

JUHO REPONEN

Sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimen mitoitus



Juho Reponen

Sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimen mitoitus

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2013

Liikennevirasto

Helsinki 2013

Kannen kuva: Juho Reponen

Verkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-321-8

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 020 637 373

Juho Reponen: Sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimen mitoitus. Liikennevirasto, väylätekniikkaosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 20/2013. 41 sivua ja 3 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-321-8.

Asiasanat: kompensointi, yliaallot, ratajohtosuodatin

Tiivistelmä

Insinööriyössä selvitettiin millaisia ratajohtosuodattimia on käytössä sähköradoilla. Käytössä olevat sähköradan ratajohtosuodattimet kartoitettiin kytkentäkaavioiden perusteella ja yksittäisillä käynneillä syöttöasemilla.

Tehoelektroniikkaa käyttävä sähkövetokalusto aiheuttaa yliaaltoja ja yliaaltojen rajoittamista suodattimilla on esitetty laskuesimerkeillä. Työssä havainnollistettiin, että kompensointi vaatii yliaaltoja tuottavien kuormitusten yhteydessä suodattimen toimiakseen oikein.

Työssä on aluksi selostettu Suomessa käytössä olevat sähköradan sähköistysjärjestelmät. Yliaaltovirtoja, joita verkkoyhtiöt sallivat liittymispisteissään, on esitelty taulukoissa.

Suurjännitteellä käytettävien yliaaltosuodattimien komponentteja ja rakennetta on työssä esitelty lyhyesti.

Työn tuloksena syntyi selvitys sähköradan syöttöasemilla käytössä olevista ratajohtosuodattimista. Ratajohtosuodattimista laadittiin taulukko suodatintyypeittäin. Selvitysten yhteydessä todettiin dokumenttien päivitystarve.

Juho Reponen: Dimensionering av övertonsfilter för inmatningsstationer i det elektriska bannätet. Trafikverket, Infrastruktortechnik. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 20/2013. 41 sidor och 3 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-321-8.

Sammandrag

I ingenjörsarbetet utreddes hurdana övertonsfilter som används i det elektriska bannätet. De använda övertonsfiltren kartlades utifrån kopplingsscheman och enskilda besök på inmatningsstationer.

Eldriven materiel som utnyttjar effektelektronik skapar övertoner, och dämpning av dem med filter tas upp i kalkylexemplen. Arbetet åskådliggjorde att kompensering i anslutning till belastningar som skapar övertoner kräver filter för att fungera korrekt.

Arbetet går först igenom de elsystem som används i bannätet i Finland. Övertonsflöden som nätbolagen tillåter i sina anslutningspunkter presenteras i tabellerna.

Komponenterna i och strukturen hos övertonsfilter som används med högspänning beskrivs i korthet.

Arbetet resulterade i en utredning om de övertonsfilter som används på inmatningsstationerna i det elektriska bannätet. En tabell om övertonsfiltren enligt filtertyp skapades. I samband med utredningen konstaterades att dokumenten bör uppdateras.

Juho Reponen: Electric railway substation harmonic filter ratings. Finnish Transport Agency, Infrastructure technology. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 20/2013. 41 pages and 3 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-321-8.

Summary

This engineering thesis surveys the types of contact line filters in use on electric railways in Finland. The electric railway contact line filters were mapped on the basis of connection diagrams and, in some cases, visits to the substations.

Electric traction stock that employs power electronics causes harmonic waves. In this study, the limiting of harmonics by filters is illustrated by sample calculations. The study demonstrates that when loads generate harmonics, their compensation requires filters in order to work correctly.

The electrification systems in use on the electric railways in Finland are first described, and then the harmonic currents allowed by the network companies in their service points are presented in tables.

The components and structure of high-voltage harmonic filters are also briefly explained.

A mapping of contact line filters in use at electric railway substations is provided with a table of contact line filters by type. During the mapping stage, a need to update the documentation was identified.

Esipuhe

Työn tavoitteena oli saada sähköradan syöttöasemien yliaaltosuodattimista olevat tiedot kootuksi yhteen julkaisuun mahdollisimman kattavasti.

Työssä on kartoitettu käytettävissä oleva dokumentaatio ja pyritty tarkistamaan sen ajantasaisuus. Suodattimet on jaettu työssä kytkennän perusteella neljään eri päätyyppiin, joista on työssä kytkennät sekä taulukko ja kartta.

Työssä on käsitelty myös kompensoinnin perusteita ja haasteita.

Työn tilaajana toimi Juha-Matti Vilppo Liikennevirastosta ja työ tilattiin Rejlers Oy:ltä oppilastyönä, jossa ohjaajana toimi Terhi Väre. Metropolia ammattikorkeakoulusta työn ohjaajana toimi Arja Ristola. Raportin laatija insinööriopiskelija Juho Reponen työskenteli Rejlers Oy:llä määräaikaisena työntekijänä työn ajan. Kustannuksista vastasivat Liikennevirasto ja Rejlers Oy.

Helsingissä kesäkuussa 2013

Liikennevirasto
Väylätekniikkaosasto

Sisällys

LYHENTEET	8
1 JOHDANTO	9
2 SUOMESSA KÄYTÖSSÄ OLEVAT SÄHKÖRADAN SÄHKÖISTYJSÄRJESTELMÄT	10
2.1 1x 25 kV:n järjestelmä	10
2.2 2x25 kV:n järjestelmä	12
2.3 1x25 kV:n järjestelmästä 2x25:n kV järjestelmäksi	13
2.4 Syöttöasemat	13
3 LOISSÄHKÖ	16
4 YLIAALLOT JA HÄIRIÖVAIKUTUKSET	17
4.1 Yliaallot	17
4.2 Häiriövaikutukset	18
5 YLIAALTOJEN AIHEUTTAJAT	19
6 SÄHKÖVETOKALUSTO	21
7 VERKKOYHTIÖN VAATIMUKSET JA RAJOITUKSET	23
8 LOISTEHON KOMPENSOINTI JA YLIAALTOJEN SUODATUS	26
8.1 Kuristimet ja kondensaattorit	26
8.1.1 Kuristimet	26
8.1.2 Kondensaattorit	26
8.2 Loistehon kompensointi	27
8.3 Yliaaltojen suodatus	29
8.4 Loistehon kompensointi ja yliaaltojensuodatus	30
9 RATAJOHTOSUODATTIMET	37
10 LOPUKSI	44
LÄHTEET	45
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	megavolttiampeeri
Mvar	megavari
P	pätöteho
Q	loisteho
Q _c	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. Verkkoyhtiöiden 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

Rautateillä 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.

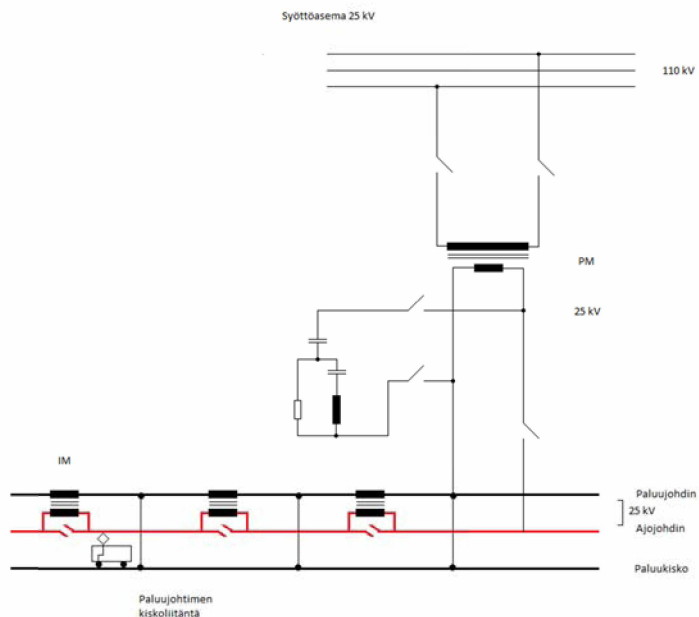
Suomessa sähköradoilla käytetään kahta eri sähköistysjärjestelmää, 1x25 kV:n ja 2x25 kV:n. Molemmat järjestelmät toteutetaan muuntajalla 110 kV:n kantaverkosta tai 110 kV:n alueverkosta.

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 sijaitsee Espoon Kilossa, jossa toimi myös rakennusaikaisen työmaan tukikohta. Kilon syöttöasema purettiin 1990-luvun alkupuolella, kun Mankin syöttöasema valmistui.

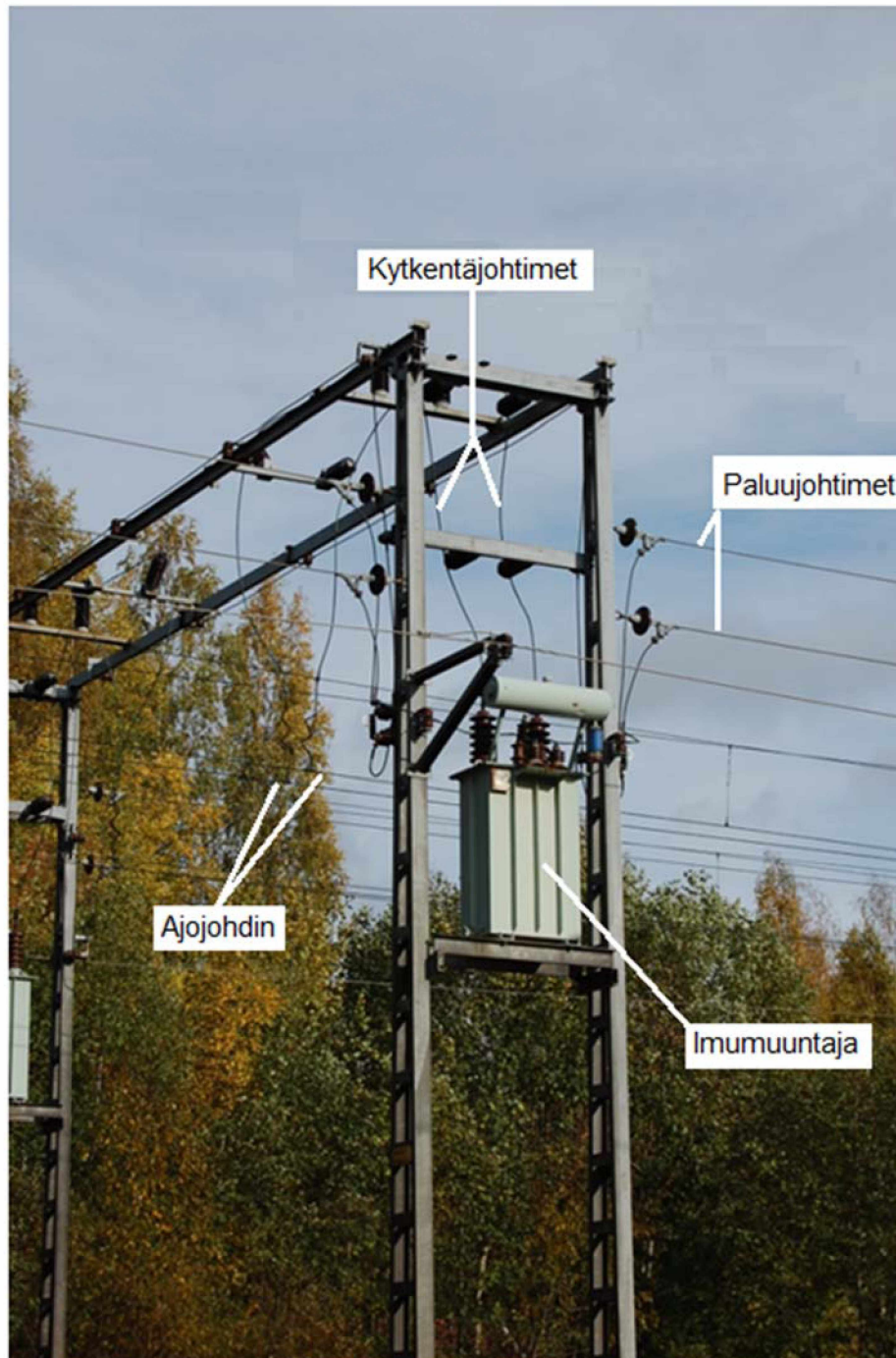
2.1 1x 25 kV:n järjestelmä

Suomen yleisin käytössä oleva sähköistysjärjestelmä on 1x25 kV:n järjestelmä, joka ulottuu kahta poikkeusta lukuun ottamatta Oulun, Iisalmen ja Joensuu tasalle. 1x25 kV:n järjestelmässä syöttöaseman päämuuntajan 110/25 kV:n toision toinen napa kytetään paluujohtimeen ja toinen napa ajojohtimeen katkaisijan kautta. Kuvassa 1 on esitetty 1x25 kV:n järjestelmän kytkentä.



Kuva 1. 1x25 kV:n järjestelmän kaavio

Suomessa maaperän ominaisvastus on suhteellisen suuri ja siksi junan paluuvirta pyrkii leviämään paluukiskosta laajalle alueelle. 1x25 kV:n järjestelmässä käytetään imumuuntajia paluuvirran pitämiseksi paluujohtimessa ja näin vähennetään maan kautta kulkevia virtoja. Imumuuntajat kytketään sarjaan paluujohtimen ja ajojohtimen kanssa. Kuvassa 2 on valokuva imumuuntajasta. Paluujohdin kytketään kiskoon imumuuntajien puolivälissä.[11,s.402]



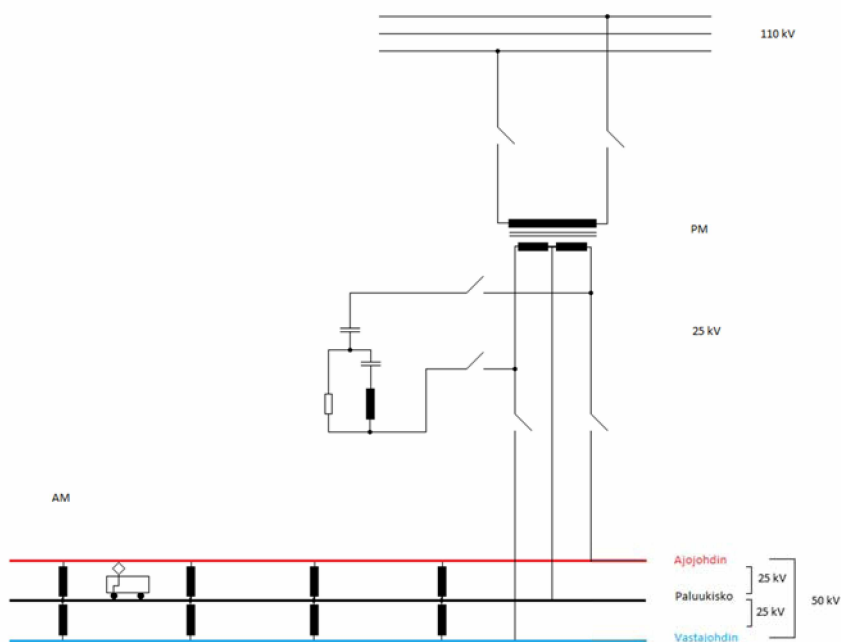
Kuva 2. Imumuuntaja. Paluujohtimet on päätetty pylvääseen ja ajojohtin on tuotu muuntajaan kytkentäjohtimilla.

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.

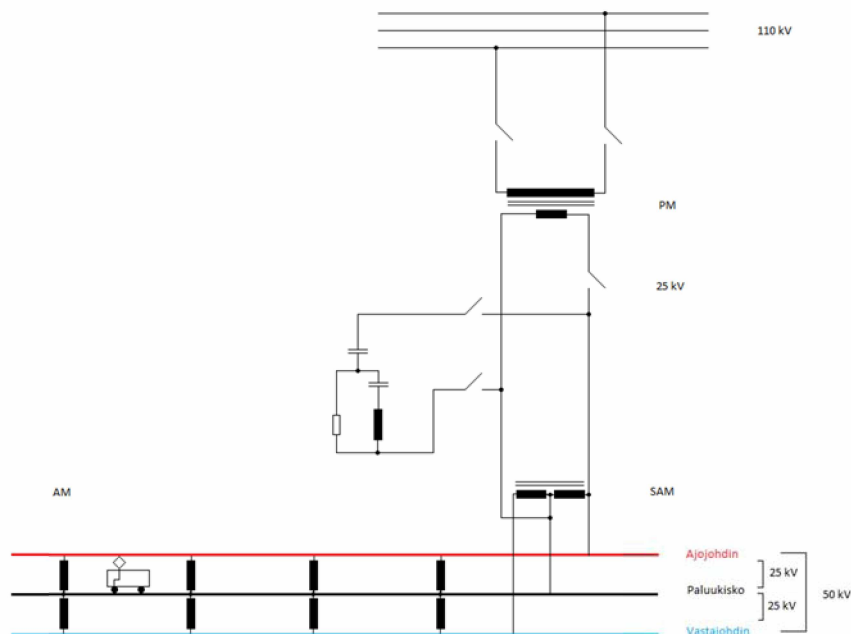
2x25 kV:n järjestelmässä päämuuntajan toisiossa on kaksi 25:n kV käämiä kytketty sarjaan, joiden keskipiste on kytketty paluukiskoon. Toinen käämi on tuotu ajojohtimeen ja toinen vastajohtimeen. Myös 2x25 kV:n järjestelmässä osa paluuvirrasta pyrkii kulkemaan maan kautta ja tämän rajoittamiseksi järjestelmässä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

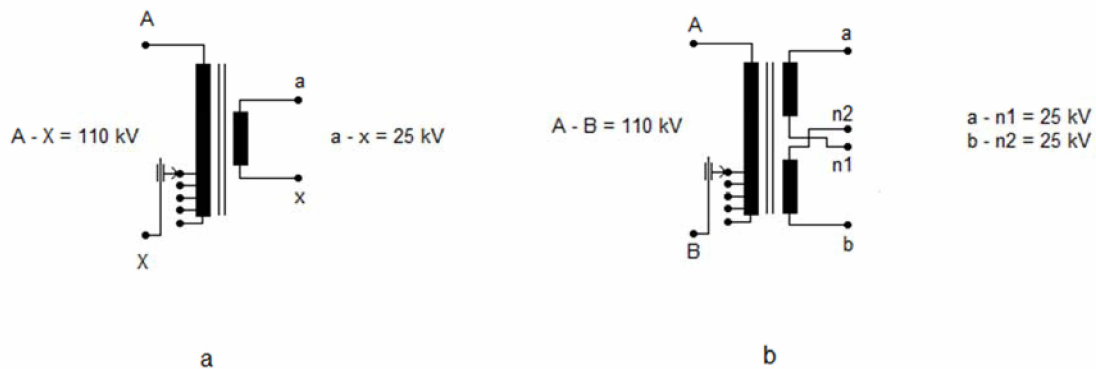
Jos 1x25 kV:n syöttöasema pitää muuttaa 2x25 kV:n syöttöasemaksi, se voidaan toteuttaa säästömuuntajalla, jossa keskipiste kytketään paluukiskoon, toinen puoli 25 kV:n ajojohtimeen ja toinen puoli vastajohtimeen. Suomessa Hirvinevan, Kuivalan ja Parkatin syöttöasemat on toteutettu tällä järjestelyllä,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



Kuva 4. 2x25 kV:n järjestelmä toteutettuna syöttöasemasäästömuuntajalla

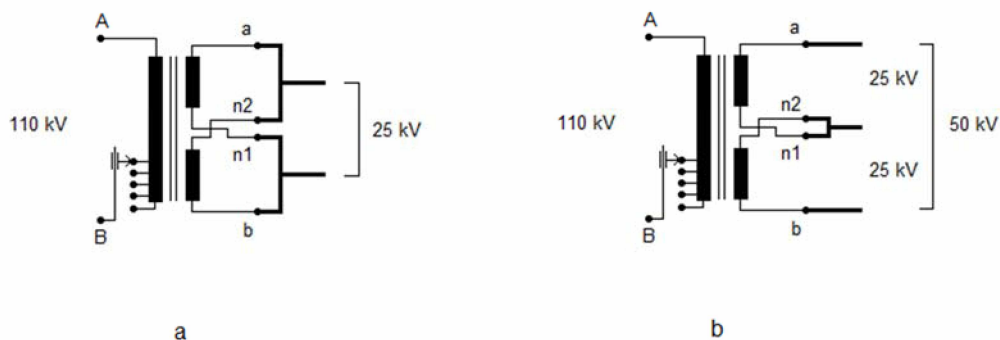
2.4 Syöttöasemat

Syöttöasemalla muutetaan kanta- ja/tai alueverkon 110 kV:n jännite sähköradan tarvitsemaksi 25 kV:n (1x25 kV:n järjestelmä) tai 50 kV:n (2x25 kV:n järjestelmä) jännitteeksi päämuuntajalla, joka on yksivaiheinen, tehon tarpeesta riippuen 7,5 MVA tai 12,5 MVA suurtehomuuntaja. Muuntajassa on yläjännitepuolella käämikytkin, jolla voidaan säätää muuntosuhdetta. Käämikytkin on muuntajissa yläjännitepuolella koska pienempiä virtoja on helpompi kytkeä ja johtimien poikkipinnat ovat pienempiä. Aiemmin, kun käytössä oli vain 25 kV:n järjestelmä, niin muuntajissa oli tosiossa vain yksi 25 kV:n käämi. Nykyisin kaikki uudet muuntajat varustetaan kahdella 25 kV:n toisiokäämillä, joka mahdollistaa myös 2x25 kV:n järjestelmän käytön. Kuvassa 5 on päämuuntajien periaatteellinen kytkentä ja käämikytkimen periaate.



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.

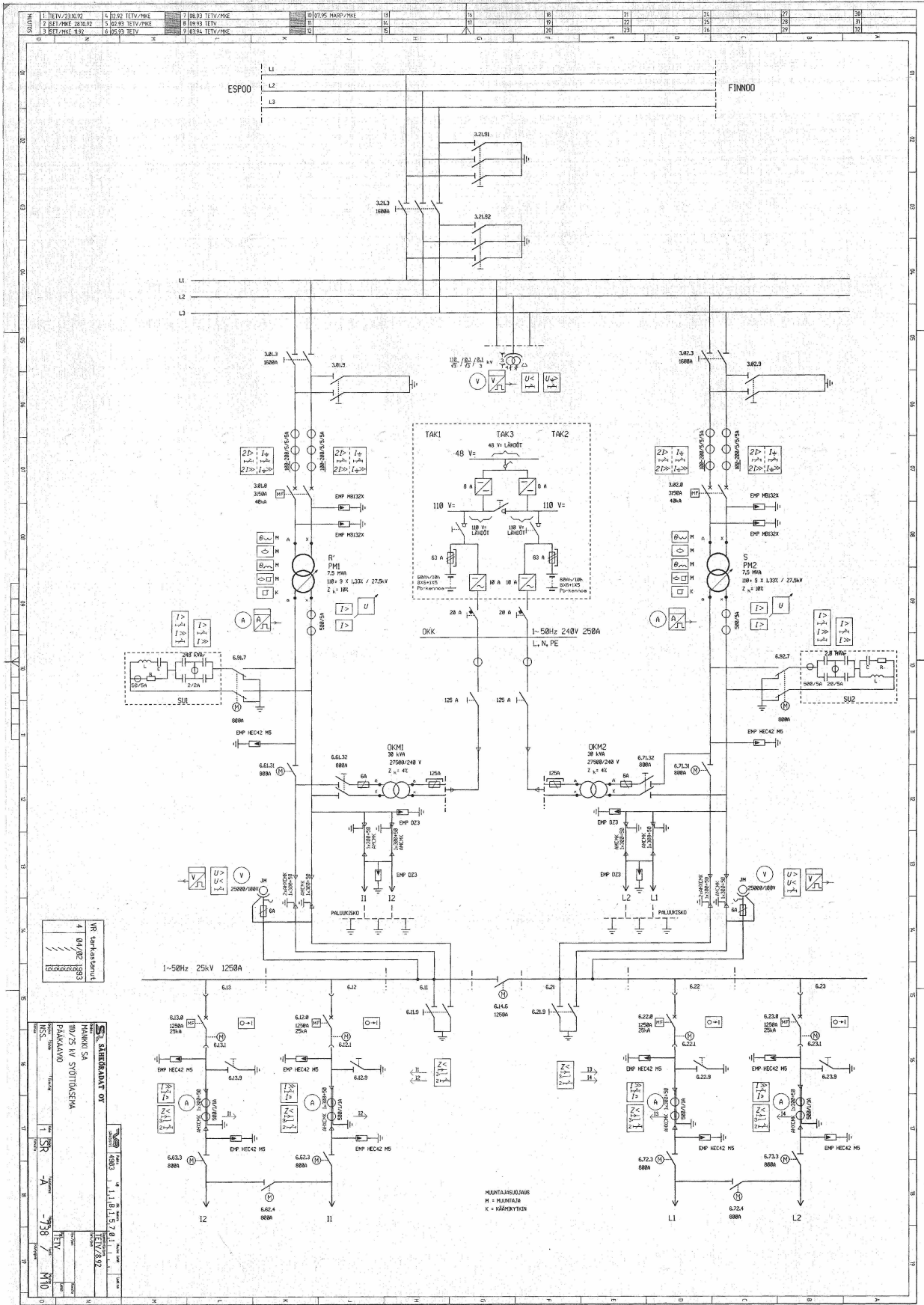


Kuva 6. a) päämuuntajan kytkentä 1x25 kV:n järjestelmään ja b) kytkentä 2x25 kV:n järjestelmään.

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

Suojareleistus 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 akustoineen, josta syötetään suojareleitä, 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.



Kuva 7. Esimerkki syöttöaseman pääkaaviosta (Mankki)

3 Loissähkö

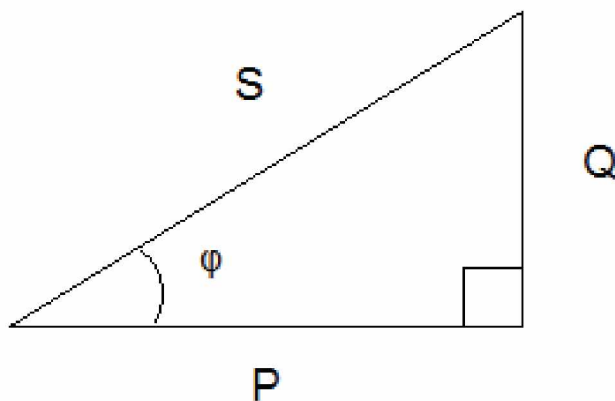
Sähköteho P on jännite U kerrottuna virralla I ($P=U \cdot I$). Tämä pätee tasasähköllä ja vaihtosähköllä resistiivisellä kuormalla sinimuotoisella jännitteellä. Vaihtosähköllä teho ilmoitetaan näennäistehona S , pätöteho P ja loisteho Q . Nämä tehot lasketaan seuraavasti:

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

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

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

Kaavassa φ (fi) 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 φ 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.

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

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

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

Kaavassa

P = pätöteho

I = virta

U = jännite

R = resistanssi

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

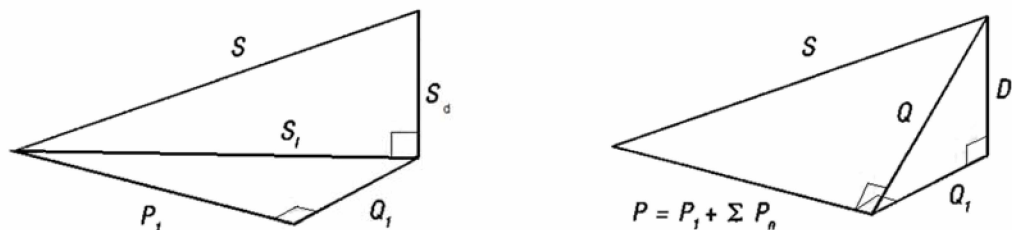
Loisteho pyritään kompensoimaan lähellä kulutuspaistettä. Yleensä $\cos \varphi$ pyritään saamaan lähelle 1:tä. Verkkoyhtiöt perivät kulutetusta loistehosta yleensä suurkuluttajilta maksua. Yleensä ylikompensointi eli loistehon tuottaminen verkkoon ei ole sallittua.

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 säröytymisen. 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 määrittely saattaa vaihdella lähteestä riippuen. Kuvassa 9 on osoitinkuvin 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 yliaaltoloistehoja.

Yliaaltojen haittoja ovat mm. häviöiden kasvu, mittarien virhenäyttämät, automaatio-laitteiden 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.

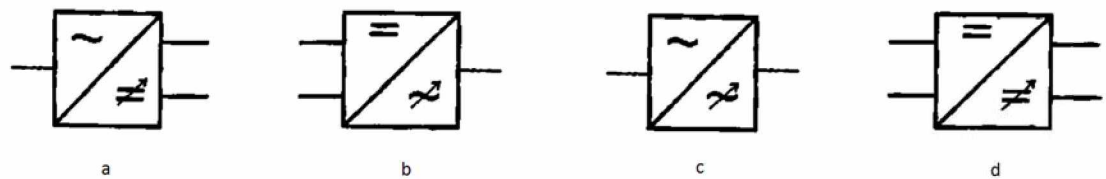
Maan sähkönjohtavuus on Suomessa huono ja vaikka käytetään imu- ja säästömuuntajia virran paluureitti voi vaihdella ja virrasta voi 15–20 % kulkeutua maan kautta [9,s.6]. Kapasitiivinen kytkeytyminen on vähäistä, koska sähkökenttä vaikuttaa lähinnä ajojohdon ja kiskojen välillä ja vaimenee nopeasti etäisyyden 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 kiskoliitettä 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 peruskytkentöjä. 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].



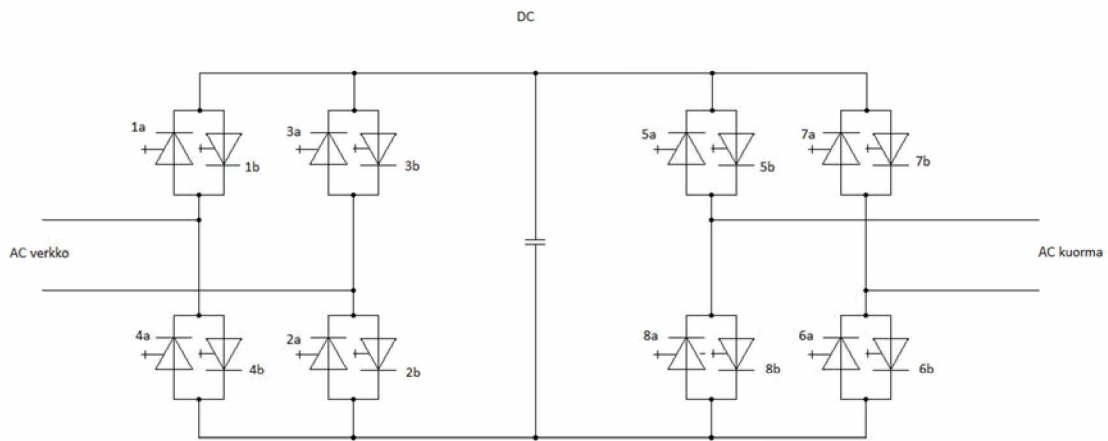
Kuva 10. a) tasasuuntaaja, b) vaihtosuuntaaja, c) toistosuuntaaja (vaihtosähkö) ja d) toistosuuntaaja (tasasähkö).

Suuntaajissa käytettävät komponentit ovat yleensä diodi, tyristori ja transistori.

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

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 tyristoreilla. 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 tyristöreilla ja diodeilla tehdyt tasasähkökäytöt aiheuttavat paljon yliaaltovirtoja ja tarvitsevat loistehoa toimiakseen. Nykyisin käytetään täysin ohjattuja suuntaajia ja vaihtosähkömoottoreita. Täysin ohjatuilla suuntaajan vastarinnankytketyillä verkkosilloilla pystytään tehokerroin asettelemaan hyvin lähelle yhtä ja syöttämään mahdollista jarrutustehoa verkkoon. Jarrutustehoa verkkoon syöttäessä tarvitaan kuitenkin suodatusta virran ja jännitteen pitämiseksi sinimuotoisena.

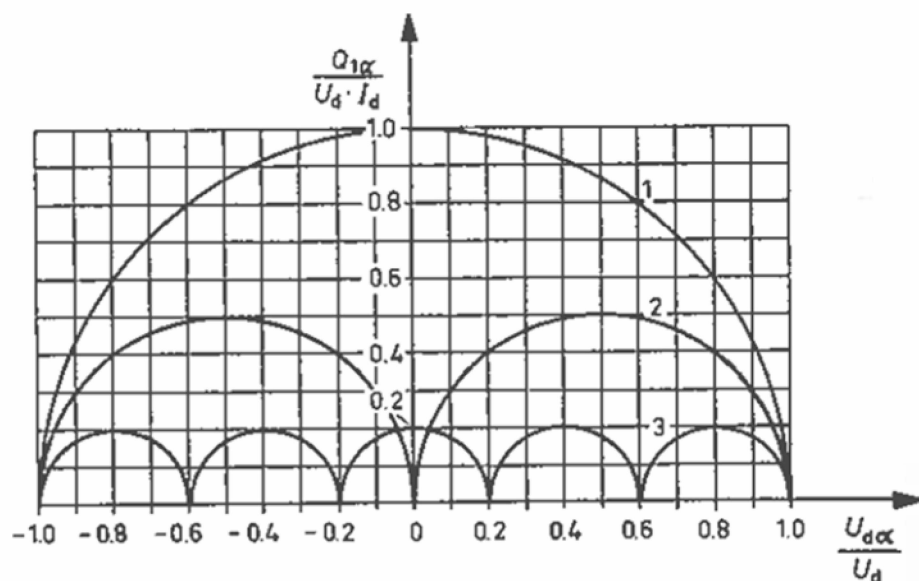
6 Sähkövetokalusto

Rautateillä käytettävän sähkövetokaluston vetomoottoreiden tehoa säädetään erilaisilla suuntaajilla. Tasasähkökäyttöillä tehonsäätö tehdään jännitettä muuttamalla ja vaihtosähkökäyttöillä muuttamalla jännitettä ja taajuutta. Suuntaajat ovat epälineaarisia kuormia, joista aiheutuu yliaaltovirtoja.

Vetokaluston suuntaajat tarvitsevat hyvälaatuisen jännitteen toimiakseen oikein. Rautateiden 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.

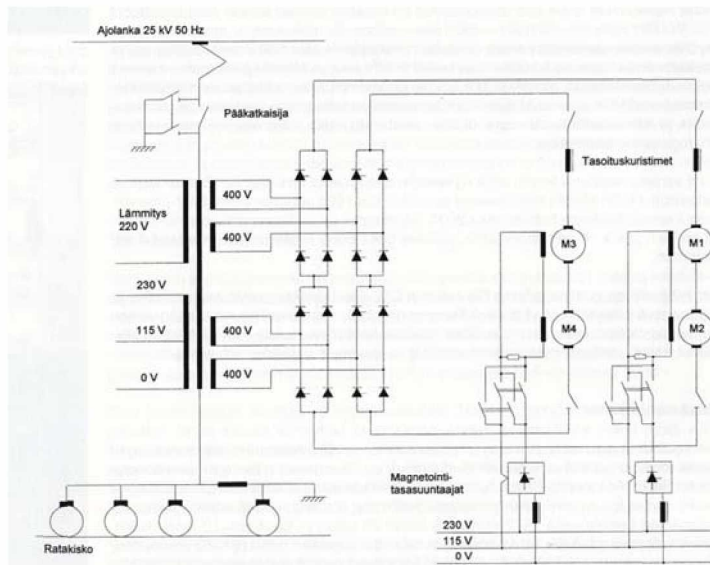
Kuvassa 12 on esitetty ohjausloistehon tarve kun suuntaajia on 1, 2 tai 3 kytkettynä sarjaan, Y-akselilla on ohjausloistehontarve. Havaitaan että sarjaan kytkentä pienentää loistehon tarvetta [10,s.357–358].

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 kompensointikondensaattorissa.

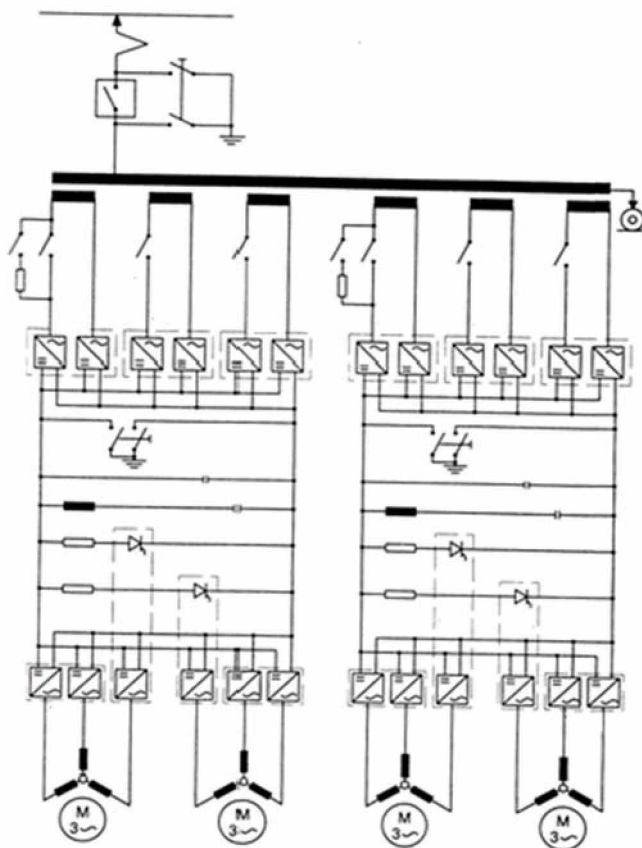


Kuva 12. Ohjausloisteho kytkettäessä suuntaajia sarjaan (1, 2 ja 3 ovat sarjassa olevien suuntaajien määrä) [10, s.358]

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 kytkinkomponenttina 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.

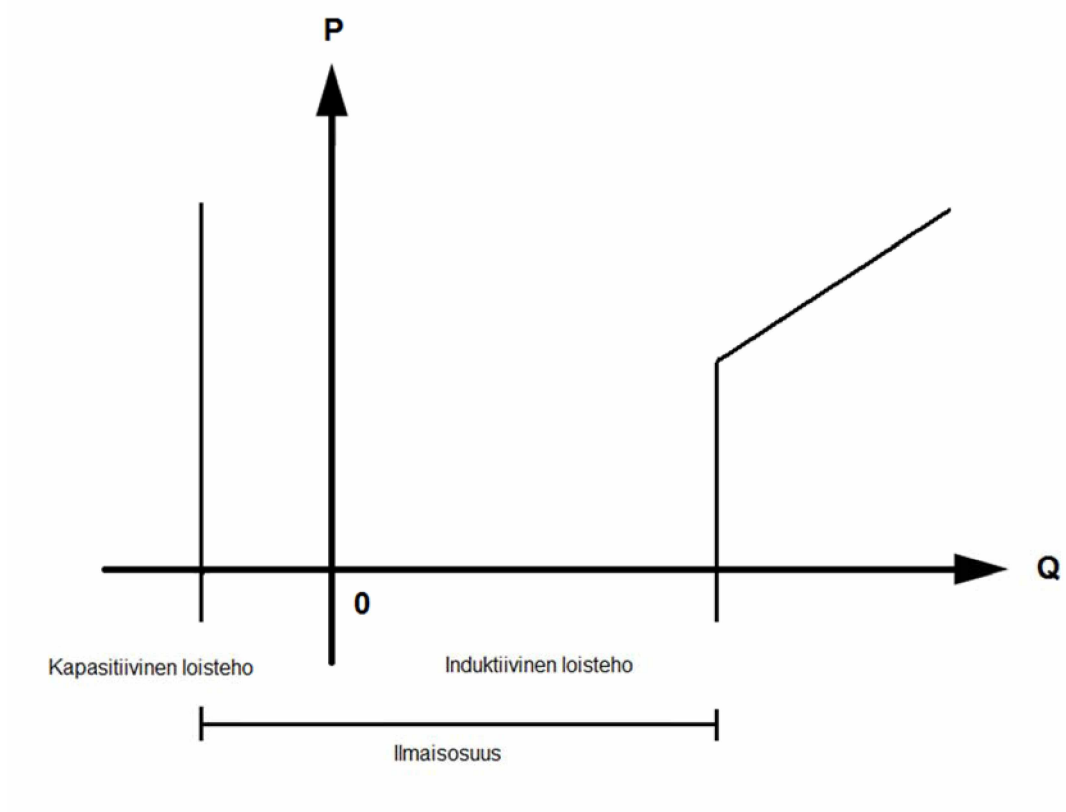
Taulukko 2. Fingridin verkkoon liittyjille sallitut harmoniset yliaaltojännitteet

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 rautasydämissä. Rautasydämissä kuristimia käytetään paikoissa, joissa jännite pysyy lähes vakiona, koska rautasydämissen kuristimen induktanssi riippuu jännitteestä rautasydämen kyllästymisen vuoksi. Toisaalta sillä saadaan suurempi induktanssi kuin ilmasydämisellä kuristimella. Ilmasydämiset kuristimet ovat jännitteestä ja virrasta riippumattomia [3,s.134,138]. Kuristimen nimellivirta määritellään ekvivalenttivirtana eri yliaaltojen virroista, siten että se vastaa sellaista perustaajuista 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

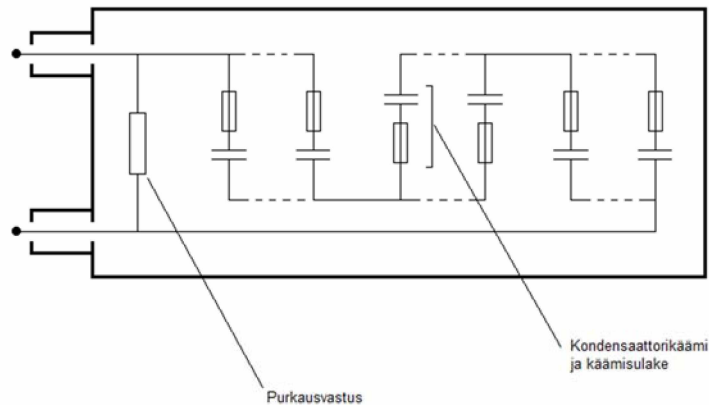
R_n = kuristimen vaihtovirtaresistanssi ko. harmonisella taajuudella

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 kytkettynä 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.



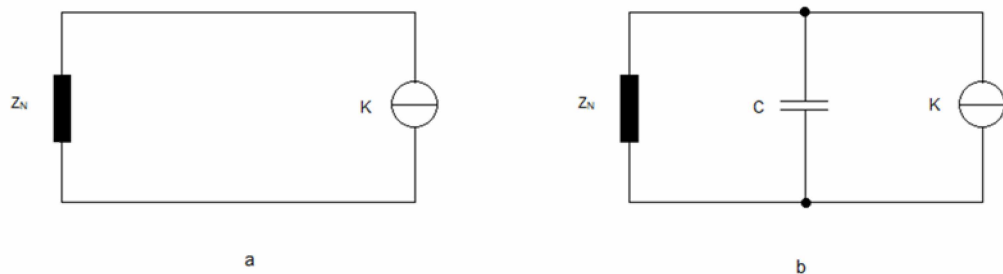
Kuva 16. Kaksinapaisesti eristetyin suurjännitekondensaattorin rakenne

8.2 Loistehon kompensointi

Kompensoinnissa pyritään tuottamaan tarvittava loisteho mahdollisimman lähellä kulutusta, jotta vältetään siirtomatkoilta. Koska teho on $P = R \cdot I^2$, Loisvirta kasvattaa myös häviötä.

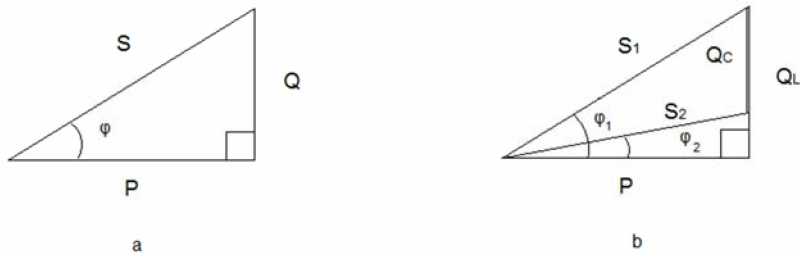
Perinteisillä moottorikäyttöillä kuormitus on induktiivinen, joten tarvittava loisteho voidaan tuottaa rinnakkaiskondensaattoreilla. Kapasitiivista loistehoa tuottavat yleensä vain kevyessä kuormassa olevat suurjännitteiset 220 kV ja 400 kV johdot, joita kompensoidaan reaktoreilla eli kuristimilla.

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



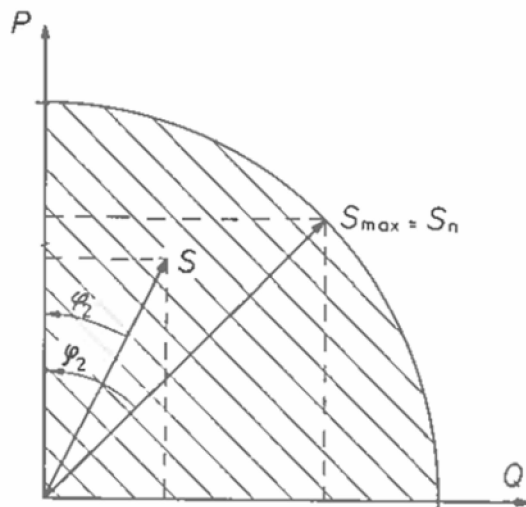
Kuva 17. Z_N on syöttävän verkon induktanssi, K on kompensoitava kuormitus ja C on kompensointikondensaattori

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 näennäisteho 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:

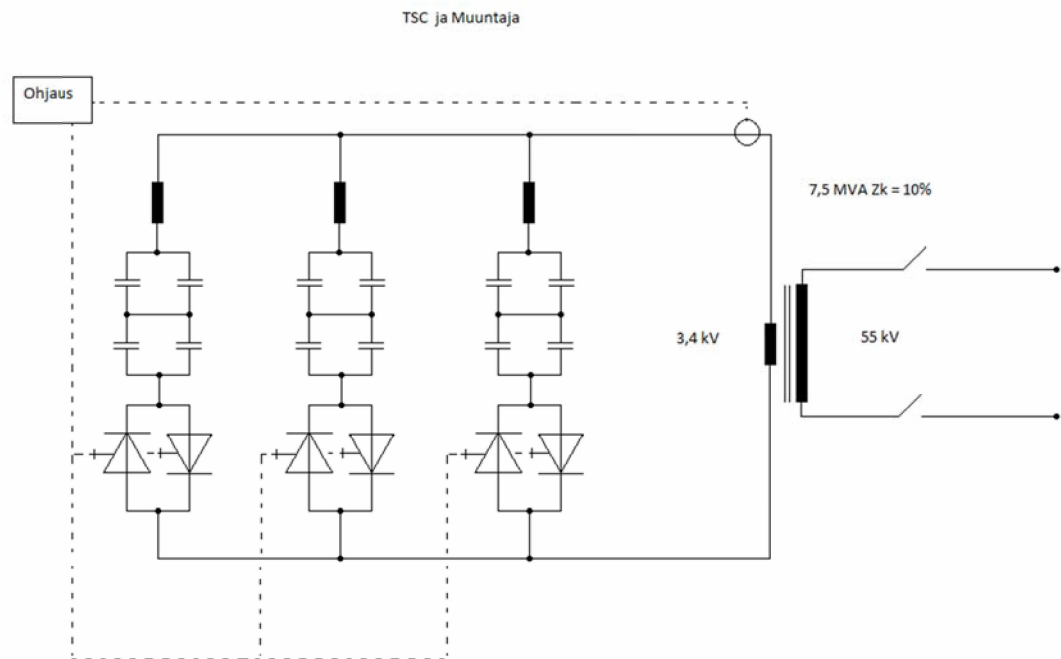
$$Q_C = \frac{U^2}{X_C} \quad (9)$$

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 kompensattoria, jolla kytkentä onnistuu nopeasti ja lähes ilman kytkentäpiikkiä. Laitteistosta riippuen myös portaaton loistehon säätö on mahdollista. Kuvassa 20 on esimerkki tyristoreilla ohjatusta kompensattorista.



Kuva 20. Tyristorikytketty kompensattori 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.

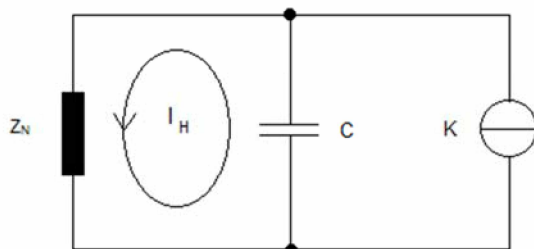
8.4 Loistehon kompensointi ja yliaaltojen-suodatus

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

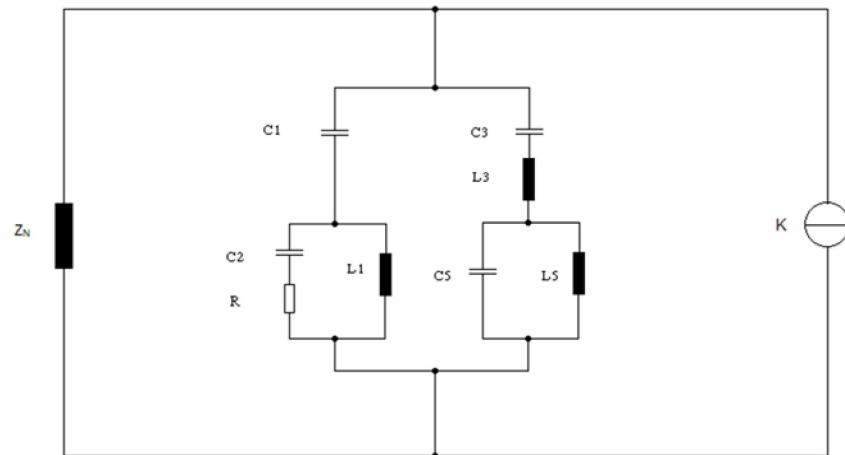
$7 \Rightarrow 2479,3$ kVar

$9 \Rightarrow 1499,8$ kVar

$11 \Rightarrow 1004,0$ kVar

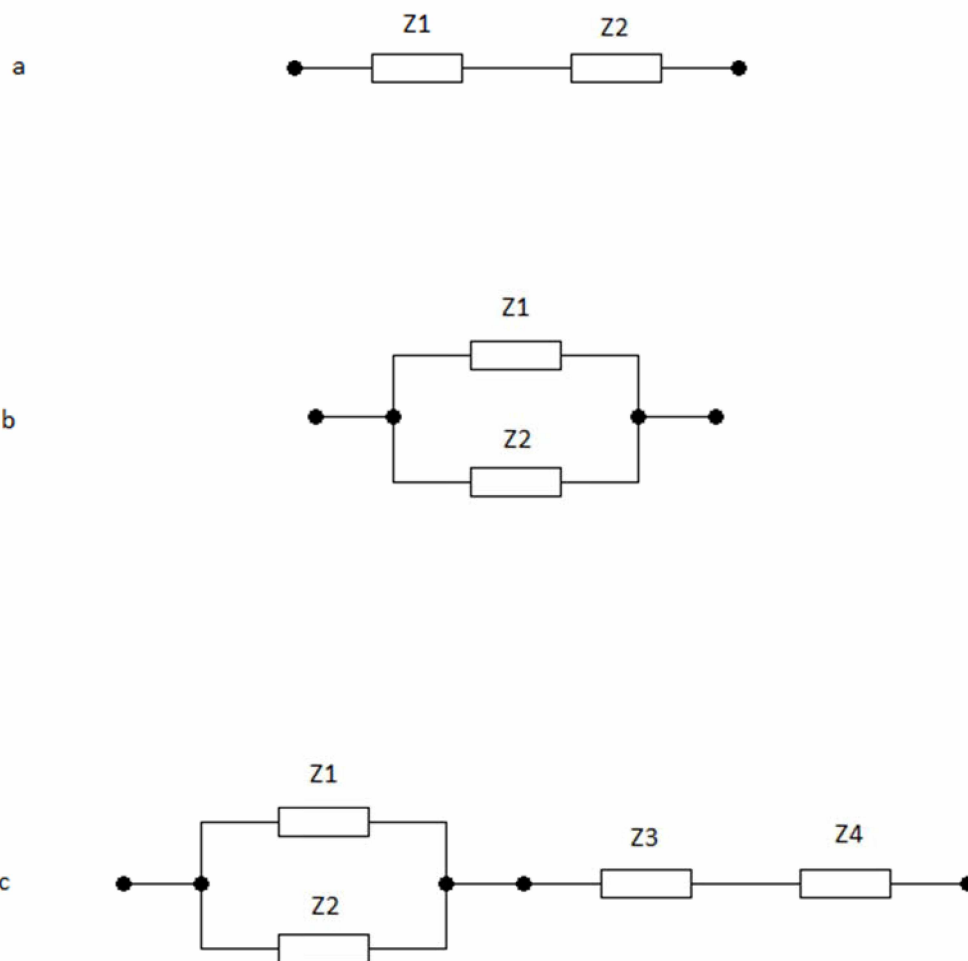
Näillä kompensointitehoilla rinnakkaisresonanssi verkon induktanssin ja kompensointikondensaattori kanssa on mahdollinen [12,s.16–17]. Rinnakkaisresonanssissa yliaallot vahvistuvat ja verkon jännite säröytyy voimakkaasti. Resonanssi voidaan estää estokelaparistolla tai yliaaltosuodattimella.

Kuvassa 22 on sijaiskytkentä suodattimen kytkeytymisestä verkon ja kuorman rinnalle. Kuvassa on suodatin, jossa on laajakaistainen ylipäästösuodatin $C_1 = 12\mu F$, $C_2 = 13,2\mu F$, $R = 33\Omega$, $L_1 = 54$ mH ja 3. ja 5. yliaallolle viritetty, $C_3 = 4,47\mu F$, $L_3 = 160$ mH, $C_5 = 16\mu F$ ja $L_5 = 40$ 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

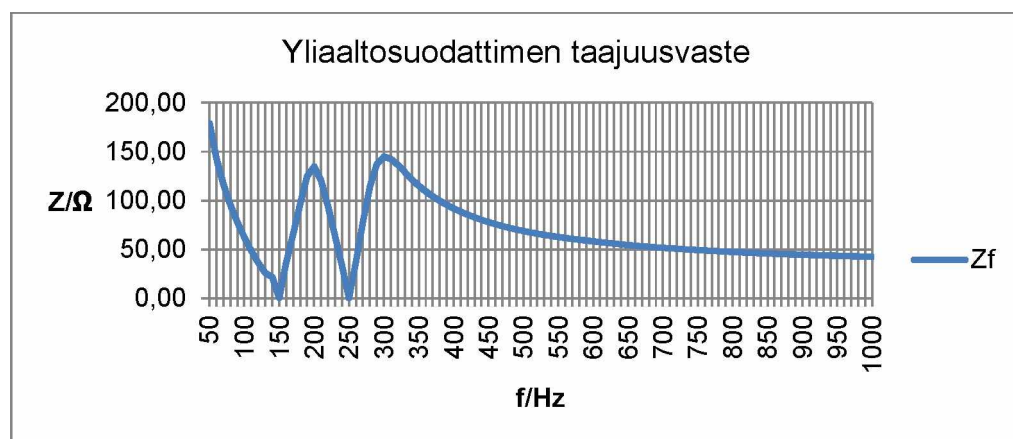
j = imaginääriyksikkö

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

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

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

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

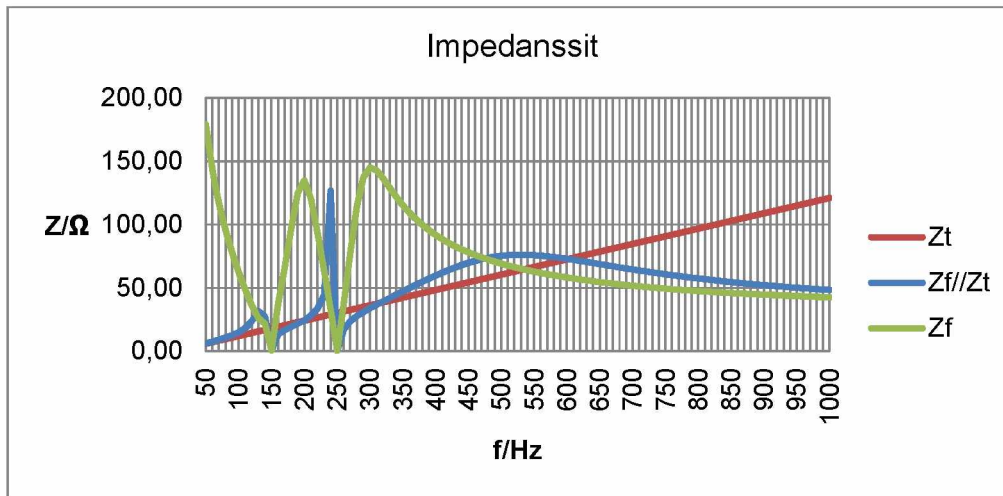


Kuva 24. Kuvassa 22 olevan suodattimen impedanssi $Z(f)$. Y-akseli impedanssi Ω ja X-akseli taajuus Hz

Verkon impedanssi kasvaa taajuuden noustessa lähes lineaarisesti. Suodatin kytketään verkon ja yliaaltolähteen rinnalle. Sarjaresonanssitilanteessa yliaallot kumoutuvat kuvan 25 kaavion Z_f/Z_t minimikohtissa. 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:

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

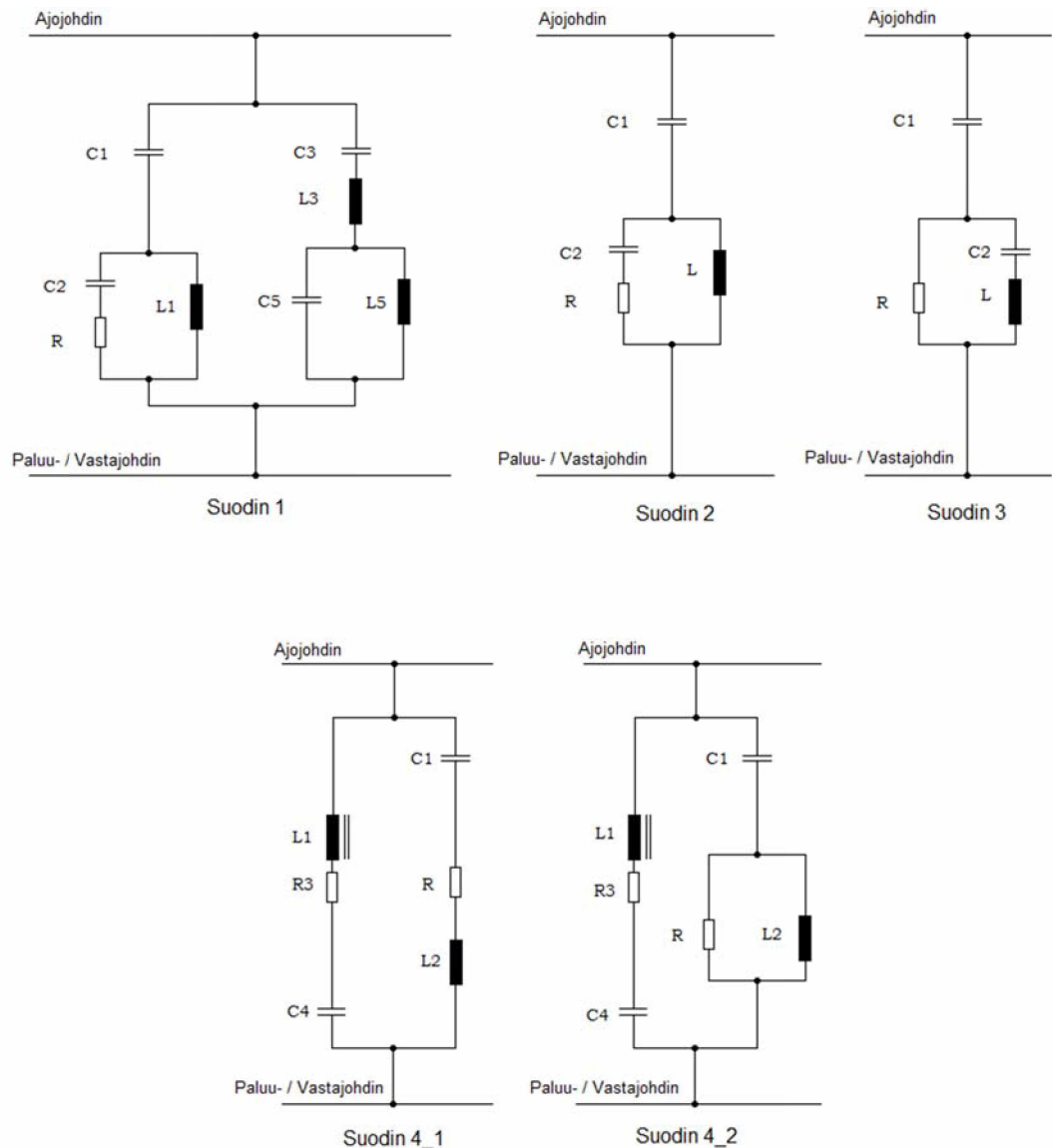


Kuva 25. Kuvassa Z_f on suodattimen impedanssi. Z_t on syöttävän muuntajan impedanssi ja $Z_t//Z_f$ verkon ja suodattimen rinnankytkennän impedanssi. Y-akselin impedanssi on Ω ja X-akselin taajuus Hz

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

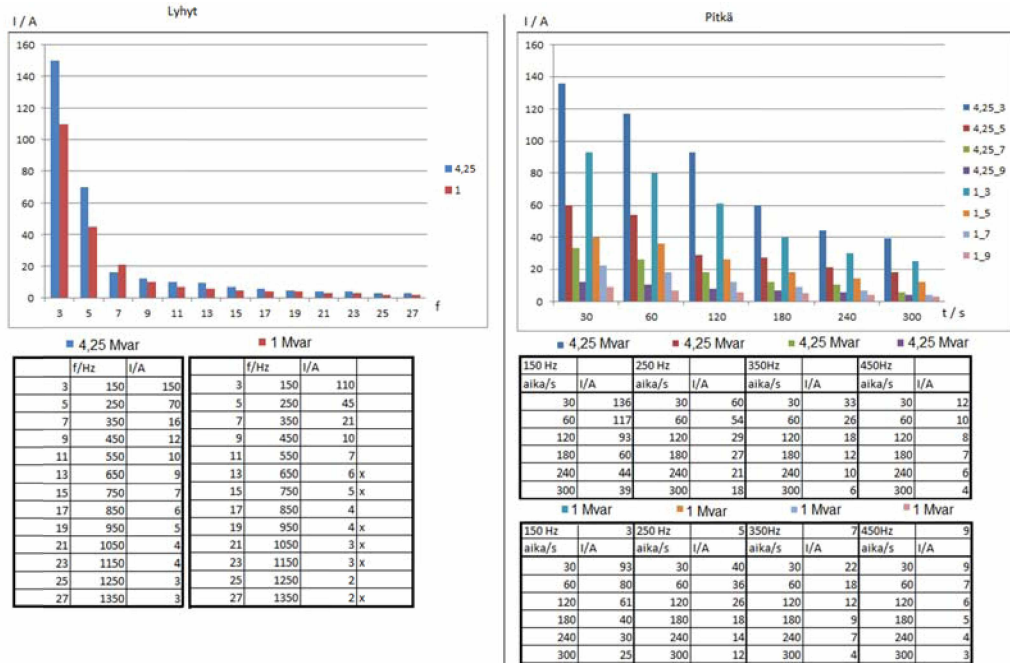
9 Ratajohtosuodattimet

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 tyyppin kaksi suodattimen kytkentäversio 2. Kuvassa 26 on suodattimien kytkentä ja numerojako. Liitteessä 1 on suodattimien kytkennät ja niiden numerointi kokonaisuudessaan. Liitteessä 2 on suodattimet numerojaon 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 lyhyiläkin 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:

$$X_t = Z_k * \frac{U^2}{S_n}$$

(20)

$$L_t = \frac{X_t}{2\pi f}$$

(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 μF

Lisätään päämuuntajan induktanssi 19 mH, jolloin saadaan 89,3 mH. Oletetaan kompensointitehoksi 1 Mvar, jolloin kapasitanssi on 4,2 μF ja lisätään ratajohdon keskinäiskapasitanssi 0,35 μF , jolloin saadaan 4,55 μF . Sitten lasketaan resonanssitaajuus kaavalla.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

(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-ilmio. Suodattimen spekseissä on 1 Mvar:n suodattimelle annettu 250 Hz taajuudella lyhytaikaiseksi virraksi 45 A.

Esimerkiksi suodattimen 3_1 taajuusvaste lasketaan seuraavasti:

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

(23)

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

Muuntajan reaktanssi

$$X_{t250Hz} = 5 * j6,05 \Omega = j30,32 \Omega$$

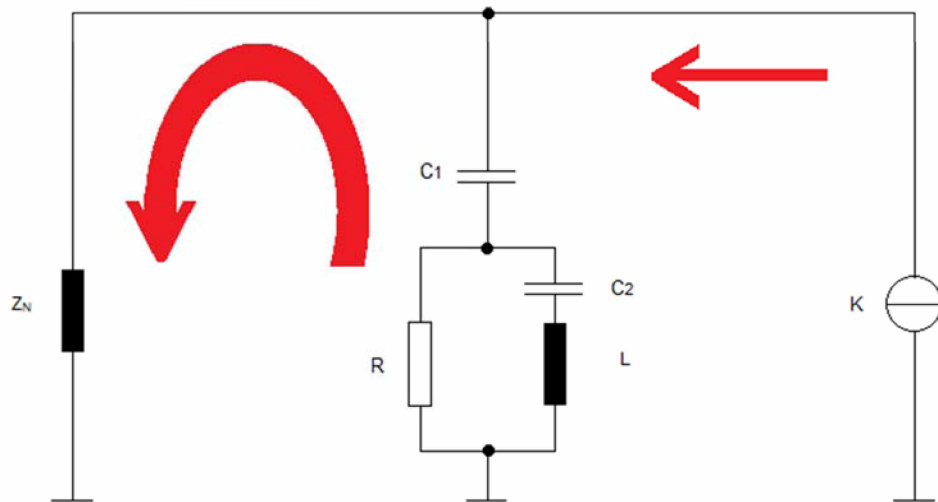
ja suodattimen impedanssi ovat rinnan joten virranjako on seuraava

$$I_f = \frac{X_{t250Hz}}{(X_{t250Hz} + Z_{f250 Hz})} * I_5 = \frac{j30,32 \Omega}{(j30,32 + (39,25 - j136,56))} * 45 A = 12,05 A$$

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

$$I_f = \frac{X_{t250Hz}}{(X_{t250Hz} + Z_{f250 Hz})} * I_5 = \frac{(39,25 - j136,56) \Omega}{(j30,32 + (39,25 - j136,56)) \Omega} * 45 A = 56,45 A$$

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

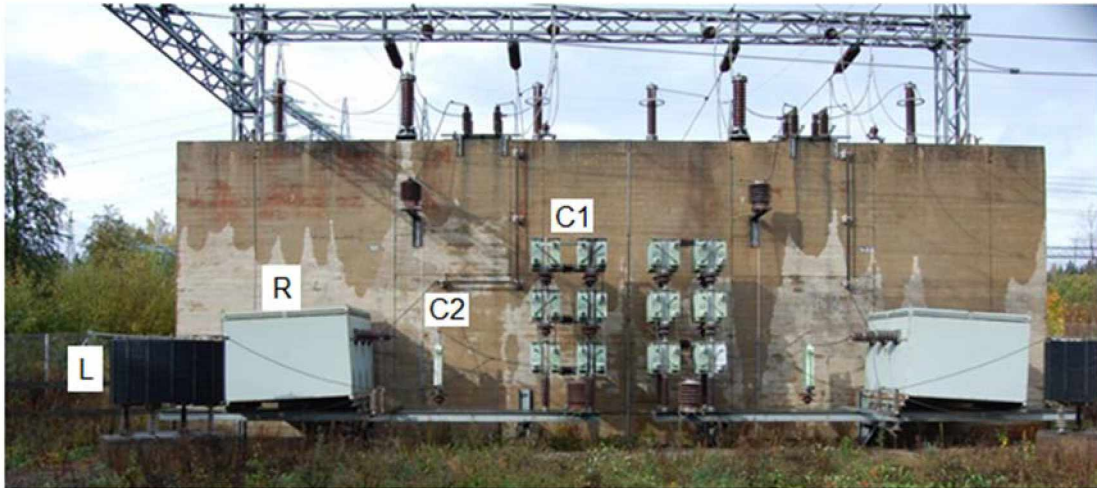
$$Z_f = \frac{1}{\left(\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_1} + R + \frac{1}{j\omega C_2}} \right) + \left(\frac{1}{j\omega C_3} + j\omega L_3 + \frac{1}{\frac{1}{j\omega L_5} + \frac{1}{j\omega C_5}} \right)}$$

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.

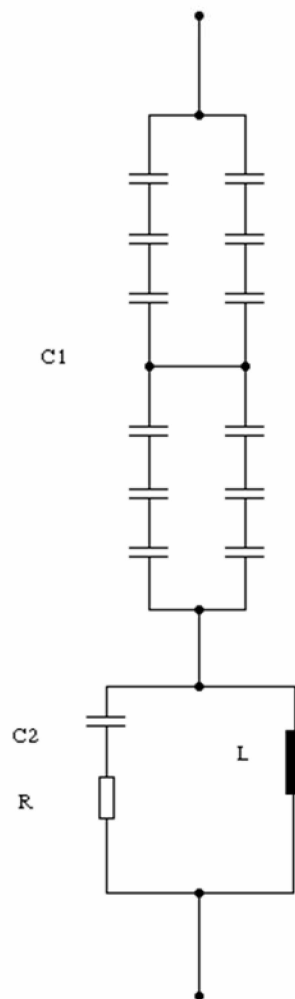
Valokuvassa 29 on kaksi syöttöaseman ratajohtosuodatinta.



Kuva 29. Kuvassa on vasemmalta lähtien ilmasydäminen lineaarinen kela L, vastus R, virityskondensaattori 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 määritelty 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 tyristoriohjattu 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.

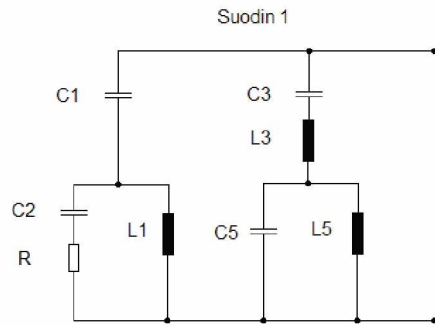
Syöttöasemilla olevien suodattimien ja niiden dokumenttien vastaavuuden saattaminen ajan tasalle on tärkeä jatkotoimenpide tälle työlle. Sähköturvallisuusmääräykset edellyttävät myös dokumenttien pitämistä todellista tilannetta vastaavana.

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. Sähkämiehen 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 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

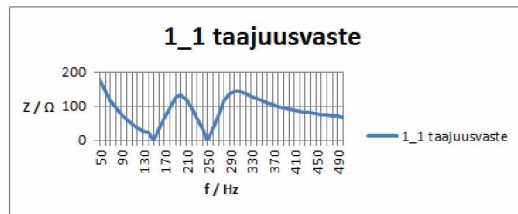
Suodattimien numerojako

Suodattimien kytkentä ja numerojako

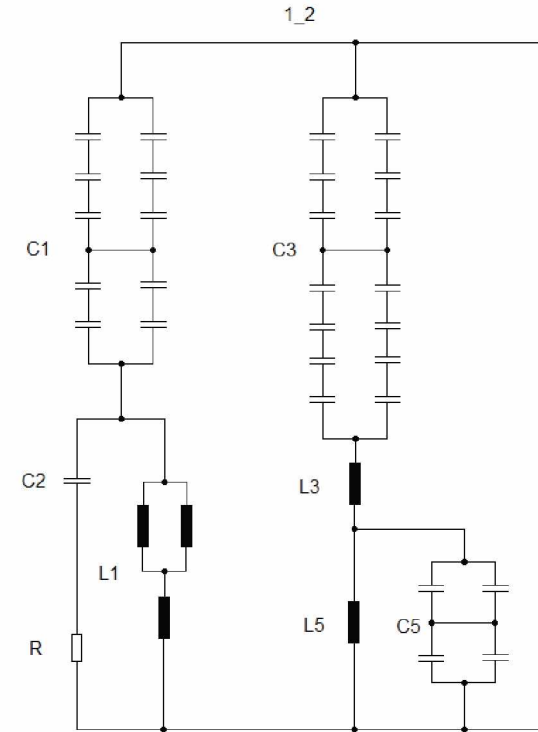
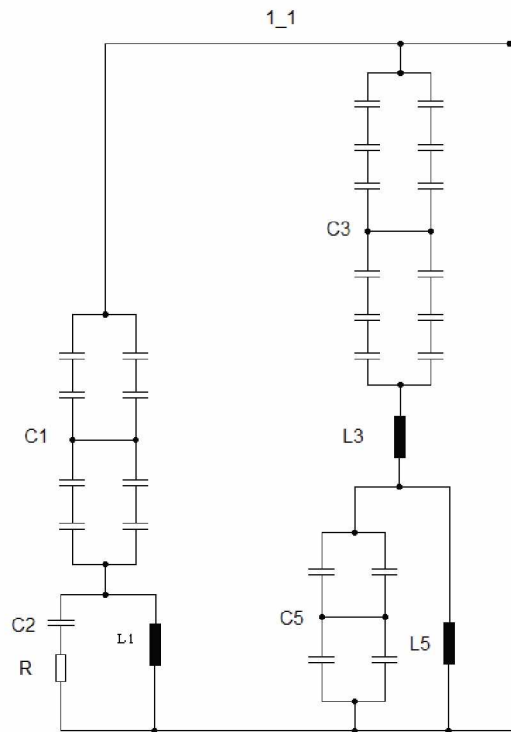


Nimellisarvot

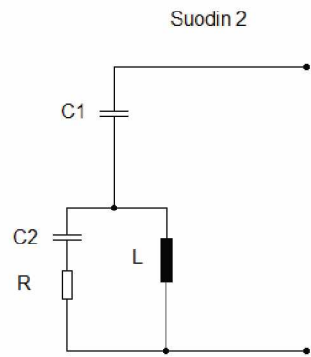
1_1		1_2	
27,5 kV	4,25 Mvar	27,5 kV	2,45 Mvar
C1 = 12 μ F	C3 = 4,47 μ F	C1 = 5,28 μ F	C3 = 4,51 μ F
C2 = 13,2 μ F	L3 = 160 mH	C2 = 13,2 μ F	L3 = 163 mH
R = 33 ohm	C5 = 16 μ F	R = 33 ohm	C5 = 16 μ F
L1 = 54 mH	L5 = 40 mH	L1 = 16 mH	L5 = 38,8 mH



kytkennän numero



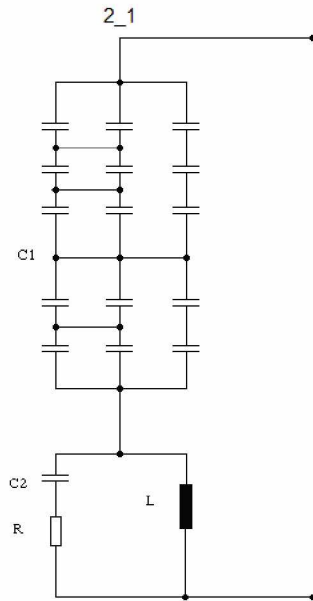
LIITE 1 / 2 (4)



Nimellisarvot

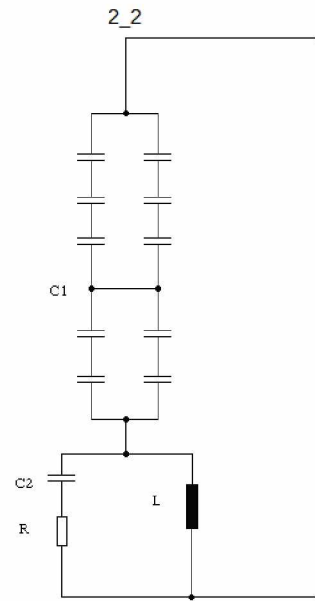
27,5 kV / 2 MVar
L = 78 mH
R = 63 ohm
C2 = 13,2 μF
C1 = 7,9 μF

kytkennän numero



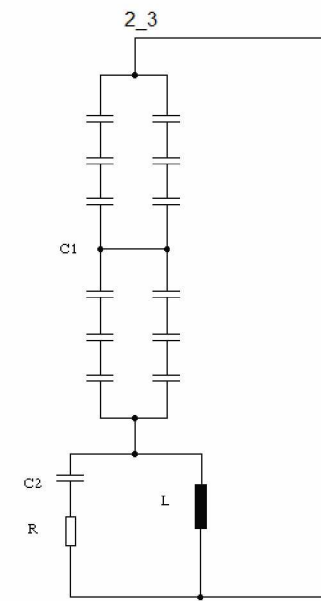
Nimellisarvot

27,5 kV / 2 MVar
L = 78 mH
R = 63 ohm
C2 = 13,2 μF
C1 = 7,9 μF



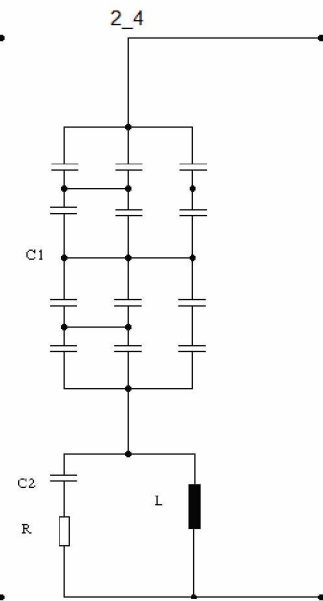
Nimellisarvot

27,5 kV / 2 MVar	27,5 kV / 1 MVar
L = 78 mH	L = 78 mH
R = 63 ohm	R = 63 ohm
C2 = 13,2 μF	C2 = 130 μF
C1 = 7,9 μF	C1 = 4,2 μF



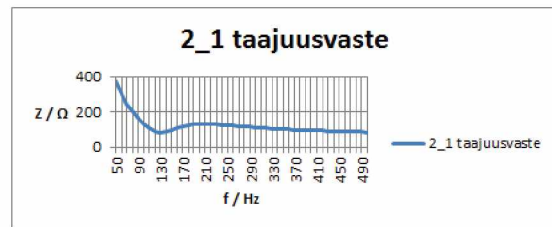
Nimellisarvot

27,5 kV / 1,6 MVar
L = 78 mH
R = 63 ohm
C2 = 13,2 μF
C1 = 6,7 μF



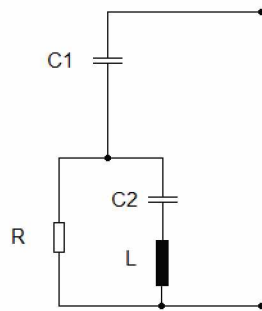
Nimellisarvot

27,5 kV / 2 MVar
L = 78 mH
R = 63 ohm
C2 = 10,6 μF
C1 = 7,9 μF



2_1 taajuusvaste

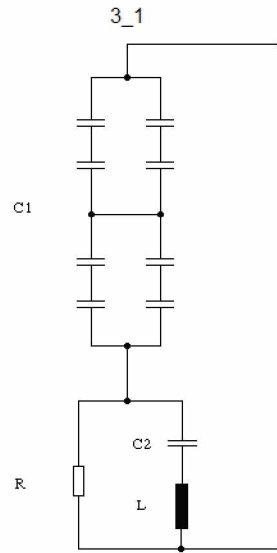
Suodin 3



Nimellisarvot

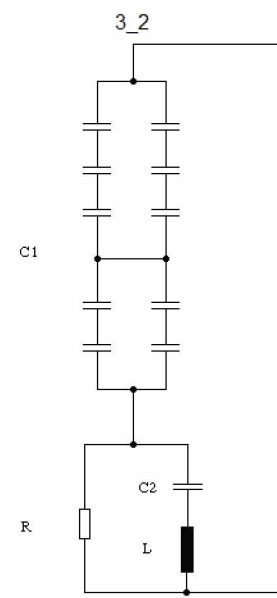
27,5 kV / 1 MVar	55 kV / 1MVar
L = 78 mH	L = 39 mH
R = 45 tai 63 ohm	R = 100 ohm
C2 = 130 μF	C2 = 261 μF
C1 = 4,2 μF	C1 = 1,03 μF

kytkentä numero



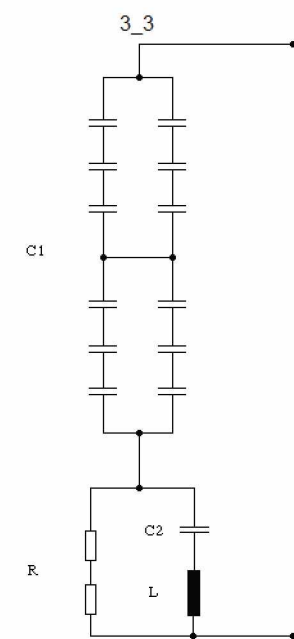
Nimellisarvot

55 kV / 1MVar	27,5 kV / 1 MVar	27,5 kV / 1,3 MVar
L = 39 mH	L = 78 mH	L = 78 mH
R = 100 ohm	R = 45 ohm	R = 63 ohm
C2 = 261 μF	C2 = 130 μF	C2 = 130 μF
C1 = 1,03 μF	C1 = 4,2 μF	C1 = 5,3μF



Nimellisarvot

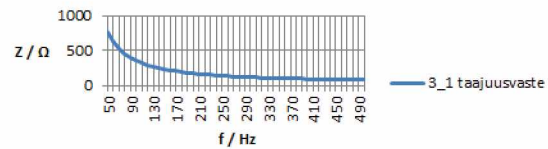
27,5 kV / 1 MVar	27,5 kV / 1 MVar
L = 78 mH	L = 78 mH
R = 45 ohm	R = 63 ohm
C2 = 130 μF	C2 = 130 μF
C1 = 4,2 μF	C1 = 4,2 μF



Nimellisarvot

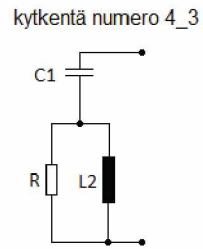
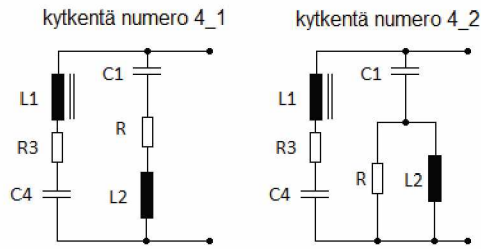
55 kV / 1MVar
L = 39 mH
R = 100 ohm
C2 = 261 μF
C1 = 1,03 μF

3_1 taajuusvaste



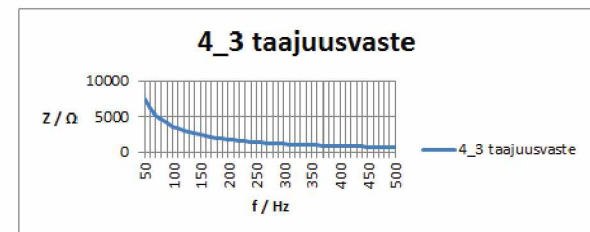
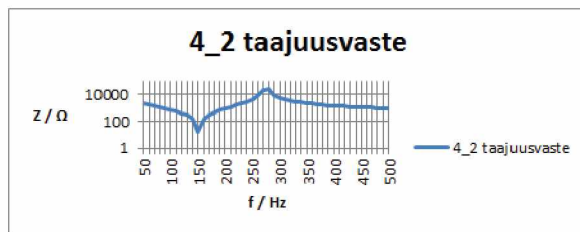
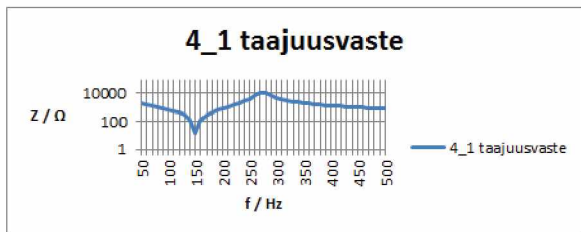
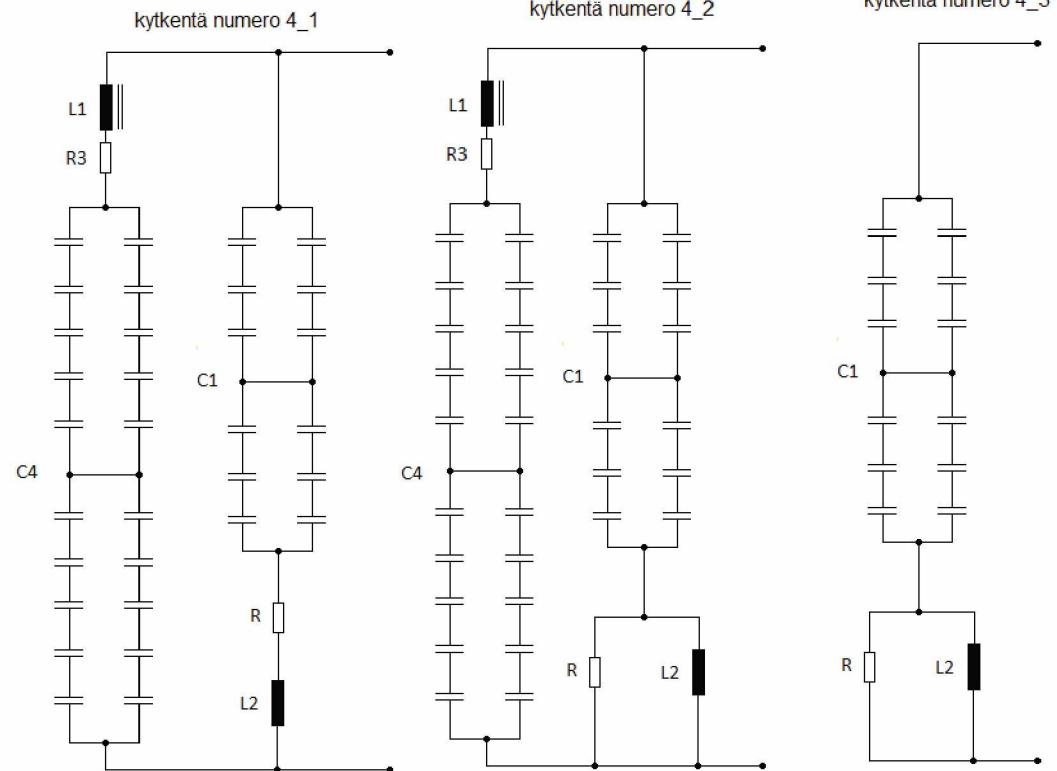
LIITE 1 / 4 (4)

Suodin 4



55 kV	
150 Hz 1,09 MVar	HP 0,4 MVar
L1 = 1,1 H	C1 = 0,417 μ F
R3 = 15,8 ohm	L2 = 39 mH
C4 = 1,02 μ F	R = 130 ohm

55 kV	
HP 0,4 MVar	
C1 = 0,43 μ F	
L2 = 46 mH	
R = 121 ohm	



Taulukko ratajohtosuodattimista

Taulukko syöttöasemien suodattimista

	Nimi	Pääkaavio	Suodattimen sijoituspiirustus	Suodattimen suojauskaavio	Suodatin 1	Kompensointiteho Su1, Mvar	C1 μ F mitattu	C2 μ F	L mH	R Ω	Suodatin 2	Kompensointiteho Su2, Mvar	C1 μ F mitattu	C2 μ F	L mH	R Ω	Lisätieto	Päämuuntaja 1, teho MVA	Muuntaja1 kytketty vaiheisiin	Päämuuntaja 2, teho MVA	Muuntaja2 kytketty vaiheisiin	Rataosa	Sähköis-tämisvuosi	
1	Alapua	2	2_1	2_4	2_4	2	8,06	10,6	78	63	2_4	2	8,11	10,6	78	63		7,5	L1, L3	7,5	L2, L3	Kok - Oul	1983	
2	Armala	3_2	o	3_2	3_2	1	4,24	130	78	63		1	4,4	130,5	78	34		7,5	L1, L3			Kvl - Pie	1980	
3	Arometsä	3_2	2_1	x	3_2	1	4,26	130	78	45	3_2	1	4,28	130	78	63		12,5	L1, L2	12,5	Li, L3	Tl - Sei	1975	
4	Eräslahti	3	3	x	3_1	1	4,29	130	78	45								7,5	L2, L3			Tre - Jy	1994	
5	Eteläkangas	4	4	x	4_3	0,4	0,42		48,4	124							2x25	12,5	L1, L3			Oul - Roi	2004	
6	Eurakoski	3	3	x	3_1	1	4,17	130	78	45								7,5	L3, L2			Tre - Rma	1998	
7	Haapoja	3	3	x	3	1												7,5	L1, L2			Sei - Vs	2011	
8	Haarajoki	3	o	3	3_1	1	1,03	260	39	70							2x25	12,5	L3, L1			Kev - Hlt	2006	
9	Halmeperunsuo	3	x	x	3_3	1	1,03	261	39	81							2x25	12,5	L2, L3			Oul - Kon	2006	
10	Hanhisuo	3	3	x	3_1	1	4,32	130	78	45								7,5	L1, L2			Tru - Tl	2000	
11	Hausjärvi	3_2	2_1	3_2	2_2	1	4,33	130	78	63	2_2	1	4,32	130	78	63		7,5	L3, L2	12,5	L1, L2	Rii - Kvl	1977	
12	Heinipuro	3	x	x	3_3	1	0,99	261	39	81							TSC 2x25	12,5	L1, L3			Kon - Vsu	2006	
13	Hirvineva	2	2_1	2_4	3_2	1,3	5,44	132	78	63	2_4	2	8,16	10,6	78	63	pm1SAM	7,5	L2, L3	7,5	L2, L1	Kok - Oul	1983	
14	Hovinsaari	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,25	130	78	63	2_4	2	8,27	10,6	78	63		7,5	L1, L3			Kvl - Kot	1979	
15	Huhdanneva	2,1	o	o	2_1	2	7,91	13,2	78	63	2_1	2	7,94	13,2	78	63		7,5	L1, L2	7,5	L1, L3	Sei - Kok	1981	
16	Hulmi	3	3	x	3_1	1	4,34	130	78	45								7,5	L3, L2			Tru - Tl	2000	
17	Ilmala	x	x	o	1_2	~4					1_1	4,25						12,5	L2, L1	12,5	L2, L1	Hel - Kkn	1969	
18	Isohenna	3	o	3	3	1	1,05	260	39	70							2x25	12,5	L1, L2			Kev - Hlt	2006	
19	Jyrä	x	x	x	3_1	1	4,08	130	78	45								7,5	L1, L3			Tre - Rma	1998	
20	Kaitakorpi	x	x	x	3_1	1	4,13	130	78	45								7,5	L3, L2			Tre - Rma	1998	
21	Kalliovarasto	x	x	x	3_3	1	1,01	261	39	81							2x25	12,5	L1, L3			Oul - Kno	2006	
22	Kemijärvi				3												rakenteilla	12,5				Roi - Kjä	2013	
23	Kilo																purettu						Hel - Kkn	1969
24	Kilteri	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,24	130	78	63								7,5	L2, L3			Hpl - Mrl	1975	
25	Kivikumpu	4	4	x	4_3	0,4	0,43		48,4	124							2x25	12,5	L3, L2			Oul - Roi	2004	
26	Kolava	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,19	130	78	63	3_2	1	4,15	130	78	63		12,5	L1, L2	7,5	L1, L3	Rii - Kvl	1977	
27	Korvenläitä	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,2	130	78	63		1	4,4	130,5	78	34		7,5	L2, L3			Kvl - Pie	1980	
28	Kuivala	2	2_1	2_4	2_4	2	8,11	10,6	78	63	3_2	4,19	130	78	63		pm2SAM	7,5	L2, L1	7,5	L3, L1	Kok - Oul	1983	
29	Kukkola	2_3	2_1	x	2_3	1,6	6,62	13,2	78	45	2_3	1,6	6,69	13,2	78	45		7,5	L3, L2	7,5	L1, L2	Rii - Tl	1974	
30	Kurkimäki	2	2_4	2_1							3_1	1,3	5,48	130	78	30				7,5	L3, L1		Pie - Ilm	1984
31	Kytömaa	2	2_2	2_2	2_2	2	7,84	13	78	63								12,5	L3, L1			Kev - Rii	1972	
32	Käkelä	3	3	x	3_1	1	4,25	130	78	35								7,5	L2, L3			Kr - Tru	1995	
33	Köpskog	3	3	x	3_1	1	4,32	130	78	45								7,5	L1, L3			Kr - Tru	1995	
34	Laikko	2	2_1	2_2	2_2	2	7,97	13,2	78	63								7,5	L1, L3			Ima - Joe	1988	
35	Lamminpää	3_2	2_1	x	3_2	1	4,28	130	78	63	3_2	1	4,25	130	78	63		12,5	L1, L3	7,5	L2, L3	Tl - Sei	1975	
36	Lauritsala	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,27	130	78	63	3_2	1	4,24	130	78	63		7,5	L3, L1	7,5	L3, L2	Lä - Ima	1978	
37	Laviamäki	3	3	x	3_1	1	4,28	130	78	45								7,5	L1, L2			Kr - Tru	1995	
38	Lelkola	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,28	130	78	63		1	4,4	130,5	78	34		7,5	L3, L1			Kvl - Pie	1980	
39	Leppälahti	3	3	x	3_1	1	4,34	130	78	45								7,5	L3, L2			Jy - Pie	1995	
40	Linnapelto	2_2	2_2	2_2							2_2	2	9	14,25	78	63				7,5	L3, L2		Kev - Sld	1990
41	Luumäki	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,17	130	78	63	3_2	1	4,21	130	78	63		12,5	L2, L1	7,5	L3, L1	Kvl - Vai	1978	
42	Mankki	3,2_1	3,2_1	x	3_1	1	4,27	130	78	45	2_1	2	7,85	13,2	78	63		7,5	L2, L1	7,5	L2, L3	Hel - Kkn	1969	
43	Marinkylä	3_2	2_1	3_2	3_2	1	4,31	130	78	63	3_2	1	4,27	130	78	63		7,5	L1, L3	7,5	L2, L3	Kvl - Kot	1979	

Suodattimet kartalla

Kartta ratajohtosuodattimista.

Sähköradan syöttöasemien ratajohtosuodattimet kartalla 2012

