

Juho Reponen

# Sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimen mitoitus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkötekniikka

Insinöörityö

28.11.2012

Tekijä Otsikko	Juho Reponen Sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimen mitoitus
Sivumäärä Aika	43 sivua + 3 liitettä 28.11.2012
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Sähkötekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Teknologiapäällikkö Arja Ristola Projektipäällikkö Terhi Väre
<p>Insinööriyössä selvitettiin millaisia ratajohtosuodattimia on käytössä sähköradoilla. Käytössä olevat sähköradan ratajohtosuodattimet kartoitettiin kytkentäkaavioiden perusteella ja yksittäisillä käynneillä syöttöasemilla.</p> <p>Tehoelektroniikkaa käyttävä sähkövetokalusto aiheuttaa yliaaltoja ja yliaaltojen rajoittamista suodattimilla on esitetty laskuesimerkeillä. Työssä havainnollistettiin, että kompensointi vaatii yliaaltoja tuottavien kuormitusten yhteydessä suodattimen toimiakseen oikein.</p> <p>Työssä on aluksi selostettu Suomessa käytössä olevat sähköradan sähköistysjärjestelmät. Yliaaltovirtoja, joita verkkoyhtiöt sallivat liittymispisteissään, on esitelty taulukoissa.</p> <p>Suurjännitteellä käytettävien yliaaltosuodattimien komponentteja ja rakennetta on työssä esitelty lyhyesti.</p> <p>Työn tuloksena syntyi selvitys sähköradan syöttöasemilla käytössä olevista ratajohtosuodattimista. Ratajohtosuodattimista laadittiin taulukko suodatintyypeittäin. Selvitysten yhteydessä todettiin dokumenttien päivitystarve.</p>	
Avainsanat	kompensointi, yliaallot, ratajohtosuodatin

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Suomessa käytössä olevat sähköradan sähköistysjärjestelmät	1
2.1	1x 25 kV:n järjestelmä	2
2.2	2x25 kV:n järjestelmä	4
2.3	1x25 kV:n järjestelmästä 2x25:n kV järjestelmäksi	5
2.4	Syöttöasemat	6
3	Loissähkö	10
4	Yliaallot ja häiriövaikutukset	11
4.1	Yliaallot	11
4.2	Häiriövaikutukset	13
5	Yliaaltojen aiheuttajat	13
6	Sähkövetokalusto	15
7	Verkkoyhtiön vaatimukset ja rajoitukset	18
8	Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus	20
8.1	Kuristimet ja kondensaattorit	20
8.1.1	Kuristimet	20
8.1.2	Kondensaattorit	21
8.2	Loistehon kompensointi	22
8.3	Yliaaltojen suodatus	25
8.4	Loistehon kompensointi ja yliaaltojensuodatus	26
9	Ratajohtosuodattimet	33

10	Lopuksi	40
	Lähteet	42
	Liitteet	
	Liite 1. Suodattimien numerojako	
	Liite 2. Taulukko ratajohtosuodattimista	
	Liite 3. Suodattimet kartalla	

## Lyhenteet

C	kapasitanssi
D	säröteho
Hz	hertsi
I	virta
kV	kilovoltti
kvar	kilovari
L	induktanssi
MVA	megavoltiampeeri
Mvar	megavari
P	pätöteho
Q	loisteho
Q <sub>c</sub>	kompensointiteho
R	resistanssi
S	näennäisteho
U	jännite
X	reaktanssi
Z	impedanssi

## 1 Johdanto

Tämä työ on tehty Liikenneviraston toimeksiannosta Rejlers Oy:lle. Työn tarkoituksena oli selvittää, millaisia ratajohtosuodattimia sähköradoilla on käytössä ja sitä, miksi niitä käytetään. Verkko-yhtiöiden vaatimuksia sallituista yliaaltovirroista on katsottu sähköradan syöttöasemien 110 kV verkkoon liittymisen kannalta.

Käytössä olevat suodattimet numeroitiin kytkennän perusteella ja niistä tehtiin taulukko ja suodatinkartta, jotka ovat työn liitteenä.

Loistehon kompensointia yliaaltopitoisessa verkossa havainnollistettiin laskuesimerkein. Laskuin esitettiin, milloin resonanssi verkon induktanssin kanssa on mahdollinen ja miten suodattimella saadaan rajoitettua tilannetta.

Suuri osa työstä käsitti käytössä olevien suodattimien kartoituksen ja kytkentäkaavioiden tarkistamista. Kartoituksen yhteydessä ilmeni, että käytännössä syöttöasemilla tehdyt suodattimien muutokset eivät ole siirtyneet dokumentteihin.

## 2 Suomessa käytössä olevat sähköradan sähköistysjärjestelmät

Rautateilla käytetään erilaisia jännitteitä eri puolilla maailmaa. Euroopassa on käytössä ainakin seuraavia jännitteitä: 1,5 kV, 3 kV DC, 15 kV 16 2/3 Hz ja 25 kV 50 Hz.

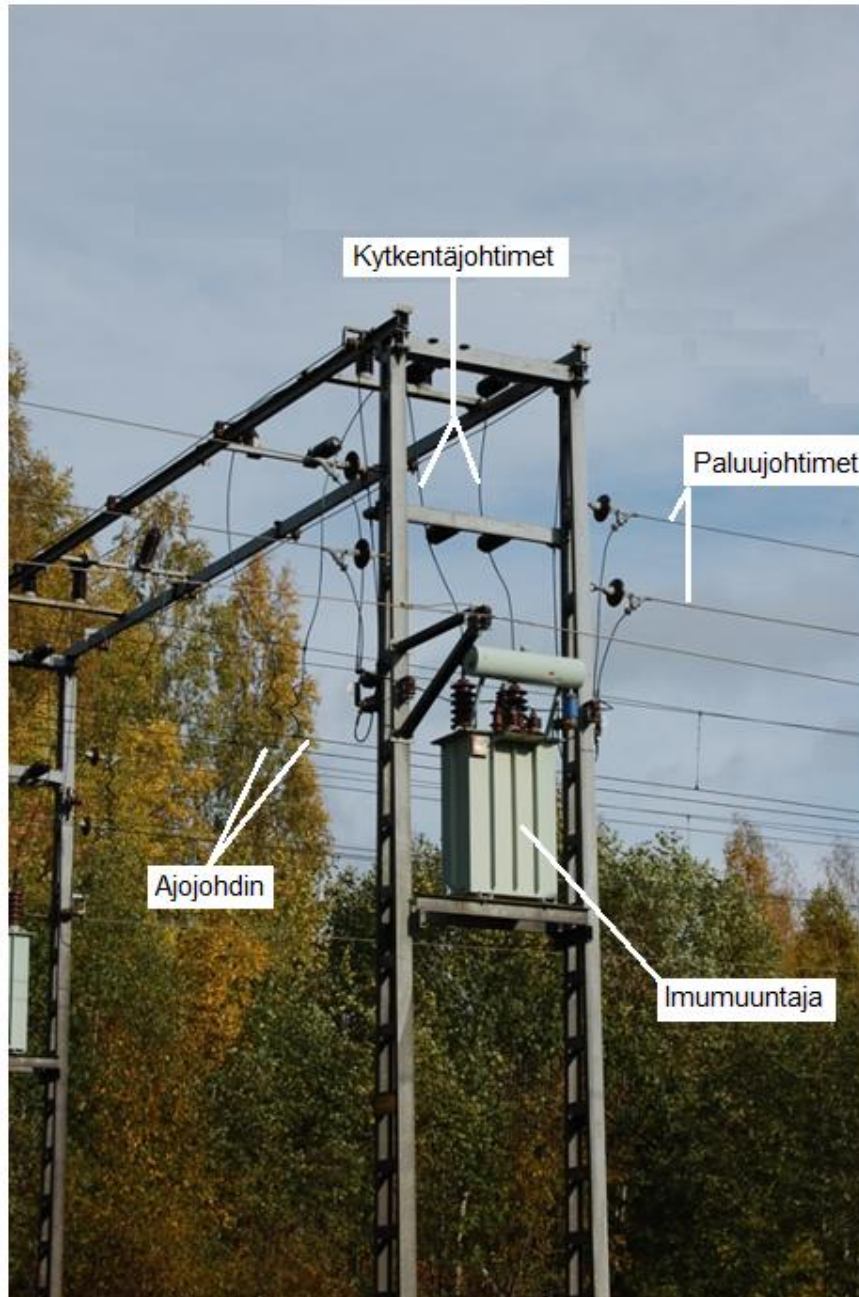
Suomessa sähköradoilla käytetään kahta eri sähköistysjärjestelmää, 1x25 kV:n ja 2x25 kV:n. Molemmat järjestelmät toteutetaan muuntajalla 110 kV:n kantaverkosta tai 110 kV:n alueverkosta.

Suomessa päädyttiin perusteellisten selvitysten jälkeen 1950 luvulla 25 kV:n ja 50 Hz järjestelmään. [1,s.98]

Suomen ensimmäinen sähköistetty rataosuus oli Helsinki-Kirkkonummi, joka valmistui vuonna 1969. Tällä rataosalla käytettiin alkuun myös osalla matkaa puupylväitä, joista on myöhemmin luovuttu. Rataosan ainoa syöttöasema sijaitsi Espoon Kilossa, jossa



kulkevia virtoja. Imumuuntajat kytketään sarjaan paluujohtimen ja ajojohtimen kanssa. Kuvassa 2 on valokuva imumuuntajasta. Paluujohtin kytketään kiskoon imumuuntajien puolivälissä.[11,s.402]



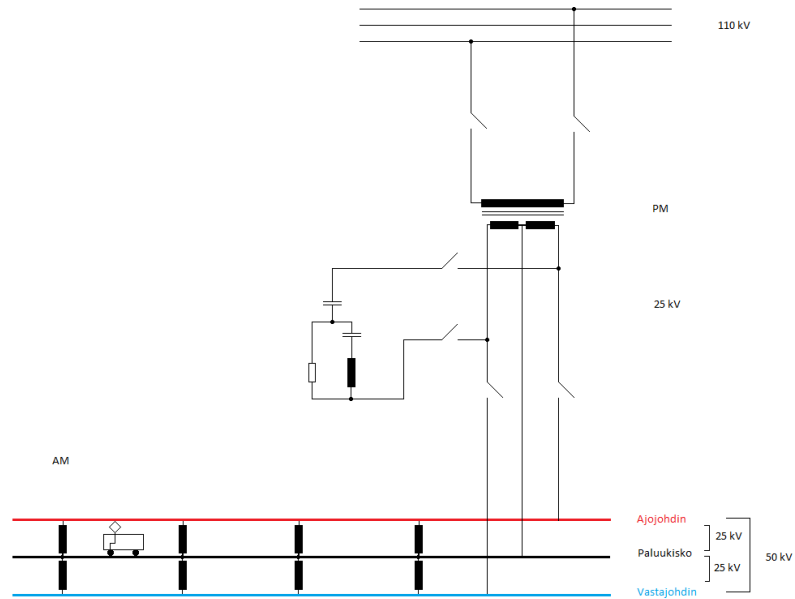
Kuva 2. Imumuuntaja. Paluujohtimet on päätetty pylvääseen ja ajojohdin on tuotu muuntajaan kytKentäjohtimilla.

Imumuuntaja on 1:1 kytketty virtamuuntaja, jonka avulla paluujohtimeen synnytetään sen omalle jännitehäviölle vastakkainen jännite, jolla pienennetään paluujohtimen reaktanssia ja näin saadaan paluuvirralla helppo kulkutie syöttöasemalle. [11,s.402]

## 2.2 2x25 kV:n järjestelmä

Sähkövetokaluston tehontarpeen kasvu on johtanut suurempijännitteisten järjestelmien kehitykseen. Ainakin Japanissa on jo vuonna 1976 ollut 2x25 kV:n järjestelmä. [11 s. 395]. Tässä järjestelmässä sähkövetokalustoon ei tarvitse tehdä muutoksia, koska jännite sähkövetokaluston yli ei muutu. Lisäksi sillä saadaan pitempiä syöttöalueita niillä alueilla, jossa 110 kV linjat ovat harvassa, koska 110 kV linjojen rakentaminen on merkittävä kustannustekijä. 2x25 kV:n järjestelmässä jännite ajojohtimen ja vastajohtimen välillä on 50 kV, joten siirrettävä teho kaksinkertaistuu virran pysyessä samana, koska teho on jännite kertaa virta  $P=U \cdot I$ . Suomen ensimmäinen 2x25 kV:n järjestelmä, joka valmistui vuonna 2004, rakennettiin Oulun ja Rovaniemen välille. Muut Suomen 2x25 kV:n järjestelmän radat ovat Kerava - Lahti, Hirvineva - Tuomioja - Raahe ja Oulu - Kontiomäki - Vartius ja Kontiomäki - Iisalmi.

2x25 kV:n järjestelmässä päämuuntajan toisiossa on kaksi 25:n kV käämiä kytketty sarjaan, joiden keskipiste on kytketty paluukiskoon. Toinen käämi on tuotu ajojohtimeen ja toinen vastajohtimeen. Myös 2x25 kV:n järjestelmässä osa paluuvirrasta pyrkii kulkemaan maan kautta ja tämän rajoittamiseksi järjestelmässä käytetään säästömuuntajia. Säästömuuntajassa on kaksi erillistä käämiä, jotka on kytketty sarjaan muuntajan liittimissä ja niiden keskipiste on yhdistetty paluukiskoon. Kaksi muuta säästömuuntajan liitintä on kytketty ajojohtimeen ja vastajohtimeen. Kuvassa kolme on kytkentä 2 x 25 kV:n järjestelmästä.

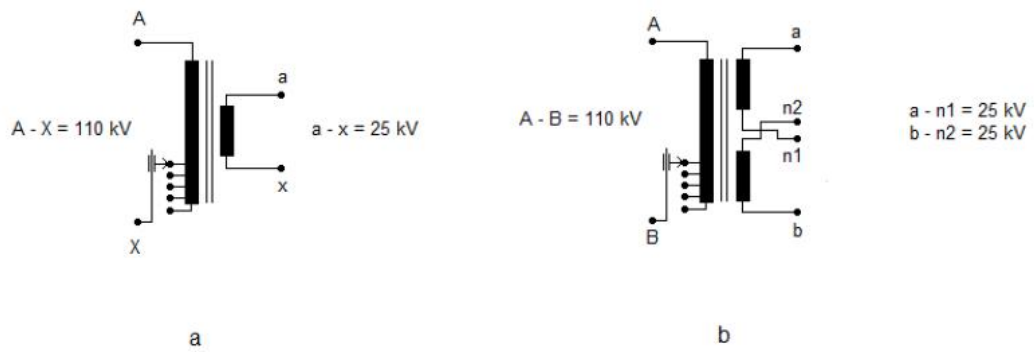


Kuva 3. 2x25 kV:n järjestelmän kaavio

### 2.3 1x25 kV:n järjestelmästä 2x25:n kV järjestelmäksi

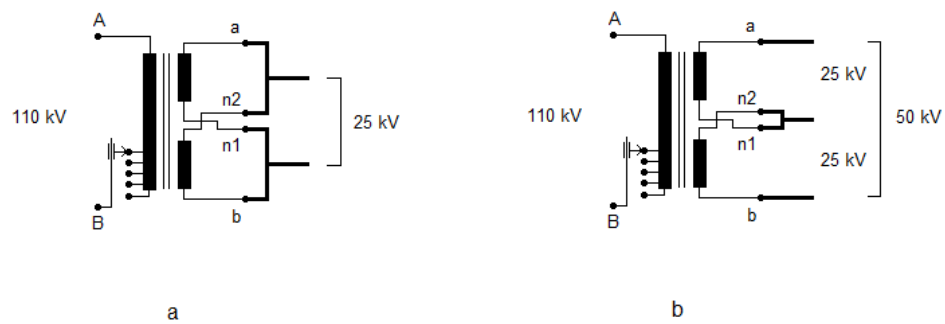
Jos 1x25 kV:n syöttöasema pitää muuttua 2x25 kV:n syöttöasemaksi, se voidaan toteuttaa säästömuuntajalla, jossa keskipiste kytketään paluukiskoon, toinen puoli 25 kV:n ajojohtimeen ja toinen puoli vastajohtimeen. Suomessa Hirvinevan, Kuivalan ja Parkatin syöttöasemat on toteutettu tällä järjestelyllä, koska nämä syöttävät sekä 1x25 kV:n että 2x25 kV:n järjestelmän rataosuuksia. Kuvassa 4 on kytkentä syöttöaseman säästömuuntajalla toteutetusta järjestelmästä.





Kuva 5. Päämuuntaja a) yhdellä toisiokäämillä ja b) kahdella toisiokäämillä.

Kahdella toisiokäämillä varustetut muuntajat liitetään 1x25 kV:n järjestelmään kytkemällä toisiokäämit rinnakkain ja 2x25 kV:n järjestelmässä sarjaan. Kuvassa 6 on päämuuntajien kytkentä kumpaankin järjestelmään. Kytkentä tehdään muuntajien kannella.



Kuva 6. a) päämuuntajan kytkentä 1x25 kV:n järjestelmään ja b) kytkentä 2x25 kV:n järjestelmään.

Syöttöasemalla on myös omakäyttömuuntaja 25 kV/230 V, josta saadaan syöttöaseman apulaitteille sähköt, katkaisijat 110 kV:n ja 25 kV:n puolelle sekä virta- ja jännitemuuntajat pätö- ja loistehonmittausta ja suojarleistystä varten.

Suojareistys mittaa jännitettä ja virtaa. Jännitteelle ja virralle on aseteltu arvot, joiden ylityksestä seuraa hälytys ja/tai katkaisijan avautuminen tai molemmat vian kiireellisyydestä riippuen. Arvot riippuvat muuntajista, kaapeleista ja muiden järjestelmään liitettyjen komponenttien jännite-, virta- ja kuormituskestoisuudesta.

Syöttöasemilla ja myös muilla sähköasemilla on 110 V:n tasasähköjärjestelmä akustoinen, josta syötetään suojarleitä, katkaisijoiden ohjauslaitteita ja kaukokäyttölaitteita, sekä mahdollisesti muita toiminnan kannalta tärkeitä laitteita. Akustolla varmistetaan sähkön saanti näille laitteille myös vikatilanteissa, joissa normaali syöttöjännite puuttuu. Kuvassa 7 on esitetty esimerkkinä syöttöaseman pääkaavio.



### 3 Loissähkö

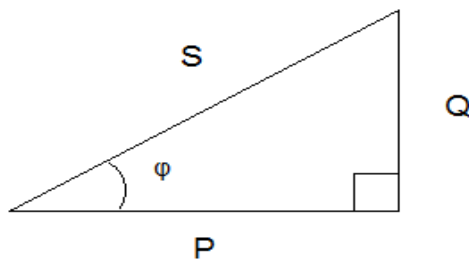
Sähköteho  $P$  on jännite  $U$  kerrottuna virralla  $I$  ( $P=U \cdot I$ ). Tämä pätee tasasähköllä ja vaihtosähköllä resistiivisellä kuormalla sinimuotoisella jännitteellä. Vaihtosähköllä teho ilmoitetaan näennäistehona  $S$ , pätöteho  $P$  ja loistehona  $Q$ . Nämä tehot lasketaan seuraavasti:

$$S = U \cdot I \quad (1)$$

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (3)$$

Kaavassa  $\varphi$  (fii) on jännitteen ja virran välinen vaihesiirtokulma. Kuvassa 8 on piirretty tehokolmio joka havainnollistaa tehojen välistä yhteyttä.



Kuva 8. Tehokolmio, jossa  $S$  on näennäisteho,  $P$  pätöteho,  $Q$  loisteho ja  $\varphi$  on vaihesiirtokulma.

Kolmiosta havaitaan, että loisteho kasvattaa siirrettävää näennäistehoa. Vaikka loisteho ei tee työtä, vaan kulkee kuorman ja verkon välillä, se kuitenkin kasvattaa tehohäviöitä, koska se lisää virtaa johdoissa. Sähkötekniikan peruskaavoista saadaan häviöteho.

$$P = U * I \quad (4)$$

$$U = R * I \quad (5)$$

$$P = R * I^2 \quad (6)$$

Kaavassa

P = pätöteho

U = jännite

I = virta

R = resistanssi

Tästä havaitaan, että virta vaikuttaa neliöllisesti tehohäviöön, mistä seuraa että loistehoa ei kannata siirtää verkossa.

Loisteho pyritään kompensoimaan lähellä kulutuspistettä. Yleensä  $\cos \varphi$  pyritään saamaan lähelle 1:tä. Verkkoyhtiöt perivät kulutetusta loistehosta yleensä suurkuluttajilta maksua. Yleensä ylikompensointi eli loistehon tuottaminen verkkoon ei ole sallittua.

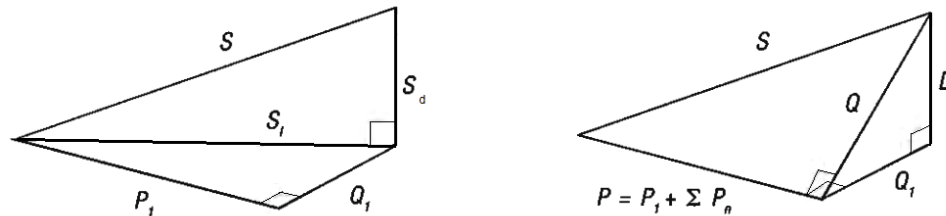
## 4 Yliaallot ja häiriövaikutukset

### 4.1 Yliaallot

Yliaallot ovat sähköverkon perustaajuutta korkeampia taajuuksia. Summautuessaan perustaajuuteen, joka on Euroopassa 50 Hz, ne säröyttävät sinimuotoista virtaa. Jännite säröytyy, kun verkosta otetaan epäsinimuotoista virtaa ja nämä yliaaltovirrat aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä, jotka edelleen aiheuttavat jännitteen sä-

röytymisen. Yliaaltoja on harmonisia eli perustaajuuden monikertoja (100, 150, 200 Hz, jne.), mutta myös epäharmonisia yliaaltoja, jotka eivät ole perustaajuuden monikertoja.

Puhtaalle sinimuotoiselle vaihtosähkölle käytetään näennäistehoa  $S$ , pätötehoa  $P$  ja loistehoa  $Q$ . Yliaaltopitoisessa verkossa tämä ei riitä vaan tarvitaan vielä säröteho  $D$ . Särötehon määritelmä saattaa vaihdella lähteestä riippuen. Kuvassa 9 on osoitinkuvoin pyritty havainnollistamaan asiaa.[2,s.17]



Kuva 9.  $S_1$ ,  $P_1$  ja  $Q_1$  ovat perustaajuuden näennäis-, pätö- ja loisteho.  $S_d$  on yliaaltojen aiheuttama näennäisteho,  $S$  on kokonaisnäennäisteho,  $Q$  on kokonaisloisteho ja  $P$  on kokonaispätöteho, joka sisältää myös mahdollisten yliaaltojen aiheuttaman pätötehon.

Useimmin säröteho määritellään kaavalla

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2} \quad (7)$$

Tällöin säröteho  $D$  ei sisällä lainkaan yliaaltopätötehoja vaan vain yliaaltoistehoja.

Yliaaltojen haittoja ovat mm. häviöiden kasvu, mittarien virhenäyttämät, automaatiolaitteiden virhetoiminnat sekä resonanssitilanteissa virta- ja jännitepiikit.

## 4.2 Häiriövaikutukset

Sähköradalla häiriöt liittyvät yliaaltoihin ja virran paluureittiin. Yliaallot voivat aiheuttaa syöttävässä sähköjärjestelmässä resonanssi-ilmiön, jota käsitellään jäljempänä.

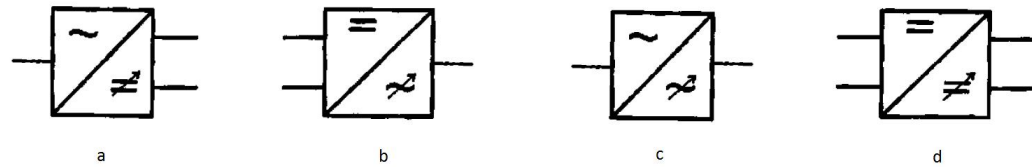
Maan sähkönjohtavuus on Suomessa huono ja vaikka käytetään imu- ja säästömuuntajia virran paluureitti voi vaihdella ja virrasta voi 15 -20 % kulkeutua maan kautta [9,s.6]. Kapasitiivinen kytkeytyminen on vähäistä, koska sähkökenttä vaikuttaa lähinnä ajojohdon ja kiskojen välillä ja vaimenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Sen sijaan induktiivinen kytkeytyminen on ongelmallisempi ilmiö, koska virta leviää maassa laajalle alueelle, joten indusoiva virtasilmukka on iso ja häiriöt ulottuvat kauas. Nämä häiriöt ovat ongelma lähinnä puhelin-, ohjaus- ja tiedonsiirtokaapeleille [11,s.403-404]. Radan suuntaisten kaapeleiden kannalta pahin tilanne on silloin, kun veturi on lähellä imumuuntajaa ja vastaavasti paluujohtimen kiskoliitäntä on kauimpana.

Puhelinkaapeliverkossa häiriöt olivat merkittäviä silloin, kun lankapuhelimet olivat yleisempiä. Nykyään häiriintyvät eniten ohjaus- ja valvontalaitteet, joiden kaapelit kulkevat ratasähkökaapeleiden ja paluukiskon lähellä. Myös kosketus- ja vaarajännitteet katsotaan yleensä kuuluvaksi häiriöihin. Niiden arvot on määrätty sähköturvallisuusmääräyksissä.

## 5 Yliaaltojen aiheuttajat

Suuntaajat ovat nykyään tehoelektroniikan peruskentöntöjä. Niiden yksi merkittävä sovellusalue on sähkömoottoreiden ohjaaminen ja käyttäminen.

Suuntaajilla tehdään vaihtosähköstä tasasähköä (kuva 10 a), tasasähköstä halutun taajuista vaihtosähköä (kuva 10 b), vaihtosähköstä eri taajuista vaihtosähköä (kuva 10 c) ja tasasähköstä halutun jännitteistä tasasähköä (kuva 10 d). Suuntaaja voi rakenteesta riippuen toimia sekä tasasuuntaajana että vaihtosuuntaajana [7,s.29].



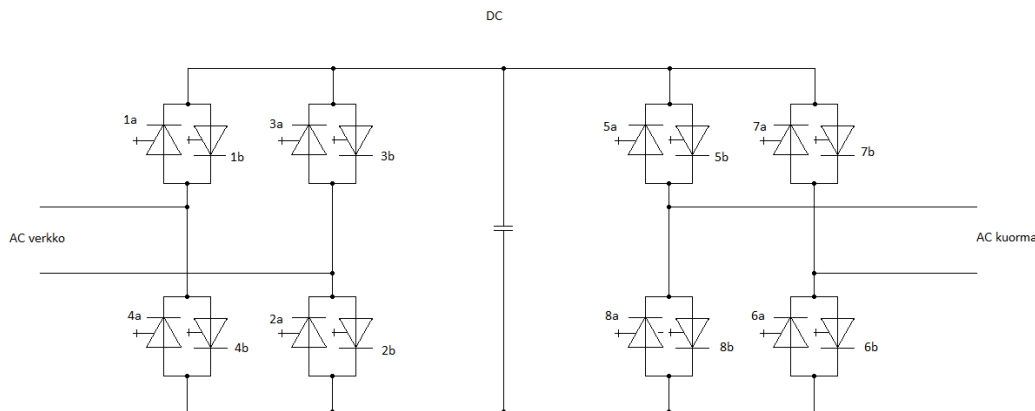
Kuva 10. a) tasasuuntaaja, b) vaihtosuuntaaja, c) toistosuuntaaja (vaihtosähkö) ja d) toistosuuntaaja (tasasähkö).

Suuntaajissa käytettävät komponentit ovat yleensä diodi, tyristori ja transistori.

Diodia ei pystytä ohjaamaan, mutta tyristoria ja transistoria voidaan ohjata. Perinteiset tyristorit, jotka pystytään vain syöttämään hilalta ovat uudemmissa suuntaajissa korvautuneet GTO-tyristoreilla (gate turn off) eli hilalta sytytettävillä ja sammutettavilla tyristorilla.

Transistoreissa käytetään nykyisin IGBT-transistoreja (Insulated Gate Bipolar Transistor), joissa on yhdistetty perinteinen bipolaaritransistori ja kanavatransistori. IGBT:n ohjaus toimii jännitteellä. IGBT-transistorien jännitekestoisuus kehittyi koko ajan ja nykyisin päästään jo usean kilovoltin jännitekestoisuuteen, myös kytkentätaajuudet ovat suurempia kuin tyristorilla. GTO- ja IGCT-tyristoreja (Integrated Gate-Commutated Thyristor) käytetään kuitenkin suuritehoisissa sovelluksissa edelleen.

Kuvassa 11 on taajuusmuuttaja, jossa on vastarinnankytketty 1-vaiheinen sekä verkosilta että kuormasilta. Vastarinnankytkennässä komponentit on kytketty eri suuntiin rinnakkain. Kun tehoa siirretään verkosta kuormaan päin kytkennässä johtavat positiivisen puolijakson ajan tyristorit 1a, 5b, 6b ja 2a ja negatiivisen puolijakson ajan 1b, 5a, 6a ja 2b.



Kuva 11. Kuva 1-vaiheinen taajuusmuuttaja

Puoliksi ohjatut tyrystoreilla ja diodeilla tehdyt tasasähkökäytöt aiheuttavat paljon yliaal-  
toivirtoja ja tarvitsevat loistehoa toimiakseen. Nykyisin käytetään täysin ohjattuja suun-  
taajia ja vaihtosähkömoottoreita. Täysin ohjatuilla suuntaajan vastarinnankytketyillä  
verkkosilloilla pystytään tehokerroin asettelemaan hyvin lähelle yhtä ja syöttämään  
mahdollista jarrutustehoa verkkoon. Jarrutustehoa verkkoon syötettäessä tarvitaan  
kuitenkin suodatusta virran ja jännitteen pitämiseksi sinimuotoisena.

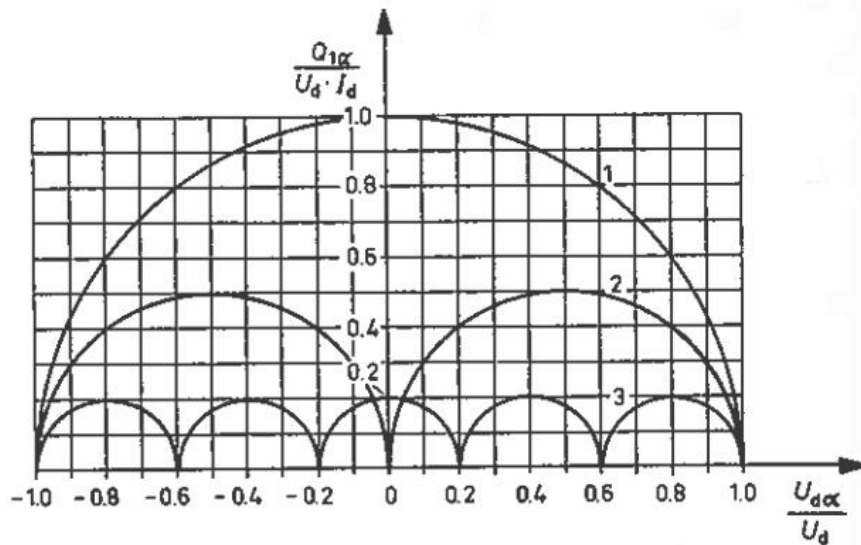
## 6 Sähkövetokalusto

Rautateillä käytettävän sähkövetokaluston vetomoottoreiden tehoa säädetään erilaisilla  
suuntaajilla. Tasasähkökäytöillä tehonsäätö tehdään jännitettä muuttamalla ja vaih-  
tosähkökäytöillä muuttamalla jännitettä ja taajuutta. Suuntaajat ovat epälineaarisia  
kuormia, joista aiheutuu yliaaltoivirtoja.

Vetokaluston suuntaajat tarvitsevat hyvälaatuisen jännitteen toimiakseen oikein. Rauta-  
teiden vetokalusto on eri-ikäistä ja vanhin sähkövetokalusto on tasavirtakäyttöistä.  
Niissä on puoliksi ohjattu tasasuuntaussilta, eli ohjattu puoli on tyristori ja ohjaamaton  
diodi. Siltoja on yleensä kaksi sarjassa ohjausloistehon pienentämiseksi.

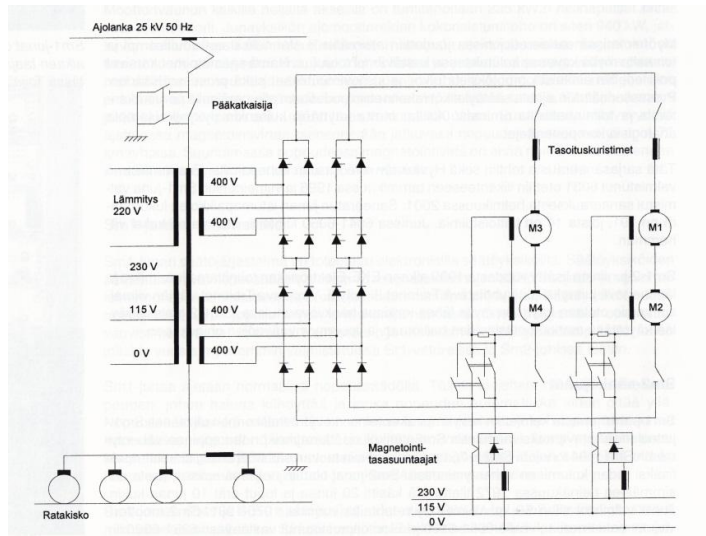
Kuvassa 12 on esitetty ohjausloistehon tarve kun suuntaajia on 1, 2 tai 3 kytkettynä sarjaan, Y-akselilla on ohjausloistehontarve. Havaitaan että sarjaan kytkentä pienentää loistehon tarvetta [10,s.357-358].

Tällaisessa puoliksi ohjatussa suuntaajassa ei ole hyötyjarrutusmahdollisuutta eli jarrutusenergian syöttämistä takaisin verkkoon. Kuormana on tasasähkömoottori, joka on suuri induktanssi. Moottori sekä suuntaaja tarvitsevat loistehoa, joka otetaan syöttävästä ratajohdosta ja joka pyritään tuottamaan suodattimen kompensointikondensaattoris-

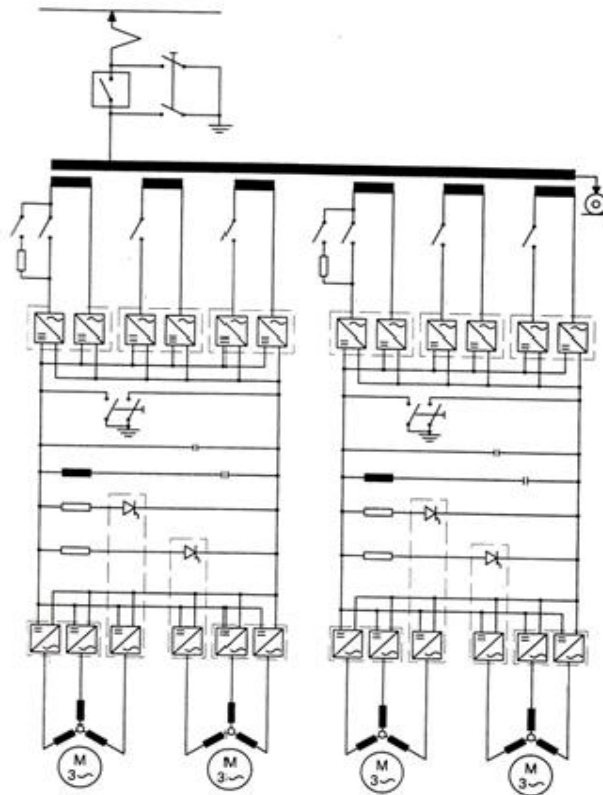


Kuva 12. Ohjausloisteho kytkettäessä suuntaajia sarjaan (1, 2 ja 3 ovat sarjassa olevien suuntaajien määrä) [10, s.358]

Uudemmassa sähkövetokalustossa on täysin ohjattu vastarinnan kytketty GTO- tai IGBT-silta, joten hyötyjarrutus on mahdollista, samoin tehokertoimen saaminen lähelle 1:tä. Suodattimen osuus tämän kaluston kohdalla on ennemminkin yliaaltovirtojen vaimentaminen. Kuvassa 13 on esimerkki vanhemman vetokaluston pääkaaviosta ja kuvassa 14 uudemman vetokaluston pääkaaviosta.



Kuva 13. Sm2 moottorijunan yksinkertaistettu pääkaavio [1,s.120]



Kuva 14. Sr2 veturin yksinkertaistettu pääkaavio. Tasa- ja vaihtosuuntausmoduulien kyttekomponenttina on GTO-tyristori [1,s.135].

## 7 Verkkoyhtiön vaatimukset ja rajoitukset

Sähkönlaatua koskeva standardi SFS-EN 50160 on aiemmin koskenut vain sähkönjakelua 35 kV jännitetasoon asti. Uusin standardin versio antaa viitteellisiä arvoja harmonisille yliaaltojännitteille 36 – 150 kV. CIGRE (Conseil International des Grands Réseaux Electriques) on julkaissut jännitteen laatua koskevan raportin, joka antaa vain suosituksia. CIGRE on kansainvälinen 1921 Pariisissa perustettu järjestö, joka kehittää suurjännitteisen sähkön tuotantoon, siirtoon ja jakeluun liittyvää tietoa.

Verkkoyhtiöt asettavat rajoja harmonisille yliaaltojännitteille ja virroille verkon häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi.

Taulukko 1. Standardin SFS-EN 50160 antamat viitteelliset arvot harmonisille yliaaltojännitteille 36 – 150 kV [4,s.40-44]

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

Fingridin sallimat harmoniset yliaaltojännitteet liittämiskohdassa on esitetty seuraavassa taulukossa [5,s.6]. Taulukossa 3 on esitetty Fingridin verkon sallitut emissiovirrat.

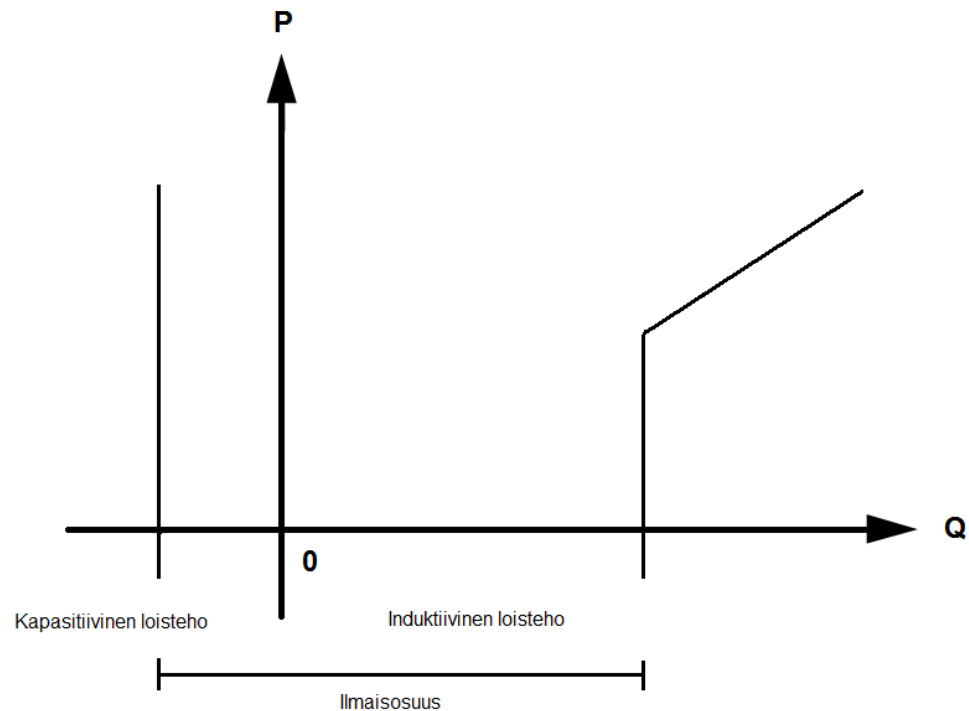
Taulukko 2. Fingridin verkkoon liittyjille sallitut harmoniset yliaaltojännitteet

HARMONISTEN JÄNNITTEIDEN MAKSIMITASOT 110 KV VERKOSSA					
Prosentteina nimellisjännitteestä					
Parittomat yliaallot, kolmella jaottomat		Parittomat yliaallot, kolmella jaolliset		Parilliset yliaallot	
n	%	n	%	n	%
5	3	3	3	2	1
7	2,5	9	1,5	4	0,7
11	1,7	15	0,5	6	0,5
13	1,7	21	0,5	>6	0,3
17	1,5	>21	0,3		
19	1,5				
23	0,8				
25	0,8				
>25	0,5				

Taulukko 3. Fingridin verkkoon liittyjille sallitut emissiovirrat

SALLITUT EMISSIOVIRRAT	
% liittyjän referenssivirrasta	
Virran kokonaissärö	6 %
Vaihevirran psfometriarvo	5 A
Virran vastakomponentti	20 %

Verkkoyhtiöt laskuttavat yleensä myös suurteholiittyjän loistehon kulutusta ja tuottoa, joissain tapauksissa sitä myös rajoitetaan verkon häiriöttömän toiminnan varmistamiseksi. Kuvassa 15 on havainnollistettu loistehon tuoton ja kulutuksen ilmaisosuutta ja tämän ulkopuolelle jäävää maksettavaa osuutta [6,s.3-4].



Kuva 15. Loistehon ilmaisosuus

## 8 Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus

### 8.1 Kuristimet ja kondensaattorit

#### 8.1.1 Kuristimet

Kuristimet voivat olla ilma- tai rautasydämiä. Rautasydämiä kuristimia käytetään paikoissa, joissa jännite pysyy lähes vakiona, koska rautasydämiä kuristimen induktanssi riippuu jännitteestä rautasydämiä kyllästymisen vuoksi. Toisaalta sillä saadaan suurempi induktanssi kuin ilmasydämiä kuristimella. Ilmasydämiä kuristimet ovat jännitteestä ja virrasta riippumattomia [3,s.134,138]. Kuristimen nimellisvirta määritellään ekvivalenttivirtana eri yliaaltojen virroista, siten että se vastaa sellaista perustajuista virtaa, joka aiheuttaa samat häviöt kuin todellinen kokonaisvirta. Ekvivalenttivirta saadaan yhtälöstä 8 [11,s.660].

$$I_{eq} = \sqrt{I_1^2 + \sum_2^{\infty} \frac{R_n}{R_1} * I_n^2} \quad (8)$$

$I_{eq}$  = 50 Hz ekvivalenttivirta

$I_1$  = perustaajuinen virta (50 Hz)

$I_n$  = n:s harmoninen virta

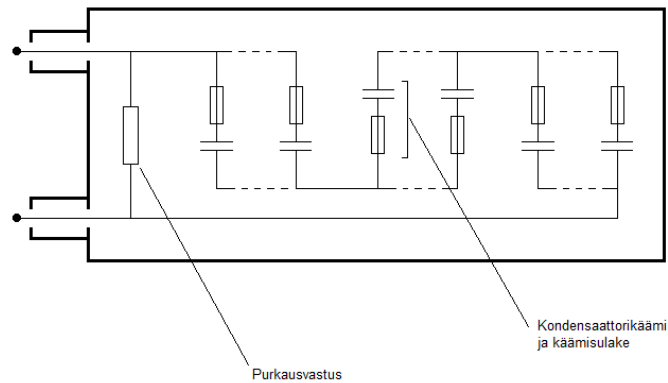
$R_n$  = kuristimen vaihtovirtaresistanssi ko. harmonisella taajuudella

$R_1$  = kuristimen 50 Hz:n vaihtovirtaresistanssi

Kuristimien nimellisjännite on suurin käyttöjännite vaikka sen yli oleva jännite käytännössä on aina pienempi.

### 8.1.2 Kondensaattorit

Suurjännitteellä kondensaattoreita kytketään sarjaan riittävän jännitekestoisuuden saavuttamiseksi ja rinnan tarpeellisen kompensointitehon saavuttamiseksi. Suurjännitekondensaattorissa on sisällä ns. kondensaattorikämejä, joissa on kondensaattori ja sulakelanka kytketty sarjaan. Näitä taas on kytketty sarjaan ja rinnan kondensaattorin sisällä. Yhden käämisulakkeen palaminen pudottaa kondensaattorin tehoa vain n. 1,5 - 3 %. Lisäksi kondensaattorin sisällä on purkausvastus. Kondensaattori voi olla yksi- tai kaksinapaisesti eristetty [8,s.4]. Kuvassa 16 on havainnollistettu suurjännitekondensaattorin rakennetta.



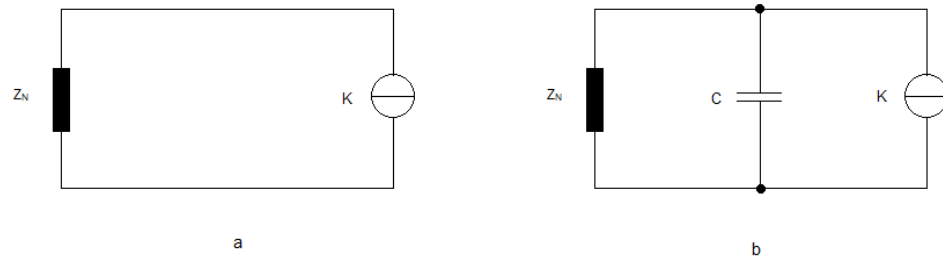
Kuva 16. Kaksinapaisesti eristetyin suurjännitekondensaattorin rakenne

## 8.2 Loistehon kompensointi

Kompensoinnissa pyritään tuottamaan tarvittava loisteho mahdollisimman lähellä kulu- tusta, jotta vältytään siirtomatkoilta. Koska teho on  $P = R \cdot I^2$ , loisvirta kasvattaa myös häviöitä.

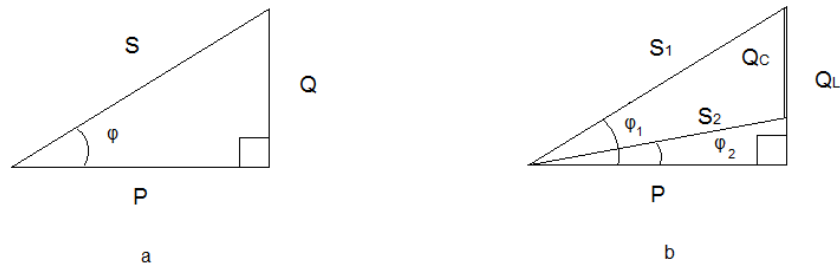
Perinteisillä moottorikäyttöillä kuormitus on induktiivinen, joten tarvittava loisteho voi- daan tuottaa rinnakkaiskondensaattoreilla. Kapasitiivista loistehoa tuottavat yleensä vain kevyessä kuormassa olevat suurjännitteiset 220 kV ja 400 kV johdot, joita kom- pensoidaan reaktoreilla eli kuristimilla.

Kuvassa 17a on sijaiskytkentä ilman kompensointia ja kuvassa 17b kompensoinnin kanssa.



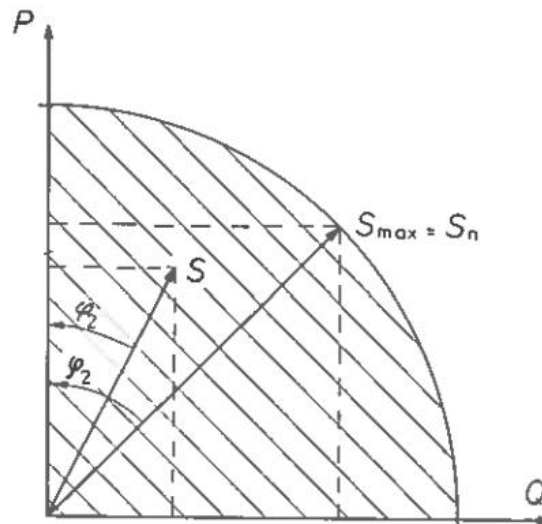
Kuva 17.  $Z_N$  on syöttävän verkon induktanssi, K on kompensoitava kuormitus ja C on kompensointikondensaattori

Kuvassa 18 on tehokolmiolla havainnollistettu kompensoinnin vaikutusta siirrettävään tehoon. Kuvassa 18a on tilanne ilman kompensointia ja 18b kompensoinnin vaikutus siirrettävään tehoon.  $Q_L$  on kuorman kuluttama loisteho ja  $Q_C$  on kompensoinnilla tuotettu loisteho, näiden vaikutus on vastakkainen jolloin  $Q_L - Q_C = Q$  ja  $S_2$  on näennäis-teho kompensoinnin jälkeen.



Kuva 18. Kompensoinnin vaikutus a) kompensoimaton b) kompensoitu

Kompensointi kuormittaa myös muuntajaa tyhjäkäynnillä, jos esimerkiksi kompensoitavaa kuormitusta ei ole ja 7,5 MVA muuntajaan on kytketty 1 Mvar suodatinparisto, vastaa tämä muuntajan kannalta 1 MVA kuormitusta. Kuva 19 havainnollistaa muuntajan kuormittumista.



Kuva 19. Muuntajan sallittu kuormitus on jokainen piste viivoitetulla alueella [3,s.29]

Kompensointikondensaattori vaikuttaa jännitteeseen seuraavasti:

$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (9)$$

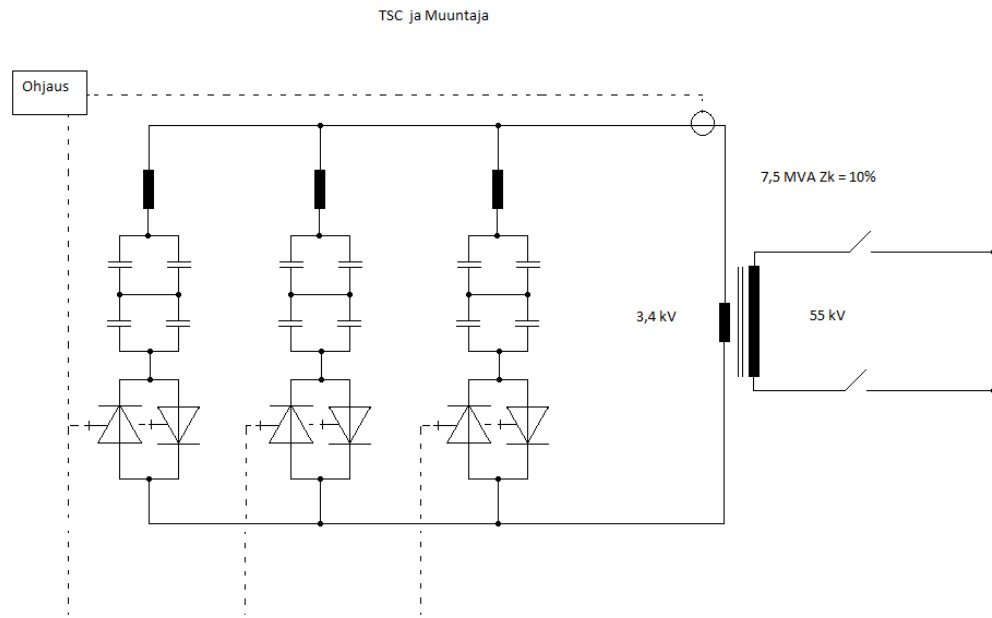
U = jännite

$Q_C$  = kondensaattoripariston kompensointiteho

$X_C$  = kondensaattoripariston reaktanssi

Kerralla kytkettävän kondensaattoripariston koko pitää mitoittaa niin, että jännitteen nousu ei huononna sähkön laatua. Kompensointipariston kytkentäpiikki voi myös aiheuttaa ongelmia. Mikäli kuormituksen loistehon tarve muuttuu nopeasti, ovat mekaaniset kytkimet hitaita. Kytkentäpiikit ja jännitestabiilisuus voivat haitata kompensointia tai estää kompensoinnin käytön kokonaan. Näissä tapauksissa voidaan käyttää tyristoriohjattua kompensointia, jolla kytkentä onnistuu nopeasti ja lähes ilman kytkentäpiik-

kiä. Laitteistosta riippuen myös portaaton loistehon säätö on mahdollista. Kuvassa 20 on esimerkki tyristoreilla ohjatusta kompensaaattorista.



Kuva 20. Tyristorikytketty kompensaaattori eli TSC (Thyristor Switched Capacitor) on tarkoitettu nopeasti muuttuville kuormille

### 8.3 Yliaaltojen suodatus

Yliaaltojen vaikutus on sitä suurempi mitä heikompi syöttävä verkko on, koska vahva verkko suodattaa luonnostaan paremmin yliaaltoja. Yliaaltoja voidaan suodattaa aktiivisilla ja passiivisilla suodattimilla. Aktiivisuodatin seuraa koko ajan yliaaltoja tuottavaa kuorman ottamaa virtaa ja ajaa samansuuruisen, mutta vastakkaisvaiheisen virran, jolloin yliaaltovirrat kumoavat toisensa.

Yliaaltosuodattimessa kela viritetään kompensointikondensaattorin kanssa sarjaan halutuille yliaaltotaajuuksille, jolloin kyseinen yliaalto suodattuu pois. Suodatin tuottaa kuitenkin perustaajuudella loistehoa.

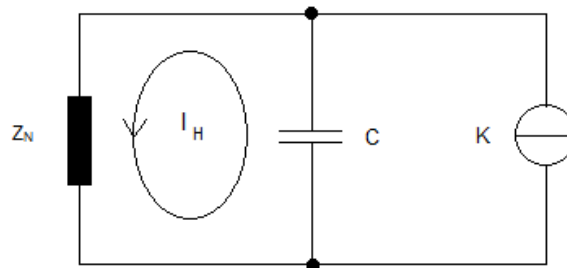
#### 8.4 Loistehon kompensointi ja yliaaltojen suodatus

Yleensä kompensoinnin ja yliaaltojen suodatuksen suunnittelu alkaa kartoittamalla tilanne, joko mittaamalla tai jos kuormitus ja verkko tunnetaan riittävällä tarkkuudella niin laskennallisesti.

Yliaallot rasittavat verkossa olevia kondensaattoreita, koska kondensaattorin reaktanssi on kääntäen verrannollinen taajuuteen, se voi ylikuormittua ja tuhoutua. Sen estämiseksi käytetään yliaaltosuodattimia tai estokelaparistoa.

Estokelaparisto on yksinkertaisin tapa tuottaa perustaajuista loistehoa, mutta yliaallot eivät poistu. Estokela on kondensaattorin kanssa sarjaan kytketty kela, jolla estetään yliaaltojen pääsy kondensaattoriin virittämällä kelan ja kondensaattorin resonanssitaajuus alimman esiintyvän yliaaltotaajuuden alapuolelle.

Verkon yliaaltotilanne pitää tuntea ja tarvittaessa estää kompensointikondensaattorin ja verkon induktanssin välinen resonanssi, joko suodattimella tai estokelaparistolla. Kompensointikondensaattori kytkeytyy verkon rinnalle kuvan 21 mukaisesti.



Kuva 21. Kompensointikondensaattorin, verkon ja yliaaltolähteen sijaiskytkentä.  $Z_N$  verkko,  $C$  kondensaattori,  $K$  yliaaltoja tuottava kuorma ja  $I_H$  mahdollisen resonanssitilanteen aiheuttama yliaaltovirta verkon ja kompensointikondensaattorin välillä.

Seuraavassa on esitetty esimerkkilasku kompensointikondensaattorin ja verkon välistä resonanssitarkastelusta.

Oletetaan syöttävän 110 kV:n verkon oikosulkuimpedanssiksi  $2,8 \Omega$  ja muuntajan arvoiksi 12,5 MVA,  $z_k = 10\%$ ,  $U_1 / U_2 = 113 / 27,5$  kV. Lasketaan syöttävän verkon oikosulkuteho kaavalla

$$S_{k110} = \frac{U^2}{Z_{k110}} \quad (10)$$

$S_{k110}$  = syöttävän verkon oikosulkuteho

$Z_{k110}$  = syöttävän verkon oikosulkuimpedanssi

$U$  = syöttävän verkon jännite

$$S_{k110} = \frac{U^2}{Z_{k110}} = \frac{110kV^2}{2,8\Omega} = 4321,43MVA$$

Lasketaan muuntajan oikosulkuteho

$S_{kt}$  = muuntajan oikosulkuteho

$S_n$  = muuntajan nimellisteho

$z_k$  = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi

$$S_{kt} = \frac{S_t}{z_k} = \frac{12500kVA}{0,1} = 125MVA \quad (11)$$

Syöttävän verkon ja muuntajan yhteinen oikosulkuteho lasketaan niiden rinnankytkentänä.

$S_{kt}$  = muuntajan oikosulkuteho

$S_{k110}$  = syöttävän verkon oikosulkuteho

$S_{k27,5}$  = muuntajan ja syöttävän verkon yhteinen oikosulkuteho muuntajan alajännitepuolella

$$S_{k27,5} = \frac{1}{\frac{1}{S_{k110}} + \frac{1}{S_{kt}}} = \frac{1}{\frac{1}{4321,43MVA} + \frac{1}{125MVA}} = 121486kVA$$

Lasketaan millä kompensointitehoilla on suuri todennäköisyys rinnakkaisresonanssiin verkon induktanssin kanssa kaavalla.

$$f_r = f_1 * \sqrt{\frac{S_k}{Q}} \Rightarrow \quad (12)$$

$$Q_r = \frac{S_k}{n^2} = \frac{121486kVA}{n^2} \quad (13)$$

missä

$f_r$  = resonanssitaajuus

$f_1$  = perustaajuus

$n$  = yliaallonjärjestysluku

$Q_r$  = loisteho resonanssitaajuudella

$S_k$  = verkon oikosulkuteho

$n = 3, 5, 7, 9$  ja  $11$

$3 \Rightarrow 13498,4$  kVar

$5 \Rightarrow 4859,4$  kVar

$7 \Rightarrow 2479,3$  kVar

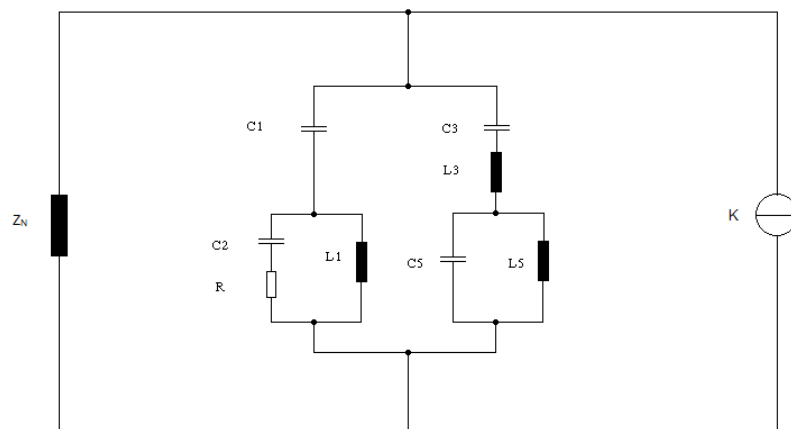
$9 \Rightarrow 1499,8$  kVar

$11 \Rightarrow 1004,0$  kVar

Näillä kompensointitehoilla rinnakkaisresonanssi verkon induktanssin ja kompensointikondensaattori kanssa on mahdollinen [12,s.16-17]. Rinnakkaisresonanssissa yliaallot vahvistuvat ja verkon jännite säröytyy voimakkaasti. Resonanssi voidaan estää estokeylaparistolla tai yliaaltosuodattimella.

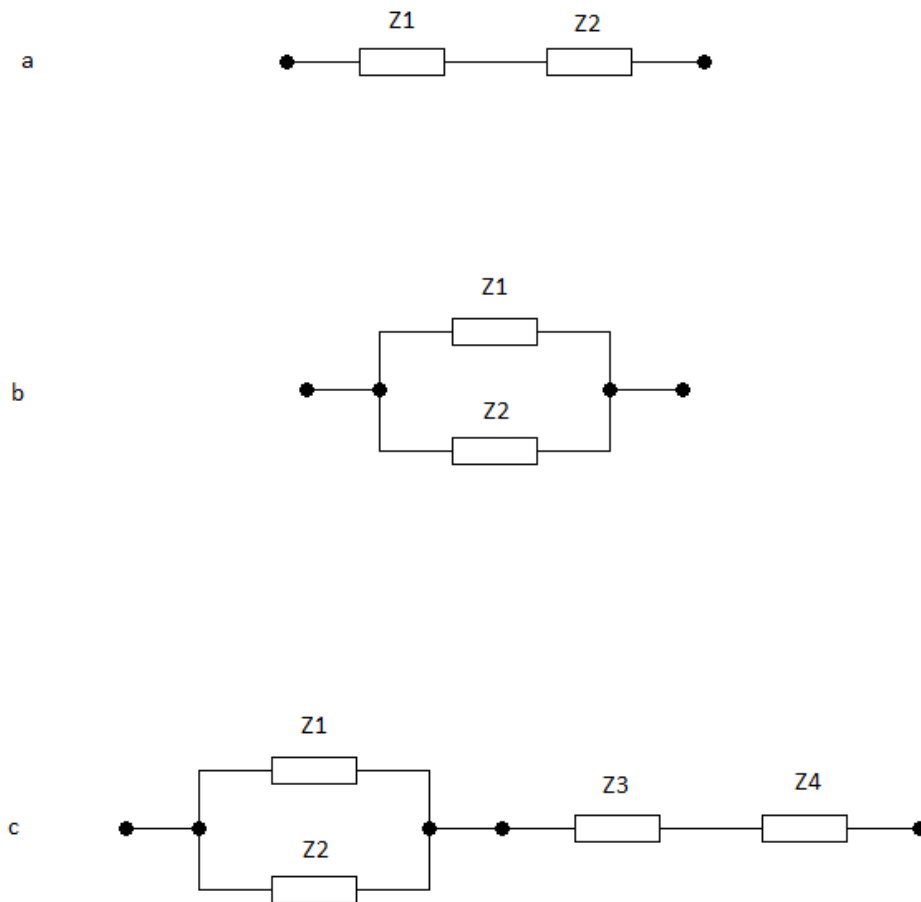
Kuvassa 22 on sijaiskytkentä suodattimen kytkeytymisestä verkon ja kuorman rinnalle. Kuvassa on suodatin, jossa on laajakaistainen ylipäästösuodatin  $C1 = 12\mu F$ ,  $C2 =$

13,2 $\mu$ F,  $R=33\Omega$ ,  $L1 = 54$  mH ja 3. ja 5. yliaalloille viritetty,  $C3= 4,47$   $\mu$ F,  $L3 = 160$  mH,  $C5= 16\mu$ F ja  $L5= 40$  mH haara rinnakkain.



Kuva 22.  $Z_N$  on syöttävän verkon induktanssi,  $K$  on yliaaltoja tuottava kuorma ja näiden rinnalle kytketty suodatin

Vaihtosähköpiireissä impedanssit lasketaan sarjassa suoraan yhteen ja rinnankytkennässä käänteisarvoilla. Kuvassa 23 on havainnollistettu sarjaan ja rinnankytkentöjä.



Kuva 23. a) impedanssit sarjassa, b) impedanssit rinnakkain, c) sarja- ja rinnankytkennän yhdistelmä.

Kuvan 23 a sarjaan kytkennän kokonaisimpedanssi lasketaan kaavalla:

$$Z = Z_1 + Z_2 \quad (14)$$

Kuvan 23 b rinnankytkennän kokonaisimpedanssi lasketaan kaavalla.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} \quad (15)$$

Kuvan 23 c kokonaisimpedanssi lasketaan kaavalla.

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}} + Z_3 + Z_4$$

Induktanssin ja kapasitanssin impedanssit lasketaan seuraavilla kaavoilla:

Induktanssi:

$$Z = j * \omega * L \quad (16)$$

Kapasitanssi:

$$Z = \frac{1}{j * \omega * C} \quad (17)$$

Z = impedanssi

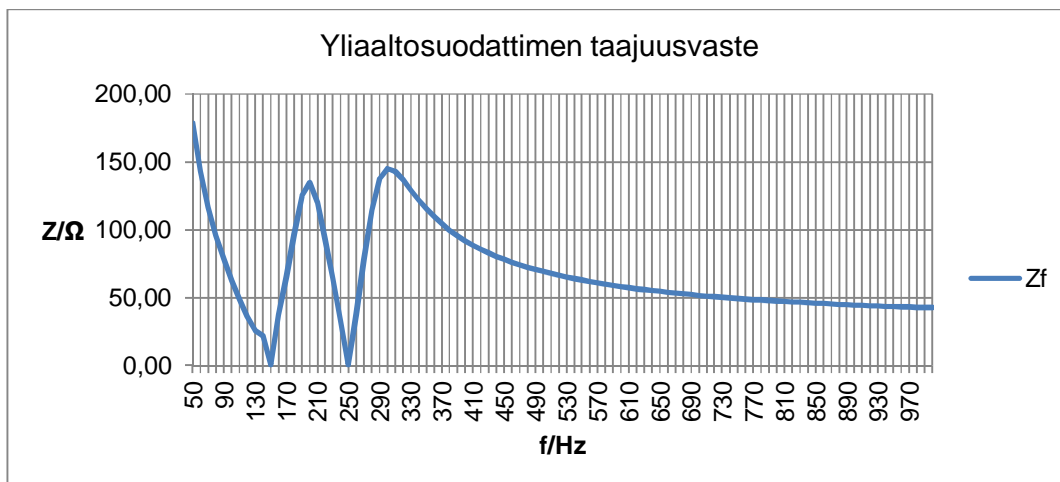
j = imaginääriyksikkö

$\omega = 2\pi f$  , jossa f = taajuus Hz

Kuvassa 22 olevan suodattimen impedanssi voidaan laskea käyttäen sarjaan ja rinnankytkettyjen impedanssien kaavoja seuraavasti:

$$Z_f = \frac{1}{\left( \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega L_1 + R + \frac{1}{j\omega C_2}} \right) + \left( \frac{1}{j\omega C_3 + j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega L_5 + \frac{1}{j\omega C_5}}} \right)} \quad (18)$$

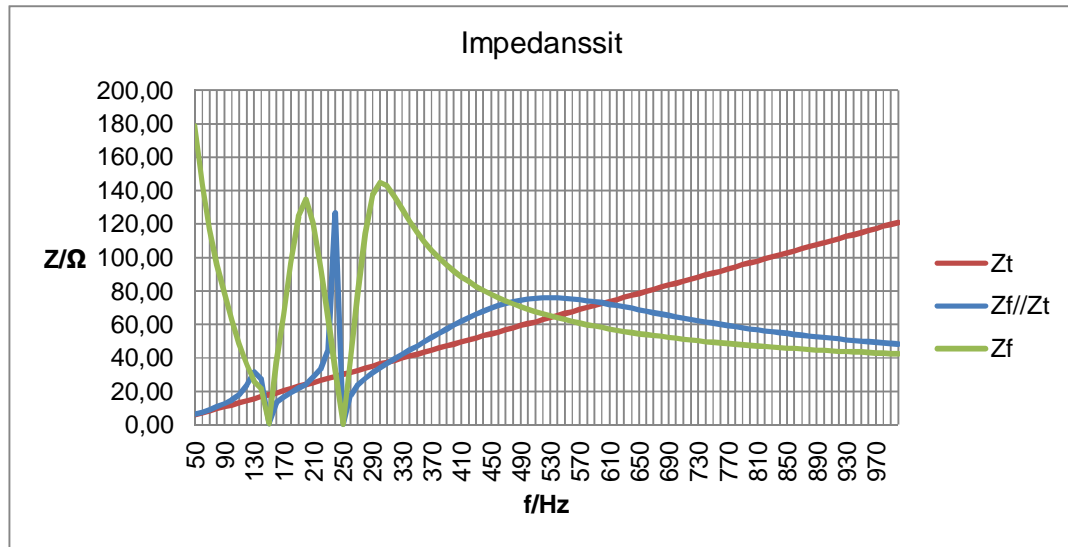
antamalla f:lle ( $\omega=2\pi*f$ ) eri arvoja saadaan suodattimen impedanssi taajuuden funktiona. Tämä on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Kuvassa 22 olevan suodattimen impedanssi  $Z(f)$ . Y-akseli impedanssi  $\Omega$  ja X-akseli taajuus Hz

Verkon impedanssi kasvaa taajuuden noustessa lähes lineaarisesti. Suodatin kytketään verkon ja yliaaltolähteen rinnalle. Sarjaresonanssitilanteessa yliaallot kumoutuvat kuvan 25 kaavion  $Z_f/Z_t$  minimikohdissa. Rinnakkaisresonanssissa kuvassa 25 kaavion  $Z_f/Z_t$  maksimikohdissa yliaallot vahvistuvat aiheuttaen suuren virran, jonka seurauksena yliaaltojen kohtaamat verkon impedanssit saavat aikaan jännitehäviön kukin omalla taajuudellaan. Jännitehäviöt summautuvat verkon perustaajuuteen aiheuttaen jännitteen aaltomuodon säröytymisen. Tämän vuoksi rinnakkaisresonanssitaajuudella ei saa esiintyä yliaaltoja. Kuvassa 25 on suodattimen ja syöttävän muuntajan rinnankytkennän impedanssi taajuuden funktiona, joka on laskettu kaavalla:

$$Z_f // Z_t = \frac{1}{\frac{1}{Z_t} + \frac{1}{Z_f}} \quad (19)$$

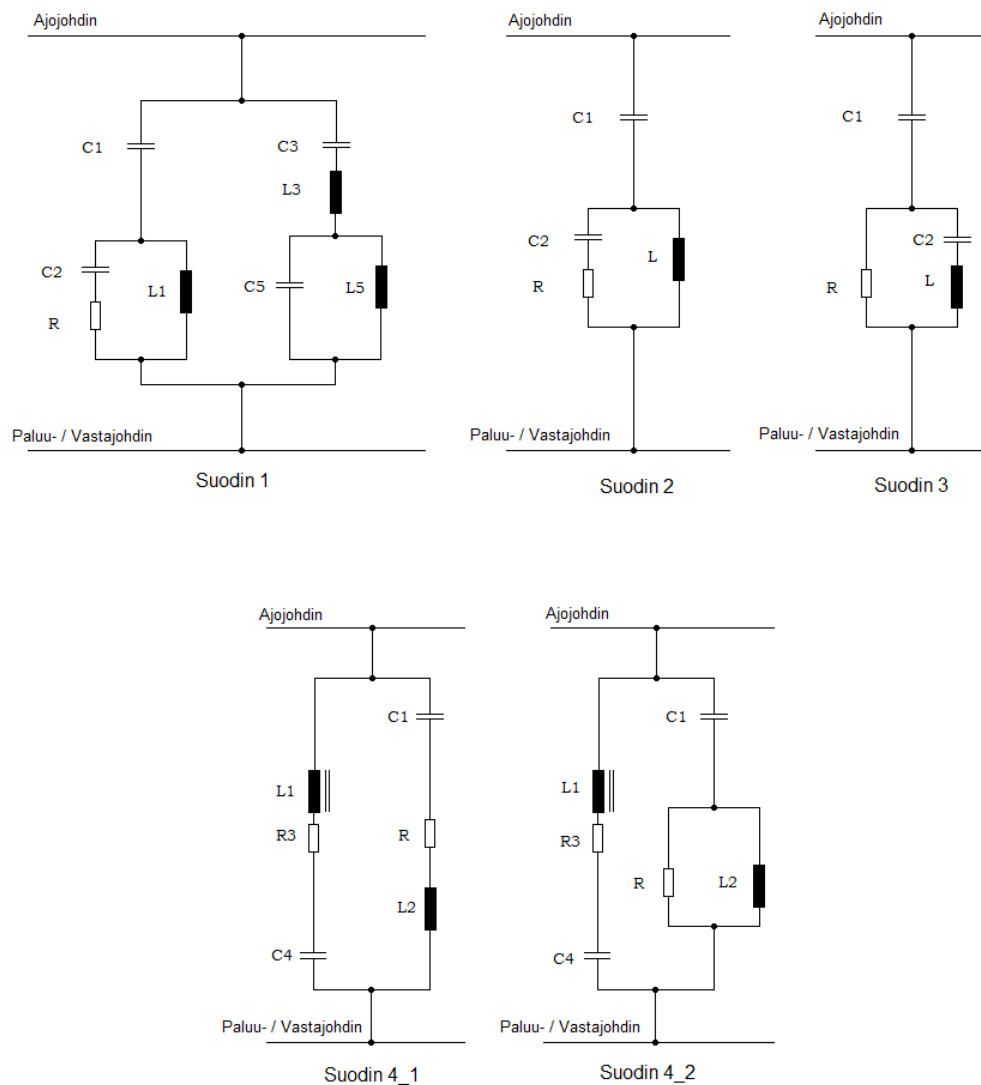


Kuva 25. Kuvassa  $Z_f$  on suodattimen impedanssi.  $Z_t$  on syöttävän muuntajan impedanssi ja  $Z_t/Z_f$  verkon ja suodattimen rinnankytkennän impedanssi. Y-akselin impedanssi on  $\Omega$  ja X-akselin taajuus Hz

Kuvaajasta voidaan havaita että viritys on tarkka, jotta vältetään rinnakkaisresonanssita.

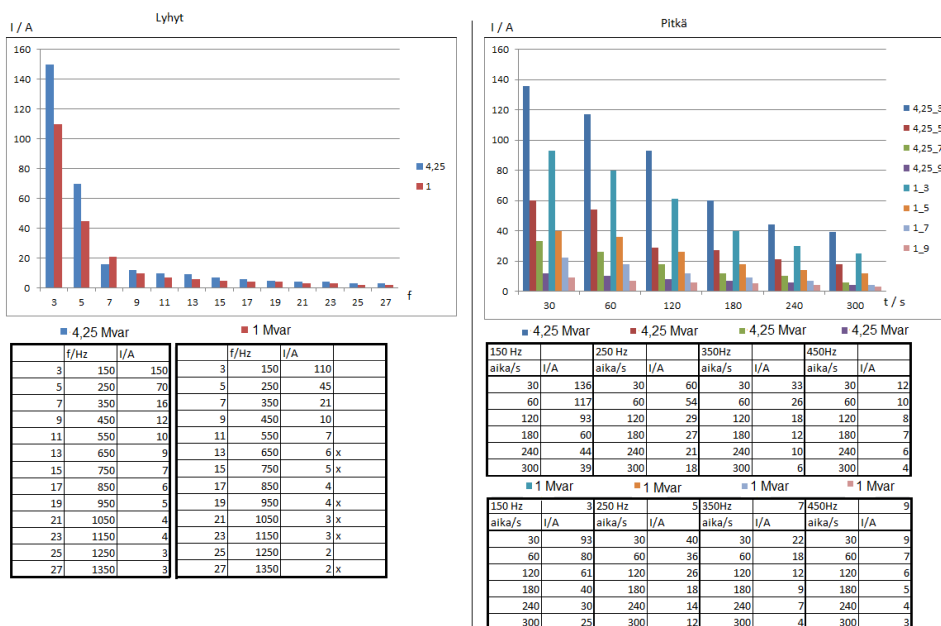
## 9 Ratajohtosuodattimet

Suomessa käytössä olevat ratajohtosuodattimet on jaoteltu tässä työssä numeroin 1 - 4. Mikäli suodattimesta on useampia erilaisia kytkentöjä, ne on numeroitu päänumeron jälkeen alaviivalla erotettuna esim. 2\_2 eli tyypin kaksi suodattimen kytkentäversio 2. Kuvassa 26 on suodattimien kytkentä ja numerojako. Liitteessä 1 on suodattimien kytkennät ja niiden numerointi kokonaisuudessaan. Liitteessä 2 on suodattimet numerojalon avulla merkitty syöttöasemittain. Liitteessä 3 on suodattimet kartalla värimerkinnöillä.



Kuva 26. Suodattimien kytkentä ja numerojako

Ratajohtosuodattimen pääasiallinen tehtävä on estää resonanssi-ilmiön syntyminen kompensointikondensaattorin kanssa ja toisena tehtävänä vaimentaa yliaaltoja niin, että ne eivät häiritsevästi siirry 110 kV:n verkkoon.



Kuva 27. Suodattimen spekseissä annetut mitoitusvirrat [13,s.11,12;14,s.10]

Sähköradan resonanssitaajuus saadaan laskemalla se ratajohdon sähköisistä arvoista [13, s.9], jotka ovat

induktanssi 1,91 mH / km

kapasitanssi 11,5 nF / km

Mikäli syöttöaseman ja ratajohdon välissä käytetään kaapelia, kapasitanssi saa lyhylläkin kaapeleilla huomattavasti suurempia arvoja. Kaapelin kapasitanssi on ilmoitettu kaapelin teknisissä tiedoissa.

Kuvasta 26 saadaan 250 Hz lyhytaikaiseksi virraksi 45 A. Lisäksi tarvitaan syöttävän muuntajan induktanssi, joka saadaan laskettua muuntajan arvoista seuraavasti:

$$X_t = Z_k * \frac{U^2}{S_n} \quad (20)$$

$$L_t = \frac{X_t}{2\pi f} \quad (21)$$

missä

$X_t$  = päämuuntajan reaktanssi

$L_t$  = päämuuntajan induktanssi

$$X_t = 0,1 * \frac{(27,5 \text{ kV})^2}{12,5 \text{ MVA}} = 6,05 \Omega$$

$$L_t = \frac{6,05 \Omega}{2\pi * 50 \text{ Hz}} = 19 \text{ mH}$$

Oletetaan ratajohdon pituudeksi 30 km jolloin saadaan seuraavat arvot:

induktanssi 57,3 mH

kapasitanssi 0,35  $\mu\text{F}$

Lisätään päämuuntajan induktanssi 19 mH, jolloin saadaan 89,3 mH. Oletetaan kompensointitehoksi 1 Mvar, jolloin kapasitanssi on 4,2  $\mu\text{F}$  ja lisätään ratajohdon keskinäis-kapasitanssi 0,35  $\mu\text{F}$ , jolloin saadaan 4,55  $\mu\text{F}$ . Sitten lasketaan resonanssitaajuus kaavalla.

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

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{89,3 \text{ mH} * 4,55\mu\text{F}}} = 249,7 \text{ Hz}$$

Tästä havaitaan, että ollaan melko lähellä 5 harmonista joka on 250 Hz. Tarvitaan suodatin estämään resonanssi-ilmiö. Suodattimen spekseissä on 1 Mvar:n suodattimelle annettu 250 Hz taajuudella lyhytaikaiseksi virraksi 45 A.

Esimerkiksi suodattimen 3\_1 taajuusvaste lasketaan seuraavasti:

$$Z_f = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{R} + \left(\frac{1}{j\omega C_2} + j\omega L\right)} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} Z_{f250\text{Hz}} &= \frac{1}{j2\pi * 250 \text{ Hz} * 4,2 * 10^{-6} \text{ F}} + \frac{1}{45 \Omega + \left(\frac{1}{j2\pi * 250 \text{ Hz} * 130 * 10^{-6} \text{ F}} + j2\pi * 250 \text{ Hz} * 0,078 \text{ H}\right)} \\ &= 39,25 - j136,56\Omega \end{aligned}$$

Muuntajan reaktanssi

$$X_{t250\text{Hz}} = 5 * j6,05 \Omega = j30,32 \Omega$$

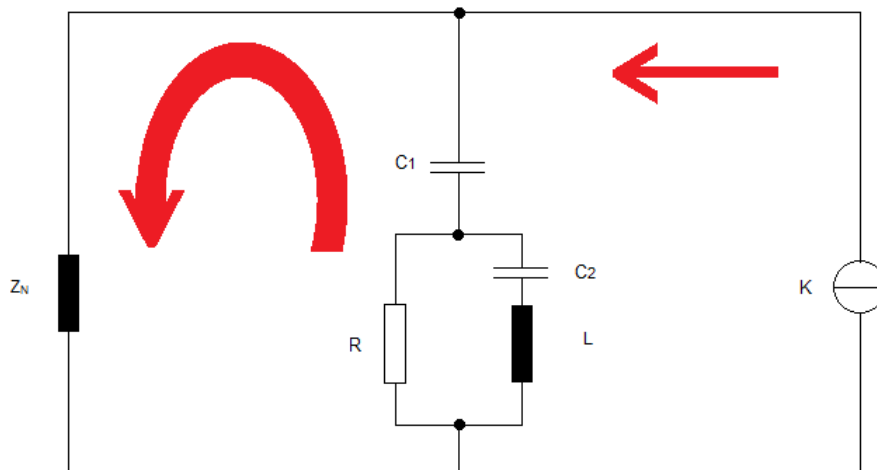
ja suodattimen impedanssi ovat rinnan joten virranjako on seuraava

$$I_f = \frac{X_{t250\text{Hz}}}{(X_{t250\text{Hz}} + Z_{f250\text{Hz}})} * I_5 = \frac{j30,32 \Omega}{(j30,32 + (39,25 - j136,56))} * 45 \text{ A} = 12,05 \text{ A}$$

Tästä nähdään että 5. harmonisen 45 A virrasta päätyy suodattimeen n. 12 A ja vastaavasti laskemalla syöttävään verkkoon päin menevä virta saadaan:

$$I_f = \frac{X_{t250\text{Hz}}}{(X_{t250\text{Hz}} + Z_{f250\text{Hz}})} * I_5 = \frac{(39,25 - j136,56) \Omega}{(j30,32 + (39,25 - j136,56)) \Omega} * 45 \text{ A} = 56,45 \text{ A}$$

Havaitaan että virta on suurempi kuin alkuperäinen. Tämä johtuu resonanssitaajuuden läheisyydestä, koska osa virrasta kulkee kompensointipariston ja muuntajan induktanssin välillä. Kuva 28 havainnollistaa tilannetta. Resonanssi muuttuu heti, jos lähtöarvot muuttuvat: esimerkiksi syöttöaluetta muutetaan, kompensointiteho on eri, mukana on kaapelia, päämuuntajan teho on eri jne.



Kuva 28. Kompensointipariston ja muuntajan induktanssin välinen virta on yliaaltotaajuuden resonanssitilanteessa suurempi kuin kuorman virta.

Esimerkiksi 4,25 Mvar:n numero 1\_1 suodattimen impedanssi 250 Hz taajuudella saadaan laskettua kaavalla

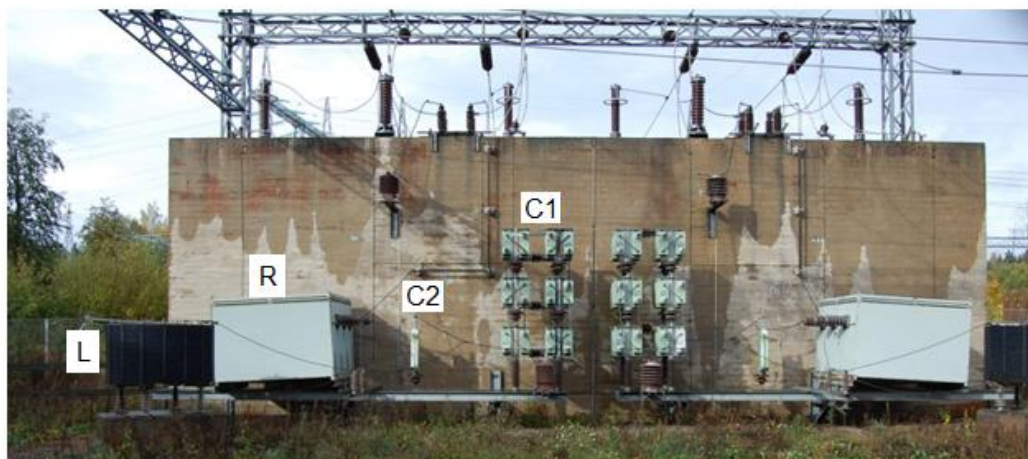
$$Z_f = \frac{1}{\frac{1}{\left( \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_1} + R + \frac{1}{j\omega C_2}} \right)} + \frac{1}{\left( \frac{1}{j\omega C_3} + j\omega L_3 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_5} + \frac{1}{j\omega C_5}} \right)}}$$

josta saadaan n. 0,4 Ω. Tämä havaitaan myös kuvasta 24. Lasketaan vastaavasti suodattimen virta  $I_f$ . Kuvasta 27 saadaan 4,25 Mvar suodattimen 250 Hz lyhytaikaiseksi virraksi 70 A

$$I_f = \frac{X_{m250Hz}}{(X_{m250Hz} + Z_{f250Hz})} * I_5 = \frac{j30,32 \Omega}{(j30,32 + j0,4)} * 70 A = 69,1 A$$

Tästä havaitaan että lähes kaikki 5. harmonisen virta menee suodattimeen, joten voidaan todeta että yksittäiselle taajuudelle viritetty suodatin on parempi vaihtoehto kuin laajakaistainen ylipäästösuodatin.

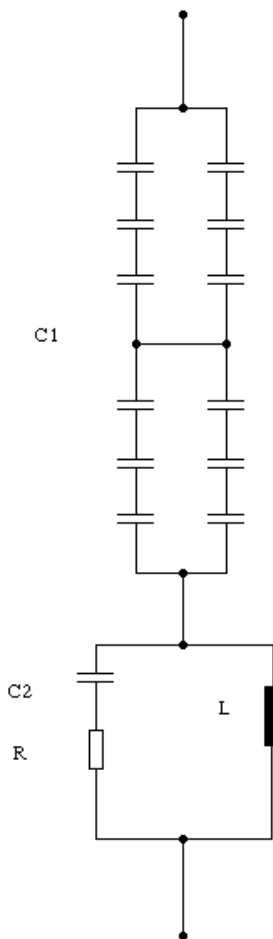
Valokuvassa 29 on kaksi syöttöaseman ratajohtosuodatinta.



Kuva 29. Kuvassa on vasemmalta lähtien ilmasydäminen lineaarinen kela L, vastus R, virituskondensaattori C2, kompensointikondensaattorit C1, joita on 6 kpl sarjassa ja näitä kaksi rinnakkain (ratajohtosuodatin Kukkola).

Kuvassa 29 olevan suodattimen kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 30. Suodin on kytkennän perusteella tyypitetty 2\_3.

Suodin 2\_3



Kuva 30. Valokuvassa 29 olevan suodattimen kytkentä.

## 10 Lopuksi

Sähkövetokaluston uusiutuessa n.10 vuoden aikajänteellä loistehontarve tulee pienemään. Uusiutuva sähkövetokalusto tuottaa myös korkeampia yliaaltoja suuntaajien kytkentätaajuuden kasvaessa, enemmän kuin vanhempi sähkövetokalusto. Sähkönsyöttöjärjestelmän impedanssi kasvaa taajuuden noustessa, josta seuraa että korkeammat taajuudet vaimenevat luonnostaan paremmin.

Loistehon ja yliaaltojen todellista määrää on tärkeä seurata tulevaisuudessa ja ainakin aika ajoin mitata, jotta vältetään liialliselta ylikompensoinnilta ja sen aiheuttamilta lisähäviöiltä. Mittauksilla voidaan todeta yliaaltojen määrä ja sitä kautta todellinen suodatuksen tarve.

Sähkövetokaluston yksittäisen yksikön tuottamat harmoniset yliaaltovirrat ovat aika pieniä ja niistä on määritetty sallitut arvot, joita ei saa ylittää. Yhtä aikaa syöttöaseman alueella liikkeellä oleva sähkövetokalusto vaikuttaa yliaaltovirtojen määrään. Nykyään käytössä on vielä runsaasti loistehoa kuluttavaa vanhempaa sähkövetokalustoa, joten kompensointitehoa tarvitaan vielä vuosia.

Mikäli loistehon tarve muuttuu nopeasti TSC eli tyristorihjattu kondensaattori voi tulla kyseeseen. Aktiivisuodattimet jotka poistavat yliaallot lähes kokonaan ja tuottavat tarvittavan loistehon voivat olla käyttökelpoisia yliaaltopitoisessa verkossa, jossa loistehon ja yliaaltojen määrä vaihtelee.

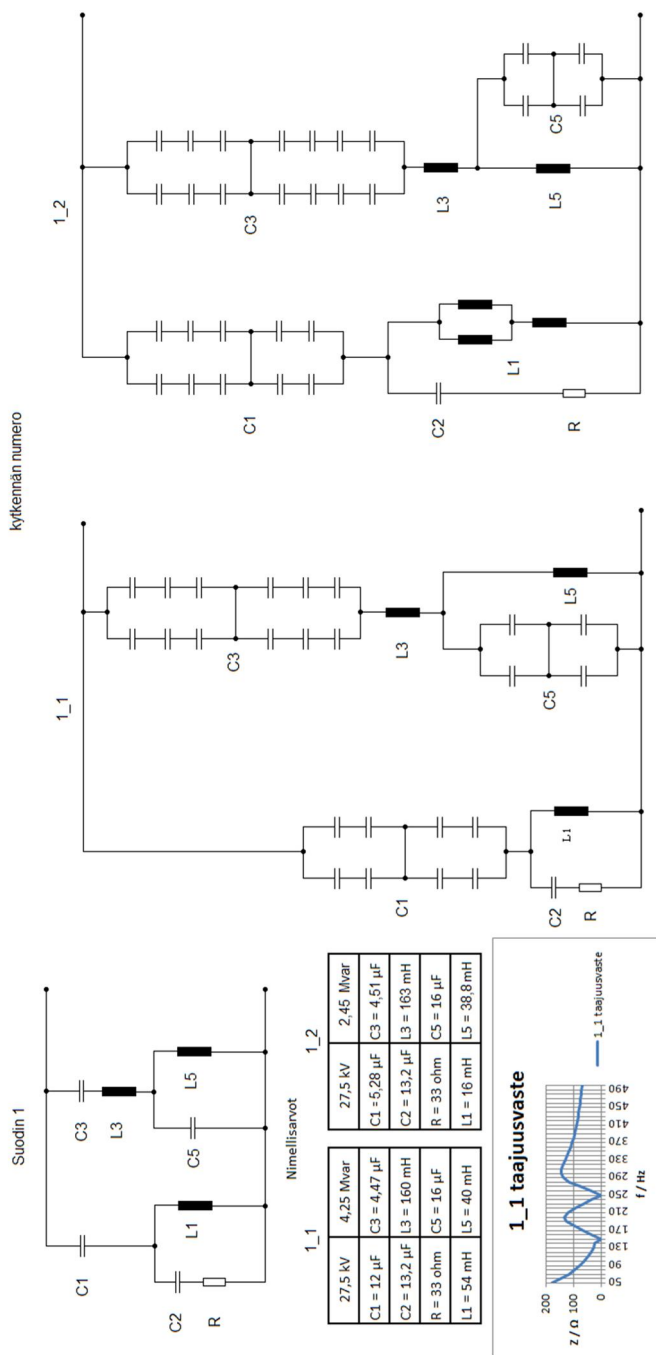
Syöttöasemilla olevien suodattimien ja niiden dokumenttien vastaavuuden saattaminen ajan tasalle on tärkeä jatkotoimenpide tälle työlle. Sähköturvallisuusmääräykset edellyttävät myös dokumenttien pitämistä todellista tilannetta vastaavana.

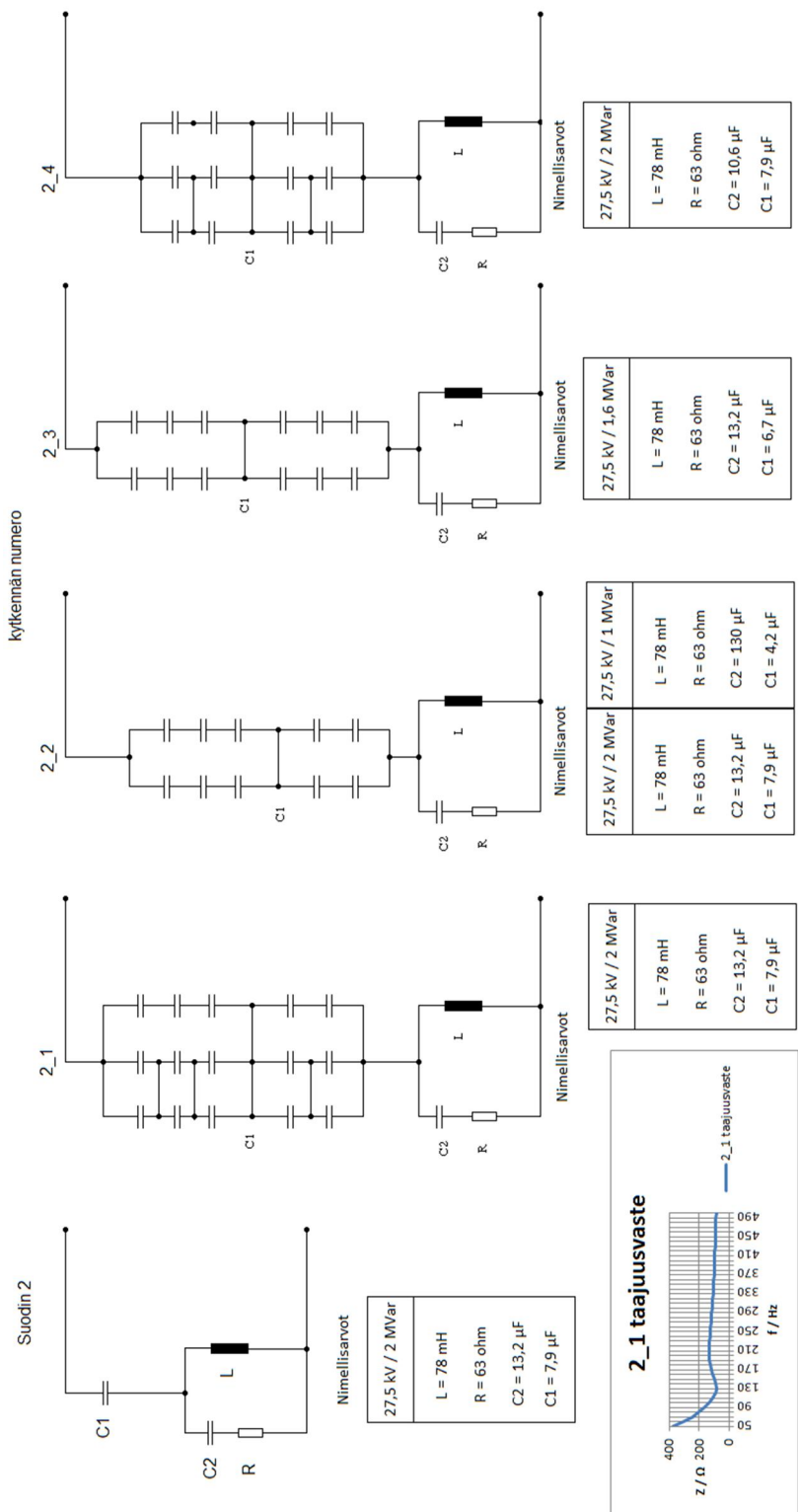
## Lähteet

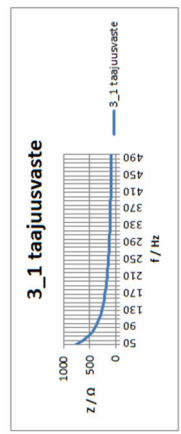
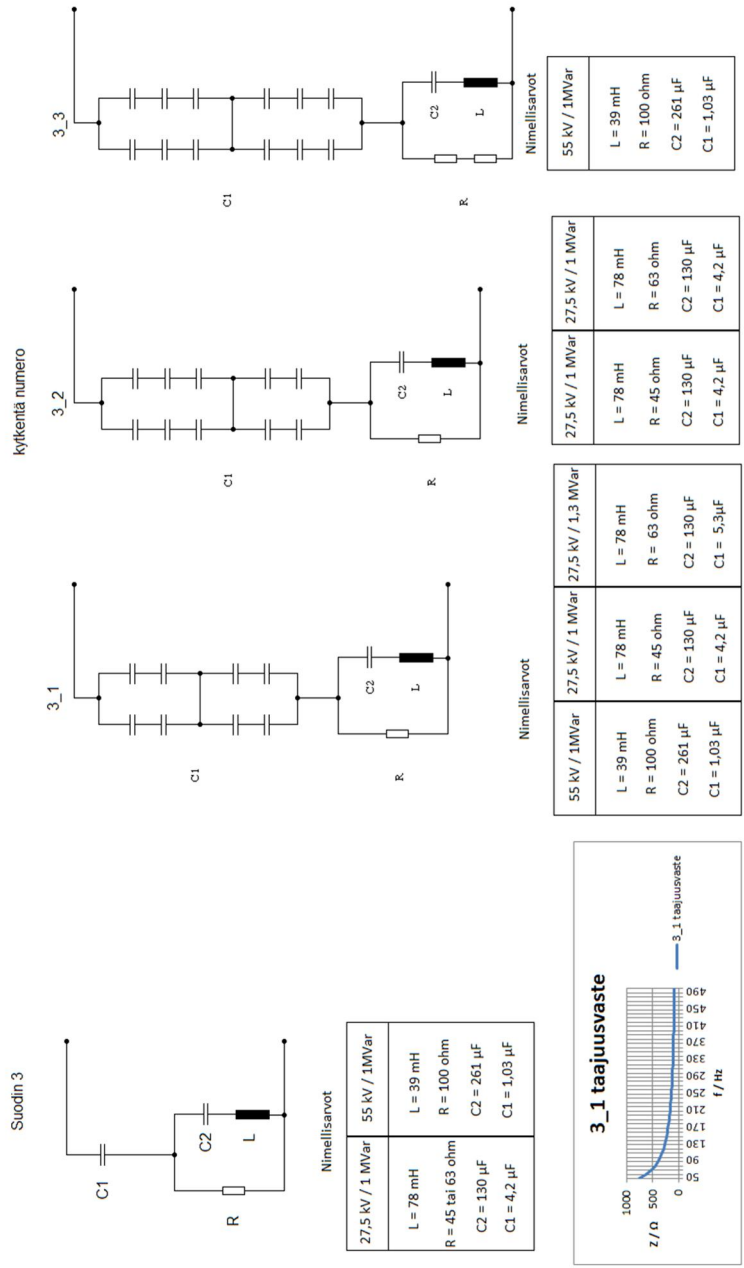
- 1 Pitkänen, Juhani (toim.). 2001. Tsaarin ajasta EU-kauteen, rautateiden tele- ja sähkötekniikkaa vuodesta 1860. Kaarina: Kaarinan Tasopaino Oy
- 2 Vitikka, Veli-Pekka (toim.). 2006. Yliaallot ja kompensointi Sähkö- ja Teleurakoitsija liitto STUL ry. Tampere: Tammer-paino Oy
- 3 Aura, Lauri & Tonteri, Antti, J. 1986. Sähkömiehen käsikirja 2 Sähkökoneet. Porvoo: WSOY
- 4 Standardi SFS-EN 50160. 2010. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuudet.
- 5 Fingrid 110kV sähkön laatu. Verkkodokumentti.  
[http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/110%20kV\\_verkon\\_sahkonlaatu.pdf](http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Liittyminen/110%20kV_verkon_sahkonlaatu.pdf) Luettu 6.11.2012.
- 6 Fingrid Loissähkön toimituksen ja loistehoreservin ylläpito. Verkkodokumentti.  
<http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Kantaverkkopalvelut/Liite%204%20Loiss%C3%A4hk%C3%B6n%20sovellusohje.pdf> Luettu 6.11.2012
- 7 Hietalahti, Lauri. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. Vantaa: Hansaprint
- 8 Nokia capacitors. 2005. Asennus- ja huolto-ohje kondensaattoriparistolle
- 9 Muurimäki, Mauno. 1974. Kenttäjohdot ja sähkörata. Viestimies Maaliskuu 1974
- 10 Pöyhönen, Otso W. (toim.).1979. Sähkötekniikan käsikirja 3. Tammi: Helsinki
- 11 Pöyhönen, Otso W. (toim.).1977. Sähkötekniikan käsikirja 2 Tammi: Helsinki
- 12 Ruppä, Erkki. 2001.Yliaallot 17. SAMK/TEKPO/Erkki Ruppä /16.9.2001. sala-bra.tp.samk.fi/er/siirto/yliaallot.doc Luettu 8.11.2012
- 13 Liikennevirasto. 2009. Filter for feeder stations of electrified lines
- 14 Liikennevirasto. 2012. Technical specification Filter of Oulunkylä feeder station

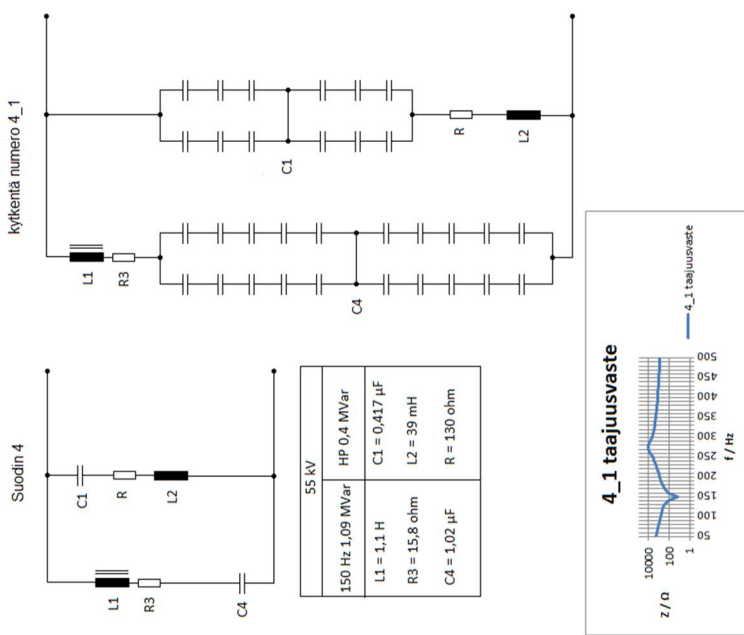
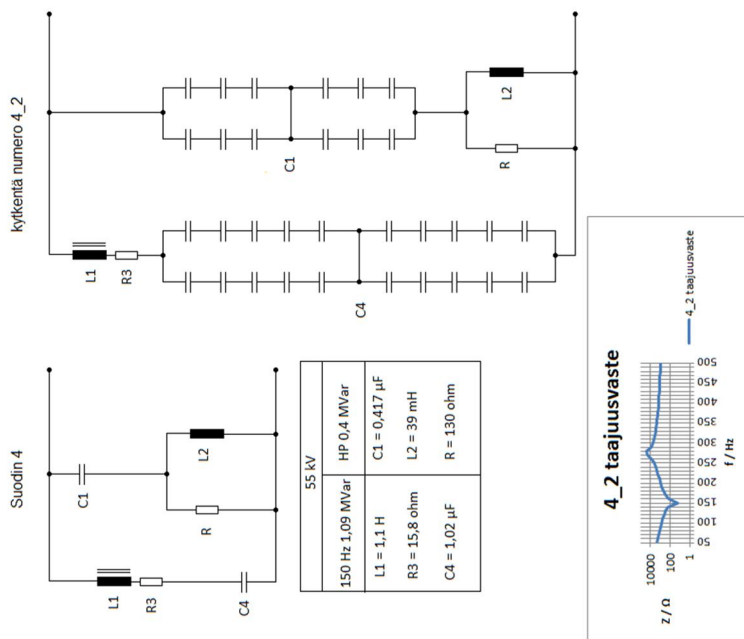
## Suodattimien numerojako

Suodattimien kytkentä ja numerojako.









## Taulukko ratajohtosuodattimista

## Taulukko syöttöasemien suodattimista.

	Nimi	Pääkaavio	Suodatti- men- sijoituspi- rustus	Suodatti- men- suojaus- kaavio	Suodatin 1	Kompen- Su1, MVar	Suodatin 2	Kompen- Su2, MVar	Lisätieto	Päämuun- taja1, teho MVA	Muuntaja1 kytketty vaiheisiin	Päämuun- taja2, teho MVA	Muuntaja2 kytketty vaiheisiin	Rataosa	Sähköis- tämisyvuosi
1	Alapua	2	2,1	2,4	2,4	2	2,4	2		7,5	L1, L3	7,5	L2, L3	Kok - Oul	1983
2	Armala	3,2	0	3,2	3,2	1	3,2	1		7,5	L1, L3	7,5	L1, L3	Kvl - Ple	1980
3	Arometsä	3,2	2,1	x	3,2	1	3,2	1		12,5	L1, L2	12,5	L1, L3	Ti - Sei	1975
4	Erästähti	3	3	x	3,1	1	3,2	1		7,5	L2, L3	7,5	L2, L3	Tre - Jy	1994
5	Eteläkangas	4	4	x	4	1,09+0,4				12,5	L1, L3	12,5		Oul - Roi	2004
6	Eurakoski	3	3	x	3,1	1			R=45Ω	7,5	L3, L2	7,5		Tre - Rma	1998
7	Haapaja	3	3	x	3	1				7,5	L1, L2	7,5		Sei - Vs	2011
8	Haarajoki	3	0	3	3,1	1				12,5	L3, L1	12,5		Kev - Hlt	2006
9	Halmepurolu	3	x	x	3,3	1				12,5	L2, L3	12,5		Oul - Kon	2006
10	Hanhisuo	3	3	x	3,1	1				7,5	L1, L2	7,5		Tru - Ti	2000
11	Hausjärvi	3,2	2,1	3,2	2,2	1	2,2	1		7,5	L3, L2	12,5	L1, L2	Rii - Kvl	1977
12	Heinipuro	3	x	x	3,3	1			TSC2x25	12,5	L1, L3	12,5		Kon - Vsu	2006
13	Hivineva	2	2,1	2,4	3,2	1	2,1	2	pm1SAM	7,5	L2, L3	7,5	L2, L1	Kok - Oul	1983
14	Hovinsaari	3,2	2,1	3,2	3,2	1				7,5	L1, L3	7,5		Kvl - Kot	1979
15	Huhdanneva	2,1	0	0	2,1					7,5	L1, L2	7,5	L1, L3	Sei - Kok	1981
16	Hulmi	3	3	x	3,1	1				7,5	L3, L2	7,5		Tru - Ti	2000
17	Ilmala	x	x	0	1,2		1	4,25		12,5	L2, L1	12,5	L2, L1	Hel - Kkn	1969
18	Isohenna	3	0	3	3	1				12,5	L1, L2	12,5		Kev - Hlt	2006
19	Jyrä	x	x	x	3,1	1				7,5	L1, L3	7,5		Tre - Rma	1998
20	Kaitakorpi	x	x	x	3,1	1				7,5	L3, L2	7,5		Tre - Rma	1998
21	Kailliovarasto	x	x	x	3,3	1				12,5	L1, L3	12,5		Oul - Kno	2006
22	Kenjätjärvi				3				rakenteilla	12,5				Roi - Kja	2013
23	Kilo								purettu					Hel - Kkn	1969
24	Kilteri	3,2	2,1	3,2	3,2	1				7,5	L2, L3	7,5		Hpl - Mrl	1975
25	Kivikumpu	4	4	x	4	1,09+0,4			2x25	12,5	L3, L2	12,5		Oul - Roi	2004
26	Kolava	3,2	2,1	3,2	3,2	1				12,5	L1, L2	7,5	L1, L3	Rii - Kvl	1977
27	Konvalta	3,2	2,1	3,2	3,2	1				7,5	L2, L3	7,5		Kvl - Ple	1980
28	Kuivala	2	2,1	2,4	2,4	2	3,2		pm2SAM	7,5	L2, L1	7,5	L3, L1	Kok - Oul	1983
29	Kukkola	2,3	2,1	x	2,3	1,6	2,3	1,6		7,5	L3, L2	7,5	L1, L2	Rii - Ti	1974
30	Kurkimäki	2	2,4	2,1	2,2	2	2,1	2		7,5	L3, L1	7,5	L3, L1	Ple - Ilm	1984
31	Kytömaa	2	2,2	2,2	2,2	2				12,5	L3, L1	12,5		Kev - Rii	1972
32	Käkela	3	3	x	3,1	1				7,5	L2, L3	7,5		Kr - Tru	1995
33	Kopskog	3	3	x	3,1	1				7,5	L1, L3	7,5		Kr - Tru	1995
34	Laikko	2	2,1	2,2	2,2	2				7,5	L1, L3	7,5		Ilma - Joe	1988
35	Lammipää	3,2	2,1	x	3,2	1	3,2			12,5	L1, L3	7,5	L2, L3	Ti - Sei	1975
36	Lauritsala	3,2	2,1	3,2	3,2	1	3,2	1		7,5	L3, L1	7,5	L3, L2	Lä - Ilma	1978
37	Laviamäki	3	3	x	3,1	1				7,5	L1, L2	7,5		Kr - Tru	1995
38	Leikola	3,2	2,1	3,2	3,2	1				7,5	L3, L1	7,5		Kvl - Ple	1980
39	Leppälähti	3	3	x	3,1	1				7,5	L3, L2	7,5		Jy - Ple	1995
40	Linnapälto	2,2	2,2	2,2	2,2		2,2	2		7,5	L3, L2	7,5	L3, L2	Kev - Sid	1990
41	Luumäki	3,2	2,1	3,2	3,2	1	3,2	1		12,5	L2, L1	7,5	L3, L1	Kvl - Vai	1978
42	Mankki	3,2,1	3,2,1	x	3,1	1	2,1	2		7,5	L2, L1	7,5	L2, L3	Hel - Kkn	1969
43	Marinkylä	3,2	2,1	3,2	3,2	1	3,2	1		7,5	L1, L3	7,5	L2, L3	Kvl - Kot	1979





