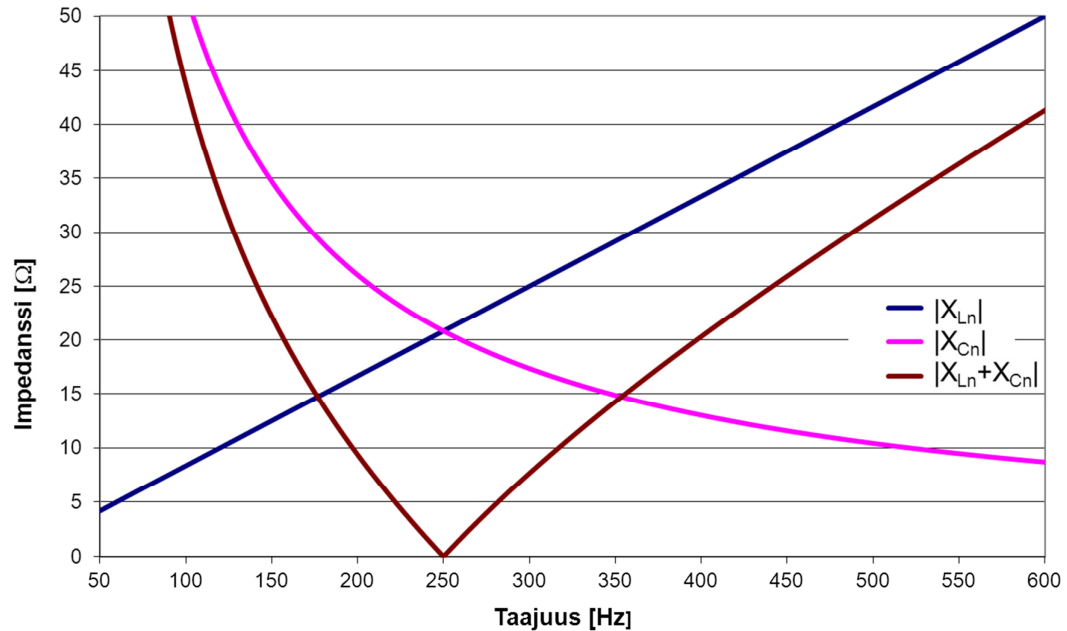
Kuva 12. Yhdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston kytkennät

Suodatinparistossa kondensaattorien muodostama kapasitanssi ja suodatinkuristimien synnyttämä induktanssi muodostavat sarjaresonanssipiirin. Kondensaattorien kapasitanssit ja suodatinkuristimen induktanssi valitaan siten, että niiden muodostama sarjaresonanssipiiri virityy sille harmoniselle yliaaltotaajuudelle, jota verkosta on tarkoitus suodattaa. [19]

Suodattimen suodatustulos on sitä parempi mitä pienempi on verkkoon siirtyvä yliaaltovirta. Verkkoon siirtyvän ja suodattimen suodattaman yliaaltovirran suuruudet riippuvat verkon ja suodattimen impedanssien suhteesta. Tämän vuoksi suodattimien impedanssi pyritään tekemään pienemmäksi kuin verkon impedanssi sillä taajuudella, jonka yliaaltovirtaa suodattimella on tarkoitus suodattaa. Mikäli verkon impedanssi jollakin

taajuudella on hyvin alhainen, kyseisen taajuuden suodatustulos jää hyvin heikoksi, koska suodattimen impedanssia ei aina saada riittävän pieneksi. Näin ollen suodattimen virittäminen kyseiselle taajuudelle ei ole kannattavaa heikon suodatustehon vuoksi. [19]

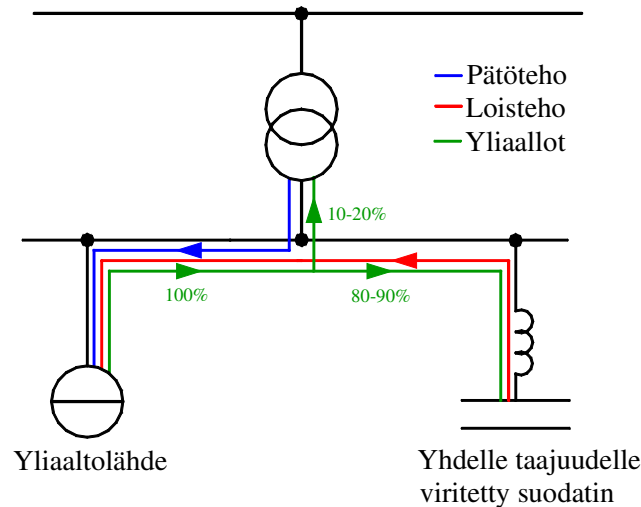
Viritystaajuus valitaan tapauskohtaisesti ja yleisimpiä viritystaajuuksia 50 Hz verkossa ovat 250, 350, 550 ja 650 Hz. Jokainen suodatettava yliaalto vaatii oman suodatinpariston. Kuvassa 13 on esitetty yhdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston impedanssin käyttäytyminen taajuuden funktiona viritystaajuudella 250 Hz



Kuva 13. 20kV 4MVar yhdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston impedanssi taajuuden funktiona, kun viritystaajuudeksi on valittu 250Hz.

Yhdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston impedanssi muodostuu induktiivisen reaktanssin ja kapasitiivisen reaktanssin summan itseisarvona kuvan 13 mukaisesti. Viritystaajuuden alapuolella suodatinparisto tuottaa kapasitiivista loistehoa ja viritystaajuuden yläpuolella induktiivista loistehoa. [19]

Suodatinparistot voivat muodostua useasta eri- tai samankokoisesta portaasta, joita ohjataan kytkinlaitteilla tarvittavan kompensointitehon saavuttamiseksi. Yliaaltojen suodattamisen lisäksi suodatinparistoa käytetään myös loistehon tuottamiseen. Kuvassa 14 on esitetty yhdelle taajuudelle viritetyn suodattimen liittäminen loistehoa kuluttavan ja yliaaltoja tuottavan kuormituksen rinnalle.



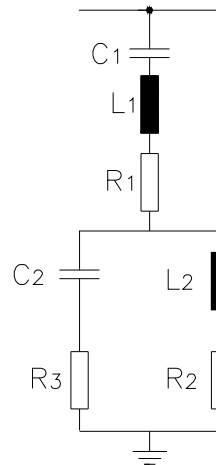
Kuva 14. Loistehon tuottaminen ja yliaaltojen suodattaminen yliaaltopitoisessa verkossa yhdelle taajuudelle viritetyn suodattimen avulla.

Tavallisesti suodatetaan kahdesta neljään suurinta, pienellä taajuudella esiintyvää yliaaltoa kukin omalla imupiirillään, tämän lisäksi saatetaan lisätä vielä laajakais-tasuodatin suodattamaan suuritaajuisimpia yliaaltoja. Suodatin muodostuu yleensä useasta eri- tai samankokoisesta portaasta, joita ohjataan kytkinlaitteilla tarvittavan kompensointitehon saavuttamiseksi. Kytettäessä suodattimia pois ja päälle, täytyy pienintä taajuutta suodattava suodatin kytkeä ensimmäisenä verkkoon ja viimeisenä pois verkosta, koska viritystaajuuden alapuolella yliaallot voivat vahvistua. Yliaallot saattavat kasvaa mikäli suodattimen ja syöttävän verkon reaktanssi muodostavat rinnakkaisresonanssiin. [19; 21]

3.5 Kahdelle taajuudelle viritetty suodatin

Kahdelle taajuudelle viritetty suodatin ei käytännössä juurikaan eroa suodatusominaisuuksiltaan kahdesta yhdelle taajuudelle viritetystä suodattimesta, vaan molemmilla ratkaisuilla voidaan suodattaa yhtäläisesti kaksi verkossa esiintyvää yliaaltotaajuutta. Resonanssitaajuuksien lähellä kahdelle taajuudelle viritetyn suodattimen ja kahden yhdelle taajuudelle viritetyn suodattimen ekvivalentti impedanssit eivät käytännössä eroa toisistaan. Kahdelle taajuudelle viritetystä paristosta käytetään myös nimeä kaksoisviritetty suodatinparisto, jota tässä työssä tullaan jatkossa käyttämään. Kaksoisviritetty suodatinparisto soveltuu loistehon tuottamiseen ja yliaaltojen suodattamiseen kuten yhdelle taajuudelle viritetty paristokin. Kaksoisviritetty paristo soveltuu käytettäväksi kohteessa, jossa verkkojännite on suuri ja tarvittava kompensointiteho pieni.[19] Kaksoisviritetyn suodatinpariston etuna verrattaessa sitä kahteen yhdelle taajuuteen viritettyyn paristoon voidaan pitää pienempiä perustaajuisia häviöitä sekä säästöä kuristimien eristysrakenteissa. [23]

Kuvassa 15 on esitetty kahdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston kytkentä.

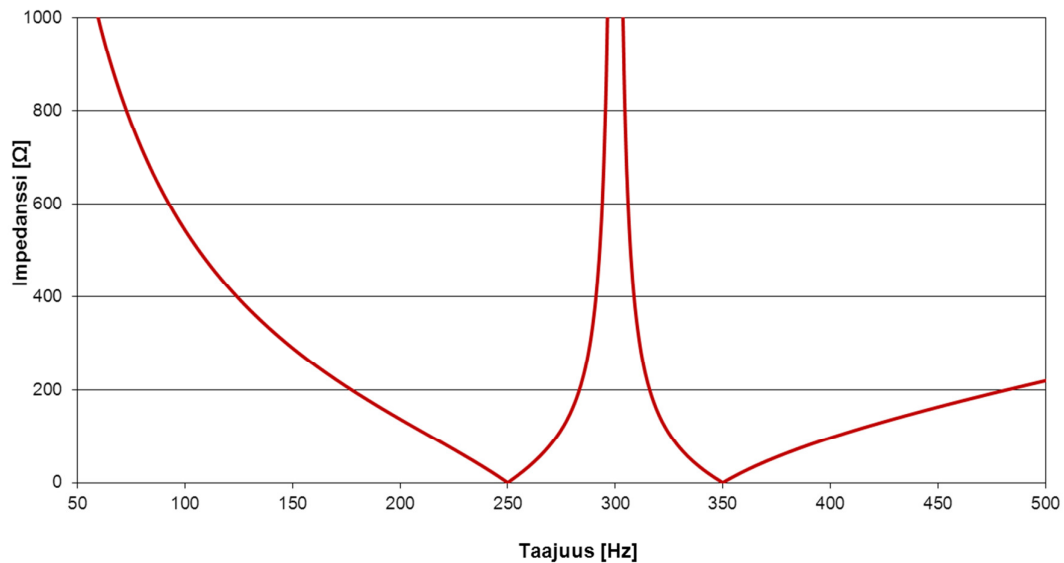


Kuva 15. Kahdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston kytkentä [23]

Kaksoisviritetty suodatinparisto muodostuu kondensaattoriryhmistä C_1 ja C_2 sekä suodatinkeloista L_1 ja L_2 . Kondensaattorien ja suodatinkelojen lisäksi joissakin sovelluksissa saatetaan käyttää myös vaimennusvastuksia R_1 , R_2 , R_3 . Lisäresistanssien mitoittamiselle ei ole annettavissa yksiselkosta mitoitusperustetta. Lisäresistanssien arvo täytyy määrittää simuloimalla sellaiseksi, että kaksoisviritetyn suodattimen impedanssi saavuttaa tavoitellun arvon koko suodatettavan taajuuskaistan ylitse. [19]

Kaksoisviritettyyn paristoon muodostuu kaksi sarjaresonanssitaajuutta, joita merkitään f_{s1} ja f_{s2} . Sarjaresonanssitaajuuksilla kaksoisviritetyn pariston impedanssi saa pienen arvon ja näin ollen verkossa esiintyvät sarjaresonanssitaajuiset yliaallot suodattuvat tehokkaasti. Sarjaresonanssitaajuuksien väliin syntyy rinnakkaisresonanssiin synnyttämä rinnakkaisresonanssitaajuus f_r . Rinnakkaisresonanssitaajuudella suodattimen impedanssi saa suuren arvon, joten kyseisellä taajuudella ilmenevät yliaallot eivät suodatu vaan saattavat jossain tapauksissa sen sijaan vahvistua rinnakkaisresonanssin vaikutuksesta. [22]

Kuvassa 16 on esitetty kahdelle taajuudelle viritetyn pariston impedanssikäyrä taajuuden funktiona.



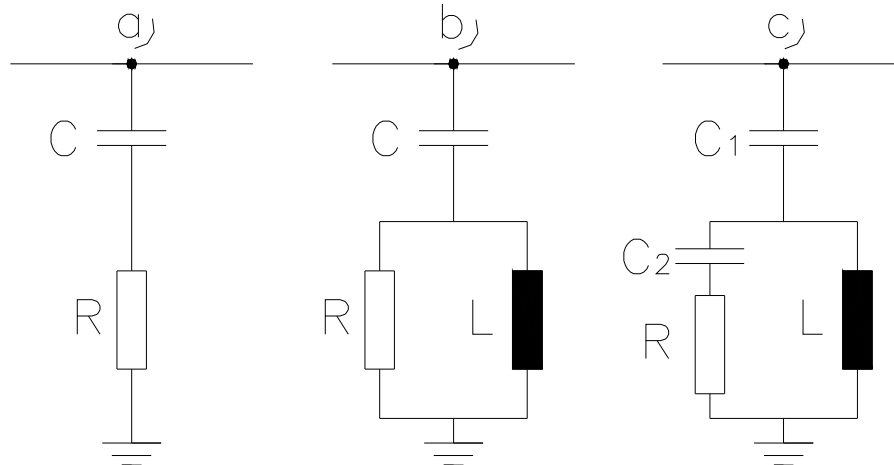
Kuva 16. Kahdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston impedanssi taajuuden funktiona, kun viritystaajuuksiksi on valittu 250 Hz ja 350 Hz.

Kuvan 16 tilanteessa kahdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston sarjaresonansitaajuudet ovat f_1 ja f_2 sekä rinnakkaisresonansitaajuus f_0 . Kaksoisviritetyn suodatinpariston etu verrattaessa kahteen rinnakkain kytkettyyn yhdelle taajuudelle viritettyyn suodatinparistoon muodostuu siitä, että ainoastaan suodatuskuristimen tulee kestää täysi verkon eristystason mukainen syöksyjännitepulsssi. Toteutettaessa sama ratkaisu kahdella yhdelle taajuudelle viritetyllä suodattimella tulee molempien suodattimien kuristimet mitoittaa kestämään täysi syöksyjännitepulsssi. Kaksoisviritetyn suodatinpariston perustaajuiset häviöt ovat pienemmät kuin vastaavien yhdelle taajuudelle viritettyjen paristojen. Kaksoisviritetyssä paristossa resistanssi mitoitetetaan mahdollisimman pieneksi häviöiden minimoimiseksi. Käytännössä resistanssi muodostuu ainoastaan kuristimen ja kondensaattoriryhmän muodostamista häviöresistansseista. Kaksoisviritettyparisto mahtuu pienempään tilaan ja tarvitsee ainoastaan yhden kytkentäkojeiston. [19; 23]

Kondensaattoriryhmien kapasitanssit ja suodatinkuristimien induktanssit valitaan siten, että sarja- ja rinnakkaisresonanssiipiiri viritetty niille harmonisille yliaaltotaajuuksille jotka verkosta on tarkoitus suodattaa. Suodattimen suodatustulos on sitä parempi mitä pienempi on verkkoon siirtyvä yliaaltovirta. Verkkoon siirtyvän ja suodattimen suodattaman yliaaltovirran suuruudet riippuvat verkon ja suodattimen impedanssien suhteesta. Tämän vuoksi suodattimien impedanssi pyritään tekemään pienemmäksi kuin verkon impedanssi niillä taajuuksilla, joiden yliaaltovirtoja suodattimella on tarkoitus suodattaa. Viritystaajuudet valitaan aina tapauskohtaisesti yleisimpien viritystaajuuksien ollessa 50 Hz verkossa 250, 350, 550 ja 650 Hz.[19; 22]

3.6 Laajakaistasuodatin

Kompensointijärjestelmä koostuu yleensä yhdestä tai useammasta yhdelle taajuudelle viritetystä suodattimesta sekä laajakaistasuodattimesta. Laajakaistasuodattimia on kolmea eri tyyppiä ja niiden kytkennät on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Laajakaistasuodatin paristojen kytkennät a) Ensimmäisen asteen laajakaistasuodatin, b) Toisen asteen laajakaistasuodatin, c) Kolmannen asteen laajakaistasuodatin. [23]

Laajakaistasuodatinta käytetään yleisesti suurilla taajuuksilla esiintyvien yliaaltojen suodattamisessa. Suuritaajuiset yliaaltovirrat jäävät normaalisti melko pieniksi ja koska verkon impedanssi suurilla taajuuksilla on melko suuri, yliaaltovirtojen suodattamiseksi ei vaadita pieni-impedanssista suodatinta. Laajakaistasuodattimen etu verrattuna yhdelle taajuudelle viritettyyn suodattimeen perustuu taloudellisuuteen koska jokaisen suuritaajuisen harmonisen yliaaltovirran suodattaminen omalla suodattimella tulisi kalliiksi, joten on taloudellisempaa hoitaa suodatus laajakaistasuodattimella. [19]

Laajakaistasuodatin suunnitellaan aina tapauskohtaisesti käyttökohteen vaatimusten mukaisesti, jotta saavutetaan paras mahdollinen suodatustulos tekniset ja taloudelliset reunaehdot huomioiden. Laajakaistasuodattimessa kuristimen rinnalle kytketään vastus. Vastuksen ansiosta myös viritystaajuutta suurempia taajuuksia pystytään suodattamaan, mutta vastus kuitenkin heikentää suodatustehoa viritystaajuudella. Laajakaistasuodattimen impedanssiarvo lähestyy suurilla taajuuksilla vaimennusvastuksen resistanssiarvoa. [23]

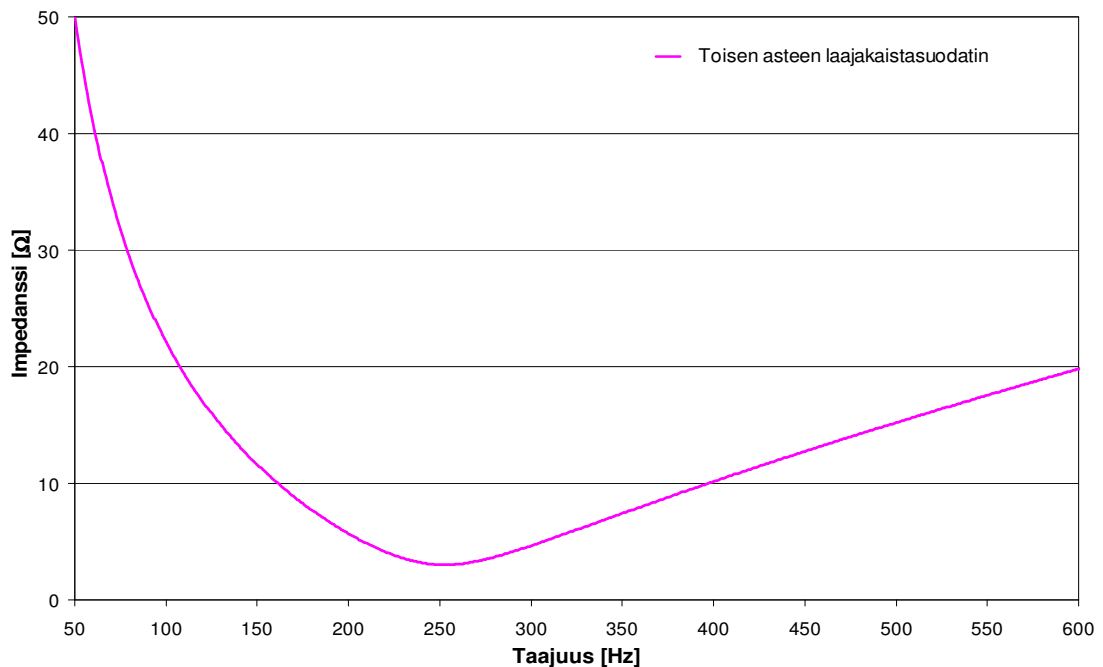
Laajakaistasuodattimen etuna verrattaessa sitä yhdelle tai kahdelle taajuudelle viritettyyn suodattimeen ovat, että sen toiminta ja kuormittuminen riippuvat vähemmän lämpötilan muutoksesta, taajuuspoikkeamasta, komponenttien valmistustoleransseista ja kondensaattorien sulakepaloista. Lisäksi laajakaistasuodatinparistolla on pieni impedanssiarvo laajemman taajuusalueen yli. Suodatusalueen laajuus vähentää tarvittavien suodatuspiirien lukumäärää. [23]

Laajakaistasuodattimen huono puoli verrattaessa sitä yhdelle tai kahdelle taajuudelle viritettyyn suodatinparistoon on se, että saman suodatustehon saavuttamiseksi laaja-

kaistasuodatin täytyy mitoittaa suuremman perustaajuisten tehon mukaan. Tämän lisäksi vastuksessa ja suodatinkuristimessa syntyvät häviöt ovat suuremmat. [23]

Ensimmäisen asteen laajakaistasuodatin muodostuu kondensaattoriryhmän kanssa sarjaan kytkettävästä vastuksesta. Ensimmäisen asteen laajakaistasuodatinta ei normaalisti käytetä suurten perustaajujen tehohäviöiden vuoksi, joten sitä ei käsitellä tässä työssä tämän enempää. Toisen asteen laajakaistasuodatin on suodatusteholtaan paras, mutta perustaajuiset häviöt ovat suuremmat kuin kolmannen asteen laajakaistasuodattimella. [23]

Toisen asteen laajakaistasuodattimen impedanssi taajuuden funktiona on esitetty kuvassa 18, viritystaajuuden ollessa 250 Hz.



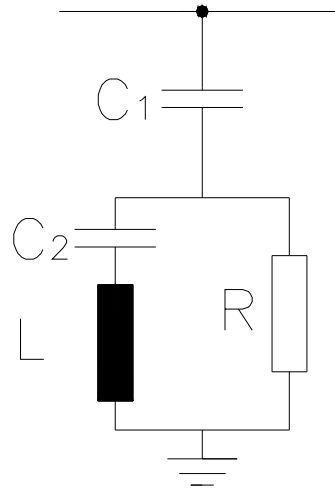
Kuva 18. 10 kV 2 MVAr toisen asteen laajakaistasuodattimen impedanssi taajuuden funktiona, kun viritystaajuudeksi on valittu 250 Hz.

Kolmannen asteen laajakaistasuodattimen etuna toisen asteen laajakaistasuodattimeen nähden voidaan pitää perustaajujen häviöiden merkittävää pienenemistä. Häviöiden pienentäminen tapahtuu vastuksen R kanssa sarjaan kytkettävällä kondensaattorilla C_2 . Kondensaattorin C_2 tehtävä on kasvattaa haaran impedanssia perustaajuudella pienentäen vastuksen kautta kulkevaa perustaajusta virtaa ja siten syntyviä häviöitä. Toisen ja kolmannen asteen laajakaistasuodattimia käytetään yleisesti sähköjakoalustoissa yliaaltojen suodattamiseen. [19; 23]

3.7 C-tyyppin suodatin

C-tyyppin laajakaistasuodatinta käytetään yleisesti suurilla taajuuksilla esiintyvien yliaaltojen suodattamisessa. Suuritaajuiset yliaaltovirrat jäävät normaalisti melko pieniksi, joten niiden suodattamiseksi ei vaadita pieniimpedanssista suodatinta. C-tyyppin suodattimen etu verrattuna yhdelle taajuudelle viritettyyn suodattimeen perustuu taloudellisuuteen, koska jokaisen suuritaajuisen harmonisen yliaaltovirran suodattaminen omalla suodattimella tulisi kalliiksi. Näin ollen on taloudellisempaa hoitaa suodattaminen C-tyyppin suodattimella, jonka pieni impedanssinen suodatuskaista on laaja. [19; 23]

Kuvassa 19 on esitetty C-tyyppin suodatinpariston kytkentä. Paristo koostuu pääkondensaattoriryhmästä C_1 , vaimennusvastuksesta R , apukondensaattoriryhmästä C_2 ja suodatinkuristimesta L_1 . Vastuksen ansiosta myös viritystaajuutta suurempia taajuuksia pystytään suodattamaan vastus kuitenkin heikentää suodatustehoa viritystaajuudella. Suodattimen impedanssi arvo lähestyy suurilla taajuuksilla resistanssin R arvoa.

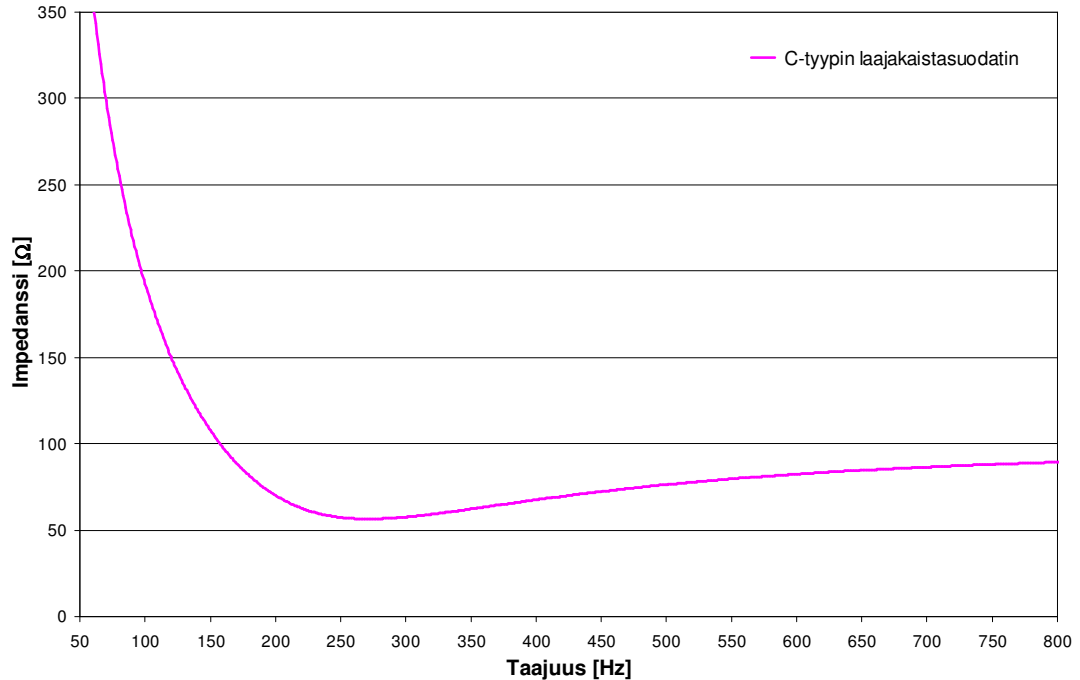


Kuva 19. C-tyyppin suodatinpariston kytkentä. [23]

Verrattaessa C-tyyppin suodatinparistoa yhdelle tai kahdelle taajuudelle viritettyyn suodatinparistoon on se, että sen toiminta ja kuormittuminen riippuvat vähemmän lämpötilan muutoksesta, taajuuspoikkeamasta, komponenttien valmistustoleransseista ja kondensaattorien sulakepaloista. C-tyyppin suodatinparisto muodostaa laajemman pieni impedanssisen suodatusalueen. Suodatusalueen laajuus vähentää tarvittavien suodatuspiirien lukumäärää, jonka ansiosta C-tyyppin paristo tulee taloudellisemmaksi. [19; 23]

C-tyyppin pariston huonona puolena verrattuna sitä yhdelle tai kahdelle taajuudelle viritettyyn suodatin paristoon on se, että saman suodatustehon saavuttamiseksi C-tyyppin suodatinparisto täytyy mitoittaa suuremman perustaajuisen tehon mukaan. Vastuksessa ja suodatinkuristimessa syntyvät häviöt ovat myös suuremmat kuin yhdelle tai kahdelle taajuudelle viritetyllä paristolla. [23]

C-tyyppin suodattimen impedanssi taajuuden funktiona on esitetty kuvassa 20 viritystaajuuden ollessa 250Hz.



Kuva 20. 66 kV 10 MVAr C-tyyppin laajakaistasuodattimen impedanssi taajuuden funktiona, kun viritystaajuudeksi on valittu 250 Hz.

C-tyyppin paristo sijoittuu suodatusominaisuuksiltaan toisen ja kolmannen asteen laajakaistasuodattimien väliin. C-tyyppin suodattimen etu verrattaessa sitä muihin laajakaistasuodattimiin on huomattavasti pienemmät perustaajuiset häviöt. [23]

Apukondensaattoriryhmän kapasitanssi ja suodatinkuristin induktanssi mitoitetaan siten, että ne muodostavat sarjaresonanssiin perustaajuudella. Verkon perustaajuudella apukondensaattoriryhmän ja suodatinkuristimen muodostaman haaran impedanssi on lähellä nollaa, joten perustaajuinen virta kulkee kyseisen haaran kautta aiheuttamatta tehohäviöitä vastuksessa. Mikäli kompensoitavassa verkossa ei jossakin tietyssä kytkentätilanteessa esiinny lainkaan suodatettavia yliaaltoja, tällöin ainoastaan pääkondensaattoriryhmä toimii aktiivisesti tuottaen jatkuvasti tarvittavan perustaajuisten kompensointitehon. [23]

Pääkondensaattori- ja apukondensaattoriryhmän kapasitanssit mitoitetaan siten, että ne muodostavat sarjaresonanssiin suodatinkuristimen induktanssin kanssa suodatettavalla yliaaltotaajuudella. Suodatettava yliaaltotaajuus mille sarjaresonanssiin viritetään, valitaan yleisesti suurimman verkossa esiintyvän yliaaltovirran mukaiseksi. Vastuksen avulla säädetään C-tyyppin suodattimen suodatuskaistanleveyttä siten, että tarvittava suodatustulos saavutetaan. Vastuksen resistanssia mitoitettaessa tulee huomioida suodatukselle asetetut suodatusvaatimukset, sillä vastusarvon kasvattaminen parantaa suodatustulosta viritystaajuudella ja sen lähistöllä mutta heikentää suodatusta korkeammilla taajuuksilla. Vastuksen resistanssiarvon kasvattaminen suureksi aiheuttaa suodatusominaisuuksien ja impedanssikäyrän muuttumisen vastaamaan yhdelle taajuudelle viritettyä suodatinta. [19; 23]

4 KOMPENSOINTILAITTEIDEN MITOITTAMINEN

Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus pyritään suorittamaan aina siinä jännite-
tasossa, jossa niiden tarve esiintyy. Näin pyritään välttämään loistehon ja yliaaltojen
aiheuttamat häviöt ja resonanssitilanteet siirrettäessä niitä muuntajan lävitse. Loistehon
kompensointilaitte ja yliaaltosuodatin kannattaa sijoittaa aina mahdollisimman lähellä
loistehoa kuluttavaa laitetta tai yliaaltolähdettä. Tällöin loistehon kompensointi ja yliaal-
tojen suodatus toteutetaan laitekohtaisesti, mutta se ei aina ole mahdollista tai myöskään
taloudellisinta. Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus voidaan tarvittaessa to-
teuttaa myös keskitetysti tai ryhmäkohtaisesti, jolloin investointikustannukset jäävät
usein pienemmiksi. [20]

Tässä luvussa käydään lävitse kompensointilaitteiden valinnassa ja mitoittamisessa
tarvittavat lähtötiedot, joiden perusteella laitteessa käytettävät komponentit saadaan
mitoitettua. Tämän lisäksi esitellään eri paristotyyppien mitoittamisessa käytettävät mi-
toitusyhtälöt.

4.1 Kompensoinnin toteuttaminen

Loistehon kompensointi voidaan toteuttaa laitekohtaisesti, ryhmäkohtaisesti tai keskite-
tysti riippuen kohteesta. Laitekohtainen kompensointi pyritään sijoittamaan mahdolli-
simman lähelle kompensoitavaa laitetta. Laitekohtaista kompensointia sovelletaan taval-
lisesti moottoreille. Kompensoitaessa loistehoa laitekohtaisesti riski resonanssien muo-
dostumiselle verkon yliaaltojen kanssa on pienempi kuin ryhmäkompensoinnissa. [1;
20]

Ryhmäkompensointi soveltuu kohteeseen jossa usean johtolähdön kompensointi
voidaan toteutetaan yhdellä kompensointilaitteistolla. Laitekohtaiseen kompensointiin
verrattaessa ryhmäkompensoinnin laitehankinta tulee edullisemmaksi. Keskitetty kom-
pensointi hoidetaan nykyään loistehonsäätimen avulla kytkettävillä automatiikkaparis-
toilla. Keskitetty kompensointi voidaan sijoittaa teollisuuslaitoksen sähköasemalle. [4;
20]

Yliaaltosuodatin soveltuu kytkettäväksi verkkoon, jossa yliaaltopitoisuudet ovat
suuria, eli jännitesärö on yli viisi prosenttia. Yliaaltosuodattimen avulla voidaan tuottaa
tarvittava perustajuinen loisteho sekä suodattaa yliaaltoja parantaen sähkönlaatua pie-
nentämällä verkon jännitesäröä. Estokelapariin verrattuna yliaaltosuodatin suodattaa
enemmän yliaaltoja. Suurimmat yliaaltovirrat esiintyvät pienillä yliaaltotaajuuksilla,

joten yliaaltosuodattimen pitää näillä taajuuksilla olla pieni-impedanssisia, jotta yliaallot saadaan suodatettua standardin sallimalle tasolle. Suurilla taajuuksilla yliaaltovirrat jäävät normaalisti melko pieniksi, joten niiden suodattamiseksi hyväksyttävälle tasolle suodattimelta ei vaadita kovin pieniä impedanssiarvoja. [1; 20]

Jokaisen suuritaajuuden harmonisen yliaaltovirran suodattaminen omalla suodattimella tulisi kalliiksi, joten on taloudellisempaa hoitaa suodatus laajakaistasuodattimella. Yliaaltosuodattimia käytetään keskitettynä kompensointina keskijänniteverkoissa. Yliaaltosuodatintyyppiä valittaessa tarvitaan hyvä tietämys verkosta johon suodatin tullaan asentamaan, koska väärin mitoitettu laite saattaa herkästi muodostaa resonanssiipiirejä, jotka pahentavat verkon tilannetta. [19]

4.1.1 Kompensointilaitteen valinta

Kompensointi- ja suodatinlaitetta mitoitettaessa kompensoitavan verkon yliaaltopitoisuus täytyy selvittää mahdollisimman hyvin, jotta vältytään resonanssitilanteelta. Oikeanlaisen kompensointilaitteen valintaan käytetään simulointiohjelmistoja, joiden avulla simuloidaan asiakkaan verkon ja yliaaltojen käyttäytymistä eri kytkentätilanteissa. Laitteet valitaan tapauskohtaisesti kuhunkin tilanteeseen sopivaksi ja mikäli mahdollista, varataan laajennusvara tulevaisuuden kuormituksen kasvu huomioiden. Keskijännitetasolla suoritettavan kompensoinnin laiteratkaisujen valintaa ja mitoitusta ohjeistetaan muun muassa standardeissa IEC 60871-1, IEC 61642, IEEE 1036 ja IEEE 1531.

Loistehon kompensointi ratkaisut voidaan ryhmitellä seuraavasti: [5]

- Kompensointi voidaan toteuttaa laitekohtaisesti, ryhmäkohtaisesti tai keskitetysti
- Pien-, keski-, tai suurjänniteverkon kompensointi
- Induktiivisen loistehon tai kapasitiivisen loistehon kompensointi
- Pelkkä kompensointi tai kompensointi ja yliaaltojen suodatus
- Kompensointiparistojen käyttö joko sarja- tai rinnakkaiskytkennässä
- Passiivi- tai aktiivilaitteet

Loistehon kompensointi voidaan toteuttaa sähköverkon eri osissa tai jännitetasoilla sen mukaan, mikä katsotaan teknisesti ja taloudellisesti parhaaksi ratkaisuksi tapauskohtaisesti. Tässä työssä käsitellään keskijännitteellä ja suurjännitteellä suoritettavaa kompensointia ja suodattamista. Keskijännitteellä kompensointi- ja suodatuslaitteita tarvitaan pääsääntöisesti teollisuudessa ja jakeluverkkoyhtiöissä. Teollisuuden käyttökohteita ovat esimerkiksi tuulipuistot, öljyteollisuus, kaivokset, paperiteollisuus ja metalliteollisuus. Keskijännitteellä käytetyimmät laiteratkaisut ovat rinnakkaiskondensaattoriparisto, estokelaparisto ja yhdelle taajuudelle viritetty suodatinparisto sekä laajakaistasuodatin. Suurjännitteellä yleisimpiä laiteratkaisuja ovat rinnakkaiskondensaattori-, suodatin-, kaksoisviritetty-, ja C-tyyppin paristo. [19]

Muita loistehon kompensointi- ja suodatusratkaisuja ovat muun muassa sarjaparisto ja staattinen kompensattori, joita käytetään teollisuuslaitoksissa ja siirtoverkoissa. Sarjaparistoja käytetään pitkillä siirtolinjoilla johdon induktanssin aiheuttaman virran ja jännitteen välisen vaihekulman kasvun rajoittamisessa. Vaihekulman kasvu pienentää johdon pätötehon siirtokapasiteettiä. Sarjaparisto suositellaan sijoitettavaksi siirtolinjan puoleen väliin tuottamaan kapasitiivista loistehoa. Sarjapariston kapasitanssi pienentää johdon induktanssia jonka vaikutuksesta tehon siirtokapasiteetti kasvaa 30–50 %. Teollisuudessa staattisia kompensattoreita käytetään nopeasti tapahtuvien jännite- ja loistehon muutoksien tasoittamiseen ja kompensointiin. Sähkönsiirtoverkoissa staattista linjakompensaattoria käytetään suodattamaan harmonisia yliaaltoja, tasoittamaan jännitteen vaihteluja ja epäsymmetrisiä kuormia sekä vaimentamaan linjakytkentöjen aiheuttamia äkillisiä muutoksia. [9; 18]

4.1.2 Kompensointilaitteen mitoittamisen lähtötiedot

Kompensointilaitteen mitoittamisessa tarvitaan runsaasti teknisiä tietoja asennuskohteen verkosta ja ympäristöolosuhteista, jotta pystytään mitoittamaan mahdollisimman optimaalinen laiteratkaisu. Pariston mitoittaminen muodostuu teknistaloudelliseksi optimointitehtäväksi, jonka suurimmaksi haasteeksi muodostuu usein lähtötietojen puutteellisuus tai niiden virheellisyys. Kompensointilaitteiden mitoittamisessa on otettava huomioon erilaisia teknisiä reunaehtoja, joiden puitteissa pariston optimaalinen rakenne tulee toteuttaa. Reunaehtoja asettavat muun muassa standardit, joista yleisimmin käytettävät standardit ovat IEC ja IEEE, joiden ohjeistukseen asiakas-spesifikaatiot usein nojaavat. Taulukossa 5 on esitetty eri paristotyyppien mitoittamisessa tarvittavat lähtötiedot sinisellä värillä.

Taulukko 5. Kompensointilaitteiden mitoittamisessa tarvittavat lähtötiedot.

Mitoituksen lähtötiedot	Rinnakkaiskondensaattoriparisto	Estokelaparisto	Suodatinparisto	Laajakaistasuodatin	C-tyypin suodatin
Vaadittu standardi IEC/IEEE					
Perustaajuinen kompensointiteho tai kapasitanssi					
Nimellis- ja maksimijännite					
Verkon nimellistaajuus ja taajuusvaihtelut					
Oikosulkuvirta ja kesto aika					
Oikosulkuteho ja suhteellinen oikosulkuimpedanssi					
Eristystasovaatimus					
Tähtipisteen käsittely maadoitettu/maadoittamaton					
Ryömintämatkavaatimus					
Ympäristönlämpötila					
Asennustila					
Maanjärjestys- ja tuulivaatimus					
Verkon kokonaisjännitesärökerroin THD					
Yksittäisten yliaaltotaajuuksien jännitesärö					
Viritystaajuus					
Yliaaltovirrat					
Suodatusvaatimus					
Hyvyytluku tai vastuksen resistanssiarvo					

Taulukossa 5 esitettyjen lähtötietojen perusteella optimaalisen paristorakenteen mitoittaminen on mahdollista. Tämän työn tarkoituksena ei ole perehtyä verkostojen simulointiin ja järjestelmien analysointiin, vaan tässä työssä perehdytään kompensointilaitteiden tekniseen mitoittamiseen yllä olevassa taulukossa esiteltyjen lähtötietojen perusteella.

4.1.3 Kompensointilaitteiston mitoittamista ohjeistavat standardit

Loistehon kompensointilaitteiden ja niissä käytettävien komponenttien mitoittamista, testauksesta ja käyttöä ohjeistetaan lukuisissa standardeissa, joista kattavimpia ovat IEC ja IEEE standardoimisjärjestöjen standardit. Tässä työssä mitoittamista käsitellään ainoastaan IEC standardien ohjeistuksen mukaan, koska ALSTOM Grid Oy:n valmistamista tuotteista merkittävimmän osan mitoitus perustuu IEC standardeihin. Kompensointilaitteiden mitoittamista käsittelevät ja tämän työn kannalta oleellimmat IEC ja IEEE standardit on kerätty pääpiirteittäin alla olevaan listaukseen.

IEC 60871-1 Shunt capacitors for a.c. power systems having a rated voltage above 1000 V – Part 1: General

Standardissa määritellään yhtenevät säännöt ja ohjeistukset liittyen yli 1000 V rinnakkais- ja suodatinkondensaattoriyksiköiden ja paristojen ominaisuuksiin, mitoittamiseen sekä testaamiseen. Standardi antaa myös ohjeet kondensaattorien ja paristojen asentamiseen, toimintaan sekä turvalliseen käyttöön. [13]

- Normaalit käyttöolosuhteet

Standardissa lämpötila-alueet määritellään ylä- ja alalämpötilojen mukaan. Alempi lämpötila tarkoittaa ympäristön lämpötilaa, jossa kondensaattori voidaan kytkeä verkkoon. Ylempi lämpötila on se maksimiympäristölämpötila, jossa kondensaattoria saadaan käyttää. Taulukko selvittää ylälämpötilojen ja vastaavien keskiarvoisten lämpötilojen riippuvuutta käyttöajasta. [13]

Taulukko 6. Kondensaattorien lämpötilarajat standardin IEC 60871-1 mukaan.

Luokka	Ympäristönlämpötila (°C)		
	Maksimi	Keskimääräinen	
		24h	1 vuosi
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

Standardin määrittelemä lämpötilakategoria kattaa lämpötila-alueen $-50\text{ °C}/+55\text{ °C}$. Standardin mukaiset vaatimukset ovat voimassa maksimissaan korkeuteen 1000 metriä meren pinnasta asti. [13]

- Ylijännitekestoisuus

Kondensaattoriyksikön ylijännitekestoisuudeksi standardi määrittää

1.10-kertainen nimellisjännite 12 tuntia vuorokaudessa

1.15-kertainen nimellisjännite 30 minuuttia vuorokaudessa

1.20-kertainen nimellisjännite 5 minuuttia

1.30-kertainen nimellisjännite 1 minuutti

On kuitenkin huomioitava, että kondensaattoreita tulisi käyttää vain tilapäisesti maksimijännitteellä ja maksimilämpötilassa samanaikaisesti. [13]

- Ylivirtakestoisuus

Kondensaattoriyksikön suurin sallittu jatkuva ylivirta on 1.3-kertaa yksikön nimellisvirta. Kapasitanssitoleranssista johtuen ylivirran arvo saattaa nousta jopa 1.43-kertaiseksi nimellisvirtaan verrattuna. [13]

- Toleranssit

Kondensaattoriyksiköiden ja paristojen kapasitanssit eivät saa poiketa nimellisestä kapasitanssista enempää kuin:

-5 %/+10 % kondensaattoriyksiköille

-5 %/+5 % kapeakaistasuodattimissa käytettäville kondensaattoriyksiköille

-7,5 %/+7,5 % laajakaistasuodattimissa käytettäville kondensaattoriyksiköille

-5 %/+10 % paristo, jonka teho on ≤ 3 MVA

0 %/+10 % paristo, jonka teho on > 3 MVA ja ≤ 30 MVA

0 %/+ 5 % paristo, jonka teho on > 30 MVA

Kapasitanssi tulee mitata standardin määrittelemässä lämpötilassa +20 °C. [13]

- Laatu ja testaus

Standardissa määritellään kondensaattoriyksiköiden testausolosuhteet ja suoritettavat rutiini- ja tyyppitestit. Tässä työssä testausta ei käsitellä tämän enempää. Suoritettavat testit ja testausarvot löytyvät kyseisestä standardista. [13]

- Turvallisuusvaatimukset purkauslaitteelle

Kondensaattoriyksikön tulee purkautua maksimissaan 10 minuutin aikana vähintään 75 voltin jäännösjännitteiseksi tai sen alle. Kondensaattoriyksikön alkaessa purkautua purkautumisen alkuhetken jännitteeksi oletetaan $\sqrt{2}$ - kertaa yksikön nimellisjännite. [13]

IEC 61000-3-6 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems

Standardissa määritellään harmonisten yliaaltojännitteiden mitoitustasot sekä sallitut häiriönpäästötasot keski- ja suurjännitteellä. [6]

IEC 60071-1 ja IEC 60071-2 Insulation co-ordination

Standardit käsittelevät laitteiden eristystasojen valintaa, ilmajälivaatimuksia sekä esittelevät standardin mukaiset testit ja testaustasot. [24]

IEC 60815-1 Guide for the selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions.

Standardissa on käsitelty ympäristön saasteisuuden asettamia vaatimuksia eristimille ja niiden ryömintämatkoille. [25]

IEC 60076-6. Power transformers – Part 6: Reactors.

Standardissa määritellään yhtenevät säännöt ja ohjeistukset liittyen eri kuristintyyppien ominaisuuksiin, mitoitukseen sekä testaamiseen. [26]

IEEE-18 Standard for Shunt Power Capacitors

Standardissa määritellään yhtenevät säännöt ja ohjeistukset liittyen yli 216 V ja 2.5 kVAr rinnakkaiskondensaattoriyksiköiden, mitoitukseen sekä testaamiseen. Standardi antaa myös ohjeet kondensaattorien ja paristojen asentamiseen, toimintaan sekä turvalliseen käyttöön. [27]

- Normaalit käyttöolosuhteet

Standardissa kondensaattoriyksikön jatkuvaksi maksimilämpötilaksi on määritelty +46 °C. Tässä lämpötilassa kondensaattoriyksikön tulee pystyä toimia ilman vioittumista 24 tuntia päivässä yksikön huippulämpötilan ollessa +55 °C. Yksikön minimilämpötilaksi on määritelty -40 °C siinä lämpötilassa yksikön tulee toimia jatkuvasti vioittumatta. Standardin mukaiset vaatimukset ovat voimassa maksimissaan korkeuteen 1800 metriä meren pinnasta asti. [27]

- Ylijännitekestoisuus

Kondensaattoriyksikön ylijännitekestoisuudeksi standardi määrittää

1.10-kertainen jatkuva nimellisjännite

1.20-kertainen huippujännite, ylittämättä yksikön nimellisjännitettä kerrottuna kertoimella $1.2\sqrt{2}$. Jännitteen oletetaan sisältävän harmoniset yliaaltojännitteet pois lukien transientit. [27]

- Ylivirtakestoisuus

Kondensaattoriyksikön sallittu jatkuva ylivirta on 1.35 kertaa nimellisvirta perustuen nimellisloistehoon ja nimellisjännitteeseen. [27]

- Tehonkestoisuus

Kondensaattoriyksikön maksimi tehonkeston tulee olla 1.35-kertainen nimellisloistehoon nähden. [27]

- Toleranssit

Kondensaattoriyksiköiden ja paristojen kapasitanssit eivät saa poiketa nimellisestä kapasitanssista enempää kuin -0 %/+10 %. Kapasitanssi tulee mitata standardin määrittelemässä lämpötilassa +25 °C. [27]

- Laatu ja testaus

Standardissa määritellään kondensaattoriyksiköiden testausolosuhteet ja suoritettavat rutiini- ja tyyppitestit. [27]

- Turvallisuusvaatimukset purkauslaitteelle

Kondensaattoriyksikön tulee purkautua maksimissaan viiden minuutin aikana vähintään 50 voltin jäännösjännitteiseksi tai sen alle. Kondensaattoriyksikön purkautumisen alkajalla yksikön varausjännitteen arvoksi oletetaan $\sqrt{2}$ kertaa yksikön nimellisjännite. [27]

IEEE-519 Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems

Standardissa esitellään harmonisia yliaaltolähteitä sekä raja-arvot verkossa esiintyville harmonisille yliaaltojännitteille ja -virroille.[28]

IEEE-1036 Guide for Application of Shunt Power Capacitors

Standardissa määritellään yhtenevät säännöt ja ohjeistukset liittyen yli 2400 V rinnakkaiskondensaattoriyksiköiden ja paristojen ominaisuuksiin, mitoitukseen sekä testaamiseen. Standardi antaa myös ohjeet kondensaattorien ja paristojen asentamiseen, toimintaan sekä turvalliseen käyttöön. [29]

- Standardiin on koottu luettelo kondensaattoriyksiköiden tyyppillisistä nimellisjännite-, nimellisteho- sekä BIL-tasoista. [29]
- Standardissa esitellään paristojen epäbalanssisuojausta sekä vertaillaan sulakkeellisten, sulakkeettomien ja ulkoisilla sulakkeilla olevien paristojen eroavaisuuksia. [29]

IEEE-1531 Guide for Application and Specification of Harmonic Filters

- Standardissa esitellään yliaaltosuodattimen pääkomponentit ja niiden mitoittamisessa huomioitavia pääkohtia. [30]

- Standardin mukainen mitoitusprosessissa ensimmäisenä määritetään tarvittava loistehon määrä, jonka jälkeen selvitetään viritystaajuus. Seuraavaksi tehdään selvitys, jotta varmistutaan suodatusvaatimusten täyttymisestä. Mikäli vaadittu suodatustaso saavutetaan, tämän jälkeen voidaan siirtyä komponenttien mitoittamiseen. [30]

4.2 Sähköiset ja ympäristötekniset mitoitusperusteet

Kompensointilaitteen suunnittelussa on huomioitava erilaisia lähtötietoja ja niiden vaikutusta laitteen sähkötekniiseen mitoittamiseen. Esimerkiksi verkossa esiintyvät harmoniset yliaaltovirrat ja verkon nimellisjännite yhdessä vaikuttavat paristossa käytettäviltä komponenteilta vaadittuun jännitemitoitukseen. Sähköverkon nimellisjännite puolestaan määrää komponenttien eristystason. Kompensointilaitteen komponenteilta vaaditun ryömintämatkan valintaan vaikuttavat verkon eristystaso sekä ympäristöolosuhteet. [19]

Sähkötekniisen mitoituksen kannalta määrääväksi tekijäksi muodostuu yleensä vain muutama tässä luvussa esitelty tekijä kerrallaan, joten optimaalisen paristorakenteen hakeminen lähtötietojen perusteella on mahdollista. Jotta optimaalinen laiteratkaisu voidaan ylipäätään saavuttaa, on ensin ymmärrettävä sähkötekniisten lähtötietojen vaikutus laitteistossa käytettävien komponenttien mitoittamisessa. Seuraavissa luvuissa käsitellään kompensointilaitteiden sähkötekniset mitoitusperusteet. Hetkellinen- ja jatkuva jänniterasitus ovat kriittisimmät sähkötekniset mitoitustekijät ja niiden valintaa tulee kiinnittää erityisen tarkkaan huomiota.

4.2.1 Jännite

Pariston jänniterasitus voidaan jakaa normaalin käyttötilanteen jatkuvaan jänniterasitukseen ja hetkelliseen jänniterasitukseen. Jatkuva jännite tarkoittaa jännitettä, joka voidaan mitata pariston navoista sen normaalin käytön aikana. Hetkellinen jänniterasitus ilmenee joko vika- tai kytkentätilanteessa tai ilmastollisena ylijännitteenä. Yksittäisille komponenteille kuten kondensaattori, kuristin ja vastus suoritetaan laboratorioissa rutiini- ja tyyppitestit, joilla testataan hetkellisen jänniterasituksen riittävä kestoisuus. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan ensin jatkuva ja sitten hetkellinen jänniterasitus. [17]

4.2.1.1 Jatkuva jänniterasitus

Kompensointilaitteen jatkuva jänniterasitus mitoitetaan verkon nimellisjännitteen mukaan, mikäli syöttävässä verkossa ei esiinny yliaaltoja. Yliaaltovirrat aiheuttavat jänniterasituksen kasvun, mikä tulee ottaa huomioon kompensointilaitteen jännitemitoituksessa. Yliaaltovirtojen aiheuttama ylijännite voidaan määrittää neliösumman U_{RSS} avulla tai aritmeettisesti U_{arit} yhteen laskemalla. Aritmeettisesti laskien saadaan pahin mahdolli-

nen tilanne, koska kunkin yliaaltovirran muodostaman jännitteen tehollisarvo summaataan suoraan yhteen.

Aritmeettisesti laskettaessa siis oletetaan, että yliaaltovirtojen vaihesiirtokulmat osuvat siten, että kaikkien huippu esiintyy samalla ajan hetkellä. Jännitteen laskeminen aritmeettisesti esitellään yhtälössä 42. Käytännössä näin ei koskaan kuitenkaan tapahdu, joten jänniterasituksen arvioinnissa käytetään toistakin laskentatapaa. [19]

Neliösumman neliöjuuri menetelmällä ratkaistaessa yliaalloista johtuvaa jänniterasitusta, perustajuiseen jännitteeseen lisätään neliöjuuri yliaaltojännitteiden neliösummasta. Jännitteen laskeminen neliösumman neliöjuuri menetelmää käyttäen esitellään yhtälössä 43. Tässä työssä kondensaattorien jatkuva jänniterasitus lasketaan yhtälössä 39 esittämällä tavalla. Kuristimien jänniterasitusta laskettaessa käytetään yleisesti molempia luvussa 4.4 esitettäviä laskentatapoja. Jatkuva jänniterasitus on pariston mitoituksen kannalta merkittävä tekijä ja verkossa esiintyvät yliaallot vaikuttavat jänniterasituksen syntymiseen oleellisesti, joten yliaaltojen tunteminen on jännitemitoituksen kannalta tärkeää. [19]

4.2.1.2 Hetkellinen jänniterasitus

Sähköverkossa esiintyy hetkellisiä ylijännitteitä, joiden kesto aika on yleensä lyhyt mutta amplitudi voi olla hyvinkin suuri. Hetkellisiä ylijännitteitä syntyy, kun verkkoon liitetään tai pois kytketään kuormia. Ilmastolliset ylijännitteet ovat kuitenkin sähköverkon komponenttien kannalta tuhoisimpia. Ilmastollisten ylijännitteiden kesto aika on yleensä ainoastaan mikrosekuntien luokkaa, mutta niiden jännitteen amplitudit ovat suurimpia. [17]

Kompensointilaitteissa käytettävien komponentin eristyksen jännitelujuutta testataan yleisesti syöksyjänniteimpulssilla. Syöksyjänniteimpulssin nousu- ja laskuaika sekä amplitudi määritellään standardissa IEC 60060-1. Komponentin hetkellinen jännitteen kestävyys ilmoitetaan eristystasolla. Eristystaso ilmoitetaan yhden minuutin käyttötaajuuden jännitteen ja syöksyjännitteen arvolla. Kompensointilaitteiden syöksyjännitteen kesto vaatimus määräytyy verkon nimellisjännitteen mukaan. Standardissa IEC 60071-1 määritellään testijännitteet verkon maksimijännitteiden mukaan. Taulukossa 7 on esitetty testausjännitteet eri nimellisjännitteille. Pariston nimellisjännitteestä riippuen paristossa käytettävien komponenttien eristystaso testataan taulukon mukaisilla jännitearvoilla. [17; 24]

Taulukko 7. Maksimijännitteiden mukaiset koejännitteet

Suurin sallittu käyttöjännite U_m / [kV]	1 min käyttötaajuinen 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

Paristolle kokonaisuutenaan ei tehdä jännitekokeita, ainoastaan pariston komponenteille suoritetaan standardien määrittämät rutiini ja tyyppitestit, joissa jänniterasituskesto testataan. [19]

4.2.2 Loisteho

Loistehon kompensointiratkaisu suunnitellaan tuottamaan tarvittava perustaajuinen kompensointiteho verkon nimellijännitteellä ja – taajuudella. Loisteho on yksi kompensointilaitteiden mitoituksen lähtötiedoista.

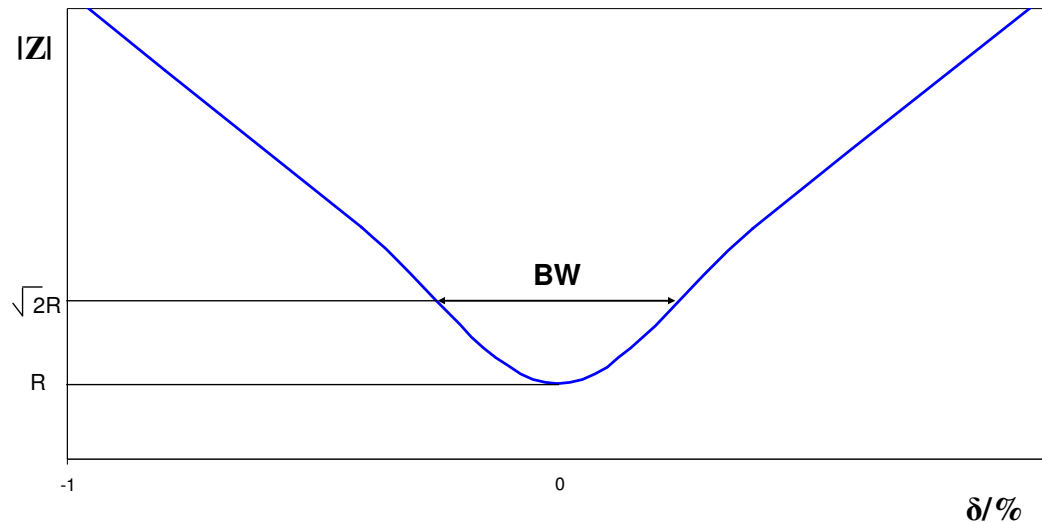
4.2.3 Virta

Loistehon kompensointiratkaisussa käytettävät komponentit mitoitetaan siten, että ne kestävät jatkuvakestoisen ja hetkellisen virtarasituksen vaurioitumatta. Verkossa esiintyvät yliaaltovirrat täytyy huomioida virtamitoituksessa.

4.2.4 Taajuuspoikkeama ja kaistanleveys

Suodattimen sarjaresonansitaajuus, eli viritystaajuus ei aina pysy samana kuin sen yliaallon taajuus, mitä suodattimen pitäisi verkosta suodattaa. Taajuuspoikkeama aiheutuu syöttävän verkon perustaajuuden vaihteluista, suodattimen kapasitanssien ja induktanssien vanhenemisesta tai lämpötilan muutoksesta. Taajuuspoikkeamaan syntymiseen vaikuttaa myös komponenttien valmistustoleranssit. [23]

Kuvassa 21 suodattimen impedanssin itseisarvo on esitetty taajuuden poikkeaman δ funktiona.



Kuva 21. Suodattimen impedanssin itseisarvo taajuuden poikkeaman δ funktiona.

Kuvassa 21 suodattimen kaistanleveys BW on rajattu taajuuksilla joilla suodatinpiirin reaktanssi ja resistanssi ovat yhtä suuret, eli impedanssin kulma on 45 astetta ja impedanssiarvo on $\sqrt{2}R$. Suodatinpariston kaistanleveys saadaan määritettyä seuraavalla yhtälöllä: [23]

$$BW = \Delta f = \frac{R}{2\pi L} \quad (23)$$

jossa

BW = kaistanleveys

Δf = taajuuden muutos

L = induktanssi

Taajuuden poikkeaman suuruus ilmaisee taajuuden suhteellisen muutoksen resonanssitaajuudesta ja sen arvo saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä: [23]

$$\delta = \frac{\omega - \omega_r}{\omega_r} = \frac{f - f_r}{f_r} \quad (24)$$

jossa

δ = taajuuden poikkeama

ω = kulmataajuus

ω_r = resonanssikulmataajuus

f = taajuus

Sähköverkkojen perustaajuuden vaihtelu voi olla noin $\pm 1\%$, mistä aiheutuu vastaava muutos yliaaltojen taajuuksiin. Suodatettavan yliaallon taajuus muuttuu näin ollen suodattimen viritystaajuuden arvosta. Kondensaattorin kapasitanssiarvon riippuvuus lämpötilasta normaalilla käyttölämpötila-alueella on noin $0,038\%/^{\circ}\text{C}$, kun taas kuristimen induktanssiarvo ei riipu merkittävästi lämpötilasta. [23]

Valmistustoleranssit aiheuttavat vaihtelua kondensaattorien ja kuristimien kapasitanssien ja induktanssien arvoissa. Kondensaattoriyksiköiden toleranssi on yleensä $\pm 5\%$ ja kuristimien $\pm 2\%$. Kondensaattoriparistojen valmistustoleranssi voi olla tiukempi kuin yksiköiden, tällöin yksiköt pyritään sijoittamaan telineisiin siten, että vaihekapasitanssit ovat toleranssien rajoissa. Suodattimen taajuuden kokonaispoikkeama voidaan laskea yhtälöstä: [23]

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta L}{L} \right) \quad (25)$$

jossa

ΔC = kapasitanssin muutos

ΔL = induktanssin muutos

4.2.5 Suodatinpariston hyvyysluku

Suodatinpariston hyvyyttä eli suodatuskykyä kuvataan yleisesti hyvyysluvun avulla. Hyvyysluku ei kuitenkaan riitä kuvaamaan suodattimen hyvyyttä sillä suodatustulos riippuu suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien suhteesta. Suodatinpariston mitoitus perustuukin lähtökohtaisesti impedanssien mitoitukseen, eli suodattimen impedanssin tulee jollakin tietyllä välillä olla verkon impedanssiarvoa pienempi. [19]

Yhdelle taajuudelle viritetyssä suodatinparistossa vastus, kuristin ja kondensaattori muodostavat sarjaresonanssipiirin, jonka hyvyysluku on Q_s . Hyvyysluku kuvaa suodattimen impedanssikäyrän käyttäytymistä ja suodatuskaistanleveyttä resonanssitaajuuden tuntumassa. Yhdelle taajuudelle viritettyjen suodattimien hyvyysluku on normaalisti välillä 30–150. Hyvyysluku määritellään suodattimeen varastoituvan energian ja jakson aikana syntyvien energiahäviöiden avulla seuraavasti: [8]

$$Q_s = 2\pi \frac{\text{suodattimeen varastoitunut energia}}{\text{energiähäviö jakson aikana}} \quad (26)$$

jossa

$$Q_s = \text{suodattimen hyvyysluku}$$

Suodatinparistossa sähköenergia varastoituu vuoronperään kuristimen magneettikenttään ja kondensaattorin sähkökenttään. Kuristimeen ja kondensaattoriin varastoituneen energian määrä vaihtelee jaksollisesti siten, että varastoitunut kokonaisenergia on vakio ja se on ajasta riippumaton. Varastoituneelle energialle voidaan kirjoittaa seuraavan yhtälön mukainen lauseke: [8]

$$W_L(t) = \frac{1}{2} L \hat{i}^2 \quad (27)$$

jossa

$$W_L(t) = \text{kuristimeen varastoitunut energia}$$

$$\hat{i} = \text{virran huippuarvo}$$

Suodatinpariston vastus sen sijaan kuluttaa energiaa, eli vastuksessa sähköenergia muuttuu lämmöksi, joten se ei varastoi energiaa. Suodatinpariston vastuksessa syntyvät häviöt voidaan laskea seuraavasti: [8]

$$P_R = \frac{1}{2} R \hat{i}^2 \frac{2\pi}{\omega_r} \quad (28)$$

jossa

$$P_R = \text{vastuksen tehohäviöt}$$

Sijoittamalla yhtälö 27 ja 28 yhtälöön 26, voidaan suodatinpariston hyvyysluvun määrittelmä kirjoittaa seuraavan yhtälön mukaisesti: [8]

$$Q_s = \frac{X_r}{R} = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{R \omega_r C} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} \quad (29)$$

jossa

$$X_r = \text{reaktanssi resonanssitaajuudella}$$

$$C = \text{kapasitanssi}$$

Edellisessä yhtälössä R on suodattimen resistanssi ja X_r on kuristimen reaktanssi sarjaresonanssitaajuudella. Suodatinpariston hyvyysluku saadaan laskettua myös kais-tanleveyden BW avulla seuraavalla tavalla: [23]

$$Q_s = \frac{\omega_r}{BW} \quad (30)$$

Ensimmäisen asteen suodattimessa käytettävän vaimennusvastuksen resistanssiarvo saadaan laskettua yhtälöstä 31, mikäli vaadittu hyvyysluku tunnetaan. [23]

$$R = \frac{X_r}{Q_s} \quad (31)$$

Laajakaista- ja C-tyyppin suodatinparistossa vastus kytketään suodatinkuristimen rinnalle. Laajakaista- ja C-tyyppin suodatinpariston hyvyyslukua merkitään Q_r ja se on normaalisti välillä 0,5–5. Hyvyysluku saadaan ratkaistua seuraavalla tavalla, mikäli vastuksen resistanssi tunnetaan. [23]

$$Q_r = \frac{R}{X_r} = \frac{R}{\omega_r L} = R\omega_r C = \frac{R}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (32)$$

jossa

Q_r = laajakaistaisen suodattimen hyvyysluku

Laajakaista- ja C-tyyppin suodattimen vastuksen resistanssiarvo saadaan ratkaistua seuraavalla yhtälöllä, mikäli haluttu hyvyysluvun arvo tiedetään.

$$R = Q_r X_r \quad (33)$$

Hyvyysluku valitaan siten, että verkonhaltijan asettamat suodatusvaatimukset täyttyvät ja se on suodattimen mitoituksen kannalta merkittävä tekijä. [23]

4.2.6 Syöttävän verkon impedanssin vaikutus

Suodatinta mitoitettaessa täytyy tuntea syöttävän verkon impedanssi eri taajuuksilla. Syöttävän verkon impedanssi suodattimen kytkentä kohdassa voidaan määrittää mittaamalla tai laskemalla. Tarkemmin impedanssin arvo saataisiin määritettyä mittaamalla, mutta impedanssiarvo vaihtelee kuormitus ja kytkentätilanteiden mukaan. Verkon impedanssin määrittäminen kaikissa mahdollisissa kytkentätilanteissa on työlästä ja tämän vuoksi suodattimien mitoituksessa päädytäänkin usein approksimoimaan verkon impedanssia helposti laskettavalla mallilla. Syöttävän verkon impedanssi Z_{kv} saadaan laskettua yhtälöstä 34, mikäli syöttävän verkon oikosulkuvirta tai oikosulkuteho tunnetaan. [11]

$$Z_{kv} = \frac{zU^2}{S_{kv}''} = \frac{zU}{\sqrt{3}I_{kv}''} \quad (34)$$

jossa

Z_{kv} = verkon oikosulkuimpedanssi

z = jännitekerroin

S_{kv}'' = oikosulkuteho

I_{kv}'' = alkuoikosulkuvirta

Jännitekertoimen z määrittäminen esitellään standardissa IEC 60909. Kyseinen standardi määrittää kertoimen arvoksi keski- ja suurjännitteellä maksimioikosulkuvirralla 1,1 ja minimioikosulkuvirralla 1,0. Mikäli syöttävän verkon impedanssin komponentteja ei tunneta tarkkaan, ne voidaan approksimaationa jakaa resistanssi- ja reaktanssiosaan seuraavasti: [31]

$$X_{kv} = j0,995 Z_{kv} \quad (35)$$

$$R_{kv} = 0,1 X_{kv} \quad (36)$$

jossa

R_{kv} = verkon resistanssi

Näin ollen syöttävän verkon resistanssin ja reaktanssin R/X-suhde on 0,1. Syöttävän verkon kokonaisimpedanssille voidaan kirjoittaa seuraavanlainen yhtälö: [31]

$$Z_{kv} = R_{kv} + X_{kv} = 0,1 X_{kv} + X_{kv} \quad (37)$$

Huomioitaessa yliaaltotaajuuden vaikutus syöttävänverkon impedanssiin, tällöin yhtälö voidaan kirjoittaa muotoon: [31]

$$Z_{nkv} = 0,1 \frac{U_n^2}{S_{kv}''} + j \frac{U_n^2}{S_{kv}''} n \quad (38)$$

jossa

Z_{nkv} = verkon impedanssi taajuudella $n f_1$

Syöttävän verkon impedanssin vaikutus täytyy huomioida erityisen tarkasti suodattimen suunnittelussa, jotta asetettu suodatusvaatimus saavutetaan. Koska suodattimen tulos riippuu verkon ja suodattimen impedanssien suhteesta, suodattimen impedanssi on mitoitettava pienemmäksi kuin verkon impedanssi sillä yliaaltotaajuudella, jota suodattimella on tarkoitus suodattaa. [19]

4.2.7 Ympäristöolosuhteiden huomioiminen

Asennuspaikan lämpötila vaikuttaa pariston komponenttien mitoitukseen. Esimerkiksi kondensaattoriyksikön gradientin valintaan vaikuttaa merkittävästi asennuspaikan lämpötila. Kondensaattoriyksiköiden käyttöolosuhteiden vaikutusta käsitellään standardissa IEC 60871-1 sekä luvussa 4.1.3. Asennuspaikan kylmyys asettaa rajoitteita käytettävän gradientin suuruuteen, koska eristysaineena käytetyn kyllästysöljyn eristysominaisuudet heikkenevät viskositeetin kasvaessa. Lämpötila vaikuttaa myös kuristimen käämityksen virrantiheyteen ja siten tarvittavaan poikkipinta-alaan. Kuristimessa käytetyt eristemateriaalit määrittävät kuristimen lämpötilaluokan. ALSTOM Grid oy:n valmistamalla kuristimilla lämpötilaluokka on F, joka tarkoittaa suurimmillaan 100 °C keskimääräistä lämpenemää ja 155 °C kuumimman pisteen lämpötilaa. [14]

Asennuspaikan ilmansaasteet vaikuttavat pariston tukieristimiltä vaadittuun ryömintämatkaan. Jos asennuspaikalla esiintyy suolaa, metallipölyä tai muita ilmansaasteita on pariston tukieristimien ryömintämatkaa kasvatettava. Tuuliolosuhteet aiheuttavat pariston tukirakenteisiin kohdistuviin voimiin. Tuulen suunnassa tukieristimiin kohdistuu vetävä voima ja tuulensuuntaa vasten olevalle sivulle puristava voima. Tuuli aiheuttaa eristimille ja pariston rakenteelle erityisiä vaatimuksia lähinnä päällekkäin asennettujen kolmivaiheisten kuristimien ja vastusten tapauksessa tai jos kasataan korkeita kondensaattoriteline-rakennelmia. [14]

Kylmyyden aiheuttamat lumi- ja jääkuormat aiheuttavat pariston rakenteelle ja komponenteille lisärasituksia. Lumisissa olosuhteissa pariston tukieristimien alle asennetaan tukirakenteet, joiden korkeus on enemmän kuin odotettu lumikuorma. Kuvassa 6 kompensointilaitteen alle on asennettu tukirakenteet, koska laitteisto sijaitsee Ruotsissa ja talvella lumen syvyydeksi on arvioitu 1.2 metriä. Lumi ja jää eivät aiheuta ongelmia pariston ollessa käytössä, koska pariston lämpöhäviöt sulattavat lumen ja jään tehokkaasti. Ongelma muodostuu, mikäli laitteiston käyttö on jaksollista tai se on pois käytöstä pitkiä aikoja. [14]

Pariston asennuspaikka voi sijaita korkealla merenpinnan yläpuolella, jolloin ohut ilma aiheuttaa omat erityisvaatimuksensa. Ilma ohenee merenpinnan tasosta korkeammalle noustaessa. Ilman oheneminen, eli ilmanpaineen pieneneminen tulee huomioida ilmapäleissä ja jäähditysominaisuuksissa. Ilmapäleitä kasvavat noustaessa yli 1000 metrin korkeuteen merenpinnasta 1,4 % jokaista sataa metriä kohden. [14]

Maanjäristykset tulee huomioida paristorakennetta mitoittaessa. Maanjäristyksiä koskevien vaatimuksien seurauksena pariston tukieristimet on valittava tarvittaessa vahvemmiksi kuin ilman vaatimuksia. Pariston telineiden keston tulee myös kiinnittää huomiota. Tarvittaessa paristorakennelma mallinnetaan ja sille suoritetaan lujuuslaskenta. [19]

4.3 Kondensaattoriyksikön jännitemitoitus

Kondensaattoriyksikön sähkötekniset arvot kuten nimellisteho ja kapasitanssiarvo määritetään pariston eri komponenttien mitoituksen yhteydessä. Kondensaattorien jännitekestoisuus määräytyy eristystasovaatimuksen ja kondensaattorien yli vaikuttavan mitoitusjännitteen perusteella. Mitoitusjännitteen suuruus määrittää kondensaattoriyksikön eristeaineen paksuuden ja paristossa olevien sarjakytkentöjen määrän. Verkon syösyjännitevaatimus vaikuttaa paristotelineiden alle asennettavien tukieristimien valintaan. Kondensaattoriyksikön mitoittamisessa tarvittavat lähtötiedot:

- Kapasitanssi tai loisteho
- Nimellisjännite ja yliaaltojännitteet
- Nimellistaajuus
- Ympäristönlämpötila

Tähteen kytketyn 1-vaiheisen kondensaattoriyksikön nimellisjännite on verkon nimellisjännite jaettuna neliöjuuri kolmella, mikäli verkossa ei ole yliaaltoja. Kondensaattorin mitoitusjännite saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä, kun yksikön mitoituksessa otetaan huomioon perusaallon lisäksi myös yliaallot: [13]

$$U_c = U_{c1} + \sum_{n=2}^{\infty} U_{cn} \quad (39)$$

jossa

U_c = kondensaattorin mitoitusjännite

U_{c1} = kondensaattorin yli vaikuttavan perustaajuuden jännitteen tehollisarvo

U_{cn} = kondensaattorin yli vaikuttava jännite taajuudella nf_1

$$U_{cn} = \frac{I_n}{\omega_n C} \quad (40)$$

jossa

ω_n = kulmataajuus yliaaltotaajuudella nf_1

Kondensaattoriyksikön sisäinen rakenne, kuten käämielementtien sarjaan- ja rinnankytkentöjen määrä riippuu kondensaattorin nimellis- ja mitoitusjännitteestä sekä mitoitusloistehosta. Kondensaattorin tuottaman loistehon määrä on suoraan verrannollinen kondensaattoriyksikön kapasitanssiin ja neliöllisesti verrannollinen jännitteeseen. Kondensaattoriyksikön sisäinen rakenne on esitetty tarkemmin luvussa 3.1.1. [19]

4.4 Kuristimen virta- ja jännitemitoitus

Kuristimen sähkötekniset arvot kuten induktanssi ja jännitekestoisuus määritetään pariston eri komponenttien mitoituksen yhteydessä. Kuristimen jännitekestoisuus määräytyy eristystasovaatimuksen ja kuristimen yli vaikuttavan jännitteen perusteella. Verkon syöksyjännitevaatimus vaikuttaa kuristimen mitoitukseen ja tukieristimien valintaan. Syöksyjännitevaatimus vaikuttaa kuristinlankakierrosten väliseltä eristeaineelta vaadittuun jännitekestoisuuteen. Kuristimen jännitekestoisuutta voidaan kasvattaa kasvattamalla kuristimen korkeutta, jonka seurauksena käämikierrosmäärä lisääntyy. Korkeuden kasvun vaikutuksesta kierroskohtainen käämilangan jänniterasitus jää pienemmäksi, kestäen näin suuremman jänniterasituksen koko käämin ylitse. [32]

Kuristimen mitoituksessa tarvittavat lähtötiedot:

- Induktanssi tai induktiivinen reaktanssi
- Nimellisvirta ja harmoniset yliaaltovirrat
- Nimellisjännite
- Nimellistaajuus
- Oikosulkuteho
- Asennustapa
- Ympäristölämpötila

Kuristimien mitoituksessa on käytettävä ekvivalenttivirtaa, joka ottaa huomioon kuristimen häviöresistanssien muuttumisen eri taajuuksilla. Ekvivalenttivirta voidaan kuvitella perustaaajuiseksi virraksi, joka aiheuttaa saman lämpenemisen kuristimessa kuin todelliset kuormitusvirrat. Kuristinta kuormittava ekvivalenttivirta lasketaan yhtälöstä: [32]

$$I_{Lekv} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{R_{Ln}}{R_{L1}} I_{Ln}^2} \quad (41)$$

jossa

- I_{Lekv} = kuristimen ekvivalenttivirta
- R_{L1} = kuristimen resistanssi perustaaajuudella
- R_{Ln} = kuristimen resistanssi taajuudella nf_1
- I_{Ln} = kuristimen virta taajuudella nf_1

Virtamitoituksessa on huomioitava, että virrat voivat resonoitua suodattimen rinnakkaisresonanssipiirissä. Kuristimien jänniterasitusta laskettaessa käytetään yleisesti molempia alla esitetty laskentatapoja U_{arit} ja U_{rss} . [32]

$$U_{arit} = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \quad (42)$$

jossa

U_{arit} = aritmeettisesti laskettu jännite

U_n = jännitteen tehollisarvo taajuudella nf_1

$$U_{r_{ss}} = U_1^2 + \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \quad (43)$$

jossa

$U_{r_{ss}}$ = jännitekomponenttien neliösumman neliöjuuri

4.5 Vastuksen virta- ja tehomitoitus

Vastuksien sähkötekniiset arvot kuten resistanssi ja jännitekestoisuus määritetään pariston eri komponenttien mitoituksen yhteydessä. Vastuksen jännitekestoisuus määräytyy eristystasovaatimuksen ja vastuksien yli olevan jännitteen perusteella. Asennuskohteen verkossa esiintyvä syöksyjännite vaikuttaa vastuksen mitoitukseen ja tukieristimien valintaan. Vastuksen mitoituksessa tarvittavat lähtötiedot

- Resistanssi
- Nimellisvirta
- Nimellisjännite
- Teho
- Eristystaso
- Asennustapa
- Ympäristönlämpötila

Vastuksen termisessä mitoituksessa voidaan käyttää virran tehollisarvoa, joka saadaan laskettua yhtälöllä

$$I_R = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (44)$$

jossa

I_R = vastuksen virran tehollisarvo

Vastuksen tehonkestoisuus saadaan virran tehollisarvon avulla laskettua seuraavan yhtälön mukaisesti, kun vastuksen resistanssi tunnetaan. [11]

$$P_R = I_R^2 R \quad (45)$$

4.6 Rinnakkaiskondensaattoripariston mitoittaminen

Rinnakkaiskondensaattoripariston tuottama loisteho on verrannollinen jännitteen neliöön. Rinnakkaiskondensaattoripariston tuottama perustaajuinen loisteho saadaan lasketua seuraavasta yhtälöstä. [33]

$$Q_1 = U^2 2\pi f_1 C \quad (46)$$

Yleensä rinnakkaiskondensaattoriparistoa mitoittaessa tunnetaan tarvittavan perustaajuisen loistehon määrä. Perustaajuisen loistehon avulla voidaan laskea rinnakkaiskondensaattoripariston kapasitanssi seuraavan yhtälön mukaisesti: [33]

$$C = \frac{Q_1}{U^2 2\pi f_1} \quad (47)$$

Standardi IEC 60871-1 määrittää, että kondensaattoriyksikön tulee kestää 10 %:in ylijännitettä ja 1,3-kertaista nimellisvirtaa vaurioitumatta. Ylijännitteen ja ylivirran lisäksi kondensaattoriyksikön kapasitanssi saa kyseisen standardin mukaan ylittää nimellisarvonsa 15 prosenttia. Rinnakkaiskondensaattorien kanssa sarjaan kytkettävät vaimennuskuristimet mitoitetetaan edellisestä johtuen kestäämään 1,5-kertaista nimellisvirtaa. [13]

4.7 Estokelapariston mitoittaminen

Estokelapariston tehtävä on tuottaa kapasitiivista loistehoa sekä suodattaa yliaaltoja. Estokelaparisto soveltuu käytettäväksi kohteissa, joissa yliaaltojen määrä on kohtalainen. Estokelapariston mitoittamisessa tarvitaan asennuskohteesta ja sähköverkosta vähintään luvussa 4.1.2 esitellyt lähtötiedot. Estokelapariston mitoittamisessa tarvitaan tieto verkon yliaaltojen kokonaismäärästä sekä yliaaltospektri. Yliaaltospektrin avulla määritellään harmoniset yliaaltojännitteet, joiden mukaan kondensaattoriyksiköiden jänniterasitus lasketaan. Yliaaltospektrin avulla määritetään myös estokelaa kuormittavat harmoniset yliaaltovirrat. Yleisesti käytetyt yliaaltojännitteet, joita käytetään estokelaparistojen mitoituksessa löytyvät taulukoista 1-3. Estokelapariston mitoituksessa käytetyt harmoniset yliaaltojännitepitoisuudet vaihtelevat sovellettavien standardien mukaan. Taulukossa 7 on esitetty ALSTOM Grid oy:n käyttämä estokelapariston mitoitusjännitesäröspektri. [19]

Estokelaparistoa mitoittaessa tarvitaan tieto mille taajuudella estokelaparisto viritetään, eli millä taajuudella kondensaattorien kapasitanssi ja estokelan induktanssi ovat

yhtä suuret. Estokelapariston viritystaajuus valitaan siten että se on alhaisempi kuin alhaisimman verkossa esiintyvän harmonisen yliaallontaajuus. Yleensä viritystaajuudeksi valitaan joko 189 Hz tai 204 Hz. Taulukossa 7 on esitetty tyypilliset estokelapariston mitoituksessa käytettävät yliaaltojänniteprosentit prosentteina nimellisjännitteestä. [19]

Taulukko 7. Tyypillinen estokelapariston mitoitusjännitesäröspektri, jännitesäröt yliaallontaajuuksille prosentteina nimellisjännitteestä.

f/Hz	U _{th} /%
50	110
150	0.5
250	6
350	5

Viritystaajuuden ja verkon perustaajuuden avulla saadaan ratkaistua yliaallon järjestysluku n , mikä ilmaisee sarjaresonanssipiiritaajuuden suhteessa perustaajuuteen. [19]

$$n = \frac{f_r}{f_1} \quad (48)$$

jossa

$$f_r = \text{resonanssitaajuus}$$

Järjestysluvulla n induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret eli estokelapariston impedanssi on nolla. [19]

$$nX_L = \frac{X_C}{n} \Rightarrow X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (49)$$

jossa

$$X_L = \text{induktiivinen reaktanssi taajuudella } f_1$$

$$X_C = \text{kapasitiivinen reaktanssi taajuudella } f_1$$

Estokelapariston tuottama perustaajuinen kompensointiteho jännitteellä U saadaan ratkaistua yhtälön 50 avulla. Yleensä estokelapariston tuottamaa perustaajuista loistehoa ei tarvitse laskea, koska se on yksi mitoituksen lähtötiedoista. [1]

$$Q_1 = \frac{U^2}{X_{kok}} = \frac{U^2}{X_C - X_L} = \frac{U^2}{X_C - \frac{X_C}{n^2}} = \frac{U^2}{X_C \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \right)} = U^2 2\pi f_1 C \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \quad (50)$$

jossa

$$X_{kok} = \text{kokonaisreaktanssi taajuudella } f_1$$

Estokelapariston nimelliskapasitanssi saadaan ratkaistua perustaajuisen loistehon, verkon nimellisjännitteen ja verkon nimellistaajuuden avulla yhtälöstä 51. Nimelliska-

pasitanssin avulla saadaan ratkaistua estokelan nimellisinduktanssi yhtälön 53 mukaisesti. [1]

$$C = \frac{Q_1}{U^2 2\pi f_1 k} \quad (51)$$

jossa

k = kuristimen aiheuttama jännitteennousu

Kerroin k ilmaisee kuristimen aiheuttaman kondensaattorien mitoitusjännitteennousun. Mitoitusjännitteen nousu tulee ottaa huomioon kondensaattorien jänniterasitusta määritettäessä. [1]

$$k = \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (52)$$

Estokelapariston induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat viritystaajuudella yhtä suuret, joten estokelan nimellisinduktanssi saadaan ratkaistua yhtälöstä. [1]

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \quad (53)$$

Kondensaattoriyksiköiden ja estokelan tulee kestää jatkuvasti standardissa IEC 61000-2-2 määritellyt harmoniset yliaaltojännitteet sekä perustaajuinen ylijännite +10 %. Jännitekestoisuus varmistetaan siten että mitoituksessa käytettävät eli taulukossa 4 esitellyt yliaaltojännitteet ovat vähintään yhtä suuret kuin standardien sallimat tasot jakeluverkkojen osalta. Estokelan muodostama induktiivinen reaktanssi ja kondensaattorien muodostama kapasitiivinen reaktanssi ratkaistaan seuraavasti. [19]

$$X_{Ln} = 2\pi f_n L \quad (54)$$

jossa

X_{Ln} = kuristimen induktiivinen reaktanssi taajuudella $n f_1$

f_n = taajuus $n f_1$

$$X_{Cn} = \frac{1}{2\pi f_n C} \quad (55)$$

Kokonaisreaktanssin X_{kokn} avulla saadaan laskettua estokelapariston perustaajuinen virta sekä yliaaltovirrat kullekin harmoniselle yliaaltotaajuudelle n . Taulukosta 7 saadaan yliaaltojänniteprosentti U_{th} . [1]

$$X_{kokn} = |X_{Ln} - X_{Cn}| \quad (56)$$

jossa

X_{kokn} = kokonaisreaktanssi taajuudella $n f_1$

$$I_n = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}} U_{th}}{X_{kokn} 100} \quad (57)$$

jossa

$$U_{th} = \text{yliaaltojänniteprosentti}$$

$$I_n \text{ virran tehollisarvo taajuudella } nf_1$$

Estokelan virtamitoitus toteutetaan perustaajuisen ja harmonisten virtojen mukaan. Estokelan virta lasketaan perustaajuisen ja harmonisten yliaaltovirtojen neliöiden summan neliöjuurena seuraavasti:

$$I_{kok} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (58)$$

jossa

$$I_{kok} = \text{kokonaistehollisvirta}$$

Kompensointikapasitanssien yli vaikuttavat perustaajuinen ja harmoniset yliaaltojännitteet lasketaan edellä mainittujen virtojen ja kapasitiivisen reaktanssin tulona kullekin yliaaltotaajuudelle seuraavasti. [1]

$$U_{cn} = I_n X_{cn} \quad (59)$$

Tällöin kondensaattorien mitoitusjännite saadaan laskettua kondensaattorien yli vaikuttavan perustaajuisen jännitteen tehollisarvon ja yliaaltojännitteiden tehollisarvojen aritmeettisen summan avulla yhtälöstä 39. Estokelapariston 3-vaiheinen mitoitusjännite U_m , joka sisältää perustaajuisen ja harmonisten yliaaltojännitteiden aiheuttaman jännite-
rasituksen lasketaan seuraavasti.

$$U_m = \sqrt{3} U_c \quad (60)$$

Estokelapariston 3-vaiheinen mitoitusloisteho Q_m sisältää perustaajuisen loistehon ja yliaaltojen sekä estokelan aiheuttaman jännitteen nousun synnyttämän loistehon. Estokelapariston mitoitusloisteho ratkaistaan seuraavalla yhtälöllä.

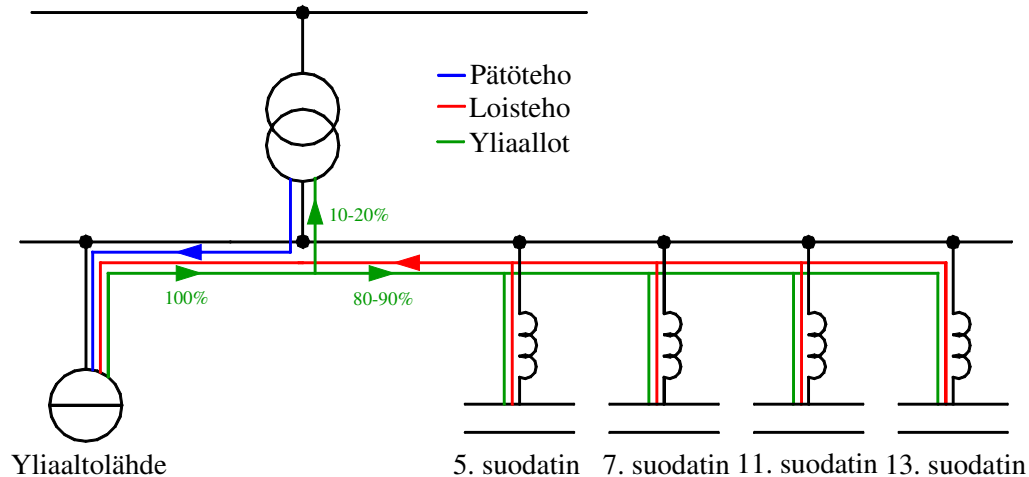
$$Q_m = U_m^2 2\pi f_1 C \quad (61)$$

Mitoitusjännite ja -loisteho yhdessä määrittävät sarjaan- ja rinnankytkettävien kondensaattoriyksiköiden määrän sekä mitoituksen. Kondensaattoriyksiköiden rakenne sekä maksimijännite ja -loisteho esitellään tarkemmin luvussa 3.1.1. Estokelan mitoittamisen kannalta oleellisinta on varmistaa, että estokela kestää siihen kohdistuvan lyhyt- sekä jatkuvakestoiset jännite- ja virtarasitukset. [19]

4.8 Yhdelle taajuudelle viritetty suodatin

Yhdelle taajuudelle viritetyn suodattimen tehtävä on suodattaa yliaaltoja sekä tuottaa kapasitiivista loistehoa. Suodatinpariston mitoittamisessa tarvitaan asennuskohteesta ja sähköverkosta vähintään luvussa 4.1.2 esitellyt lähtötiedot. Yhdelle taajuudelle viritettyä suodatinta mitoittaessa määritetään harmoninen yliaaltotaajuus minkä yliaallot verkosta halutaan suodattaa. Mittaustulosten tai tarvittaessa simuloinnin perusteella saadaan määritettyä tarvittava perustaajuinen kompensointiteho sekä suodattimen impedanssin arvo. Tarkimmin verkon impedanssiarvon saa määritettyä mittaamalla, mutta käytännössä siihen sisältyy aina virhettä, koska verkon kuormitus- ja kytkentätilanteet vaihtelevat. [35]

Mitoittaessa suodatinta kompensointitehon mukaan, suodattimien kapasitanssit valitaan siten, että niiden avulla saadaan tuotettua vaadittu perustaajuinen kompensointiteho. Suodatinratkaisu muodostuu yleensä 2-4 suodattimesta joista kukin on viritetty suodattamaan eri yliaaltotaajuutta, tilannetta selventää kuva 23.



Kuva 23. 5., 7., 11. ja 13. yliaallon suodattaminen yhdelle taajuudelle viritetyillä suodattimilla.

Perustaajuisen loistehon ja yliaaltovirtojen määrän mukaan, määritetään kondensaattoreihin kohdistuva jänniterasitus sekä suodatinkuristinta kuormittavat harmoniset yliaaltovirrat. Taulukossa 8 on esitetty viidennen yliaallonsuodattimen mitoitusvirtaspektri tilanteessa, jossa suodatin mitoitetaan suodattamaan 100 A viidettä yliaaltoa.

Taulukko 8. Suodattimen mitoitusvirtaspektri, suodatettava 5. yliaaltovirta 100 A.

f/Hz	I_h/A
50	635
150	0
250	100
350	0
550	0

Suodatettavan harmonisen yliaaltotaajuuden ja verkon perustaajuuden avulla saadaan ratkaistua yliaallon järjestysluku n , mikä ilmaisee sarjaresonanssipiiritaajuuden suhteessa nimellistaajuuteen. [19]

$$n = \frac{f_r}{f_1} \quad (62)$$

Järjestysluvulla n induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret, eli suodattimen impedanssi on nolla. Mikäli sarjaan on kytketty myös vastus, tällöin suodatuspierin impedanssi on sarjaresonanssitaajuudella vastuksen R suuruinen. [20]

$$nX_L = \frac{X_C}{n} \Rightarrow X_L = \frac{X_C}{n^2} \quad (63)$$

Suodattimen tuottama perustaajuinen kompensointiteho nimellijännitteellä saadaan ratkaistua yhtälöstä 64. Yleensä suodatinpariston tuottamaa perustaajuisia loistehoa ei tarvitse laskea vaan loistehon tarve määritetään mittaamalla verkosta ja se on yksi mitoituksen lähtötiedoista.

$$Q_1 = \frac{U^2}{X_{kok}} = \frac{U^2}{X_C - X_L} = \frac{U^2}{X_C - \frac{X_C}{n^2}} = \frac{U^2}{X_C \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \right)} = U^2 2\pi f_1 C \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right) \quad (64)$$

Suodatinpariston nimelliskapasitanssi saadaan ratkaistua perustaajuisen loistehon, verkon nimellijännitteen ja verkon perustaajuuden avulla yhtälöstä 65. Nimelliskapasitanssin avulla lasketaan suodatinkuristimen nimellisinduktanssi yhtälön 67 mukaisesti: [36]

$$C = \frac{Q_1}{U^2 2\pi f_1 \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right)} \quad (65)$$

Kerroin k ilmaisee suodatinkuristimen aiheuttaman kondensaattorien mitoitusjännitteen nousun. Mitoitusjännitteen nousu tulee ottaa huomioon kondensaattorien jänniterasitusta määritettäessä. [36]

$$k = \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (66)$$

Suodatinpariston induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat viritystaajuudella yhtä suuret, joten suodatinkuristimen induktanssi saadaan ratkaistua yhtälöstä:

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \quad (67)$$

Kondensaattoriyksiköiden mitoitusjännite saadaan laskettua perustaajuisen virran ja harmonisten yliaaltovirtojen sekä kapasitiivisten reaktanssien avulla. Kondensaattorien

ja suodatinkuristimien tulee kestää jatkuvasti lähtötiedoissa määritellyt harmoniset yliaaltojännitteet sekä perustaajuinen ylijännite +10 %. Ratkaistaan suodatinkuristimen muodostama induktiivinen reaktanssi ja kondensaattorien muodostama kapasitiivinen reaktanssi seuraavasti: [34]

$$X_{Ln} = 2\pi f_n L \quad (68)$$

$$X_{Cn} = \frac{1}{2\pi f_n C} \quad (69)$$

Suodatinpariston perustaajuinen virta saadaan laskettua pariston perustaajuisten loisteiden ja nimellisjännitteen avulla yhtälöstä 70. Virtamitoituksessa on huomioitava myös verkkojännitteen vaihtelusta sekä komponenttien valmistustoleransseista johtuva varmuuskerroin g . Varmuuskertoimen arvoksi Alstomin mitoitusohjeiden mukaan valitaan normaalisti 1,0–1,1. [19]

$$I_1 = \frac{Q_1}{\sqrt{3}U} g \quad (70)$$

jossa

$$g = \text{varmuuskerroin}$$

Suodatinkuristimen virtamitoitus toteutetaan perustaajuisten ja harmonisten virtojen mukaan. Kokonaistehollisvirta lasketaan perustaajuisten ja harmonisten virtojen neliöiden summan neliöjuurena seuraavasti.

$$I_{kok} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (71)$$

Kompensointikapasitanssien yli vaikuttavat perustaajuinen ja harmoniset yliaaltojännitteet lasketaan edellä mainittujen virtojen ja kapasitiivisen reaktanssin tulona kullekin yliaaltotaajuudelle seuraavasti.

$$U_{cn} = I_n X_{cn} \quad (72)$$

Tällöin kondensaattorien mitoitusjännite saadaan laskettua kondensaattorien yli vaikuttavan perustaajuisten jännitteen tehollisarvon ja yliaaltojännitteiden tehollisarvojen aritmeettisena summana yhtälöstä 39 tai laskemalla jänniterastitus nimellisloistehon ja perustaajuisten kapasitiivisen reaktanssin avulla IEC 60871-1 standardin liitteen B mukaisesti. Kondensaattoriyksiköiden jännitemitoituksessa käytetään näistä suurempaa arvoa. Suodatinpariston 3-vaiheinen mitoitusjännite U_m , joka sisältää perustaajuisten ja harmonisten yliaaltojännitteiden aiheuttaman jänniterastituksen ratkaistaan seuraavasta yhtälöstä:

$$U_m = \sqrt{3} U_c \quad (73)$$

Suodatinpariston 3-vaiheinen mitoitusloisteho Q_m sisältää perustaajuuden loistehon ja yliaaltojen sekä suodatinkuristimen aiheuttaman jännitteen nousun synnyttämän loistehon. Suodatinpariston mitoitusloisteho lasketaan yhtälöllä: [19]

$$Q_m = U_m^2 2\pi f C \quad (74)$$

Mitoitusloisteho ja mitoitusjännite yhdessä määrittävät sarjaan- ja rinnankytkettäviin kondensaattoriyksiköiden määrän sekä mitoituksen. Kondensaattoriyksiköiden rakenne sekä maksimijännite ja -loisteho esitellään tarkemmin luvussa 3.1.1. Suodatinkuristimen mitoittamisen kannalta oleellisinta on varmistaa, että kuristin kestää siihen kohdistuvat lyhyt- sekä jatkuvakestoiset jännite- ja virtarasitukset.

Eräissä suodatinsovelluksissa kondensaattorien ja suodatinkuristimen kanssa sarjaan liitetään myös vaimennusvastus. Resistanssin, induktanssin ja kapasitanssin mitoitusarvojen määrittämiseksi täytyy lähtötietona tuntea suodattimen hyvyysluku Q_s sekä suhteellinen taajuuspoikkeama δ . Hyvyysluku on resonanssipiireille määritelty suure, joka kuvaa taajuusvasteikäyrän huipunleveyttä. RLC-piirin kytkentä on esitetty kuvassa 12 b ja piirin impedanssi saadaan laskettua seuraavasti:

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (75)$$

jossa

$$Z = \text{impedanssi}$$

RLC-piirin resonanssitaajuus saadaan ratkaistua kapasitanssin ja induktanssin avulla seuraavasti:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (76)$$

Resonanssitaajuudella kapasitiivinen ja induktiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret, eli tällöin yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (77)$$

Edellisestä yhtälöstä seuraa, että viritystaajuudelle suodattimen impedanssi on resistanssin suuruinen. Resistanssin voidaan olettaa sisältävän erillisen vastuksen lisäksi myös kondensaattoreissa ja suodatinkuristimessa syntyvät häviöt. Pariston hyvyysluku valitaan siten, että verkonhaltijan asettamat suodatusvaatimukset täyttyvät. Hyvyysluku voidaan ratkaista yhtälön 78 avulla, kun suodattimen resistanssi sekä kapasitanssi tai induktanssi tunnetaan. Hyvyyslukua käsitellään tarkemmin luvussa 4.2.5. Suodatinpariston hyvyysluku on yleensä yksi mitoituksen lähtötiedoista ja hyvyysluvun avulla saadaan laskettua pariston resistanssi yhtälön 79 mukaisesti: [30]

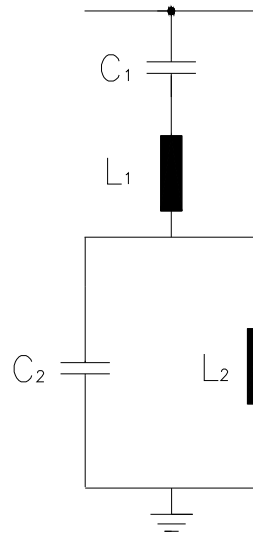
$$Q_s = \frac{X_r}{R} = \frac{\omega_r L}{R} = \frac{1}{R\omega_r C} = \frac{\sqrt{L}}{R} \quad (78)$$

$$R = \frac{X_r}{Q_s} \quad (79)$$

Kondensaattorin kapasitanssi ja kuristimen induktanssi lasketaan kuten ilman vastusta olevassa piirissä. [19]

4.9 Kahdelle taajuudelle viritetty suodatin

Kahdelle taajuudelle viritetyn suodattimen tehtävä on suodattaa yliaaltoja sekä tuottaa kapasitiivista loistehoa. Suodatinpariston mitoittamisessa tarvitaan asennuskohteesta ja sähköverkosta luvussa 4.1.2 esitellyt lähtötiedot. Kaksoisviritetyissä suodatinparistoissa käytetään hyvin harvoin lisäresistansseja, joten kaksoisviritetyn pariston kytkentä voidaan esittää kuvan 23 mukaisesti, kun lisäresistanssit poistetaan piiristä.



Kuva 23. Kahdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston kytkentä ilman lisäresistansseja.

Kaksoisviritettyä suodatinparistoa mitoittaessa pariston viritystaajuudet f_{s1} ja f_{s2} asetetaan suodatettavien yliaaltotaajuuksien kanssa yhtä suuriksi. Näin ollen suodatettavien yliaaltovirtojen ja suodattimessa muodostuvien resonanssipiirien kulmataajuudet ovat $\omega_{s1} = 2\pi f_{s1}$ ja $\omega_{s2} = 2\pi f_{s2}$. [22]

Sarjaresonanssitaajuuksilla suodattimella on pieni impedanssi, joten se suodattaa näillä taajuuksilla esiintyviä yliaaltoja tehokkaasti. Sarjaresonanssitaajuuksien välissä suodattimen impedanssikäyrällä on suuri impedanssi. Se johtuu suodattimessa syntyvästä rinnakkaisresonanssipiiristä. [22]

Rinnakkaisresonanssiin kulmataajuus $\omega_{rr} = 2\pi f_{rr}$ on yksi kaksoisviritetyn pariston mitoittamisen lähtötiedoista ja sen arvo on selvitetävä mahdollisimman tarkkaan simuloimalla. Rinnakkaisresonanssitaajuuden valinnassa on otettava huomioon syöttävän verkon impedanssi sekä verkossa esiintyvät harmoniset yliaaltovirrat. Rinnakkaisresonanssitaajuuden lähellä olevat harmoniset yliaaltovirrat voivat vahvistua rinnakkaisresonanssin vaikutuksesta. [19; 22]

Kuvan 23 mukaisessa kytkennässä kondensaattoriryhmä C_1 ja suodatinkuristin L_1 muodostavat sarjapiirin. Muodostuneen piirin impedanssiarvo kulmataajuudella $\omega = 2\pi f$ saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä. [22]

$$Z_s(\omega) = j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) \quad (80)$$

jossa

$Z_s(\omega)$ = sarjaresonanssiin impedanssi kulmataajuudella ω

C_1 = kondensaattoriryhmän C_1 kapasitanssi

L_1 = kuristimen L_1 induktanssi

Sarjaresonanssitaajuudella kondensaattoriryhmä C_1 ja suodatinkuristin L_1 muodostaman piirin impedanssiarvo on nolla, joten sarjaresonanssin kulmataajuus voidaan kirjoittaa seuraavasti.

$$Z(\omega_s) = 0 \Rightarrow \omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \quad (81)$$

jossa

$Z(\omega_s)$ = impedanssi kulmataajuudella ω_s

ω_s = kaksoisviritetyn suodattimen sarjaresonanssikulmataajuus

Kondensaattoriryhmän C_2 ja suodatinkuristimen L_2 muodostamalle rinnakkaispiirille on voimassa yhtälö: [22]

$$Z_r(\omega) = \left(\frac{1}{j\frac{1}{\omega L_2} - j\omega C_2} \right) \quad (82)$$

jossa

$Z_r(\omega)$ = rinnakkaisresonanssiin impedanssi kulmataajuudella ω

C_2 = kondensaattoriryhmän C_2 kapasitanssi

L_2 = kuristimen L_2 induktanssi

Rinnakkaisresonanssitaajuudella C_2 ja suodatinkuristin L_2 muodostaman piirin impedanssiarvo on nolla, joten rinnakkaisresonanssitaajuus voidaan kirjoittaa seuraavasti: [22]

$$Z(\omega_{rr}) = 0 \Rightarrow \omega_{rr} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (83)$$

jossa

$Z(\omega_{rr})$ = impedanssi kulmataajuudella ω_{rr}

ω_{rr} = kaksoisviritetyn suodattimen rinnakkaisresonanssikulmataajuus

Kuvan 23 mukaisen kaksoisviritetyn suodatinpariston kokonaisimpedanssi muodostuu sarja- ja rinnakkaispiirien impedanssien summana. Suodattimen kokonaisimpedanssi saa arvon nolla viritystaajuuksilla f_{s1} ja f_{s2} . [22]

$$Z(\omega) = Z_s(\omega) + Z_r(\omega) = j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_2} + j\omega C_2} \quad (84)$$

jossa

$Z(\omega)$ = kaksoisviritetyn suodattimen impedanssi kulmataajuudella ω

Edellinen yhtälö voidaan vielä johtaa seuraavan yhtälön osoittamaan muotoon kun huomioidaan, että $j \neq 0$. [22]

$$\omega^4 C_1 C_2 L_1 L_2 - \omega^2 (C_1 L_2 + C_1 L_1 + C_2 L_2) + 1 = 0 \quad (85)$$

Mikäli komponenttien mitoitusarvot C_1 ja L_1 sekä C_2 ja L_2 on annettu jo lähtötietona, tällöin muodostuneet viritystaajuudet voidaan ratkaista edellisestä yhtälöstä. Yhtälö ratkaistaan kulmataajuuden suhteen, jolloin ratkaisuksi saadut reaaliset juuret ovat kaksoisviritetyn suodatinpariston viritystaajuudet f_{s1} ja f_{s2} . Neljännen asteen yhtälön ratkaisuksi saadaan aina yhdestä neljään juurta. Kaksoisviritetyn suodatinpariston impedanssikäyrästä johtuen ratkaisuksi tulee 2 juurta, jotka ovat kaksinkertaiset, kuten kuvasta 16 nähdään. Neljännen asteen yhtälö on seuraavaa muotoa: [37]

$$ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e = 0 \quad (86)$$

jossa

a, b, c, d ja e = neljännen asteen yhtälön kertoimet

Neljännen asteen yhtälöllä on juuret α, β, γ ja ε . Juurien ja polynomin termien kertoimien välillä pätee seuraava yhteys: [37]

$$\alpha\beta\gamma\varepsilon = \frac{e}{a} \quad (87)$$

jossa

α, β, γ ja ε = neljännen asteen yhtälön juuret

Yhtälö 85 voidaan nyt kirjoittaa muotoon:

$$\alpha\beta\gamma\varepsilon = \frac{e}{a} = (C_1L_1C_2L_2)^{-1} \quad (88)$$

Koska yhtälöllä 85 on kaksi kaksinkertaista juurta, voidaan yhtälö 88 kirjoittaa seuraavasti:

$$\alpha\alpha\beta\beta = \alpha^2\beta^2 = \omega_{s1}^2\omega_{s2}^2 = (C_1L_1C_2L_2)^{-1} \quad (89)$$

jossa

$$\omega_{s1} = \text{kaksoisviritetyn suodattimen viritystaajuus } n_1f_1$$

$$\omega_{s2} = \text{kaksoisviritetyn suodattimen viritystaajuus } n_2f_1$$

Yhdistämällä yhtälöt 81 ja 83 yhtälön 89 kanssa muodostunut lauseke voidaan kirjoittaa seuraavasti:

$$\omega_{s1}\omega_{s2} = \frac{1}{\sqrt{C_1L_1}} \frac{1}{\sqrt{C_2L_2}} = \omega_s\omega_{rr} \quad (90)$$

Kaksoisviritetyn suodattimen impedanssiarvo on nolla kulmataajuuksien arvoilla $\omega_{s1} = 2\pi f_{s1}$ ja $\omega_{s2} = 2\pi f_{s2}$. Tällöin suodatettavat yliaaltovirrat kulkeutuvat tehokkaasti suodattimeen. Koska rinnakkaisresonanssikulmataajuus ω_{rr} ja suodattimen viritystaajuudet ω_{s1} ja ω_{s2} on määritetty jo lähtötietona, voidaan niiden avulla ratkaista sarjaresonanssikulmataajuus ω_s yhtälöstä 90. Sijoittamalla sarjaresonanssitaajuuden yhtälö 81 ja rinnakkaisresonanssitaajuuden yhtälö 83 yhtälöön 91, jonka jälkeen se voidaan saattaa seuraavaan muotoon: [22]

$$\frac{\omega^4}{\omega_s^2\omega_r^2} - \left(\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{\omega_r^2} + \frac{1}{\omega_s^2} + \frac{1}{\omega_r^2}\right)\omega^2 + 1 = 0 \quad (91)$$

Koska ω_{s1} on yksi yhtälön 91 juurista, voidaan ω korvata ω_{s1} , jolloin kapasitanssien C_1 ja C_2 välillä vaikuttaa seuraavan yhtälön mukainen suhde: [22]

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{\omega_{s1}^2 + \omega_{s2}^2 - \omega_{rr}^2}{\omega_s^2} - 1 \Rightarrow C_2 = \frac{\omega_s^2}{\omega_{s1}^2 + \omega_{s2}^2 - \omega_{rr}^2 - \omega_s^2} C_1 \quad (92)$$

Kapasitanssin C_1 ja L_1 välillä vaikuttaa yhtälön 81 mukainen suhde, joten yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti: [22]

$$L_1 = \left(\frac{\omega_{rr}}{\omega_{s1}\omega_{s2}} \right)^2 \cdot \frac{1}{C_1} \quad (93)$$

Myös kapasitanssin C_2 ja L_2 välillä vaikuttaa yhtälön 83 mukainen suhde, joten yhtälö voidaan kirjoittaa seuraavasti: [22]

$$L_2 = \frac{1}{\omega_{rr}^2} \cdot \frac{1}{C_2} = \frac{(\omega_{s1})^2 + (\omega_{s2})^2 - (\omega_{rr})^2 - (\omega_s)^2}{(\omega_s \omega_{rr})^2 C_1} \quad (94)$$

Kaksoisviritetyn suodatinpariston tuottama perustaaajuinen loisteho verkon nimelliskäynnillä lasketaan seuraavalla yhtälöllä: [22]

$$Q_1 = \frac{U^2}{Z(\omega_1)} \quad (95)$$

jossa

$Z(\omega_1)$ = kaksoisviritetyn suodattimen impedanssi perustaaajuudella

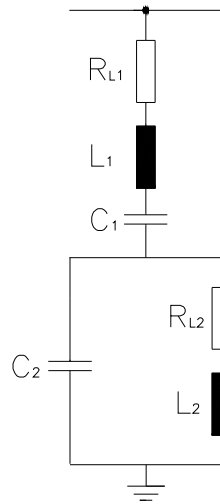
Suodattimen impedanssi $Z(\omega_1)$ peruskulmataajuudella $\omega_1 = 2\pi f_1$ lasketaan seuraavasta yhtälöstä: [22]

$$Z(\omega_1) = Z_s(\omega_1) + Z_r(\omega_1) = j\omega_1 L_1 + \frac{1}{j\omega_1 C_1} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega_1 L_2} + j\omega_1 C_2} \quad (96)$$

Kapasitanssi C_1 saadaan ratkaistua yhtälöiden 95 ja 96 avulla, kun yhtälöön 96 sijoitetaan yhtälöissä 92, 93 ja 94 esitellyt lausekkeet. Tällöin ainoa tuntematon tekijä eli C_1 saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöstä. [22]

$$C_1 = \left(\omega_1 \left(\frac{\omega_{rr}}{\omega_{s1}\omega_{s2}} \right)^2 - \frac{1}{\omega_1} + \frac{\omega_1 ((\omega_{s1}^2 + \omega_{s2}^2 - \omega_{rr}^2) \omega_{rr}^2 - \omega_{s1}^2 \omega_{s2}^2)}{\omega_{s1}^2 \omega_{s2}^2 (\omega_{rr}^2 - \omega_1^2)} \right) \frac{Q}{U^2} \quad (97)$$

Lähteestä 22 poiketen yhtälöön 97 on lisätty sulkumerkit siten, että kapasitanssi on saatu vastaamaan loistehoa yhtälöllä 95 laskien. Kaksoisviritetyn suodatinpariston impedanssi muodostuu reaktanssien lisäksi myös suodatinkuristimien resistiivisistä komponenteista R_{L1} ja R_{L2} . Kuvassa 24 on esitetty kaksoisviritetyn suodatinpariston kytkentä, jossa kuristimien resistiiviset komponentit on otettu mukaan tarkasteluun. Mitoittaminen voidaan toteuttaa myös ilman kuristimien resistiivisten komponenttien huomioon ottamista, riippuen vaaditun tarkastelun tarkkuudesta. Tällöin kuristimien resistanssit voidaan jättää huomiotta ja tarkasteltava kytkentä muodostuu kuvan 23 mukaiseksi. Tarkastellaan seuraavaksi kuitenkin kuvan 24 mukaista kytkentää.



Kuva 24. Kahdelle taajuudelle viritetyn suodatinpariston kytkentä, kun kuristimien resistanssit huomioidaan.

Resistiivinen komponentti muodostuu suodatinkuristimen käämilangan resistanssista, joten pariston mitoitusta tehdessä täytyisi tietää kuristimen resistanssi, joka ei kuitenkaan mitoitusvaiheessa ole vielä saatavilla. Tämän vuoksi mitoitusta tehdessä täytyy käyttää valistunutta alkuarvausta suodatinkuristimen resistanssin arvolle ja suorittaa tarkastuslaskenta, kun kuristin on suunniteltu ja resistanssi selvillä. Kaksoisviritetyn suodattimen kokonaisimpedanssi perustaajuudella saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöstä, kun suodatinkuristimien resistanssit ovat mukana tarkastelussa. [19]

$$Z_{kok}(\omega_1) = R_{L1} + j\omega_1 L_1 + \frac{1}{j\omega_1 C_1} + \left(\frac{1}{j\omega_1 C_2 + \frac{1}{R_{L2} + j\omega_1 L_2}} \right) \quad (98)$$

jossa

$Z_{kok}(\omega_1)$ = impedanssi taajuudella ω_1 kuristimen resistanssit mukana

R_{L1} = kuristimen L_1 resistanssi perustaajuudella

R_{L2} = kuristimen L_2 resistanssi perustaajuudella

Pariston läpi kulkeva perustaajuinen virta I_1 saadaan ratkaistua yhtälöstä 99, kun tiedetään pariston yli vaikuttava jännite sekä impedanssi $Z_{kok}(\omega_1)$. Virtamitoituksessa on huomioitava myös verkkojännitteen vaihtelusta sekä komponenttien valmistustoleransseista johtuva varmuuskerroin g . Varmuuskertoimen arvoksi Alstomin mitoitusohjeiden mukaan valitaan normaalisti 1,0–1,1. [19]

$$I_1 = \frac{g U}{\sqrt{3} |Z_{kok}(\omega_1)|} \quad (99)$$

Perustaajuinen virta I_1 kulkee kondensaattoriryhmän C_1 ja kuristimen L_1 lävitse ja jakautuu kondensaattoriryhmän C_2 ja kuristimen L_2 impedanssien suhteessa. Kondensaattoriryhmän C_2 kautta kulkeva virta I_{C2} saadaan laskettua seuraavasti: [38]

$$I_{C2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{R_{L2} + j\omega L_2}} \right)}{\frac{1}{j\omega C_2}} I_1 \quad (100)$$

jossa

I_{C2} = kondensaattoriryhmän C_2 läpi kulkeva virta

Kuristimen L_2 lävitse perustaajuudella kulkeva virta I_{L2} saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöstä: [38]

$$I_{L2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_2 + \frac{1}{R_{L2} + j\omega L_2}} \right)}{R_{L2} + j\omega L_2} I_1 \quad (101)$$

jossa

I_{L2} = kuristimen L_2 läpi kulkeva virta

Kaksoisviritetyn pariston läpi kulkevien virtojen voidaan olettaa muodostuvan suodatetuista yliaaltovirroista I_{n1} ja I_{n2} sekä perustaajuisesta virrasta I_1 , kun suodatin on viritetty suodattamaan n_1 :ttä ja n_2 :ttä yliaaltoa. Suodatusominaisuudet riippuvat siitä, miten pieneksi suodatettavan taajuuden impedanssiarvo saadaan suhteessa syöttävän verkon impedanssiarvoon kyseisellä taajuudella. Suodattimen suodattama virta saadaan laskettua, kun tiedetään syöttävän verkon impedanssi suodatettavalla taajuudella. Syöttävän verkon impedanssi Z_{n1v} saadaan ratkaistua luvussa 4.2.4 esitellyllä yhtälöllä. Kaksoisviritetyn suodattimen suodattama yliaaltovirta I_{n1} saadaan laskettua suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien sekä yliaaltolähteen tuottaman virran I_{h1} avulla yhtälön 102 mukaisesti. Suodattimen impedanssi Z_{n1} suodatettavalla yliaaltotaajuudella n_1 saadaan ratkaistua yhtälöllä 98, kun kulmataajuutena käytetään suodatettavaa yliaaltotaajuutta. [38]

$$I_{n1} = \frac{\left| \frac{Z_{n1} Z_{n1v}}{Z_{n1} + Z_{n1v}} \right|}{|Z_{n1}|} I_{h1} \quad (102)$$

jossa

I_{n1} = suodattimen suodattama virta taajuudella $n_1 f_1$

I_{h1} = yliaaltolähteen tuottama virta taajuudella $n_1 f_1$

Z_{n1} = suodattimen impedanssi taajuudella $n_1 f_1$

Z_{n1v} = verkon impedanssi taajuudella $n_1 f_1$

Yliaaltovirta I_{n1} kulkee kondensaattoriryhmän C_1 ja kuristimen L_1 lävitse ja jakautuu kondensaattoriryhmän C_2 ja kuristimen L_2 impedanssien suhteessa. Kondensaattoriryhmän C_2 kautta kulkeva virta I_{n1c2} saadaan laskettua yhtälöllä: [38]

$$I_{n1c2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega_{s1}C_2 + \frac{1}{R_{L2} + j\omega_{s1}L_2}} \right)}{\frac{1}{j\omega_{s1}C_2}} I_{n1} \quad (103)$$

jossa

$$I_{n1c2} = \text{kondensaattoriryhmän } C_2 \text{ läpi kulkeva virta taajuudella } n_1 f_1$$

Kuristimen L_2 kautta kulkeva yliaaltovirta I_{n1L2} saadaan ratkaistua seuraavasti: [38]

$$I_{n1L2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega_{s1}C_2 + \frac{1}{R_{L2} + j\omega_{s1}L_2}} \right)}{R_{L2} + j\omega_{s1}L_2} I_{n1} \quad (104)$$

jossa

$$I_{n1L2} = \text{kuristimen } L_2 \text{ kautta kulkeva virta taajuudella } n_1 f_1$$

Kaksoisviritetyn pariston suodattama yliaaltovirta I_{n2} saadaan laskettua suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien sekä yliaaltolähteen tuottaman yliaaltovirran I_{h2} avulla yhtälön 105 mukaisesti. Suodattimen impedanssi Z_{n2} suodatettavalla yliaaltotaajuudella n_2 saadaan ratkaistua yhtälöllä 98, kun kulmataajuutena käytetään suodatettavaa yliaaltotaajuutta. [38]

$$I_{n2} = \left| \frac{\frac{Z_{n2}Z_{n2v}}{Z_{n2} + Z_{n2v}}}{Z_{n2}} \right| I_{h2} \quad (105)$$

jossa

$$I_{n2} = \text{suodattimen suodattama virta taajuudella } n_2 f_1$$

$$I_{h2} = \text{yliaaltolähteen tuottama virta taajuudella } n_2 f_1$$

$$Z_{n2} = \text{suodattimen impedanssi taajuudella } n_2 f_1$$

$$Z_{n2v} = \text{verkon impedanssi taajuudella } n_2 f_1$$

Yliaaltovirta I_{n2} kulkee kondensaattoriryhmän C_1 ja kuristimen L_1 lävitse ja jakautuu kondensaattoriryhmän C_2 ja kuristimen L_2 impedanssien suhteessa. Kondensaattoriryhmän C_2 kautta kulkeva virta I_{n2c2} saadaan laskettua yhtälöstä: [38]

$$I_{n_2 C_2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega_{s1} C_2 + \frac{1}{R_{L_2} + j\omega_{s1} L_2}} \right)}{\frac{1}{j\omega_{s1} C_2}} I_{n_1} \quad (106)$$

jossa

$I_{n_2 C_2}$ = kondensaattoriryhmän C_2 läpi kulkeva virta taajuudella $n_2 f_1$

Kuristimen L_2 kautta kulkeva yliaaltovirta $I_{n_2 L_2}$ saadaan ratkaistua seuraavan yhtälön avulla: [38]

$$I_{n_2 L_2} = \frac{\left(\frac{1}{j\omega_{s1} C_2 + \frac{1}{R_{L_2} + j\omega_{s1} L_2}} \right)}{R_{L_2} + j\omega_{s1} L_2} I_{n_1} \quad (107)$$

jossa

$I_{n_2 L_2}$ = kuristimen L_2 kautta kulkeva virta taajuudella $n_2 f_1$

Kuristimien L_1 ja L_2 termisessä mitoituksessa ei voida käyttää virran tehollisarvoa, sillä kuristimien häviöresistanssien suuruus riippuu merkittävästi taajuudesta. Kuristimien mitoituksessa on käytettävä ekvivalenttivirtaa joka ottaa huomioon kuristimen häviöresistanssien muuttumisen eri taajuuksilla. Ekvivalenttivirta voidaan kuvitella perustaaajuseksi virraksi, joka aiheuttaa saman lämpenemisen kuristimessa kuin todelliset kuormitusvirrat. Kuristinta L_1 kuormittava ekvivalenttivirta lasketaan yhtälöstä. [32]

$$I_{ekvL_1} = \sqrt{I_1^2 + \frac{R_{L_1 n_1}}{R_{L_1}} I_{n_1}^2 + \frac{R_{L_1 n_2}}{R_{L_1}} I_{n_2}^2} \quad (108)$$

jossa

I_{ekvL_1} = kuristimen L_1 ekvivalenttivirta

$R_{L_1 n_1}$ = kuristimen L_1 resistanssi taajuudella $n_1 f_1$

$R_{L_1 n_2}$ = kuristimen L_1 resistanssi taajuudella $n_2 f_1$

Kuristinta L_2 kuormittava ekvivalenttivirta ratkaistaan seuraavasta yhtälöstä: [32]

$$I_{ekvL_2} = \sqrt{I_{L_2}^2 + \frac{R_{L_2 n_1}}{R_{L_2}} I_{n_1 L_2}^2 + \frac{R_{L_2 n_2}}{R_{L_2}} I_{n_2 L_2}^2} \quad (109)$$

jossa

I_{ekvL_2} = kuristimen L_2 ekvivalenttivirta

$R_{L_2 n_1}$ = kuristimen L_2 resistanssi taajuudella $n_1 f_1$

R_{L2n2} = kuristimen L_2 resistanssi taajuudella n_2f_1

Virtamitoituksessa on huomioitava, että virrat voivat resonoitua suodattimen rinnakkaisresonanssipiirissä. Kondensaattoriryhmien C_1 ja C_2 mitoitusjännite saadaan ratkaistua perustaajuisten ja yliaaltotaajuisten jännitteiden aritmeettisena summana. [19]

$$U_{mc1} = \frac{I_1}{\omega_1 C_1} + \frac{I_{n1}}{\omega_{s1} C_1} + \frac{I_{n2}}{\omega_{s2} C_1} \quad (110)$$

jossa

U_{mc1} = kondensaattoriryhmän C_1 mitoitusjännite

$$U_{mc2} = \frac{I_{C2}}{\omega_1 C_2} + \frac{I_{n1C2}}{\omega_{s1} C_2} + \frac{I_{n2C2}}{\omega_{s2} C_2} \quad (111)$$

jossa

U_{mc2} = kondensaattoriryhmän C_2 mitoitusjännite

Kaksoisviritetyn suodattimen mitoitusloistehot kondensaattoriryhmille C_1 ja C_2 saadaan laskettua yhtälöillä: [19]

$$Q_{mc1} = U_{mc1}^2 2\pi f C_1 \quad (112)$$

jossa

Q_{mc1} = kondensaattoriryhmän C_1 mitoitusloisteho

$$Q_{mc2} = U_{mc2}^2 2\pi f C_2 \quad (113)$$

jossa

Q_{mc2} = kondensaattoriryhmän C_2 mitoitusloisteho

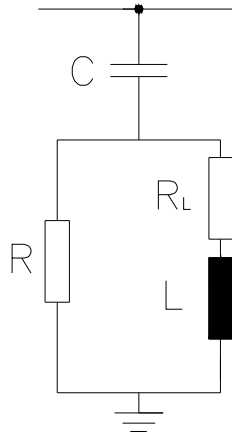
Mitoitusloisteho ja -jännite yhdessä määrittävät kondensaattoriryhmien C_1 ja C_2 sarjaan- ja rinnankytkettävien kondensaattoriyksiköiden määrän sekä mitoituksen. Kondensaattoriyksiköiden rakenne sekä maksimijännite ja -loisteho esitellään tarkemmin luvussa 3.1.1.

4.10 Laajakaistasuodatin

Laajakaistasuodattimen tehtävä on suodattaa yliaaltoja taajuuskaistan ylitse sekä tuottaa kapasitiivista loistehoa. Laajakaistasuodattimen mitoittamisessa tarvitsee asennuskohteesta ja sähköverkosta tuntea vähintään luvussa 4.1.2 esitellyt lähtötiedot. Mittaustulosten tai tarvittaessa simuloinnin perusteella saadaan määritettyä tarvittava perustaajuinen kompensointiteho sekä suodattimelta vaadittava impedanssikäyrä, jotta suodatusvaatimukset täyttyvät. Tarkimmin verkon impedanssin arvon saa määritettyä mittaamalla mutta käytännössä siihen sisältyy aina virhettä, koska verkon kuormitus- ja kytkentätilanteet vaihtelevat. Mitoitettaessa suodatinta kompensointitehon mukaan, suodattimen

kapasitanssi valitaan niin, että niillä saadaan tuotettua vaadittu perustaajuinen kompensointiteho. [19]

Kuvassa 25 on esitetty yleisimmin käytetyn toisen asteen laajakaistasuodattimen kytkentä.



Kuva 25. Toisen asteen laajakaistasuodattimen kytkentä, kun kuristimien resistanssit huomioidaan.

Laajakaistasuodatinta mitoitettaessa määritetään taajuuskaista, jonka yliaaltotaajuu-
det halutaan suodattaa. Laajakaistasuodattimen resonanssitaajuus f_r ratkaistaan seuraavasti:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (114)$$

Laajakaistasuodattimen suodatusominaisuuksia kuvataan hyvyysluvulla Q_r . Hyvyysluku ilmaisee laajakaistasuodattimen impedanssikäyrän terävyyttä. Laajakais-
tasuodattimilla on matala impedanssiarvo koko suodatusalueen ylitse. Laajakais-
tasuodattimen hyvyysluku saadaan määritettyä seuraavalla yhtälöllä: [23]

$$Q_r = \frac{R}{X_r} \quad (115)$$

X_r ilmaisee laajakaistasuodattimen kuristimen reaktanssin resonanssitaajuudella. Reaktanssi ratkaistaan alla olevasta yhtälöstä: [23]

$$X_r = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (116)$$

Laajakaistasuodattimen mitoituksen päämääränä on määrittää sellaiset komponent-
tiarvot joiden avulla saavutetaan asetetut suodatusvaatimukset kaikilla suodatettavilla
yliaaltotaajuuksilla, sekä saadaan tuotettua tarvittava kapasitiivinen loisteho. Ka-
pasitanssin arvo mitoitetaan siten, että laajakaistasuodattimen avulla saadaan tuotettua

vaadittu kompensointiteho. Verkon perustaajuudella voidaan olettaa, että $R_L \ll X_r \ll R$.

Laajakaistasuodattimen kapasitanssi saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöstä: [19]

$$C = \frac{Q_1}{U^2 \cdot 2\pi f_1 \left(\frac{n^2}{n^2 - 1} \right)} \quad (117)$$

Induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat viritystaajuudella yhtä suuret, joten kuristimen induktanssi saadaan ratkaistua yhtälöstä 118, kun taajuus f_r valitaan alimman suodatettavan taajuuden mukaan. [1]

$$2\pi f_r L = \frac{1}{2\pi f_r C} \Rightarrow L = \frac{1}{(2\pi f_r)^2 C} \quad (118)$$

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin kuvan 25 mukaista toisen asteen laajakaistasuodatinta. Laajakaistasuodatinta mitoitettaessa on tiedettävä kytkettävän verkon perustaajuinen jännite sekä suodatettavien yliaaltovirtojen suuruudet. Pariston läpi kulkeva perustaajuinen virta I_1 saadaan ratkaistua, kun tiedetään pariston yli vaikuttava jännite sekä impedanssi Z . Suodattimen impedanssi sisältää reaktanssien lisäksi myös suodatinkuristimien resistiivisen komponentit R_L ja vaimennusvastuksen R . Resisttiivinen komponentti muodostuu suodatinkuristimen käämilangan resistanssista, joten pariston mitoitusta tehdessä täytyisi tietää kuristimen resistanssi, joka ei kuitenkaan mitoitusvaiheessa ole vielä saatavilla. Tämän vuoksi mitoitusta tehdessä täytyy käyttää valistunutta alkuarvausta suodatinkuristimen resistanssin arvolle ja suorittaa tarkastuslaskenta, kun kuristimen on suunniteltu ja resistanssi selvillä. Vaimennusvastuksen arvo on yksi laajakaistasuodattimen mitoituksen lähtötiedoista ja se ratkaistaan järjestelmäsuunnittelua tehtäessä. Vaimennusvastuksen arvo ratkaistaan simuloimalla syöttävää verkkoa eri kytkentätilanteissa. Simuloinnin avulla saadaan ratkaistua laajakaistasuodattimen impedanssilta vaaditut arvot, joiden ala puolella impedanssiarvon tulee suodatettavalla taajuuskaistalla olla, jotta vaadittu suodatusvaatimus saadaan täytettyä. Vaimennusvastuksen arvoa muuttamalla saadaan laajakaistasuodattimen impedanssiarvo säädettyä vaadittun mukaiseksi.

Laajakaistasuodattimen impedanssi saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöstä: [19]

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{\frac{1}{R_L + j\omega L} + \frac{1}{R}} \right) \quad (119)$$

Pariston perustaajuinen virta saadaan laskettua perustaajuisen impedanssin ja pariston yli vaikuttavan jännitteen U avulla, yhtälöstä 120. Laajakaistasuodattimen virtamitoituksessa on huomioitava myös verkkojännitteen vaihteluista sekä komponenttien

valmistustoleransseista johtuva varmuuskerroin g . Varmuuskertoimen arvoksi Alstomin mitoitusohjeiden mukaan valitaan normaalisti 1,0–1,1. [19]

$$I_1 = \frac{g U}{\sqrt{3} |Z(\omega_1)|} \quad (120)$$

Kondensaattoriryhmän läpi kulkeva perustaajuinen virta I_1 jakautuu kuristimen ja vastuksen impedanssien suhteessa. Kuristimen kautta kulkeva perustaajuinen virta I_{1L} saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä:

$$I_{1L} = \left| \frac{\frac{1}{R_L + j\omega L}}{\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega L}}} \right| I_1 = \left| \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega L}} \right| I_1 \quad (121)$$

jossa

I_{1L} = kuristimen virta taajuudella f_1

Vastuksen läpi perustaajuudella kulkeva virta I_R saadaan ratkaistua seuraavalla tavalla:

$$I_R = \left| \frac{\frac{1}{R}}{\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega L}}} \right| I_1 = \left| \frac{1}{R} \right| I_1 \quad (122)$$

Laajakaistasuodattimen läpi kulkevien virtojen voidaan olettaa muodostuvan suodatetuista yliaaltovirroista I_n sekä perustaajuisesta virrasta I_1 , kun suodatin on viritetty suodattamaan n_1 :ttä yliaaltoa. Suodatusominaisuudet riippuvat siitä miten pieneksi suodatettavan taajuuden impedanssiarvo saadaan suhteessa syöttävän verkon impedanssiarvoon kyseisellä taajuudella.

Suodattimen suodatama virta saadaan laskettua, kun tiedetään syöttävän verkon impedanssi suodatettavalla taajuusalueella. Syöttävänverkon impedanssi Z_{n1v} saadaan ratkaistua luvussa 4.2.4 esitellyllä yhtälöllä. Laajakaistasuodattimen suodatama yliaaltovirta I_{n1} saadaan laskettua suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien sekä verkon yliaaltovirran I_{h1} avulla yhtälön 123 mukaisesti. Suodattimen impedanssi Z_{n1} suodatettavalla yliaaltotaajuudella n_1 saadaan ratkaistua yhtälöllä 119, kun kulmataajuutena käytetään suodatettavaa yliaaltotaajuutta.

$$I_{n1} = \left| \frac{\frac{Z_{n1}Z_{n1v}}{Z_{n1} + Z_{n1v}}}{Z_{n1}} \right| I_{h1} \quad (123)$$

Yliaaltovirta I_{n1} kulkee kondensaattoriryhmän lävitse ja jakautuu kuristimen ja vastuksen impedanssien suhteessa. Kuristimen kautta kulkeva virta I_{n1L} taajuudella n_1f_1 saadaan laskettua seuraavasti:

$$I_{n1L} = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega_s L}} \right)}{R_L + j\omega_s L} I_{n1} \quad (124)$$

jossa

$$I_{n1L} = \text{kuristimen virta taajuudella } n_1f_1$$

Vastuksen läpi kulkeva virta I_{n1R} taajuudella n_1f_1 saadaan ratkaistua seuraavalla tavalla:

$$I_{n1R} = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega_s L}} \right)}{R} I_{n1} \quad (125)$$

jossa

$$I_{n1R} = \text{vastuksen virta taajuudella } n_1f_1$$

Myös muut laajakaistasuodattimen suodattamat yliaaltotaajuiset virrat saadaan laskettua suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien sekä verkon yliaaltovirtojen avulla edellä esitellyn mukaisesti. Kuristimen termisessä mitoituksessa täytyy käyttää ekvivalenttivirtaa, sillä kuristimen häviöresistanssin suuruus riippuu merkittävästi taajuudesta. Kuristimen mitoituksessa on käytettävä ekvivalenttivirta ottaa huomioon kuristimen häviöresistanssien muuttumisen eri taajuuksilla. Ekvivalenttivirta voidaan kuvitella perustaajuiseksi virraksi, joka aiheuttaa saman lämpenemisen kuristimessa kuin todelliset kuormitusvirrat. Kuristinta kuormittava ekvivalenttivirta saadaan laskettua yhtälöstä 41. [32]

Vastuksen virran tehollisarvo lasketaan perustaajuisen ja harmonisten virtojen neliöiden summan neliöjuurena. Vastuksen mitoitus-teho saadaan ratkaistua virran tehollisarvon ja vastuksen resistanssin avulla yhtälöstä 45 ja vastuksen virran tehollisarvo yhtälöstä 44.

Kompensointikapasitanssien yli vaikuttavat perustaajuisen ja harmoniset yliaaltojännitteet lasketaan edellä mainittujen virtojen ja kapasitiivisen reaktanssin tulona kullekin yliaaltotaajuudelle seuraavasti:

$$U_{cn} = I_n X_{cn} \quad (126)$$

Kondensaattoriryhmän mitoitusjännite saadaan ratkaistua perustaajuisen ja yliaalto-
taajuisten jännitteiden aritmeettisena summana.

$$U_{mc} = \frac{I_1}{\omega_1 C} + \sum_{n=2}^{\infty} \frac{I_n}{\omega_n C} \quad (127)$$

jossa

U_{mc} = kondensaattoriryhmän C mitoitusjännite

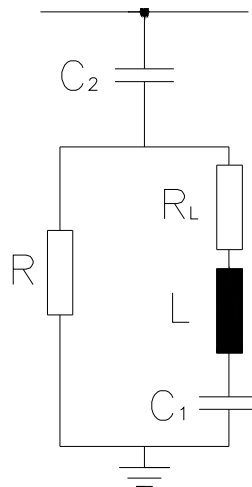
Laajakaistasuodattimen kolmivaiheinen mitoitusloisteho saadaan laskettua yhtälöllä

$$Q_m = 3U_{mc}^2 2\pi f_1 C \quad (128)$$

Mitoitusloisteho ja -jännite yhdessä määrittävät sarjaan- ja rinnankytkettävien kondensaattoriyksiköiden määrän sekä mitoituksen. Kondensaattoriyksiköiden rakenne sekä maksimijännite ja -loisteho esitellään tarkemmin luvussa 3.1.1.

4.11 C-tyyppin suodatin

C-tyyppin suodatinta käytetään suodattamaan verkon yliaaltoja laajan taajuuskaistan ylitse sekä, tuottamaan kapasitiivista loistehoa. C-tyyppin pariston mitoittamisessa tarvittavat lähtötiedot on esitelty luvussa 4.1.2. Mitoitettaessa suodatinta kompensointitehon mukaan kapasitanssi C_2 valitaan siten, että sen avulla saadaan tuotettua vaadittu perustaajuinen kompensointiteho. Kuvassa 26 on esitetty C-tyyppin suodattimen kytkentäkuva.



Kuva 26. C-tyyppin suodattimen kytkentä, kun kuristimien resistanssit huomioidaan.

C-tyypin suodatin muodostuu kahdesta sarjaresonanssipiiristä. Apukondensaattori-ryhmä C_1 ja suodatinkuristin muodostavat sarjaresonanssipiirin perustaajuudella f_1 . Perustaajuudelle viritetyn sarjaresonanssipiirin tarkoitus on pienentää suodattimessa syntyviä perustaajuisia häviöitä. Perustaajuinen virta kulkee apukondensaattori-ryhmän C_1 ja suodatinkuristimen muodostaman haaran kautta, eikä näin ollen aiheuta tehohäviötä vaimennusvastuksessa. [39]

Toinen C-tyypin suodattimessa esiintyvä sarjaresonanssipiiri muodostuu pariston kokonaiskapasitanssista ja suodatinkuristimen induktanssista ja se viritetään yleensä suurimman verkossa esiintyvän yliaaltovirran taajuudelle f_s . Suurimman yliaaltovirran taajuudelle viritetyn sarjaresonanssipiirin tarkoitus on suodattaa kyseisen taajuus mahdollisimman tehokkaasti. Suodattimen vaimennusvastus mitoitetaan siten, että pieni impedanssinen suodatusalue saadaan laajennettua suodattamaan myös viritystaajuuden yläpuolisia taajuuksia. [39]

Suodattimen impedanssi sisältää reaktanssien lisäksi myös suodatinkuristimien resistiivisen komponentit R_L ja vaimennusvastuksen R . Resisttiivinen komponentti muodostuu suodatinkuristimen käämilangan resistanssista, joten pariston mitoitusta tehdessä täytyisi tietää kuristimen resistanssi, joka ei kuitenkaan mitoitusvaiheessa ole vielä saatavilla. Tämän vuoksi mitoitusta tehdessä täytyy käyttää valistunutta alkuarvausta suodatinkuristimen resistanssin arvolle. Kuristinsuunnittelussa selviää resistanssin laskennallinen, arvo jonka jälkeen tulee suorittaa tarkastuslaskenta, jotta voidaan varmistua suodatusvaatimusten täyttymisestä. Kuvan 26 mukaisen C-tyypin suodattimen impedanssi lasketaan seuraavasti:

$$Z(\omega) = \frac{1}{j\omega C_2} + \frac{R \left(R_L + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1} \right)}{R + R_L + j\omega L + \frac{1}{j\omega C_1}} \quad (129)$$

C-tyypin suodattimessa perustaajuisista loistehoa tuottaa ainoastaan kondensaattori C_2 , koska kondensaattori-ryhmä C_1 ja suodatinkuristin L on viritetty perustaajuudelle. Näin ollen kondensaattori-ryhmän C_1 ja suodatinkuristimen muodostaman haaran reaktanssi on nolla, eli C_1 tuota perustaajuisista loistehoa. Mitoituksen lähtötietona tunnetaan verkon pääjännite, perustaajuus sekä tarvittava perustaajuinen kompensointiteho. Näiden avulla saadaan ratkaistua kondensaattori-ryhmän C_2 kapasitanssi seuraavasti: [1]

$$C_2 = \frac{Q_1}{U^2 \cdot 2\pi f_1} \quad (130)$$

Kuristimen induktanssi saadaan ratkaistua seuraavalla yhtälöllä, kun kapasitanssi C_1 ja verkon perustaajuus tunnetaan. [39]

$$L = \frac{1}{(2\pi f_1)^2 C_1} \quad (131)$$

Suodatettavan harmonisen yliaaltotaajuuden ja verkon perustaajuuden avulla saadaan ratkaistua järjestysluku n , mikä ilmaisee resonanssipiiritaajuuden suhteessa nimellistaajuuteen.

$$n = \frac{f_r}{f_1} \Rightarrow f_r = n f_1 \quad (132)$$

Järjestysluvulla n induktiivinen ja kapasitiivinen reaktanssi ovat yhtä suuret, eli suodattimen impedanssi on nolla.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow n f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (133)$$

C-tyypin suodattimen kokonaiskapasitanssi, joka muodostuu kondensaattoriryhmiin C_1 ja C_2 sarjaan kytkennästä saadaan laskettua seuraavasta yhtälöstä: [38]

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad (134)$$

Kondensaattoriryhmän C_1 kapasitanssi saadaan ratkaistua yhtälöstä 135, kun yhtälöön 133 sijoitetaan yhtälöt 131 ja 134. [39]

$$n f_1 = \frac{1}{2\pi \sqrt{\frac{1}{(2\pi f_1)^2 C_1} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}} \Rightarrow C_1 = (n^2 - 1) C_2 \quad (135)$$

C-tyypin suodattimen mitoituksen lähtötietona annetaan vaimennusvastuksen resistanssiarvo tai hyvyysluku. Mikäli lähtötietona on annettu hyvyysluku, tällöin hyvyysluvun avulla vaimennusvastuksen resistanssiarvo saadaan ratkaistua seuraavasta yhtälöstä. [23]

$$Q_r = \frac{R}{X_r} \Rightarrow R = Q_r X_r \quad (136)$$

Mitoituksen päämääränä on määrittää sellaiset komponenttiarvot joiden avulla saavutetaan asetetut suodatusvaatimukset kaikilla suodatettavilla yliaaltotaajuuksilla, sekä saadaan tuotettua tarvittava kapasitiivinen loisteho. Laajakaistasuodattimen mitoituksessa joudutaan tekemään aina kompromissiratkaisu. Sillä jos halutaan suodattaa laajantaajuuskaistan yliaallot, yksittäisen yliaallon impedanssiarvoa ei saada kovin pieneksi mikä tarkoittaa yliaaltojen kulkeutumista verkkoon.

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin kuvan 26 mukaista kytkentää. Pariston läpi kulkeva perustaajuinen virta I_1 saadaan ratkaistua, kun tiedetään pariston yli vaikuttava jännite sekä impedanssi Z . C-tyypin suodattimen virtamitoituksessa on huomioitava myös verkkojännitteen vaihteluista sekä komponenttien valmistustoleransseista johtuva

varmuuskerroin g . Varmuuskertoimen arvoksi Alstomin mitoitusohjeiden mukaan valitaan normaalisti 1,0–1,1. [19]

$$I_1 = \frac{g U}{\sqrt{3} |Z(\omega_1)|} \quad (137)$$

Perustaajuinen virta I_1 kulkee kondensaattoriryhmän C_2 lävitse ja jakautuu kuristimen resistiivisen komponentin ja vastuksen resistanssin suhteessa. Koska perustaajuudella kondensaattoriryhmä C_1 ja kuristin muodostavat sarjaresonanssipiirin, joten reaktanssi on nolla. Sarjaresonanssipiirin muodostaman haaran kautta kulkeva perustaajuinen virta I_{1LC} saadaan laskettua seuraavasti: [38]

$$I_{1LC} = \frac{\left(\frac{R_L R}{R_L + R}\right)}{R_L} I_1 \quad (138)$$

jossa

I_{1LC} = kondensaattorin ja kuristimen läpi kulkeva perustaajuinen virta

Vastuksen lävitse perustaajuudella kulkeva virta I_R saadaan ratkaistua suoraan resistanssien suhteessa yhtälöstä 139, koska perustaajuudella apukondensaattoriryhmän ja suodatinkuristimen summa reaktanssi on nolla. [38]

$$I_R = \frac{\left(\frac{R_L R}{R_L + R}\right)}{R} I_1 \quad (139)$$

C-tyyppin suodattimen läpi kulkevien virtojen voidaan olettaa muodostuvan suodatetuista yliaaltovirroista sekä perustaajuisesta virrasta I_1 , kun suodatin on viritetty suodattamaan n_1 :ttä yliaaltoa. Suodatusominaisuudet riippuvat siitä miten pieneksi suodatettavan taajuuden impedanssiarvo saadaan suhteessa syöttävän verkon impedanssiarvoon kyseisellä taajuudella. Suodattimen suodattama virta saadaan laskettua, kun tiedetään syöttävän verkon impedanssi suodatettavalla taajuusalueella. Syöttävän verkon impedanssi Z_{n1v} saadaan ratkaistua luvussa 4.2.4 esitellyllä yhtälöllä. Suodattimen suodattama yliaaltovirta I_{n1} saadaan laskettua suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien sekä verkon yliaaltovirran I_{h1} avulla yhtälön 140 mukaisesti. Suodattimen impedanssi Z_{n1} suodatettavalla yliaaltotaajuudella n_1 saadaan ratkaistua yhtälöllä 129, kun kulmataajuutena käytetään suodatettavaa yliaaltotaajuutta. [19; 38]

$$I_{n1} = \frac{\left|\frac{Z_{n1} Z_{n1v}}{Z_{n1} + Z_{n1v}}\right|}{|Z_{n1}|} I_{h1} \quad (140)$$

Yliaaltovirta I_{n1} kulkee kondensaattoriryhmän C_2 lävitse ja jakautuu kondensaattoriryhmän C_1 ja kuristimen muodostaman impedanssin ja vastuksen resistanssin suhteessa. Kondensaattoriryhmän C_1 ja kuristimen kautta kulkeva yliaaltovirta I_{n1LC} saadaan laskettua seuraavasti: [38]

$$I_{n1LC1} = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega_s L + \frac{1}{j\omega_s C}}} \right)}{R_L + j\omega_s L + \frac{1}{j\omega_s C}} I_{n1} \quad (141)$$

Vastuksen kautta kulkeva yliaaltovirta I_{n1R} saadaan ratkaistua seuraavasti: [38]

$$I_{n1R} = \frac{\left(\frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_L + j\omega_s L + \frac{1}{j\omega_s C}}} \right)}{R} I_{n1} \quad (142)$$

Myös muut C-tyyppin suodattamat yliaaltotaajuiset virrat saadaan laskettua suodattimen ja syöttävän verkon impedanssien sekä verkon yliaaltovirtojen avulla edellä esitellyn mukaisesti.

Kuristimen termisessä mitoituksessa ei voida käyttää virran tehollisarvoa, sillä kuristimen häviöresistanssin suuruus riippuu merkittävästi taajuudesta. Kuristimen mitoituksessa on käytettävä ekvivalenttivirtaa joka ottaa huomioon kuristimen häviöresistanssien muuttumisen eri taajuuksilla. Ekvivalenttivirta voidaan kuvitella perustaajuiseksi virraksi, joka aiheuttaa saman lämpenemisen kuristimessa kuin todelliset kuormitusvirrat. Kuristinta kuormittava ekvivalenttivirta lasketaan yhtälöstä 41. [32]

Vastuksen virran tehollisarvo lasketaan perustaajuisen ja harmonisten virtojen neliöiden summan neliöjuuren. Vastuksen mitoitus-teho saadaan ratkaistua virran tehollisarvon ja vastuksen resistanssin avulla yhtälöstä 45. Virran tehollisarvo lasketaan yhtälöllä 44.

Kompensointikapasitanssien yli vaikuttavat perustaajuisen ja harmoniset yliaaltotännitteen lasketaan edellä mainittujen virtojen ja kapasitiivisen reaktanssin tulona kullekin yliaaltotaajuudelle seuraavasti:

$$U_{cn} = I_n X_{cn} \quad (143)$$

Kondensaattoriryhmien C_1 ja C_2 mitoitusjännitteet U_{mc1} ja U_{mc2} saadaan ratkaistua perustaajuisen ja yliaaltotaajuisten jännitteiden aritmeettisena summana yhtälön 39 mukaisesti. Kondensaattoriryhmien C_1 ja C_2 mitoitusloistehot Q_{mc1} ja Q_{mc2} saadaan lasketua seuraavilla yhtälöillä: [19]

$$Q_{mc1} = U_{mc1}^2 2\pi f C_1 \quad (144)$$

$$Q_{mc2} = U_{mc2}^2 2\pi f C_2 \quad (145)$$

Kokonaisloisteho ja mitoitusjännite yhdessä määrittävät sarjaan- ja rinnankytkettävien kondensaattoriyksiköiden määrän sekä mitoituksen. Kondensaattoriyksiköiden rakenne sekä maksimijännite ja -loisteho esitellään tarkemmin luvussa 3.1.1.

5 KOMPENSOINTILAITTEEN SUOJAUS

Kompensointilaitteen mitoittaminen sisältää myös suojauksen suunnittelun. Kompensointilaitteen suojauksessa käytettävät suojausmenetelmät ja vaaditut suojaustasot riippuvat oleellisesti suojattavanlaitteen arvosta sekä laitteen vioittumisen aiheuttamista vaikutuksista. Tässä työssä suojaus on jaoteltu sisäiseen ja ulkoiseen suojaukseen. Kompensointilaitteen sisäisellä suojauksella tarkoitetaan laitteen sisäisen vian aiheuttamaa suojaustoiminnon aktivoitumista. Kompensointilaitteen ulkoinen suojaus käsittää syöttävänverkon välityksellä siirtyvältä ylijännitteeltä suojautumisen.

Tässä luvussa esitellään kompensointilaitteiden kytkentävaihtoehdot sekä käsitellään suojauksessa käytettäviä komponentteja. Kompensointilaitteet koostuvat sarjaan- ja rinnankytketyistä kondensaattoriyksiköistä ja kondensaattoriyksiköt muodostuvat käämielementeistä. Kondensaattoriyksiköiden suojaus voidaan toteuttaa sisäisillä ja ulkoisilla sulakkeilla tai ne voivat olla kokonaan sulakkeettomia.

5.1 Kondensaattoriyksikön suojaus

ALSTOM Grid oy valmistaa kondensaattoriyksiköitä sekä sisäisillä sulakkeilla että sulakkeettomana. Kondensaattoriyksikkö muodostuu käämielementeistä, joita kytketään sarjaan ja rinnan tarvittavan tehon ja jännitekestoisuuden saavuttamiseksi. Käämielementin vikaantuminen aiheuttaa kapasitanssin muutoksen, joka muuttaa yksikön sisäistä jännitteen jakoa. [19]

Kondensaattoriyksikön käämielementtien vikaantuminen aiheuttaa käämielementtiryhmän kapasitanssin pienenemisen. Käämielementtiryhmän kapasitanssin pienenemisestä seuraa reaktanssin kasvaminen ja tästä syystä jänniterasitus rinnakkaisilla käämielementeillä kasvaa. Käämielementtiryhmään kohdistuva jänniterasitus riippuu ennen kaikkea kondensaattoriyksikön sisäisten rinnankytkentöjen määrästä. Mitä enemmän rinnankytkentöjä kondensaattoriyksikkö sisältää, sitä pienempi vaikutus yksittäisen elementin hajoamisella on yksikön toiminnalle. [38]

Kondensaattoriyksikön tulee kestää IEC 60871-1 standardin mukainen jatkuva 10 prosentin ylijännite ja 1,3-kertainen ylivirta yksikön nimellisvirtaan nähden vaurioitumatta. Mikäli yksikön yli vaikuttava jännite tai virta nousee liian suureksi, tulee yksikön kytkentälaitteen laukaista yksikkö automaattisesti pois verkosta. Standardissa IEC 60871-1 määritellään myös käyttöympäristölle lämpötilarajat, joissa yksiköiden tulee toimia ilman vaurioitumista sekä kapasitanssirajat joiden puitteissa yksikön kapasitanssiarvon tulee pysyä. [13] IEC 60871-1 standardin asettamia ohjeistuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.1.3.

5.1.1 Sulakkeeton kondensaattoriyksikkö

Sulakkeettomassa kondensaattoriyksikössä käämielementtien kanssa sarjaan ei ole kytkettyä sisäisiä sulakkeita. Tällöin käämielementin läpilyönnin sattuessa elementti menee oikosulkuun ja muiden sarjaan kytkettyjen elementtien jänniterasitus nousee. Sulakkeettomat kondensaattoriyksiköt suunnitellaan yleensä suuremmalle nimellisjännitteelle, kuin sisäisillä sulakkeilla varustetut yksiköt. Näin ollen sulakkeettomissa yksiköissä on enemmän käämielementtejä kytkettynä sarjaan kuin sulakkeellisissa yksiköissä. Sulakkeettoman yksikön etuna verrattaessa sitä sulakkeelliseen yksikköön ovat pienemmät valmistuskustannukset sekä häviöt, koska sulakkeiden kustannus ja häviöt jäävät pois. [19]

Suuressa paristossa, joka sisältää useita sarjaankytkettyjä kondensaattoriyksiköitä yksittäisen käämielementin vioittuminen ei vielä aiheuta ongelmaa pariston sisäisessä jännitejaossa, vaan paristo voi jatkaa toimintaansa ilman keskeytystä. Sulakkeettoman yksikön toiminta perustuukin kehittyneisiin eristysmateriaaleihin sekä useaan sarjaankytkettyyn käämielementtiin, jotka mahdollistavat suuremman mitoitusjännitteen. [19]

5.1.2 Sulakkeellinen kondensaattoriyksikkö

Sulakkeellisessa kondensaattoriyksikössä jokaisen käämielementin kanssa sarjaan on kytkettynä sulake. Sisäisen sulakkeen tehtävänä on poistaa vioittunut käämielementti rinnankytkennästä, jotta vioittunut elementti ei aiheuta suurempaa vahinkoa kondensaattoriyksikön sisällä. Käämielementin vioittuminen johtuu eristeaineen pettämisen aiheuttamasta oikosulusta. Käämielementin oikosulun seurauksena rinnakkaisten elementtien varaus purkautuu oikosulkeutuneen elementin ja sen kanssa sarjassa olevan sulakkeen kautta. Rinnakkaisten käämielementtien varauksen purkautumisen synnyttämä purkausvirta aiheuttaa sulakkeen palamisen. Sulakepalosta huolimatta kondensaattoriyksikkö voi jatkaa toimintaansa normaalisti, mutta rikkoutuneen käämielementin vaikutus näkyy koko kompensointilaitteen kapasitanssissa. [19]

Epäbalanssisuojauksen avulla tarkkaillaan, ettei vaihekohtainen epäbalanssi kasva liian suureksi. Vioittuneen käämielementin kanssa samassa rinnakkaisryhmässä olevien elementtien jännite saattaa ylittää niille asetetun jännitekestoisuusrajan.

5.2 Kompensointilaitteen sisäinen suojaus

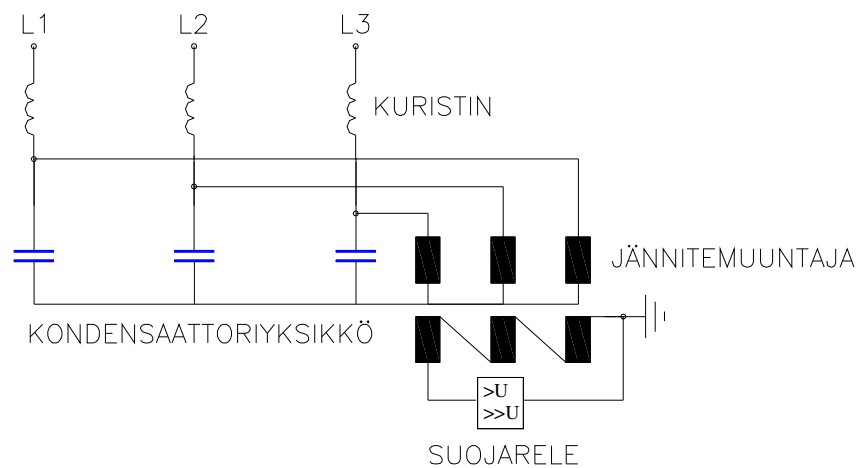
Kompensointilaitteen sisäisellä suojauksella tarkoitetaan epäbalanssisuojausta, jonka tehtävä on tarkkailla kondensaattoriyksiköiden kuntoa reaaliaikaisesti pariston käytön aikana. Epäbalanssisuojauksen avulla välitetään tieto suojausjärjestelmään kondensattoreissa tapahtuvista sulakepaloista, joiden määrä vaikuttaa pariston vaihekapasitanssiin ja siten pariston sisäiseen jännitejakoon. Epäbalanssisuojauksen toteutustapa riip-

puu pariston kytkentätavasta. Kytkentätapa taas määritellään paristotyypin, tehon, jännitteen ja verkon maadoitustavan mukaan. [19]

Epäbalanssisuojauks voidaan toteuttaa virta- ja jännitemuuntajien avulla, jotka välittävät virta tai jännite tiedon suojareleelle, jonka välityksellä katkaisija saa tarvittaessa avautumissignaalin. Kompensointilaitteen sisäiseksi suojaukseksi voidaan laskea myös ylivirtasuojaus, joka tarvittaessa laukaisee laitteen irti verkosta. Mikäli pariston ylivirta-kestoisuus ylittyy tai paristossa tapahtuu oikosulku, ylivirtasuojauksen tulee toteuttaa pariston kytkeminen irti verkosta. [19]

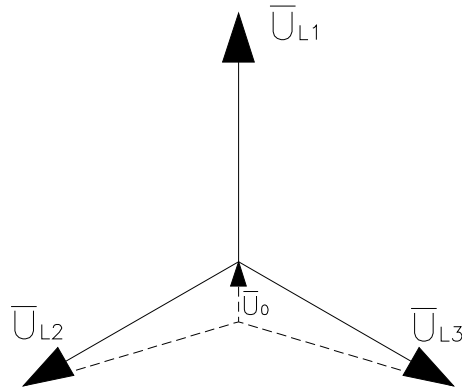
5.2.1 Y-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojauks

Tähteenkytketty kompensointilaitte koostuu yhdestä rinnan- sekä yhdestä tai useammasta sarjaankytketystä kondensaattorista vaihetta kohden. Tähteenkytketyn laitteen epäbalanssisuojauks toteutetaan kondensaattorien rinnalle kytkettyjen jännitemuuntajien toisiokäämien avokolmiokytkennän avulla. Tähteenkytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojauksen kytkentä on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. Tähteenkytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojauksen kytkentä.

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin epäbalanssisuojauksen toteuttamista kuvan 27 mukaiselle kytkennälle. Kondensaattoriyksikön sisäisen sulakkeen palaminen tai sulakkeettomassa yksikössä käämielementin läpilyönti aiheuttavat voittuneen vaiheen reaktanssiarvon muutoksen, josta seuraa tähtipisteen siirtyminen. Tähtipisteen siirtyminen synnyttää tähtipisteeseen jännitteen U_0 . Tähtipisteen siirtyminen on esitetty kuvassa 28. [19]



Kuva 28. Tähteenkytetyin kompensointilaitteen tähtipisteen siirtyminen.

Tähtipistejännitteen kasvuun vaikuttaa kondensaattorien sisäinen kytkentä, pariston kytkentä, jännite sekä vioittuneiden käämielementtien määrä. Tähtipistejännitteen muutosta mitataan reaaliaikaisesti suojarielellä. Suojareleen asetteluarvot kuvan 27 mukaiselle kytkennälle saadaan ratkaistua seuraavasta lausekkeesta: [19]

$$\frac{\bar{U}_{L1} + \bar{U}_0}{\bar{X} + \Delta\bar{X}} + \frac{\bar{U}_{L2} + \bar{U}_0}{\bar{X}} + \frac{\bar{U}_{L3} + \bar{U}_0}{\bar{X}} = 0 \quad (146)$$

jossa

- \bar{X} = terveen vaiheen reaktanssi
- $\bar{X} + \Delta\bar{X}$ = vioittuneen vaiheen reaktanssi
- U_0 = tähtipisteen jännite
- $\bar{U}_{L1}, \bar{U}_{L2}, \bar{U}_{L3}$ = vaihejännite

Yhtälöstä 147 saadaan ratkaistua tähtipisteen jännite U_0 seuraavasti: [19]

$$\bar{U}_0 = -\frac{\frac{\bar{U}_{L1}}{\bar{X} + \Delta\bar{X}} + \frac{\bar{U}_{L2}}{\bar{X}} + \frac{\bar{U}_{L3}}{\bar{X}}}{\frac{1}{\bar{X} + \Delta\bar{X}} + \frac{1}{\bar{X}} + \frac{1}{\bar{X}}} \quad (147)$$

Edellinen yhtälö voidaan kirjoittaa lausekkeen 148 osoittamaan muotoon, koska vaihejännitteet oletetaan yhtä suuriksi $\bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{L3} = 0 \Rightarrow -\bar{U}_{L1} = \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{L3}$. [19]

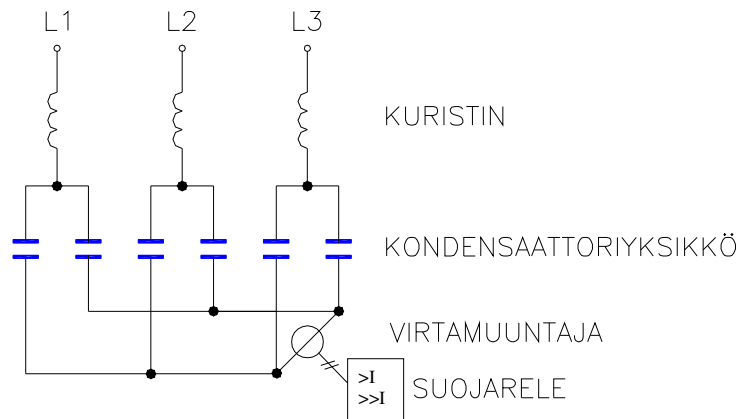
$$\bar{U}_0 = \frac{\frac{1}{\bar{X}} - \frac{1}{\bar{X} + \Delta\bar{X}}}{\frac{1}{\bar{X}} + \frac{1}{\bar{X} + \Delta\bar{X}}} \bar{U}_{L1} \quad (148)$$

Suojarele asetellaan siten, että riippuen vioittuneiden käämielementtien määrästä vaiheessa suojarieleen tulee indikoida joko hälytys tai laukaisu. Epäbalanssin hälytysraja määritellään yleensä siten, että suojarle suorittaa hälytyksen kun 1 tai 2 sulaketta on

palanut. Hälytys asetellaan siten, että pariston kokonaiskapasitanssi pysyy asetetun paristotoleranssin sisällä. Katkaisija ohjataan auki mikäli, pariston kokonaiskapasitanssi ei pysy enää toleranssissa tai käämielementtien jännitekestoisuus ylitetään. Kompensointilaitteen kokonaiskapasitanssille yleisimmin käytetty toleranssialue on $-5\% / +5\%$. Suojareleen asetteluissa tulee huomioida avokolmiokytkennän ja jännitemuuntajien muuntosuhteiden vaikutus asetteluarvoihin. [19]

5.2.2 Y-Y-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus

Kaksoistähteenkytketty kompensointilaite koostuu rinnan- ja sarjaankytketyistä kondensaattoriyksiköistä. Kaksoistähteen kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojauksessa käytetään virtamuuntajasuojausta. Virtamuuntaja kytketään mittaamaan tähtipisteiden välistä tasoitusvirtaa, kuten kuvassa 29 on esitetty. [19]



Kuva 29. Kaksoistähteen kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojauksen kytkentä.

Kaksoistähteen kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus toteutetaan kuvan 29 mukaiselle kytkennälle. Kondensaattoriyksikön sisäisen sulakkeen palaminen tai sulakkeettomassa yksikössä käämielementin läpilyönti aiheuttaa vioittuneen osatähden reaktanssiarvon muutoksen, josta seuraa tähtipisteen siirtyminen. Tähtipisteen siirtyminen synnyttää tähtipisteeseen jännitteen U_0 , tähtipisteen siirtyminen on esitetty kuvassa 28. Tähtipisteet yhdistetään virtamuuntajalla, jonka kautta tasoitusvirta alkaa kulkea mikäli, tähtipisteiden välillä on potentiaaliero. Virtamuuntajan kautta kulkevan tasoitusvirran arvoon vaikuttaa tähtipisteiden välisen potentiaalieron suuruus. Tähtipisteiden välisen potentiaalieron suuruuteen vaikuttaa vioittuneiden käämielementtien lukumäärä. Tähtipistejännitteen laskennassa voidaan käyttää yhtälöä 148, joka johdettiin Y-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojausta käsittelevässä luvussa 5.2.1. Yhtälö 148 voidaan vielä sieventää seuraavan yhtälön mukaisesti, kun terve osatähden vaihekapasitanssi merkitään C_t :llä ja viallisen osatähden vaihekapasitanssi C_x :llä. [19]

$$U_0 = \frac{\frac{1}{j\omega C_t} - \frac{1}{j\omega C_X}}{\frac{2}{j\omega C_t} + \frac{1}{j\omega C_X}} U_{L1} = \frac{j\omega(C_t - C_X)}{j\omega(2C_t + C_X)} U_{L1} = \frac{(C_t - C_X)}{(2C_t + C_X)} U_{L1} \quad (149)$$

jossa

C_t = terveen osatähden vaihekapasitanssi

C_X = viallisen osatähden vaihekapasitanssi

Epäbalanssivirta I_0 saadaan ratkaistua pariston impedanssin ja tähtipistejännitteen avulla. Pariston impedanssi saadaan ratkaistua, kun tunnetaan sarjaan- ja rinnankytkettyjen kondensaattoriyksiköiden määrä sekä yksikön kapasitanssi. Kuvan 29 mukaisen kaksoistähteen kytketyn kompensointilaitteen impedanssi ratkaistaan seuraavasti: [19]

$$Z = \frac{2 S_o}{3 R_o} X_C \quad (150)$$

jossa

S_o = osatähden sisäisten sarjaankytkentöjen määrä

R_o = osatähden sisäisten rinnankytkentöjen määrä

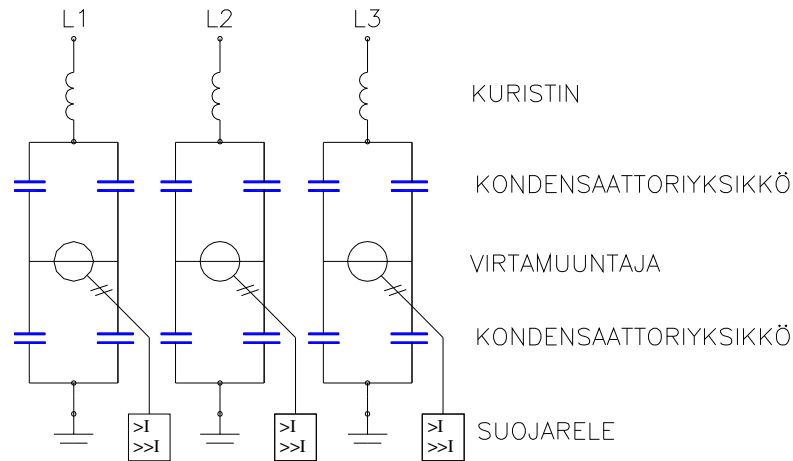
Epäbalanssivirtamuuntajan kautta kulkeva tasoitusvirta, eli pariston epäbalanssivirta saadaan ratkaistua seuraavasti: [19]

$$I_0 = \frac{U_0}{Z} \quad (151)$$

Suojareleelle asetellaan hälytys ja laukaisu riippuen vioittuneiden käämielementtien määrästä. Hälytysraja määritellään niin, että pariston kokonaiskapasitanssi pysyy asetetun toleranssin sisällä. Mikäli kokonaiskapasitanssi ei pysy asetetun toleranssin rajoissa suoritetaan laukaisu, eli paristo kytketään irti verkosta. Suojareleen asetteluissa tulee huomioida epäbalanssivirtamuuntajan muuntosuhteen vaikutus asetteluarvoihin. [19]

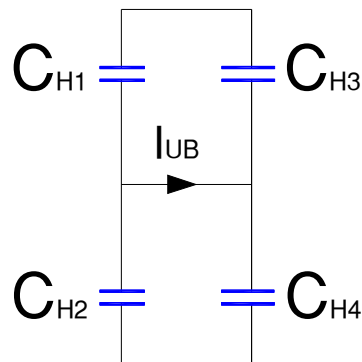
5.2.3 H-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus

H-kytketyn kompensointilaitteen jokainen haara muodostuu kondensaattoritelineistä, jotka voivat sisältävät useita sarjaan- ja rinnankytkettyjä kondensaattoriyksiköitä. Laitteen keskihaaraan asennetaan epäbalanssivirtamuuntaja, jonka avulla voidaan mitata kondensaattoriyksiköiden tilaa käytön aikana reaaliaikaisesti. Kuvassa 30 on esitetty H-kytketyn laitteen 3-vaiheinen kytkentä. Kuvan mukaisessa kytkennässä jokainen vaihe muodostaa oman suojauspiirinsä, joka koostuu epäbalanssivirtamuuntajasta sekä suoja-releestä. [19]



Kuva 30. H-kytketyn kompensointilaitteen epäbalanssisuojauksen kytkentä.

Tarkastellaan seuraavaksi tarkemmin kuvan 30 mukaisen H-kytkennän epäbalanssisuojauksen toimintaperiaatetta. Käämielementin sisäisen eristyksen pettäminen aiheuttaa käämissä läpilyönnin. Läpilyöntien aiheuttamat käämielementtien vikaantumiset aiheuttavat kondensaattoriyksiköiden kapasitanssiarvojen muuttumisen. H-kytketyssä kompensointilaitteessa kapasitanssiarvojen muutos synnyttää haarojen impedanssien välille epätasapainoa, jonka seurauksena epäbalanssivirta I_{UB} alkaa kulkea keskihaarassa olevan epäbalanssivirtamuuntajan lävitse. Kuvassa 31 on esitetty yksinkertaistettuna yhden vaiheen haarakapasitanssit ja haarakapasitanssien epätasapaino tilanteen synnyttämä epäbalanssivirta. [19]



Kuva 31. H-kytketty kondensaattoriryhmä

Kuvan 31 mukaisen H-kytketyn kondensaattoriryhmän keskihaarassa kulkeva epäbalanssivirta on nolla, mikäli kapasitanssin C_{H1} suhde kapasitanssiin C_{H2} on sama kuin kapasitanssin C_{H3} suhde kapasitanssiin C_{H4} . Keskihaarassa kulkee käytännössä aina pieni virta kondensaattoriyksiköiden kapasitanssien poiketessa nimellisarvosta valmistoleransseista johtuen. Kompensointilaitteen asennusvaiheessa kondensaattoriyksiköt pyritään asentamaan telineisiin siten että haarakohtaiset kapasitanssit ovat mahdollisimman lähellä toisiaan, näin ollen keskihaarassa kulkeva luonnollinen epäbalanssivirta saadaan mahdollisimman pieneksi. [19]

Määritettäessä epäbalanssisuojausta H-kytketylle kompensointilaitteelle oletetaan, että käämielementit vioittuvat aina samassa haarassa. Tästä johtuen epäbalanssisuojauksen avulla ei pystytä indikoimaan tilannetta, jossa käämielementtejä vioittuu tasaisesti ylä- ja alahaaran välillä. Tällöin vioittuneiden käämielementtien suhde ylä- ja alahaaran välillä säilyy samana, joten käämielementtien vioittumista ei kyetä epäbalanssisuojauksen avulla huomaamaan.[19]

H-kytketyssä paristossa on yleensä useita yksiköitä sarjaan- ja rinnankytkettynä, joten yksittäisen käämielementin vioittumisella ei ole juuri merkitystä kompensointilaitteen kokonaiskapasitanssiin. Tästä johtuen yksittäiseen käämielementtiryhmään kohdistuva ylijännite ei kasva liian suureksi. Yli 110 kV verkot ovat yleensä maadoitettuja, jonka vuoksi kompensointilaitteen tähtipisteen tulee olla myös maadoitettu. [9] Maadoittamisen vuoksi H-kytkentä on käytetyin tapa toteuttaa kompensointilaitteen epäbalanssisuojaus suurilla jännitteillä. Syöttävän verkon vaihe-epäsymmetria ei vaikuta epäbalanssisuojaukseen tarkkuuteen, koska jokainen vaihe muodostaa oman suojauspiirinsä. [19]

5.2.4 Ylivirtasuojaus

Kondensaattorien tulee kestää luvussa 4.1.3 esitelty ylivirta vaurioitumatta. Standardin määrittelemää ylivirtaa suuremmilta virroilta kompensointilaitte suojataan yleensä ylivirtasuojauksella. Ylivirtasuojaus voidaan yksinkertaisesti laajentaa sisältämään myös oikosulku- ja maasulkusuojauksen. Kompensointilaitteen ylivirtasuojaus toteutetaan vaihekohtaisesti asennettavilla virtamuuntajilla sekä virtamuuntajien toisioon kytkettävällä ylivirtareleellä. Pienet kompensointilaitteet voidaan suojata suurjännitesulakkeilla, mutta sulakkeet toimivat vain oikosulkusuojana. Sulakkeen nimellisvirran tulee olla 1,7-2-kertainen laitteen nimellisvirtaan nähden. Ylivirtasuojauksen toteuttaminen on erityisen tärkeää etenkin siinä tapauksessa, että kompensointilaitte kytetään verkkoon, jossa esiintyy runsaasti harmonisia yliaaltovirtoja ja -jännitteitä. Harmoniset yliaaltovirrat- ja jännitteet ylikuormittavat kompensointilaitetta ja aiheuttavat laitteen ylikämmenemisen, josta seuraa eristysten ennen aikaista vioittumista ja läpilyöntejä. [19]

5.2.5 Suojareleiden valinta

ALSTOM Grid Oy:n valmistamien kompensointilaitteiden pääsuojauksena toimii epäbalanssisuojaus. Epäbalanssisuojauksen toteuttaminen Y-Y- tai H-kytketylle kompensointilaitteelle vaatii suojareleelta virran mittauskanavia ja tähtikytketyssä laitteessa jännitteen mittauskanavia. Epäbalanssisuojauksen lisäksi kompensointilaitteen suojaus voidaan varustaa myös ylivirta-, oikosulku- ja maasulkusuojauksella. Edellä mainittujen suojausten toteuttamiseen tarvitaan virran mittauskanavia. Suojareleiltä vaaditaan nykyään yhä enemmän etäkäyttö- ja etävalvonta ominaisuuksia. Etäkäytön ja tiedonsiirron selkeyttämiseksi on otettu käyttöön sähkönjakeluautomaation tiedonsiirtoon liittyvä IEC 61850 standardi. Standardin tarkoituksena on luoda yhteinen kommunikointiprotokolla, jotta eri laitevalmistajien laitteet pystyvät helposti kommunikoimaan keskenään.

5.3 Kompensointilaitteen ulkoinen suojaus

Ulkoisella suojauksella tarkoitetaan syöttävän verkon välityksellä siirtyviltä ylijännitteiltä suojautumista. Ylijännitteiden syntymistä ei useinkaan voida estää, koska ne ovat seurausta sähköverkon normaaleista kytkentätilojen muutoksista sekä salamoiden aiheuttamista ylijännitteistä. Verkossa esiintyvät ylijännitteet aiheuttavat rasitusta kompensointilaitteissa käytettävien komponenttien eristeille ja näin ollen aiheuttavat eristeiden vanhenemista ja pahimmassa tapauksessa eristeiden läpilyönnin. Komponenttien kokemaa haittavaikutusta voidaan kuitenkin pienentää tehokkaalla ylijännitesuojauksella. [40]

Sähköverkkojen ylijännitesuojauksessa käytetään monia erilaisia ylijännitesuojaus tyyppisiä. Tässä luvussa käsitellään kompensointilaitteen suojausta sähköverkoissa esiintyviltä ylijännitteiltä ja esitellään ylijännitteiden syntyvät sekä tyypit. Tämän lisäksi käsitellään kompensointilaitteiden ylijännitesuojauksen toteuttaminen MO-suojan eli metallioksidilylijännitesuojan avulla.

5.3.1 Verkossa esiintyvät ylijännitteet

Sähköverkossa syntyvät ylijännitteet ovat satunnaisesti ilmeneviä tapahtumia ja ne poikkeavat toisistaan muun muassa amplitudin, keston, taajuuden ja nousunopeuden osalta. Ylijännitteet luokitellaan niiden käyrämuodon perusteella eri kategorioihin seuraavasti: [40]

- Pientaajuiset ylijännitteet
- Loivat transienttiylijiännitteet
- Jyrkät transienttiylijiännitteet
- Erittäin jyrkät transienttiylijiännitteet

Pientaajuiset ylijännitteet syntyvät yleensä kytkentätoimenpiteen tai vian seurauksena. Niiden aiheuttajina ovat tyypillisesti verkon maasulku, jännitteenanto tyhjäkäyväle johdolle, resonanssit, kuorman kytkeytyminen irti verkosta sekä vajaanapaiset toiminnot. [40]

Loivat transienttiylijiännitteet syntyvät verkon äkkinäisten tilanmuutosten, kuten oiko- ja maasulun, tai kytkentätoimenpiteiden seurauksena. Transienttiylijiännitteen vaimennettua verkkoon jää usein vielä vaikuttamaan pienitaajuinen ylijännite. Jyrkät transienttiylijiännitteet syntyvät salamaniskujen seurauksena. Salaman iskun aiheuttama ylijännite syntyy joko suorana iskuna jännitteeseen osaan tai induktion kautta salaman osuessa jännitteeseen osan läheisyyteen. Indusoituneen iskun suuruusluokka on yleensä muutamia satoja kilovoltteja, joten sen vaikutus on merkittävä vain keskijänniteverkoissa. Suorat iskut jännitteeseen osaan aiheuttavat useiden megavolttien jännitteitä, joten niiden vaikutus on huomioitava myös siirtoverkkotasolla. [40]

Erittäin jyrkät transienttilylijännitteet ovat tyypillisesti erotustoiminnon aiheuttamia jännitteitä. Ne syntyvät erotinta avattaessa, kun syntyvä valokaari katkeaa ja jälleensynty erottimen avausvälissä. Jännitelujuutta tarkasteltaessa tärkeimpinä tekijöinä voidaan pitää jänniterasituksen kestoaikaa ja jännitteen käyrämuotoa. Pientaajuiset ylijännitteet ovat kestoajaltaan yleensä pidempiä ja jännitemuodoltaan jaksollisia, kun taas transienttimuotoiset ovat nopeasti vaimenevia ja jännitemuodoltaan jyrkempiä. Loivat transienttilylijännitteet ovat pitkäkestoisia ja huippuarvo saavutetaan muutamassa sadassa mikrosekunnissa ja vaimeneminen kestää millisekunteja. Jyrkät transienttilylijännitteet sen sijaan saavuttavat huippunsa jo muutamassa mikrosekunnissa ja vaimenevat sen jälkeen muutaman kymmenen mikrosekunnin kuluessa. [40]

5.3.2 Metallioksidiyliijännitesuojan ominaisuudet

Keski- ja suurjännitekompensointilaitteiden ylijännitesuojaus toteutetaan nykyään lähes poikkeuksetta MO-suojien eli metallioksidiyliijännitesuojien avulla. MO-suoja koostuu sarjaan tai rinnan kytketyistä sinkkioksidilieriöistä, jotka suljetaan joko posliini- tai polymeerikuorella. Sinkkioksidilieriöiden koko, määrä ja kytkentä riippuvat siitä, millainen suojaustaso MO-suojalla halutaan saavuttaa. MO-suojan epälineaarinen vastus kootaan sarjassa olevista varistorikiekoista. Vastuksen pääraaka-aineena käytetään sinkkioksidia ja siihen lisätään pieni määrä muita metallioksideja. Sinkkioksidi on erittäin stabiili aine ja se alkaa hajota vasta korkeissa lämpötiloissa. Kuvassa 32 on metallioksidiyliijännitesuoja. [40]



Kuva 32. Metallioksidiyliijännitesuoja

Ylijännitesuojan kuorimateriaalin tulee kestää käyttökohteessa kertyvän likaisuuden, kosteuden, lämpötilojen, uv-säteilyn ja sähkökentän aiheuttamat rasitukset, sekä edellä mainittujen tekijöiden yhteisvaikutuksena syntyvien vuotovirtojen ja osittaispurkausten aiheuttamat rasitukset. Ylijännitesuojan täytyy kestää myös siihen kohdistuvat mekaaniset rasitukset.

MO-suojan mitoittamisen kannalta tärkeimmät ominaisuudet ovat: [40]

- Suurin sallittu jatkuva käyttöjännite U_{cov}
- Nimellispurkausvirta I_n
- Mitoitusjännite U_r
- Käyttötaajuisen ylijännitteen sieto ajan funktiona (TOV-käyrä)
- Purkauskäyttöluokka
- Energiankäsitteilykyky
- Jäännösjännite

Suurin sallittu jatkuva käyttöjännite U_{cov}

Suurin sallittu jatkuva käyttöjännitteen tehollisarvo, joka saa jatkuvasti vaikuttaa suojan ylitse. Suurimman sallitun jatkuvan käyttöjännitteen arvo usein on noin $0,8U_r$. [40]

Nimellispurkausvirta I_n

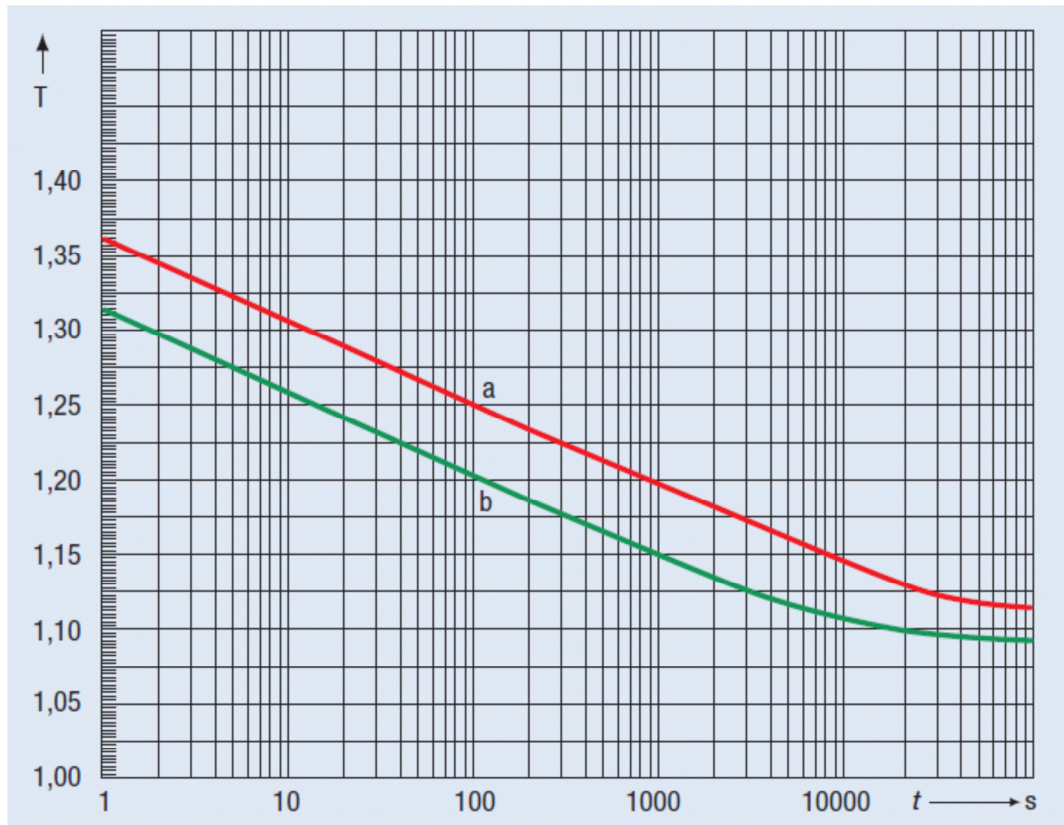
Nimellispurkausvirta on muotoa $8/20 \mu s$ olevan purkausvirtapulssin huippuarvo, joka keskijänniteverkon suojilla on yleensä 5 kA tai 10 kA. Suojatyypille määriteltyä nimellispurkausvirtaa käytetään suojaustasoa määritettäessä. Nimellispurkausvirta määrittää myös ylijännitesuojan tyyppitestauksessa käytettävien syöksyvirtapulssien huippuarvot ja siten suojalta vaadittavan energiankäsitteilykyvyn. [40]

Mitoitusjännite U_r

Mitoitusjännite ilmoittaa suurimman suojan ylitse vaikuttavan käyttötaajuisen ylijännitteen tehollisarvon, jolla suoja toimii suunnitellusti toimintasyklitestissä joka määritellään ylijännitesuojia käsittelevässä standardissa IEC 60099. Mitoitusjännitettä suurempia käyttötaajuisia ylijännitteitä ei saisi esiintyä hetkellisestikään suojan käyttöpaikalla. [40]

Käyttötaajuisen ylijännitteen sieto ajan funktiona (TOV-käyrä)

Käyttötaajuisen ylijännitteen sieto kuvataan TOV-käyrällä, joka ilmoittaa ylijännitteen kestoajan funktiona suurimman käyttötaajuisen ylijännitteen tehollisarvon, jonka suoja kestää rikkoutumatta ja joutumatta termisesti epästabiiliin tilaan. Standardi vaatii, että valmistaja antaa tämän käyrän 1200 sekuntiin asti. Jos suoja käytetään maasta erotetussa verkossa, jossa ei ole maasulun automaattista erotuslaitetta, tulisi käyrä ulottaa 24 tuntiin asti. Suojan valintaa tehtäessä TOV-käyrä on tunnettava. Kuvassa 33 on esitetty ABB Oy:n valmistaman MWK MO-suojan TOV-käyrä. TOV-käyrä a on rasittamattomalle ja käyrä b esirasitetulle suojalle. [40]



Kuva 33. MO-suojan TOV-käyrä $T=U_{TOV}/U_c$ kestoajan funktiona a rasittamattomalle ja b esirasitetulle suojalle. [35]

Purkauskyykyluokka

Purkauskyykyluokka kuvaa epäsuorasti suojan energiankäsittelykykyä. Purkauskyykyluokkien määritelmät perustuvat ajatukseen, jossa pitkän siirtojohtoon maakapasitanssit latautuvat tiettyyn ylijännitteeseen kytkentätilanteessa ja ylijännitteen energia purkautuu johtoon kytketyn ylijännitesuojan kautta maahan. Kompensointilaitteiden ylijännitesuojauksessa ylijännitesuojan purkausluokan tulee olla vähintään 3, johtuen kondensaattorien varausenergian purkautumisesta. [40]

Energiankäsittelykyky

Energiankäsittelykyky määritellään usein varsinaisten IEC 60099-4 mukaisten termien lisäksi, koska edellä kuvattu purkauskyykyluokka kuvaa sitä vain epäsuorasti. Energiankäsittelykyvyssä on erotettava ”yhden pulssin energian käsittelykyky” ja ”terminen energiankäsittelykyky”. Ensimmäinen kuvaa yhtenä pulssina tulevan energian suurinta sallittua määrää. Terminen energiankäsittelykyky kertoo suurimman suojan absorboiman energian, jonka jälkeen se vielä jäähtyy U_{cov} -jänniterasituksessa ilman ongelmia takaisin normaaliin toimintalämpötilaan. Energiankäsittelykyky riippuu suojan lämpimenevästä virrasta. [40]

Jäännösjännite U_{res}

Suojattavan kohteen kannalta merkittävin suure on suojan jäännösjännite. Suojattavan kohteen yli vaikuttaa suojan toimiessa jäännösjännitteen suuruinen jännite. Jäännösjännitteen arvo riippuu suojan läpi kulkevan purkausvirran amplitudista sekä jyrkkyydestä. [40]

5.3.3 Metallioksidilyijännitesuojan nimellisarvojen valinta

Mitotettaessa metallioksidilyijännitesuojaa syöttävä verkko ja käyttöpaikan ympäristöolosuhteet täytyy tuntea mahdollisimman tarkasti. Ylijännitesuojan mitoittamisessa syöttävästä verkosta ja käyttöpaikasta tarvitaan vähintään seuraavat lähtötiedot: [42]

- Nimellisjännite ja jännitevaihtelu
- Ympäristön minimi- ja maksimilämpötila
- Eristystaso
- Maksimivikavirta
- Maadoitustapa
- Vian kesto

Mitoituksen lähtökohtana on valita suojan nimellisarvot siten, että se kestää verkossa ilmenevät jatkuvat tai hetkelliset ylijännitteet vaurioitumatta. Ylijännitesuojan keston ja toiminnan kannalta kriittisimmät tekijät ovat käyttö- ja mitoitussjännitteen sekä energian käsittelykyvyn valinta. [42]

Ylijännitesuojien valmistajat ilmoittavat suojatyypille ominaisen energiankäsittelykyvyn muodossa kJ/kVU_{cov} . Kompensointilaitteen kytkeminen verkkoon synnyttää jännitepiikin, jonka sisältämä energia ylijännitesuojan tulee kyetä käsittelemään vioitumatta. Yhtälön 152 avulla voidaan ratkaista ylijännitetilanteessa kompensointilaitteen MO-suojan kautta purkautuvan energian määrä, kun oletetaan että jännite voi nousta U_r :n suuruiseksi. [42]

$$W = \frac{1}{2} C \left[(3U_d)^2 - (\sqrt{2}U_r)^2 \right] \quad (152)$$

jossa

U_r = ylijännitesuojan mitoitussjännite

$$U_d = \frac{\sqrt{2} U_{max}}{\sqrt{3}}$$

Ylijännitesuojalta vaadittu vähimmäisenergiankäsittelykyky W_y saadaan laskettua seuraavasti: [42; 43]

$$W_y = \frac{W_{MO}}{U_c} \quad (153)$$

jossa

W_y = ylijännitesuojan energiankäsitteilykyky
 W_{MO} = MO – suojan kautta purkautuva energia

Verkon nimellisjännitteen perusteella voidaan määrittää suurin käyttöpaikalla esiintyvä jatkuva käyttöjännite U_{max} . Standardi IEC 60871 määrittelee, että kondensaattorien tulee kestää 1,1-kertainen nimellisjännite vaurioitumatta, joten suurin jatkuva käyttöjännite on 1,1-kertaa kondensaattorien nimellisjännite. Kytettäessä ylijännitesuoja estokela- tai suodatinpariston rinnalle, suurimman jatkuvan käyttöjännitteen mitoituksessa tulee huomioida kuristimen aiheuttama jännitteennousu. Jännitteennousu saadaan ratkaistua yhtälöllä 52. Tällöin ylijännitesuojan ylitse vaikuttava suurin jatkuva käyttöjännite saadaan ratkaistua seuraavasti: [42]

$$U_{maxp} = \frac{k U_{max}}{\sqrt{3}} \quad (154)$$

jossa

U_{max} = suurin käyttöpaikalla esiintyvä jatkuva käyttöjännite

U_{maxp} = ylijännitesuojan yli vaikuttava suurin jatkuva käyttöjännite

Verkon maadoitustavalla on ratkaiseva merkitys ylijännitesuojan suurinta jatkuvaa käyttöjännitearvoa määritettäessä. Maadoitustapa ratkaisee kuinka korkeaksi terveiden vaiheiden vaihejännite vian aikana nousee. Maasulku on keskijänniteverkon yleisin pientaajuuden ylijännitteen aiheuttaja. Maasulun aiheuttaman ylijännitteen suuruus riippuu vikapaikasta ja verkon tähtipisteen maadoitustavasta.

Sähköverkot voidaan jakaa maadoitustapansa perusteella kolmeen eri tyyppiin, maasta erotettuihin, sammutettuihin ja suoraan tai impedanssin kautta maadoitettuihin verkkoihin. Maasulkukerroin kuvaa verkon terveessä vaiheessa olevan vianaikaisen jännitteen huippuarvon suhdetta saman vaiheen jännitteen huippuarvoon ennen vikaa. Maasta erotetussa verkossa sekä sammutetussa verkossa maasulkukerroin voi suurimmillaan olla noin 1,8. Tehollisesti tai impedanssin kautta maadoitetussa verkossa jännitteen nousu jää pienemmäksi, jolloin maasulkukertoimen arvo saa maksimissaan arvon 1,4. Suomessa kaikki 220 kV ja 400 kV verkon on tehollisesti maadoitettuja joten maasulkukertoimen arvo on maksimissaan 1,4. [9]

Tehollisesti maadoitetussa, eli pienen impedanssin kautta maadoitettu verkossa ylijännitesuojan suurin jatkuva käyttöjännite saadaan laskettua yhtälöstä 155. Varmuusmarginaalina on käytetty ylijännitesuojavalmistajien suosittelemaa 5 prosenttia. [42]

$$U_{cov} \geq 1,4 \frac{1,05 U_{maxp}}{\sqrt{3}} \quad (155)$$

jossa

U_{maxp} = ylijännitesuojan yli vaikuttava suurin jännitteen tehollisarvo

Maasta erotetussa tai sammutetussa verkossa ylijännitesuojan jatkuvan käyttöjännitteen tulee olla vähintään yhtä suuri kuin verkossa mahdollisesti esiintyvä suurin jat-

kuva käyttöjännite, eli $U_{cov} \geq U_{maxp}$. Mikäli maasta erotettu verkko on varustettu automaattisella vian erotuksella, ylijännitesuojalta vaadittu jatkuvan käyttöjännitteen kestoiky jää pienemmäksi johtuen lyhyemmästä vian kestosta. Mikäli verkko on varustettu automaattisella vian erotuksella, ylijännitesuojan jatkuva käyttöjännite ratkaistaan yhtälöstä 156. Yhtälössä esiintyvä T saadaan ratkaistua kuvan 38 TOV-käyrästä, kun vian vaikutusaika tunnetaan. Yleisesti on suositeltavaa että ylijännitesuojien mitoituksessa käytetään esirasituksen huomioivaa T arvoa. [42]

$$U_{cov} \geq \frac{1,05 U_{maxp}}{T} \quad (156)$$

jossa

T = käyttötaajuuden ylijännitteen kestoisuuskerroin

Maadoitettaessa tähtipiste pienen impedanssin kautta ylijännitesuojan jatkuvan käyttöjännitteen arvo saadaan ratkaistua yhtälöstä 171. Tällaisessa järjestelmässä maadoitusimpedanssi valitaan siten, että vikavirta saadaan rajoitettua halutun suuruisiksi. [42]

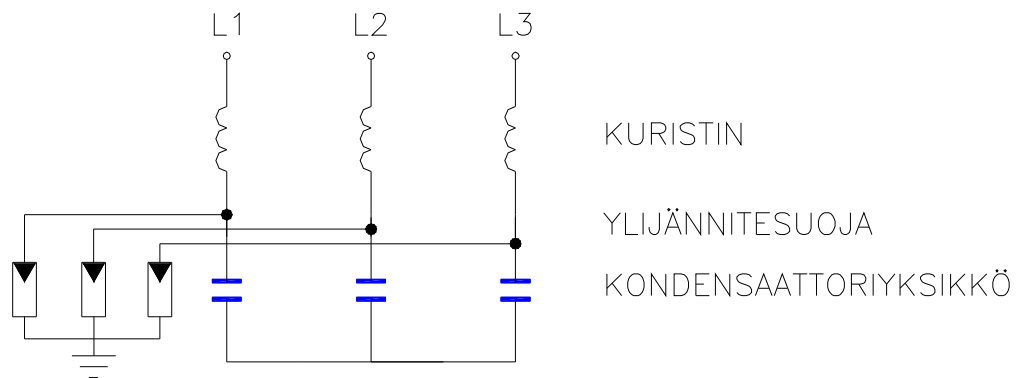
$$U_{cov} \geq \frac{1,05 U_{maxp}}{T} \quad (157)$$

Ylijännitesuojan jatkuvaa käyttöjännitettä ratkaistaessa täytyy huomioida ympäristön maksimilämpötilan sekä esirasituksen vaikutus. Ylijännitesuojan energiankäsittelykyky riippuu merkittävästi esirasituksen aiheuttamasta ylijännitesuojan lämpenemisestä. Mikäli ylijännitesuojan U_{cov} valinnassa käytetään suojauksen toiminta-aikaa, tulee sitä määrittäessä ottaa huomioon mm. mahdollisten kokeilukytkentöjen vaikutus. Eli koska suojat eivät ehdi merkittävästi jäähtyä kokeilukytkentöjen välillä, suojauksen toiminta-aika tulee kertoa lyhyessä ajassa peräkkäin tulevien mahdollisten kokeilukytkentöjen määrällä kerrointa T määrittäessä. Ylijännitesuojien valmistajat määrittävät korjauskertoimia, jotka tulee huomioida käyttöpaikan lämpötilan ylittäessä $+40$ °C. Ympäristön lämpötilan noustessa viisi astetta, ylijännitesuojan U_{cov} arvoa tulee kasvattaa 2 prosenttia. [19]

Jatkuvan käyttöjännitteen lisäksi on tarkasteltava ettei käyttöpaikan käyttötaajuisien ylijännitteiden arvot ja kestot ylitä valitun suojan mitoitusjännitettä. Mitoitusjännitettä suurempia käyttötaajuisia ylijännitteitä ei suojan käyttöpaikalla saa esiintyä hetkellises-tikään. Nimellispurkausvirta määritellään odotettavissa olevien syöksyaaltovirtojen mukaan ja keski-jänniteverkon suojilla se on yleensä 10 kA. [40]

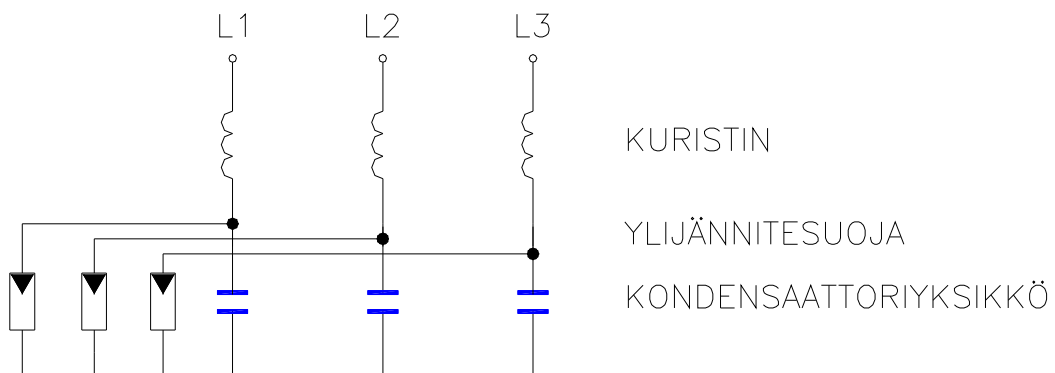
5.3.4 Kompensointilaitteen ylijännitesuojauksen toteuttaminen

Kompensointilaitteen ylijännitesuojaus toteutetaan kondensaattoriyksiköiden rinnalle kytkettävillä metallioksidisuojoilla. Rajajännitteen alapuolella MO-suoja toimii kuin vastus jonka resistanssi muuttuu jännitteen funktiona. MO-suojaan kohdistuvan jännitteen noustessa yli rajajännitteen suojan resistanssi pienenee ja se siirtyy johtavaan tilaan. Rajajännitteen ylityttyä MO-suoja siirtyy johtavaan tilaan jolloin osa kompensointilaitteen virrasta alkaa kulkea suojan lävitse. MO-suojan avulla rajoitetaan kondensaattoripariston ylitse vaikuttava jännite kondensaattorien jännitekestoisuuden sallimalle tasolle. [40] Kondensaattoripariston ylijännitesuojauksessa MO-suojat voidaan kytkeä kolmella eri tavalla. MO-suojien kytkennät on esitetty kuvissa 34–36.



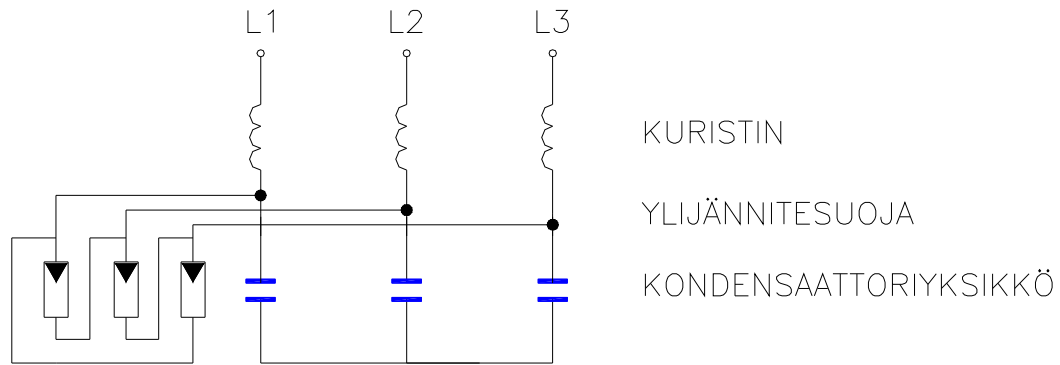
Kuvassa 34. Kondensaattoripariston ylijännitesuojauksen toteuttaminen kytkettäessä MO-suojat vaiheiden ja maan väliin.

Kuvassa 34 on esitetty kondensaattoripariston ylijännitesuojauksen toteuttaminen, kun MO-suojat kytketään vaiheen ja maan välille. Kondensaattoripariston tähtipiste voi olla maadoitettu tai maadoittamaton. [19]



Kuvassa 35. Kondensaattoripariston ylijännitesuojauksen toteuttaminen kytkettäessä MO-suojat vaiheiden ja tähtipisteen väliin.

Kondensaattoripariston ylijännitesuojaus voidaan suorittaa myös kytkemällä MO-suojat vaiheiden ja kondensaattoripariston tähtipisteen välille kuvan 35 osoittamalla tavalla. Kondensaattoripariston tähtipiste voi olla maadoitettu tai maadoittamaton. [19]



Kuvassa 36. Kondensaattoripariston ylijännitesuojauksen toteuttaminen kytkettäessä MO-suojat vaiheiden väliin.

MO-suojat voidaan asentaa vaiheiden väliin suojaamaan kondensaattoriyksiköitä ylijännitteeltä kuvan 36 mukaisesti. Vaiheiden väliin kytkettäessä ylijännitesuojien jänniterasitus tulee pääjännitteen suuruiseksi.

Kondensaattoriyksiköiden kanssa sarjaan kytketyn vaimennuskuristimen tehtävänä on vaimentaa kondensaattoripariston kytkennän aiheuttamaa kytkentäsäysvirtaa. Vaimennuskuristimen ansiosta ylijännitesuojan läpi kulkevat virrat jäävät pienemmiksi kuin ilman vaimennuskuristinta olevassa kondensaattoriparistossa. Vaimennuskuristimen käyttö pienentää ylijännitesuojan mitoitusjännitettä yleensä muutaman prosentin verran riippuen kondensaattorien ja vaimennuskuristimen mitoituksesta. [19]

Ylijännitesuojien sijoittaminen ja niiden ominaisuudet ovat tärkeä osa kondensaattoripariston eristyskoordinaatiota. Kondensaattoripariston yli vaikuttava jännite on riippuvainen etäisyydestä paristoa suojaavaan ylijännitesuojaan. Pariston kokema jänniterasitus on sama kuin ylijännitesuojan nimellissuojaustaso vain silloin, kun suojattavan kohteen ja ylijännitesuojan välisen liitännäjohdon pituus on äärettömän lyhyt ja kun suojan läpi kulkeva virtapulssi on kyseessä olevan suojan nimellissuojaustason määrittelyä vastaava. Mikäli suoja ei ole aivan kondensaattoripariston edessä, pariston kokema jännite voi nousta ylijännitesuojan nimellissuojaustasoa suuremmaksi. Kondensaattoripariston kokema jännitteen nousu on sitä suurempi, mitä pidempi liitännä- ja maadoitusjohtimien pituus on. [40]

6 YHTEENVETO

Työssä laadittiin ALSTOM Grid Oy:lle yli 1000 V loistehon kompensointiratkaisujen mitoittamista käsittelevä tekninen mitoitusperuste. Työssä esitellään loistehon kompensointilaiteratkaisuja ja niiden eroavaisuuksia sekä kerätä yhteen mitoittamisessa tarvittavat lähtötiedot. Työssä esitellään kompensointilaiteratkaisujen mitoittamisessa tarvittavia mitoitusyhtälöitä sekä perehdytään paristojen sisäiseen ja ulkoiseen suojaukseen.

Väärän tyyppinen tai väärin mitoitettu kompensointilaitte voi aiheuttaa sähköverkossa laajalle leviäviä häiriöitä ja vikatiloja. Tämän takia kompensointilaitteiston valintaan ja lähtötietojen tarkkuuteen tuleekin kiinnittää erityisen tarkkaan huomioita. Käytännössä kuitenkin usein kompensointilaitteiden mitoittaminen joudutaan tekemään vajavaisin lähtötiedoin.

Loistehon kompensointiratkaisun mitoittamisessa vaaditaan laaja-alainen tuntemus käyttöpaikan sähköverkosta ja käyttöolosuhteista, jotta pystytään määrittämään teknistaloudellisesti optimaalisin ratkaisu kuhunkin käyttökohteeseen. Sähköverkon vallitseva tila ja tulevaisuudessa tehtävät verkostoinvestoinnit sekä sähkönkulutuksen muutokset tulee tuntea mahdollisimman tarkasti, jotta kompensointilaitteisto olisi mahdollisimman kauaskantoinen investointi.

Kompensointilaitteen sähköisen mitoittamisen kannalta oleellisimpia lähtötietoja ovat verkon nimellisjännite, taajuus, tarvittava perustaajuinen loisteho sekä verkossa esiintyvät yliaaltovirrat. Verkossa vaikuttavien yliaaltovirtojen määrän tunteminen on laiteratkaisun jännite- ja virtamitoituksen kannalta erittäin merkittävä mitoituksen lähtötieto. Ympäristöolosuhteet tulee myös huomioida sähköisessä ja ympäristöteknisessä mitoituksessa erityisen tarkasti, mikäli asennuspaikka sijaitsee erittäin kylmässä tai kuumassa. Kompensointilaitteissa käytettävien komponenttien ympäristötekniselle kestolle asettaa myös omat haasteensa asennuskohteen sijaitseminen seismisillä, tuulisilla tai lumisilla alueilla.

Kompensointilaitteen sisäisenä pääsuojauksena toimii epäbalanssisuojauks, jonka tehtävä on indikoida kondensaattoriyksiköiden tilaa reaaliaikaisesti ja tarvittaessa kytkeä paristo irti syöttävästä verkosta. Epäbalanssisuojauksen mitoittamisessa ja asetteluarvojen valinnassa tulee kiinnittää huomio siihen, ettei vioittunut kondensaattoriyksikkö aiheuta ehjien yksiköiden vioittumista yksiköiden jännitejaon muuttuessa. Ylijännitesuojauksen avulla kompensointilaitte suojataan syöttävän verkon välityksellä siirtyvien ylijännitteiden varalta. Kompensointilaitteen ylijännitesuojauks tulee toteuttaa huolella, sillä kompensointilaitteet ovat arvokkaita komponentteja, joilla on yleensä pitkät toimitusajat.

LÄHTEET

- [1] Huuska, R. Pienjännitekompensointi ja suodatus. 2011, Alstom Grid Oy. 41 s.
- [2] Nousiainen, K. Sähkövoimajärjestelmän perusteet. Opetusmoniste. Tampere 2012, Tampereen teknillinen yliopisto.
- [3] Mäkinen, A. Sähköverkon häiriöt ja sähkön laatu. Luentomuistiinpanot. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [4] Yliaallot ja kompensointi. Tampere 2006, Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 120 s.
- [5] SFS-EN 50160. 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet. 4. painos. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto. 67 s.
- [6] IEC 61000-3-6. Electromagnetic compatibility (EMC) Part 3-6: Limits - Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems General. Genova 2008, 2nd edition, International Electrotechnical Commission. 62 s.
- [7] IEEE 519-1992. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1993, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 112 s.
- [8] Tarkka, P., Hietalahti, L. Piirianalyysi 2. Helsinki 2006, Edita. 284 s.
- [9] Bastman, J. Sähkövoimajärjestelmän säätö ja käyttö. Luentomuistiinpanot. Tampere 2013. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [10] Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9. painos ABB Oy. Vaasa. 626 s.
- [11] Ruppa, E. Sähkön siirto- ja jakelutekniikka. Luentomuistiinpanot. Pori 2006. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Tekniikka Pori
- [12] Järventausta, P. Sähköverkkotekniikka. Luentomuistiinpanot. Tampere 2013. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [13] IEC 60871-1. Shunt capacitors for a.c power systems having a rated voltage above 1000V – Part 1: General. Genova 2005, 3rd edition, International Electrotechnical Commission. 110 s.
- [14] Nokian Capacitors Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje suujännite kondensaattoriparistoille. 2005, Nokian Capacitors. 20 s.
- [15] Mörsky, J. Relesuojaustekniikka. Otatieto Oy, 2. korjattu painos 1992, 459 s.
- [16] Aura, L. & J. Tonteri, A. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. Vantaa 2002, WSOY. 448 s.

- [17] Nousiainen, K. Suurjännitetekniikka 2. Luentomuistiinpanot. Tampere 2013. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [18] Power factor correction. Esite. 2002, Nokian Capacitors. 11 s.
- [19] Tuovila, H. 2013. Insinööri, Tarjouslaskentainsinööri, Alstom Grid Oy. Tampere. Perehdyttämiskoulutus tarjouslaskentainsinöörin tehtävään sekä teknistaloudelliseen mitoittamiseen. Suullinen aineisto. Maaliskuu-joulukuu 2013.
- [20] Lehtio, A. Sähkövoimatekniikan perusteet. Luentomuistiinpanot. Pori 2005. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Tekniikka Pori.
- [21] Korpinen, L., Mikkola, M., Keikko, T. & Falck, E. Yliaalto-opus. [WWW]. 2014. [Viitattu 10.04.2014]. Saatavissa: <http://www.leenakorpinen.fi/archive/opukset/ylialto-opus.pdf>
- [22] Zamani, M.A. & Mohseni, M. 9th International Conference. Electrical Power Quality and Utilisation. Barcelona, 2007. Damped-Type Double Tuned Filters Design for HVDC Systems [WWW]. 2014. [Viitattu 10.04.2014]. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4424205>
- [23] Arrillaga, J. & Watson N. R. Power system harmonics. WILEY. 2nd edition, 2004, UK. 399 s.
- [24] IEC 60071-1. Insulation co-ordination – Part 1: Definitions, principales and rules. Genova 2006, International Electrotechnical Commission. 69 s.
- [25] IEC 60815-1. Guide for the selection and dimensioning of high-voltage insulators for polluted conditions. Part 1 - Definitions, information and general principles Genova 2008, International Electrotechnical Commission. 137 s.
- [26] IEC 60076-6. Power transformers – Part 6: Reactors. Genova 2007, International Electrotechnical Commission. 117 s.
- [27] IEEE-18. Standard for Shunt Power Capacitors, USA, New York 2012, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 39 s.
- [28] IEEE-519. Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, USA, New York 1992, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 101 s.
- [29] IEEE-1036. Guide for Application of Shunt Power Capacitors, USA, New York 2010, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 21 s.

- [30] IEEE-1531. Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, USA, New York 2003, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc, 69 s.
- [31] IEC 60909-0. Short-Circuit Currents in Three-phase a.c. Systems - Calculation of Currents. Genova 2001, International Electrotechnical Commission. 137 s.
- [32] Melva, H. Ilmasydämisen kuristimen konstruktion optimointi. Tampere 2013. Diplomityö, TTY/Sähkötekniikan koulutusohjelma. 77 s.
- [33] Lehtio, A. Sähkötekniikan perusteet 1. Luentomuistiinpanot. Pori 2005. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Tekniikka Pori.
- [34] Aura L. & Tonteri A. J. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. WSOY. 1. painos, 1996, Helsinki. 544 s.
- [35] Young-Sik, C. & Hanju, C. Journal of International Council on Electrical Engineering Vol. 1, No. 1, pp. 7~13, 2011. Single-tuned Passive Harmonic Filter Design Considering Variances of Tuning and Quality Factor [WWW]. 2014. [Viitattu 10.04.2014]. Saatavissa: <http://bit.ly/1sGbAia>.
- [36] Klempka, R., Hanzelka, Z. & Varetsky, Y. AGH-University of Science & Technology, Faculty of Electrical Engineering, Automatics, Computer Science and Electronic, Krakow, Poland. Bank Harmonic Filters Operation in Power Supply System – Cases Studies [WWW]. 2014. [Viitattu 10.04.2014]. Saatavissa: <http://www.intechopen.com/books/power-quality-issues/bank-harmonic-filters-operation-in-power-supply-system-cases-studies>
- [37] Kauhanen, J. Insinöörimatematiikka 1. Luentomuistiinpanot. Tampere 2011. Tampereen teknillinen yliopisto.
- [38] Lehtio, A. Sähkötekniikan perusteet 2. Luentomuistiinpanot. Pori 2005. Satakunnan ammattikorkeakoulu. Tekniikka Pori.
- [39] Klempka, R. Akademia Gorniczko-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki I Elektroniki. A New Method for the C-Type Passive Filter Design [WWW]. 2014. [Viitattu 10.04.2014]. Saatavissa: <http://www.red.pe.org.pl/articles/2012/7a/62.pdf>
- [40] Kannus, K. & Lahti, K. Ukkosylijännitteet ja ylijännitesuojaus. Opetusmoniste. Tampereen teknillinen yliopisto, 2013. 27 s.
- [41] Ahonen, P. Keski-jänniteverkkojen ylijännitesuojaus- ja jälleenkytkentätarkastelut ylijännitelaskentaohjelmiston avulla. Tampere 2010. Diplomityö, TTY/Sähkötekniikan koulutusohjelma. 63 s.

- [42] ABB Oy. 2011. Application Guidelines for MV surge arresters, 3rd edition 88 s.
- [43] Siemens AG. 2011. Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems, 3rd edition, 128 s.