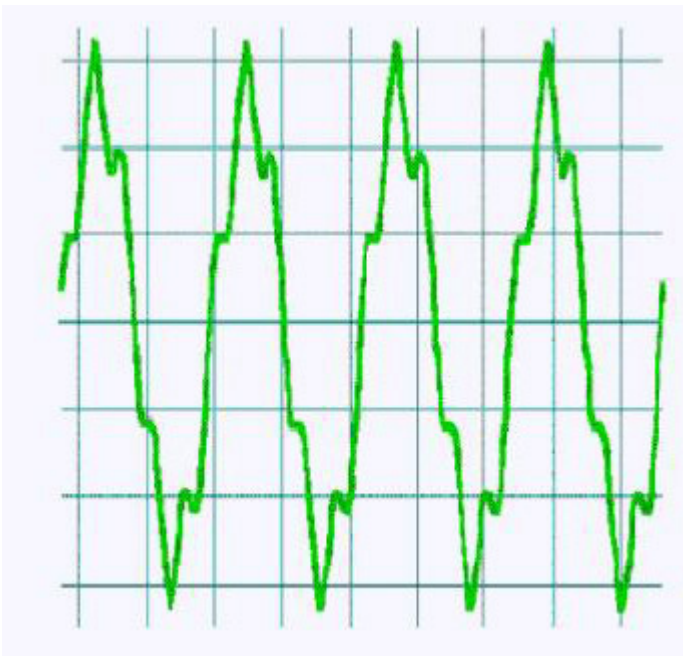


YLIAALTO-OPUS



Leena Korpinen

Marko Mikkola

Tommi Keikko

Emil Falck

Sisällysluettelo

1. Yliaaltoteoria

[Johdanto](#)

[Fourier-analyysi](#)

[Ideaaliteoria](#)

[Yliaaltokomponentit](#)

[Särö ja summautuminen](#)

2. Yliaaltojen lähteet

[Ideaaliset suuntaajat](#)

[Todelliset suuntaajat](#)

[Tyristorikytkimet](#)

[Valokaariuunit](#)

[Muuntajat](#)

[Muita lähteitä](#)

3. Yliaaltojen vaikutukset

[Resonanssi](#)

[Suuntaajat, kondensaattorit](#)

[Muuntajat, moottorit](#)

[Muita vaikutuksia](#)

4. Yliaaltojen torjunta

[Yliaaltosuodattimet](#)

[Suuntaajatekniset keinot](#)

5. Yliaaltojen esiintyminen

[Yliaaltojen mittaaminen](#)

[Yliaaltoihin liittyviä määräyksiä](#)

Yliaaltoteoria

Johdanto

Sähkölaitteet on suunniteltu toimimaan sinimuotoisella jännitteellä. Yhä useampi laite nykyään myös vaatii virheetöntä jännitettä toimiakseen oikein. Sähkön käytön kasvaessa on myös häiriötä sähköverkkoon aiheuttavien laitteiden määrä jatkuvasti kasvanut. Eräs sähkön laatua merkittävästi huonontava tekijä on yliaallot.

Sähköllä on laatutekijänsä kuten muillakin tuotteilla. Sähkön laatuun vaikuttavat:

- Taajuus
- Jännitteen taso
- Hitaat ja nopeat jännitteen vaihtelut
- Jännitepiikit
- Yliaallot
- Kolmivaihejärjestelmän epäsymmetria
- Tasajännitekomponentti
- Keskeytykset
- Käyttöoikeuden rajoitukset

Yliaallot

Yliaaltoja synnyttävät sähkönjakeluverkkoon virran tai jännitteen suhteen epälineaariset virtapiirin osat. Niiden verkosta ottama virta on epäsinimuotoista. Epälineaaristen kuormien synnyttämät virran yliaallot eivät välttämättä ole ongelma vain niiden aiheuttajalle, sillä ne leviävät verkkoa pitkin helposti myös muille sähkökäyttäjille aiheuttaen ongelmia, joihin ei ole osattu varautua.

Yliaaltoja synnyttävät virtapiirin osat voidaan jakaa joko virta- tai jännitelähdetyypiksi yliaaltogeneraattoreiksi.

Fourier-analyysi

Kun jännitteen tai virran käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta, voidaan ajatella sen olevan muodostunut useasta eritaajuisesta sinimuotoisesta signaalista. Funktio voidaan hajottaa komponentteihinsa käyttämällä Fourier-analyysiä, johon yliaaltojen matemaattinen käsittely perustuu. Jokainen jaksollinen funktio, joka on muotoa $f(t)=f(t+T)$, voidaan kehittää Fourier'n sarjaksi, joka on muotoa

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\omega t)$$

Fourier'n sarjan kertoimet

Sarjan ensimmäistä termiä ($n=1$) kutsutaan perusaalloksi ja muita yliaalloiksi järjestyslukunsa mukaan siten, että ($n=2$) on toinen yliaalto jne.

Jos funktio $f(t)$ on symmetrinen origon suhteen, sisältää sarja vain parittomia termejä.

Yliaaltojen suuruudet ilmoitetaan tavallisesti suhteellisarvoina. Suhteellisarvoilla tarkoitetaan yliaallon ja perusaallon suuruuksien suhdetta U_n / U_1 . Yliaallot esitetään yleensä kootusti spektriesityksenä.

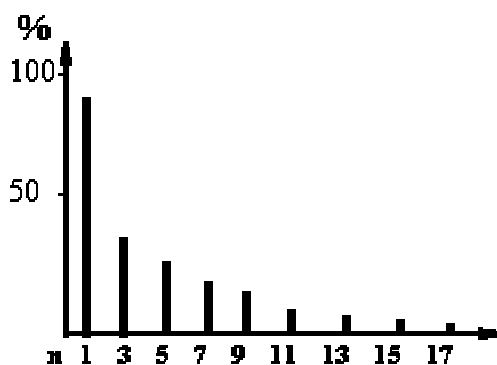
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt$$

Spektriesitys

Funktiota kuvaavien komponenttien joukkoa sanotaan taajuusspektri. Jaksollisen funktion spektri on diskreetti- eli viivaspektri. Tälle on ominaista, että komponentteja esiintyy vain taajuuksilla $n \cdot f_1$, missä n on jokin kokonaisluku. Pystyakselilta luetaan komponentin suhteellisarvo.



[Lähde 10]

Yksinkertaistettu teoria

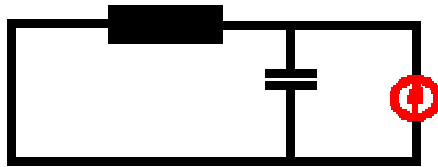
Ideaaliteoria yliaalloille perustuu ns. virtalähdeajatteluun, jolla tarkoitetaan, että yliaaltolähde toimii ideaalisena yliaaltovirtoja vaihtovirtaverkkoon syöttävänä lähteenä. Suuntaajat ovat tällaisia lähteitä.

Muita yliaaltojen aiheuttajia kuin suuntaajia voidaan pitää enemminkin jänniteyliaaltojen lähteinä.

Virtalähde



Verkon sijaiskytkentä perusaallolle [lähde4]



Verkon sijaiskytkentä yliaalloille [lähde 4}]

Yliaaltovirtalähde syöttää verkkoon virtayliaaltoja, jotka kohtaavat taajuuksiensa perusteella määräytyvät yliaaltoimpedanssit, joissa syntyy jännitehäviöitä. Näin syntyvät jännitteen yliaallot, jotka jännitteen perusaaltoon summautuessaan aiheuttavat jännitteen käyrämuodon vääristymisen eli säröytymisen. Jännitteen yliaallon järjestysluku n on sama kuin sen aiheuttaneen virtayliaallon. Virran särö on yleensä jännitteen säröä isompi johtuen verkon impedanssin pienuudesta.

Suuntaajat

Ns. yksinkertaistetussa yliaaltoteoriassa suuntaajille tehdään joukko oletuksia:

- Vaihtovirtaverkko on symmetrinen
- Vaihtovirtaverkon jännite on sinimuotoinen
- Vaihtovirtaverkon impedanssi on nolla
- Suuntaajan edessä ei käytetä erillistä kommutointikuristinta
- Suuntaajan kaikkien tyristorien ohjauskulma on sama
- Suuntaajan tasavirta on täysin tasaista

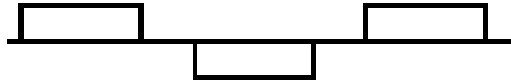
Jos oletukset ovat voimassa, saadaan suuntaajan syöttämille yliaalloille **yksinkertainen yhtälö**.

$$n = k \cdot p + 1$$

Suuntaajan pulssiluku määrää syntyneiden yliaaltojen järjestysluvun. Yo. yhtälön mukaisia yliaaltoja sanotaan suuntaajan luonteenomaisiksi yliaalloiksi. Syntyneiden yliaaltojen suuruus voidaan laskea kaavalla

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

Tällöin suuntaajan verkosta ottama virta on suorakaidepulsssia.



[Lähde 10]

Yliaaltojen järjestyslukuun ja määrään vaikuttaa teoriassa ainoastaan suuntaajan pulssiluku.

Yliaaltokomponentit

Yliaallot jaetaan eri komponentteihin ominaisuuksiensa (järjestysnumeronsa) perusteella. Komponenttiluokasta nähdään yliaallon vaiheosoittimen pyörimissuunta perustaajuuteen nähden.

Yliaallot jaetaan positiiviseen-, negatiiviseen-, ja nollakomponentteihin. Komponenttijako selviää ao. taulukosta.

No.	perus	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komp.	+	-	0	+	-	0	+	-	0

[Lähde 6]

Miten tällainen komponenttijako on saatu ?

Yliaaltopitoiset vaihevirratt voidaan kirjoittaa:

$$i_R = \sum i_{Rn} = \sum I_n \sin(n\omega t - \theta_n - n \cdot 0^\circ)$$

$$i_S = \sum i_{Sn} = \sum I_n \sin(n\omega t - \theta_n - n \cdot 120^\circ)$$

$$i_T = \sum i_{Tn} = \sum I_n \sin(n\omega t - \theta_n + n \cdot 120^\circ)$$

Yhtälöistä saadaan eri yliaalloille seuraavaa:

Jos $n = 4, 7, 10, 13, \dots$ vaihejärjestys (vaihekulma) on sama kuin perusaallolla, eli yliaallot (vaiheosoittimet) pyörivät samaan suuntaan.

Jos $n = 2, 5, 8, 11, \dots$ vaihejärjestys on eri kuin perusaallolla, eli yliaallot pyörivät eri suuntaan.

Jos $n = 3, 6, 9, 12, \dots$ vaihekulma on kaikilla vaiheilla sama, eli yliaallot eivät pyöri.

Lisäksi yliaallot jaetaan parillisiin ja parittomiin yliaaltoihin. Normaalitilanteessa, kun käyrämuoto on origon suhteen symmetrinen syntyy vain parittomia yliaaltoja. Suuri määrä parillisia yliaaltoja on usein merkki viasta tai muusta epätavallisesta käyttötilanteesta.

Särö ja summautuminen

Jännitteen tai virran käyrämuodon virheellisyyttä kuvataan särökertoimella D.

Kun verkossa on useita yliaaltolähteitä on yliaaltojen summaa yleensä vaikea arvioida. Yliaaltojen vaihekulmat eroavat toisistaan eikä verkon ja siinä olevien komponenttien sijaiskytkentää taajuuden funktiona tunneta aina tarpeeksi hyvin.

Vaihekulmat

Jos eri lähteiden aiheuttamat yliaaltokomponentit lasketaan aritmeettisesti yhteen, päädytään yleensä liian suuriin arvoihin, sillä yliaallot summautuvat geometrisesti. Eri lähteiden yliaaltovirtojen amplitudit ja vaihekulmat riippuvat mm. kuormituksesta ja siltojen ohjauskulmasta. Vain joissakin erikoistapauksissa, kuten paperikonekäytöissä, joissa kuormitusten ajallinen vaihtelu tunnetaan, voidaan tilanne laskea tarkasti.

Jos eri lähteistä peräisin olevien yliaaltovirtojen vaihekulmista ei ole täsmällistä tietoa, mutta ne eivät ole sidoksissa keskenään, voidaan summautumista arvioida yhtälöllä

$$I_n = \left(\sum_1^N I_{ni}^2 \right)^{1/2}$$

Tarkempia tuloksia tarvittaessa käytetään usein tilastollisia menetelmiä tai laskentaohjelmia.

Sijaiskytkentä

Komponenttien tavallisimmat kuvaustavat:	
Komponentti	Kuvaustapa
Siirtojohdot	
Pitkät ja suurjännite	P- tai T-ekvivalentti
Lyhyet, pien- ja keskijännite	Induktiivisen reaktanssin ja resistanssin sarjaankytkentä
Pienjänniteavojohdot	Resistanssi
Kaapelit	
Pitkät kaapelit sekä laajat kaapeliverkot	Kuten pitkät siirtojohdot
Lyhyehköt kaapelit	Kapasitiivisen reaktanssin ja resistanssin

	sarjaankytkentä
Muuntajat	Oikosulkuimpedanssista laskettu sarjaimpedanssi
Generaattorit	Induktiivisen reaktanssin ja taajuudesta riippuvan resistanssin sarjaankytkentä
Epätahtimoottorit	Oikosulkuimpedanssin suuruinen sarjaimpedanssi
Tahtimoottorit	Kuten generaattorit
Kompensointikondensaattorit	Kapasitiivinen reaktanssi
Kuormitukset yleensä	Resistanssin, kapasitiivisen ja induktiivisen reaktanssin rinnankytkentä

[Lähde 1,2]

Waltari, M. Sähkölaki ja sähkötoimitusehdot - kommentaari oikeustapauksineen. Suomen sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus Oy 1984. 292 s.

Lehmusvirta J. Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa. Diplomityö TTKK 1982, 91 s.

Peltola M. Modernin taajuusmuuttajakäytön yliaaltojen vaimennus. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Anttila I., Saransaari P. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin. Raportti TTKK 1981, 38 s.

Anttila I. Sähköverkon yliaaltoimpedanssin laskenta- ja mittaushmahdollisuudet. Diplomityö TTKK 1979, 98 s.

Arrilaga J., Bradley D., Bodger P. Power system harmonics. John Wiley & Sons Ltd 1985, 336 s.

Balda J. et al. Effects of harmonics on equipment. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, No 2, April 1993, ss.672-680

Baghzouz Y., Gong X. Analysis of three-phase transformer no-load characteristics. IEEE Transactions on Power Systems, Vol 10, No 1, Feb 1995, ss 18-26

Suomen sähkölaitosyhdistys. Suositus sähköverkon yliaaltojen rajoittamiseksi. Julkaisu 1990, 17 s.

Harmoniset yliaallot tehonsyötössä. Fluke-esite 1995, 16 s.

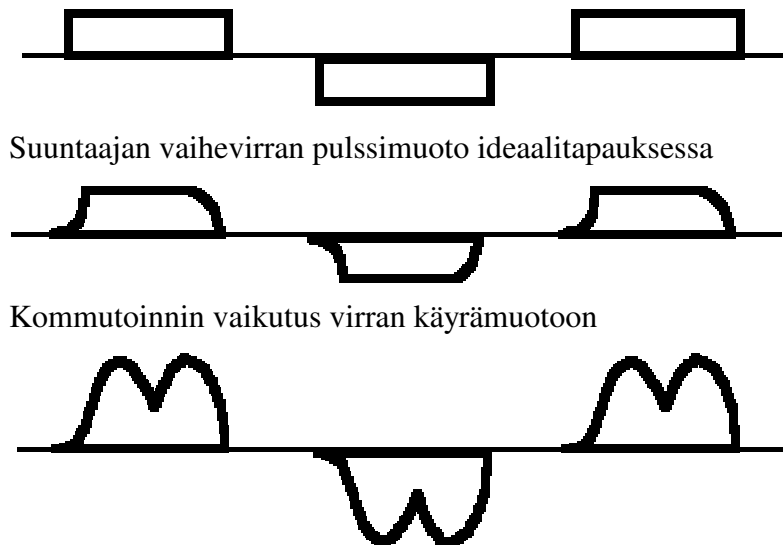
Yliaaltojen lähteet

Suuntaajat ideaalisina

Erilaiset puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajakäytöt teollisuudessa, liikenteessä ja voimansiirrossa synnyttävät yliaaltoja. Myös kotitalouksien elektroniikka on yliaaltojen lähde. Yliaaltoja tarkasteltaessa voidaan suuntaajalaitteiden käsittely palauttaa tasasuuntaussiltojen tarkasteluun.

Tasasuuntaussilta

Puolijohdetekniikalla toteutetut suuntaajakäytöt ovat lisääntyneet koko ajan hyvien ominaisuuksiensa vuoksi. Niissä ei ole kuluvia osia, hyötysuhde on korkea ja säätö tarkkaa. Suuntaajasovellusten monipuolisuudesta voidaan mainita mm. elektroniikkalaitteiden verkkolaitteet (tietokoneet, TV), UPS, valonhimentimet, ja moottorien pyörimisnopeuden säädöt kotona ja teollisuudessa. Suuntaajalaitteiden haitallisin ominaisuus on niiden aiheuttamat yliaallot sähköverkkoon, sillä niiden verkosta ottama virta poikkeaa sinimuotoisesta. Yksinkertaistetun teorian mukaan, suuntaajan pulssiluku määrää syntyneiden yliaaltojen määrän ja suuruuden.



Rajallisen induktanssin vaikutus virran käyrämuotoon [Lähde 11]

Virtapulssin pituuteen vaikuttaa suuntaajan pulssiluku ja ohjauskulma. Kuvassa on kolmivaiheisen 6-pulssisuuntaajan yhden vaiheen virta nollan asteen ohjauskulmalla, jolloin virtapulssin pituus on 120 astetta.

Suuntaajat todellisuudessa

Ideaalinen yliaaltoteoria on käytännöllinen teoreettisen tarkastelun kannalta. Todellisuudessa suuntaajien synnyttämien yliaaltojen joukossa esiintyy usein ei-luonteenomaisia yliaaltoja, joita ei tällä teorialla voida selittää.

Ideaalinen yliaaltoteoria

Idealisessa yliaaltoteoriassa suuntaajille oletetaan seuraavaa:

- vaihtovirtaverkon impedanssi on nolla
- suuntaajan tasavirta on täysin tasaista
- suuntaajan edessä ei käytetä erillistä kommutointikuristinta
- vaihtovirtaverkko on symmetrinen
- vaihtovirtaverkon jännite on sinimuotoinen
- kaikkien tyristorien ohjauskulma on sama

Esimerkkinä suuntaajakuormasta voidaan käsitellä tietokonetta.

Vaihtovirtaverkon impedanssi on nolla

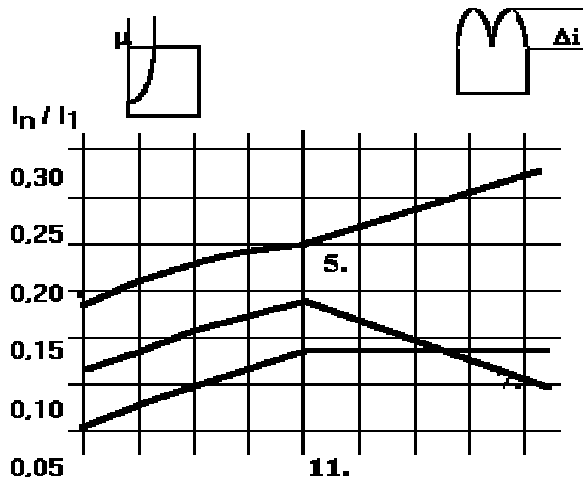
Todellisuudessa verkolla on jokin impedanssi joten kommutointi ei voi tapahtua äärettömän nopeasti. Tämän vaikutuksesta virtapulssit pyöristyvät ja etenkin suuritaajuisten yliaaltojen osuus pienenee.

Kommutoinnin kestoa kuvaa kommutointikulma m , jonka suuruus riippuu suuntaajan tasavirrasta, ohjauskulmasta a ja verkon impedanssista. Kun $m > 0$, ovat suuntaajan yliaallot pienemmät kuin ideaalitapauksessa. Ohjattu tyristorisilta synnyttää isommat yliaaltovirrat verrattuna vastaavaan diodisiltaan, sillä $a:n$ kasvattaminen pienentää $m:tä$. Suuntaajan liitäntäkohdan oikosulkutehon kasvaessa kasvaa myös kommutointikulma, mikä johtaa pienempiin yliaaltoihin. Toisaalta $m:n$ kasvaessa suuntaajan antama tasajännite pienenee.

Tasavirran aaltoisuus vaikuttaa osaan yliaaltoja suurentavasti ja osaan pienentävästi. Mitä isompi tasoituskuristin suuntaajan edessä on, sitä pienempi on tasavirran aaltoisuus.

Kommutoinnin ja aaltoisuuden vaikutus

Kommutointikulman ja tasavirran aaltoisuuden vaikutus yliaaltojen suuruuteen:



Vaihtovirtaverkko on symmetrinen

Jos suuntaajaa syöttävää muuntajaa vinokuormitetaan, aiheutuu tästä jännite-epäsymmetriasta suuntaajan verkkovirtaan kolmella jaollisia epäluonteenomaisia yliaaltoja.

Kuten edellä mainittiin, ovat muuntajat ja generaattorit myös yliaaltojen lähteitä. Tästä syystä vaihtovirtaverkon jännite ei aivan tarkkaan ole sinimuotoinen vaikka niin oletettiin.

Tyristoreja pyritään ohjaamaan siten, että kaikilla on sama ohjauskulma. Tyristorien ohjauskulmavirheet aiheuttavat verkkovirtaan, luonteenomaisten yliaaltojen lisäksi myös parillisia harmonisia ja tasavirtakomponentin. Näin syntyvät epäluonteenomaiset yliaallot ovat alle 1% virran perusaallosta kun ohjauskulmavirhe vaihtelee +-1.

Yllä olevista syistä syntyvillä yliaalloilla ei ole normaaliolosuhteissa suurta merkitystä.

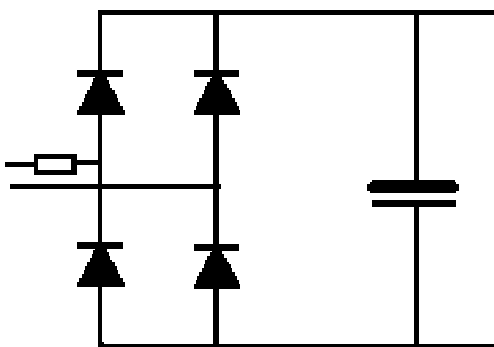
Tietokone

Tietokonekuorma on tehojen mitoituksen kannalta erittäin vaikea. Tietokoneen ottama virta on aina hyvin epälineaarinen ja sen käynnistysvirtasysäykset ovat yleensä hyvin suuret verrattuna nimellisvirtaan. Toisaalta tietokone asettaa hyvin suuret laatuvaatimukset käyttämälleen sähkölle.

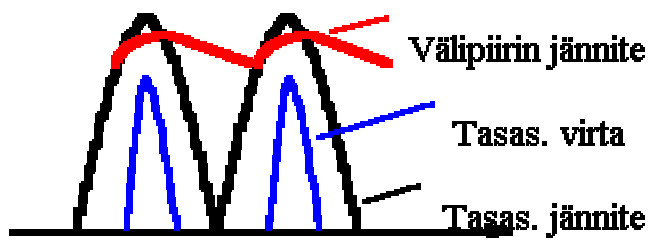
Tietokoneen ja sen oheislaitteiden sisäiset piirit toimivat tasasähköllä, jonka ne saavat omasta hakkuriteholähteestä. Tasasähkö muodostetaan yleensä yhdestä vaiheesta tasasuuntaamalla. Tasasuuntauksesta johtuen sisään menevän virran aaltomuoto poikkeaa suuresti sinimuotoisesta. Tämän tyyppinen epälineaarinen virta sisältää vain osan perusaallosta, mutta paljon harmonisia komponentteja.

Hakkuriteholähteestä

Tietokoneen teholähde



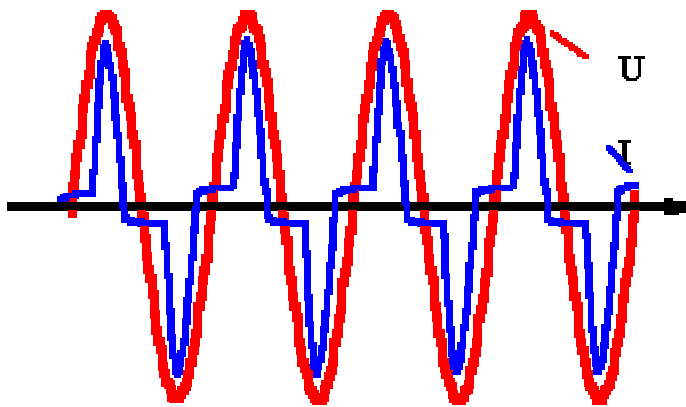
Teholähteen tasasuuntaus



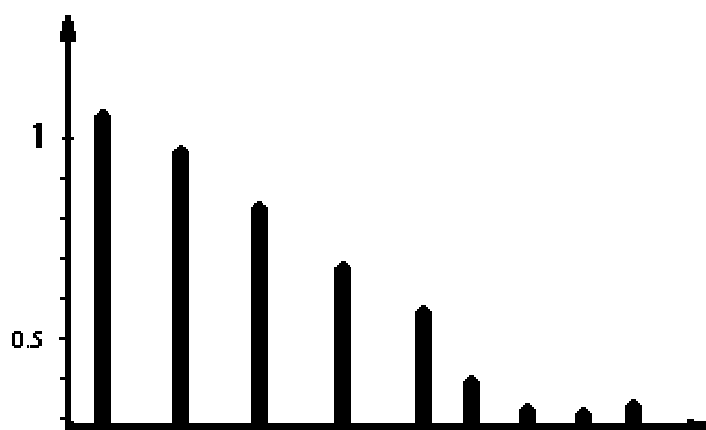
[Lähde 18]

Harmonisia komponentteja

Tietokoneen verkosta ottama virta ja jännite



Tietokoneen ottaman virran spektri



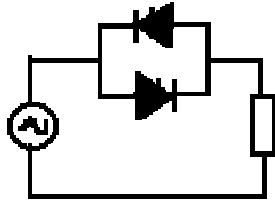
[Lähde 18]

Tyristorikytkimet

Teollisuudessa käytetään usein tyristorikytkimiä resistiivisten kuormien, esim. infrapunakuivainten ohjaukseen. Yleisimmät ohjaustavat ovat nollapiste- ja vaihekulmaohjaus.

Tyristorikytkin

Tavallisesti käytössä on kaksi tyristoria kytketty samaan vaiheeseen vastarinnan, jolloin jännitteen sekä negatiivista että positiivista puolijaksoa voidaan ohjata.



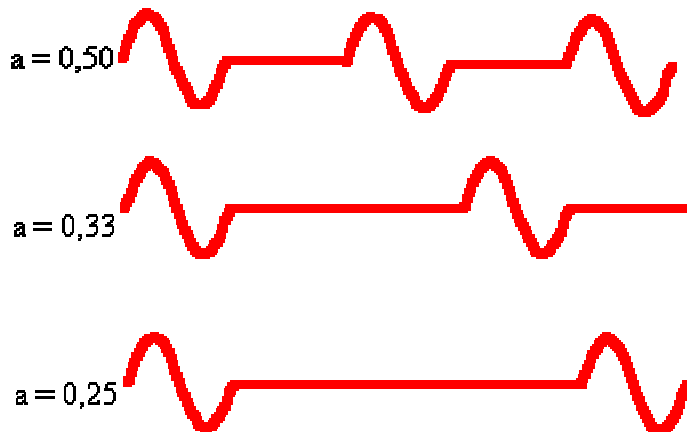
[Lähde 24]

Nollapisteohjauksessa tyristorit johtavat halutun määrän kokonaisia jaksoja.

Poistamalla sytytyspulssit saadaan tyristorit johtamattomaan tilaan.

Vaihekulmaohjauksessa tyristorit sytytetään jokaisen puolijakson aikana ja tehoa säädetään sytytyskulmaa a muuttamalla.

Nollapisteohjaus



missä $a = t_1 / t_2$

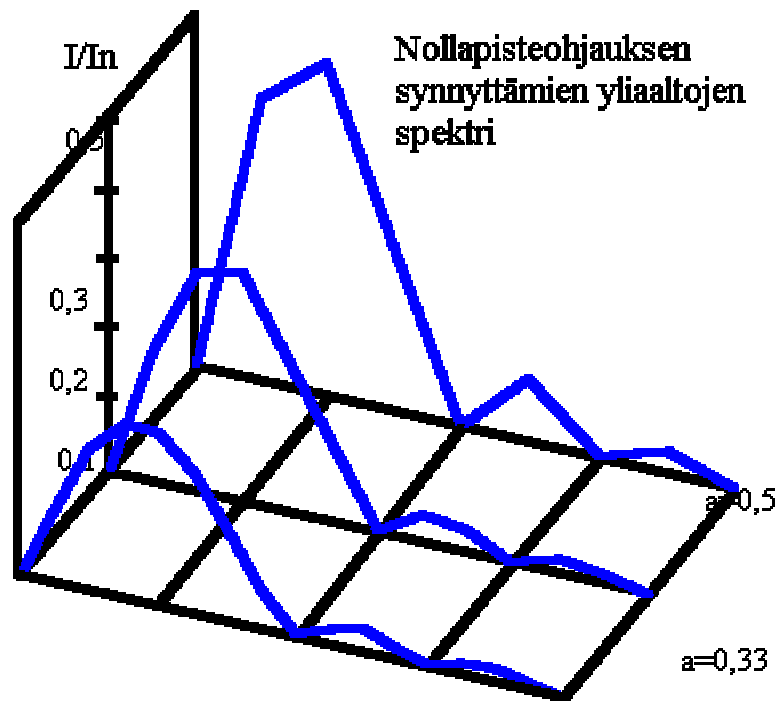
$t_1 =$ johtoaika

$t_2 =$ jaksonaika

[Lähde 25]

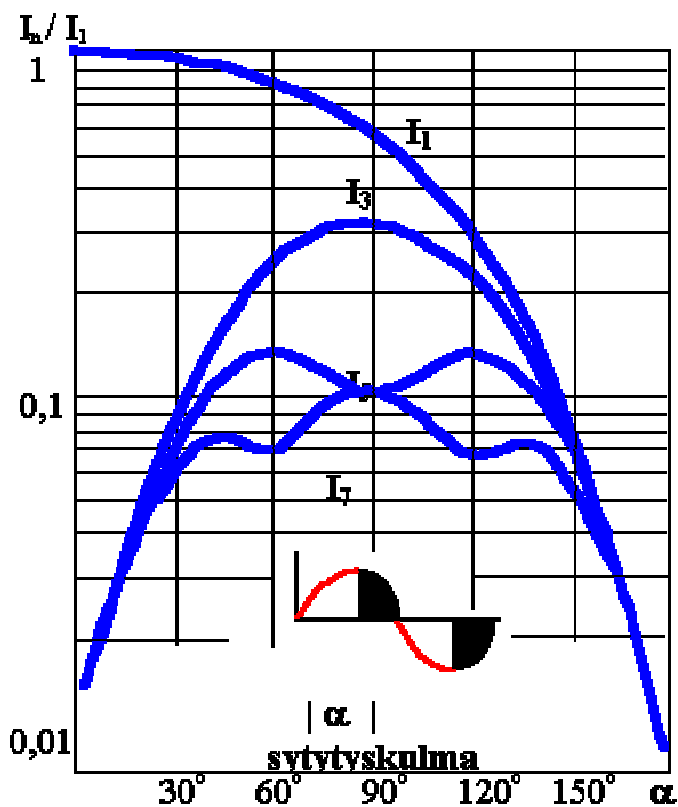
Nollapisteohjauksen synnyttämien yliaaltojen spektri. Kuvasta nähdään, että kyseinen ohjaustapa synnyttää epäharmonisia yliaaltoja.

Spektri



[lähde 25]

Vaihekulmaohjaus



[Lähde 25]

Valokaariuunit

Teollisuudessa on käytössä kolmenlaisia sulatusuuneja: vastus-, induktio- ja valokaariuuneja. Vastusuunit näkyvät verkossa vastuskuorman tavoin ja induktiouunit moottorikuorman tavoin. Verkon kannalta kaikkein häiritsevimpiä ovat valokaariuunit.

Valokaariuunit

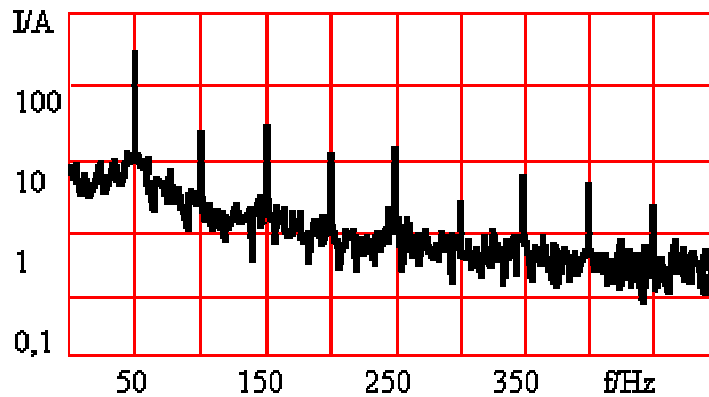
Valokaariuunit ovat sähköisesti hyvin hankalia kuormia. Häiriöitä aiheuttavat mm. kuorman epäsymmetria vaiheiden kesken. Uunin ottama päto- ja loisteho vaihtelevat muutaman hertsin taajuudella, mistä aiheutuu jänniteheilahtelua. Valokaariuuni synnyttää myös yliaaltoja.

Tavallisesti valokaari palaa elektrodin ja sulatettavan materiaalin välillä valokaaren jännitteen ollessa 40-700 voltia. Virrat saattavat olla kymmeniä kiloampeereja.

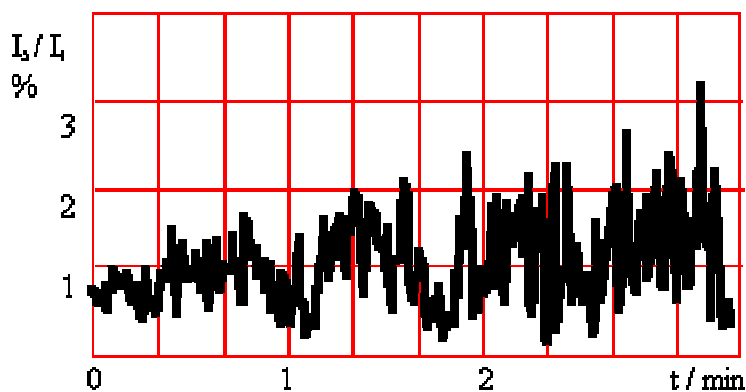
Valokaariuunin ottama virta vaihtelee nopeasti ja virta on hyvin säröytynyttä. Virta saattaa muuttua jopa niin nopeasti, että virran käyrämuotoa tutkittaessa voi olla vaikeaa löytää kahta samanlaista peräkkäistä jaksoa. Tilanne on vaikein sulatuksen

alussa. Valokaariuuni tuottaa harmonisten lisäksi myös epäharmonisia yliaaltoja sekä alle 50 Hz:n taajuisia virtoja. Syntyneiden yliaaltojen spektri on jatkuva.

Virran spektri sulatuksen alussa



Virran viides yliaalto sulatuksen alussa



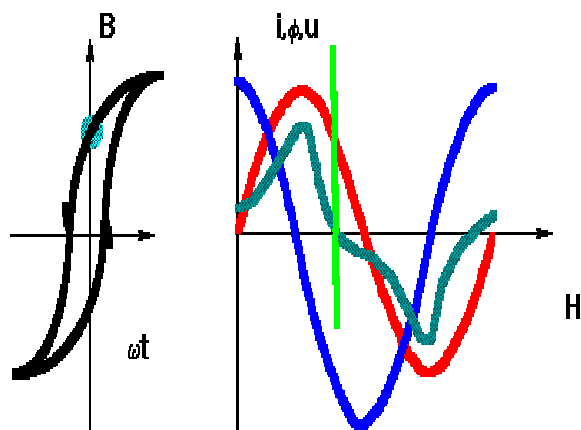
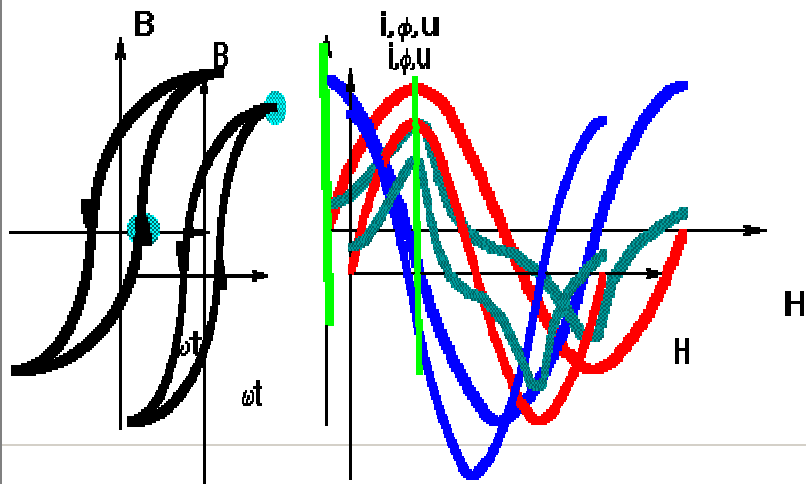
[Lähde 3]

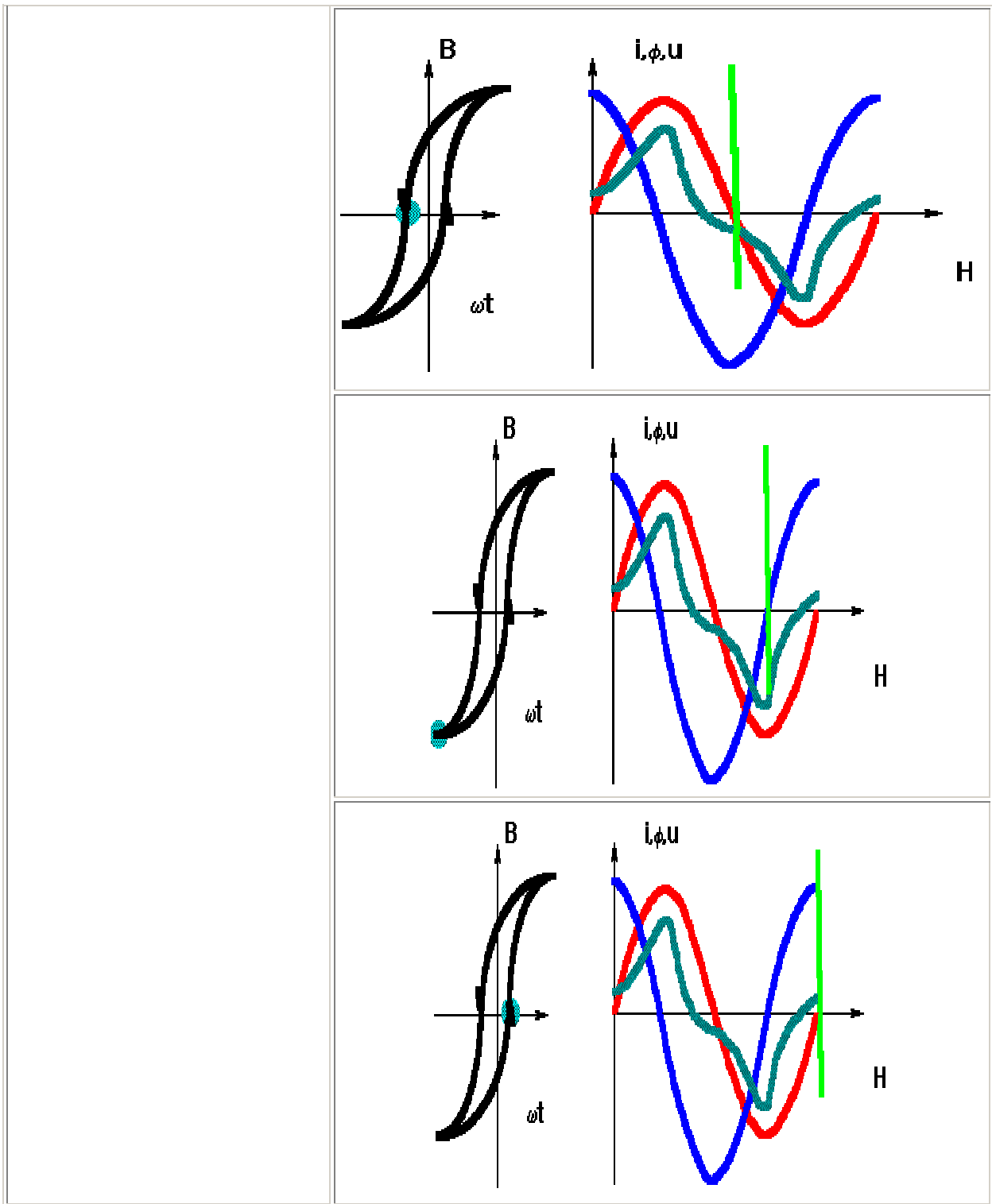
Muuntajat

Muuntajan yliaaltoja synnyttävä vaikutus perustuu raudan magneettiseen epälinearisuuteen. Magneettivuon tiheys ei kasva lineaarisesti magneettikentän voimakkuuden kasvaessa. Muuntajan rautasydämen hystereesistä johtuen magnetointivirta ei noudata syöttöjännitteen käyrämuotoa.

Hystereesi

Miten hystereesikäyrä vaikuttaa magnetointivirran muotoon? Tarkastellaan positiivista jakson puolta:





[Lähde 12,13]

Hystereesisilmukan muoto vaikuttaa magnetointivirran käyrämuotoon. Magnetointivirran käyrämuodosta nähdään, että se sisältää vain parittomia yliaaltoja. Suurilla muuntajilla magnetointivirta on n. 1% nimellisvirrasta. Pienillä muuntajilla se voi olla jopa 10%. Normaaleissa käyttöolosuhteissa muuntajat eivät ole merkittävä yliaaltolähde.

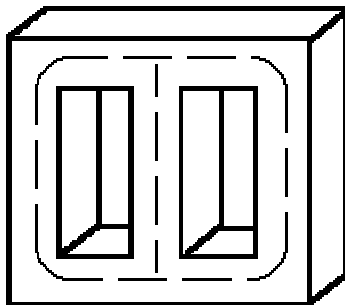
Syöttöjännitteen nostaminen yli nimellisen kasvattaa yliaaltoja huomattavasti, sillä silloin joudutaan sydämen kyllästysalueelle.

Pienikin tasavirta toisiossa kyllästyttää muuntajan sydämen ja synnyttää muuntajaan myös parillisia yliaaltoja. Tasakomponentti syntyy mm. puoliaaltotasasuuntauksesta sekä puoliksi ohjatuista suuntaajista.

Muuntajakytkennällä, sydämen rakenteella ja maadoitustavalla on merkittävä vaikutus yliaaltojen syntymiseen ja leviämiseen.

Muuntajakytkentä

Jakelumuuntajan sydämen rakenne tehdään taloudellisista syistä epäsymmetriseksi. Tällaisen kolmipylväsmuuntajan keskipylyvään reluktanssi ja myös magnetointivirta on pienempi kuin reunapylyväiden. Samoin eri vaiheiden yliaaltovirtojen suuruudet eroavat toisistaan.



[lähde 10]

Tähtikytkennässä symmetrisessä tilanteessa vaiheiden virtojen summa on nolla.

Vaikka virran perusaaltojen summa on nolla, eri vaiheiden kolmannet yliaallot eivät nolaudu, sillä niillä ei ole vaihekulmaeroa. Jos järjestelmässä on nollajohdin tai maadoitus, kulkee sen kautta kaikkien vaiheiden kolmas yliaaltovirta.

Jos järjestelmässä ei ole maadoitusta ei magnetointivirrassa voi olla kolmatta yliaaltoa, vaan se on lähes sinimuotoinen. Sen sijaan kolmas yliaalto ilmestyy vuon käyrämuotoon ja sitä kautta vaihejännitteeseen.

Pääjännitteestä kolmansia yliaaltoja ei voi havaita, sillä niillä ei ole vaihekulmaeroa.

Kolmiokytkennässä puolestaan jännite kolmoin ympäri on nolla.

Suomessa yleisimmät kytkennät jakelumuuntajille ovat Dyn11 ja Yzn11. 400 kV:n muuntajien kytkentäryhmä on YNynd11, 110/20kV:n muuntajien kytkentäryhmä on yleensä YNynd11 tai YNd11. Sähköverkkoa syöttävien generaattoreiden muuntajat ovat Dyn-kytkettyjä.

Jos toisiossa on kolmiokytkentä tai muuntajassa on kolmiokytketty tertiäärikäänitys, niin kolmioon kytkettyihin käämeihin syntyy kiertävä kolmas yliaaltovirta.

Jos muuntajan ensiökäänitys on kolmiokytketty, ei verkosta otettu magnetointivirta sisällä kolmella jaollisia yliaaltoja.

Jos Dyn-kytketyn muuntajan kuormana on kolmatta yliaaltoa aiheuttavia kuormia, niin nollajohtoon summautuvat yliaaltovirrat heijastuvat ensiöön saapuessaan muuntajaan aiheuttaen täten muuntajan ylikuumenemista.

Muita yliaaltolähteitä

Muita yliaaltolähteitä ovat purkaus- ja loistelamput, oikosulkumoottorit ja generaattorit. Normaaleissa käyttöolosuhteissa generaattorit ja oikosulkumoottorit eivät ole merkittäviä yliaaltojen lähteitä.

Purkaus- ja loistelamput

Loiste- ja purkauslamput ovat epälineaarisia kuormia ja ne tarvitsevat virranrajoittimen. Perinteisenä virranrajoittimena on ollut kuristin. Tällöin tehokerroin jää huonoksi, jota parannetaan rinnakkaiskompensoinnilla. Uudet elektroniset liitäntälaitteet parantavat hyötysuhdetta ja valonlaatua, mutta synnyttävät yliaaltoja, koska niiden toiminta perustuu verkkojännitteen vaihtosuuntaamiseen suurella taajuudella (>20 kHz). Laitteissa vaaditaan yliaaltosuodatinta yliaaltojen pienentämiseksi. Näiden lamppujen yliaaltoja säädelään standardilla IEC 555-2.

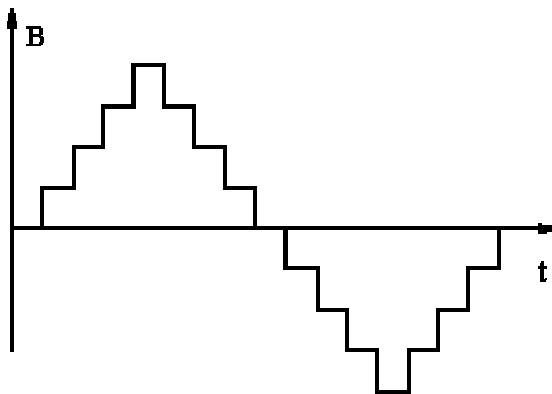
Pienoisloistelamppuja ja niiden elektronisia liittimiä ei sido mikään standardi. Ongelmia voi syntyä, kun näitä lampputyyppejä käytetään systemaattisesti isoissa rakennuksissa.

Oikosulkumoottorit

Epätahtimoottorin synnyttämät yliaallot johtuvat käämitysrakenteista ja moottorin magneettipiiriin raudan kyllästymisestä.

Sähkökoneiden ilmavälin vuontiheyden jakautuminen pyritään saamaan sinimuotoiseksi. Urakäämitystä käytettäessä ei vuo ole aivan sinimuotoinen. Erilaisten käämitysteknisin keinoin voidaan yliaaltoja rajoittaa. Jonkin tietyn yliaallon käämikerroin voidaan saada nolaksi, jolloin vastaavaa yliaaltovirtaa ei koneessa esiinny.

Urakäämityksen synnyttämä lähdejännite



[Lähde 11]

Generaattorit

Generaattoreita voidaan pitää yliaaltojännitelähteinä. Generaattorien kehittämä jännite poikkeaa sinimuodosta, sillä generaattorin navan ilmaväli ei ole aivan tarkkaan sinimuotoinen.

Generaattorin yliaaltovirtojen suuruus määräytyy kuormien yliaaltoimpedansseista.

Mikkola M. Hypermediaesitys yliaaltojen perusteista. Diplomityö TTKK 1996, 87s.

Peltola M. Modernin taajuusmuuttajakäytön yliaaltojen vaimennus. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Anttila I., Saransaari P. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin. Raportti TTKK 1981, 38 s.

Lehmusvirta J. Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa. Diplomityö TTKK 1982, 91 s.

Pohto T. Suuntaajakäyttöjen sähköjakeluverkkoon aiheuttamat yliaallot. Diplomityö TTKK 1976, 93 s.

Tuomainen M. Teollisuusverkkojen erityiskysymykset: yliaallot. INSKO 104-86 XI, 33 s.

Pettersson H. Tietokonejärjestelmä sähköverkon kuormana. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Partanen J. Sähkölämpöprosessit. Luentomoniste TTKK 1994

Tamsi L. Tasasuuntaaja- ja tyristorikäyttöjen aiheuttamat lisähäviöt syöttävässä muuntajassa. Diplomityö TTKK 1978, 79 s.

Suomen sähkölaitosyhdistys. Suositus sähköverkon yliaaltojen rajoittamiseksi. Julkaisu 1990, 17 s.

Baghzouz Y., Gong X. Analysis of three-phase transformer no-load characteristics. IEEE Transactions on Power Systems, Vol 10, No 1, Feb 1995, ss 18-26

Schalin B. Yliaallot ja valaistus. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Lehtonen M. Yliaallot ja niiden haittavaikutukset teollisuuden jakeluverkoissa. Sähkö 57-lehti 11/84, ss. 70-74

Yliaaltojen vaikutukset

Resonanssi

Yliaalloilla on monia haitallisia vaikutuksia verkon komponentteihin. Yliaallot kasvattavat häviöitä voimansiirrossa ja verkon komponenteissa aiheuttaen ylimääräistä lämpenemistä ja nopeuttaen eristeiden vanhenemista. Jännitteen käyrämuodon vääristymät aiheuttavat virhetoimintoja. Lisäksi yliaallot häiritsevät puhe ja radiotaajuudella tapahtuvaa viestiliikennettä.

Kaikkein haitallisin yliaaltoihin liittyvä ilmiö on kuitenkin resonanssi.

Resonanssi

Resonanssi syntyy, kun jonkin yliaallon taajuus on lähellä verkon resonanssitaajuutta. Tällöin yliaaltovirrat tai jännitteet usein moninkertaistuvat normaaliin tilanteeseen verrattuna. Resonanssi syntyy jonkin verkon osan kapasitanssien ja induktanssien välille. Resonanssitaajuus lasketaan kaavalla:

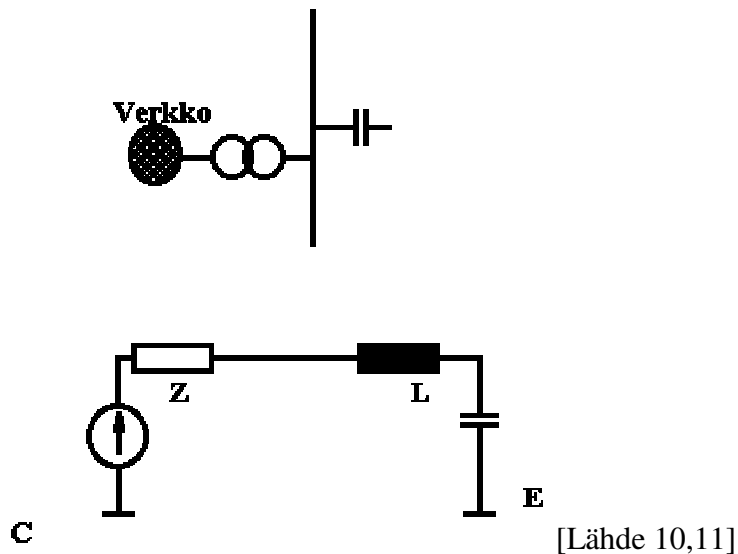
$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Resonanssi voi olla joko sarja- tai rinnakkaisresonanssi. Mikäli verkossa käytetään rinnakkaiskompensointia, muodostaa sen kapasitanssi syöttävän verkon induktanssin kanssa resonanssipiirin, jonka resonanssitaajuus on

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{S_c}{Q_c}}$$

Yllä olevasta kaavasta nähdään tiettyjä asioita resonanssitaajuudesta. Oikosulkutehon kasvu (verkon induktanssi pienenee) nostaa verkon resonanssitaajuutta ja yhä suurempi osa yliaalloista kulkeutuu syöttävän verkon suuntaan. Kompensointiasteen nosto taas pienentää resonanssitaajuutta. Verkossa kuormana olevat oikosulkumoottorit kasvattavat myös resonanssitaajuutta, mutta samalla vaimentavat resonansseja. Resistiivinen kuorma ei vaikuta resonanssitaajuuteen, mutta vaimentaa resonansseja huomattavasti.

Sarjaresonanssin muodostuminen verkossa

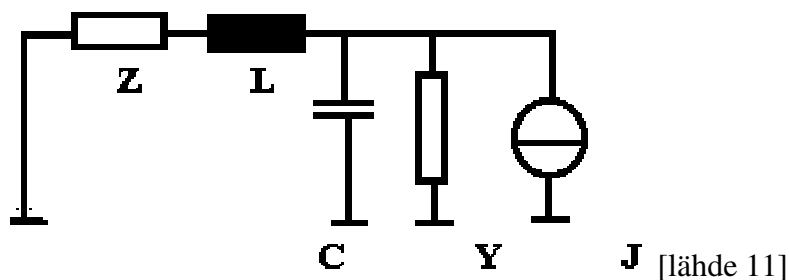
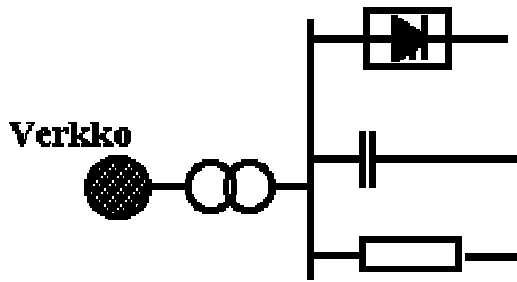


Sarjaresonanssi syntyy tavallisimmin loistehon kompensointikondensaattorien ja syöttävän muuntajan hajainduktanssien välille. Resonanssitilanteessa piirin reaktanssi on pieni, joten verkosta tulevalla yliaaltovirralla on pieni-impedanssinen sulkeutumistie. Yliaaltovirran suuruus määräytyy impedanssin Z ja yliaaltotaajuuden jännitteen E perusteella. Piirin impedanssi on pieni joten myös tämän taajuinen yliaaltovirran aiheuttama jännitesärö verkossa jää pieneksi, mutta kondensaattorin jännite säröytyy voimakkaasti.

Sarjaresonanssi 'imee' muuntajan yläjännitepuolen jänniteylijäännön hyvin pieneksi. Tätä ominaisuutta käytetään yliaaltosuodattimissa hyväksi.

Kuvassa yliaaltolähdettä on kuvattu ideaalisella jännitelähteellä E ja sen sisäisellä impedanssilla Z .

Rinnakkaisresonanssin muodostuminen verkossa



Sarjaresonanssia käytännössä vaarallisempi rinnakkaisresonanssi syntyy esimerkiksi suuntaajan rinnalle kytketyn kompensointikondensaattorin ja syöttömuuntajan tai kuormien induktanssien välille. Resonanssipiirin impedanssi on resonanssitilassa suuri, joten jännite säröytyy voimakkaasti. Tällöin kulkee resonanssipiirissä suuri virta, joka yleensä aiheuttaa kondensaattoripariston ylikuormittumisen. Virta voi olla moninkertainen normaaliin tilanteeseen verrattuna. Resonanssitajuudella syntyvän jännitteen suuruus riippuu piirin impedanssista ja yliaaltolähteen tehosta. Kuvassa yliaaltolähdettä on kuvattu ideaalisella virtalähteellä J ja sen sisäisellä admittanssilla Y .

Suuntaajat ja kondensaattorit

Vaikka suuntaajalaitteet ovatkin pahimpia yliaaltojen lähteitä, vaativat ne kuitenkin itse hyvän verkkojännitteen käyrämuodon toimiakseen oikein.

Suuntaajalaitteet

Koska verkkokommutoitujen suuntaajien ohjauspiirit on synkronoitu syöttöverkkoon, aiheuttaa jännitesärö vaikeuksia tyristorien tarkalle syttymiselle. Jännitteen särö ja kommutointilovet haittaavat syttymistä ja kommutointia, mikä johtaa ohjauskulmavirheisiin. Pahimmillaan voi syntyä positiivinen takaisinkytkentä jolloin toiminta käy epästabiiliksi. Lisäksi suuntaajasillan komponenteille aiheutuu ylimääräistä rasitusta ja hyötysuhde huononee.

Standardien mukaan syöttöjännitteen särö ei saa olla yli 5%.

Teollisuudessa käytetään kondensaattoriparistoja induktiivisen loistehon kompensointiin. Tällä pyritään nostamaan sähkökäyttöjen tehokerrointa ja pienentämään sähkön siirrosta aiheutuvia kustannuksia.

Kondensaattoriparisto

Useimmiten yliaalto-ongelmat ilmenevät kompensointikondensaattorien rinnakkaisresonansseina.

Kondensaattorin reaktanssi pienenee taajuuden kasvaessa, jolloin suuritaajuiset vahvistuvat suhteessa eniten. Yliaallot kasvattavat lämpöhäviöitä sekä vaikeuttavat perusaallolla tapahtuvaa loistehon kompensointia ja kondensaattorin suojausta. Liikalämpeneminen lyhentää pariston elinikää.

Standardin IEC-70 mukaan kondensaattorin tulee kestää pitkäaikainen tehollisarvoltaan 1,3-kertainen nimellisvirta ja 1,1-kertainen nimellisjännite. Muuttuvan loistehotarpeen mukaan on paristoja voitava säätää. Tästä aiheutuu se vaara, että jossain verkon kytkentätilanteessa ja jollain tietyllä kompensointiteholla syntyy resonanssiipiiri.

Kompensointi suoritetaan yliaaltopitoisessa verkossa joko estokelaparistoilla tai yliaaltosuodattimilla.

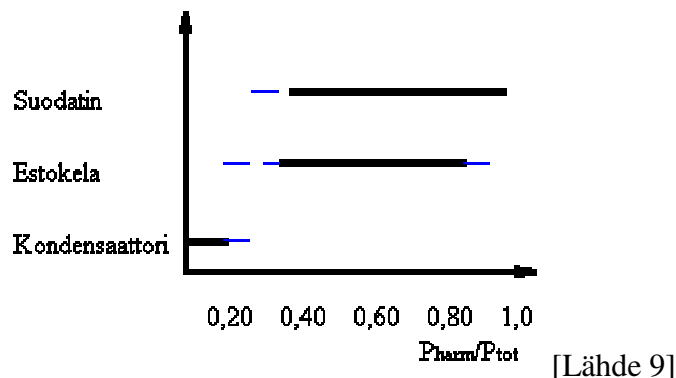
Estokelaparisto

Estokelaparistossa kukin kompensointiporras koostuu kondensaattoriyksiköstä, kuristimesta ja kontaktorista. Kondensaattorin ja kuristimen viritystaajuus on valittu siten, että se on matalampi kuin alin verkossa esiintyvä yliaalto. Kyseisen taajuuden alapuolella porras on kapasitiivinen, jolloin se tuottaa kompensointitehoa ja ko. taajuuden yläpuolella induktiivinen, jolloin se ei voi resonoida tyypillisillä yliaaltotaajuuksilla. Viritystaajuuksina käytetään 130 Hz ja 189 Hz.

Estokelaparistot eivät vaimenna yliaaltoja merkittävästi. Niiden sopivimpia käyttökohteita ovat verkot joissa on vain vähän yliaaltolähteitä, mutta paljon loistehon kulutusta.

Miten yliaaltopitoisen pienjänniteverkon kompensointi toteutetaan?

Yliaaltopitoisen verkon kompensointi valitaan kolmesta vaihtoehdosta: kondensaattoriparisto, estokelalla varustettu kondensaattoriparisto tai yliaaltosuodatin. Suutaa-antavana valintakriteerinä voi käyttää yliaaltoja tuottavan kuorman P_{harm} osuutta kokonaiskuormasta P_{tot} .



- Jos yliaaltoja tuottavan kuorman osuus ($P_{\text{harm}}/P_{\text{tot}}$) on alle 20 %, voidaan käyttää normaalia kondensaattoriparistoa.
- Jos suhde $P_{\text{harm}}/P_{\text{tot}}$ on yli 20 %, hoidetaan kompensointi joko estokelaparistolla tai yliaaltosuodattimella.
- Mikäli kompensointiteho ($Q/kvar$) suhteessa syöttävän muuntajan tehoon on suuri eli n. 30 %, riittää pienikin yliaaltoja tuottava kuorma tekemään tavallisen kondensaattoripariston käytön mahdottomaksi.

Muuntajat ja moottorit

Muuntajan ollessa kuormitettuna syntyy sen sydämessä, käämityksissä ja muissa osissa häviöitä. Nämä häviöt voidaan jakaa tyhjäkäynti- ja kuormitus-häviöihin. Yliaalloilla on vaikutusta häviöiden suuruuteen.

Häviöt

Tyhjäkäyntihäviöt P_0 muodostuvat pääasiassa rautahäviöistä, jotka puolestaan voidaan jakaa hystereesihäviöihin P_h ja pyörrevirtahäviöihin P_p . Ne ovat riippumattomia kuormituksen suuruudesta.

Tyhjäkäyntihäviöt

Muuntajan tyhjäkäyntihäviöt riippuvat jännitteen tehollisarvon lisäksi taajuudesta. Tämän vuoksi yliaallot kasvattavat tyhjäkäyntihäviöitä. Normaalisti esiintyvillä yliaaltojen suuruuksilla jakelumuuntajan tyhjäkäyntihäviöt kasvavat 1-2 %. Lisääntyneillä tyhjäkäyntihäviöillä on merkitystä, jos muuntaja on magneettisesti kyllästynyt esim. virrassa esiintyvän tasakomponentin takia. Tasakomponentin ollessa 2 % toision nimellisvirrasta kasvavat tyhjäkäyntihäviöt 10 %. Tätä on pidettävä sallitun tilanteen ylärajana. Koska muuntajan kuormitushäviöt ovat moninkertaiset tyhjäkäyntihäviöihin verrattuna, kannattaa päähuomio kiinnittää siihen, miten yliaallot kasvattavat kuormitushäviöitä.

Pääosa kuormitushäviöistä P_k on resistanssissa syntyviä virtalämpöhäviöitä P_r . Muuntajan häviöistä kuormitushäviöt muodostavat suurimman osan, sillä ne ovat muuntajan koosta riippuen moninkertaiset tyhjäkäyntihäviöihin verrattuna. Epänormaali käyttöolosuhteet ja vikatilanteet saattavat kasvattaa molempia huomattavasti.

Kuormitushäviöt

Suurin vaikutus kuormitusvirran sisältämällä yliaalloilla on muuntajan resistansseissa syntyviin virtalämpöhäviöihin. Niiden kasvu johtuu käämeissä syntyvän virranahdon aiheuttamana resistanssin suurenemisena korkeammilla taajuuksilla.

Valittaessa käytölle muuntajaa on lähdettävä siitä, ettei muuntaja lämpene liikaa nimelliskuormallaan. Jos tasavirtakäyttöjen syöttömuuntajaa kuormitetaan nimellisvirrallaan, kasvavat muuntajan kuormitushäviöt 10-20% sinimuotoiseen virtaan verrattuna. Käämien lisälämpenemä on tällöin 4-10°C.

Käytännössä on todettu, että jos järjestelmässä on paljon yliaaltoja, niin muuntajan kuormitus pitäisi vähentää noin 20-30%:a nimellisestä, ettei muuntaja ylikuumentaisi.

Yliaallot aiheuttavat muuntajissa ylimääräisiä häviöitä ja lisälämpenemistä, joilla on merkitystä muuntajan ikään, varsinkin, jos yliaaltopitoisuus on suuri.

Yliaalloilla on myös haitallisia vaikutuksia moottoreihin.

Moottorit

Yliaallot aiheuttavat moottoreissa lisääntyneitä virtalämpöhäviöitä, heilurimomenteja, värinä- ja ääni-ilmiöitä.

- Oikosulkumoottorit

Oikosulkumoottoreissa virtalämpöhäviöt kasvavat merkittävästi, kun taas rautahäviöiden kasvulla ei ole suurta merkitystä. Kuormituksella ei ole juurikaan merkitystä häviöiden kasvuun, joten häviöiden suhteellinen osuus on suurimmillaan tyhjäkäynnissä. Häviöiden kasvaessa hyötysuhde laskee ja eristeiden vanhenemisnopeus kasvaa.

Roottorikäämityksellä on suuri merkitys epätahtimoottorin yliaaltojen sietokykyyn. Jos roottorissa on virranahtokäämitys, esim. syväurakäämitys, voi yliaaltojen aiheuttama lisälämpenemä olla huomattava. Taajuusmuuttajakäytöissä saa oikosulkumoottoria kuormittaa noin 90% nimellisestä. Vinouraroottorilla estetään yliaaltojen indusoitumista roottoriin.

Yliaaltojen vaikutukset käynti- ja käynnistysväntö-momenttin ovat pienet. Sen sijaan yliaaltojen aiheuttamat heilurimomentit voivat 5-10% yliaaltojännitteellä olla jopa 10% nimellisestä. Tämä voi aiheuttaa käytön häiriöitä ja mekaanisia vahinkoja.

- Tahtikoneet

Yliaaltojen aiheuttama häviöiden kasvu on tahtikoneissa suurempaa kuin epätahtikoneissa. Yliaaltojen päävaikutus kohdistuu tahtikoneissakin roottoriin.

Tahtikoneista umpinapakoneet ovat herkempiä yliaalloille, kuin avonapakoneet, joiden vaimennuskäämitykset pienentävät yliaaltojen aiheuttamia roottorihäviöitä.

Suuret generaattorit ovat herkempiä yliaalloille, sillä niitä käytetään usein maksimiteholla, eikä niillä ole siten marginaalia lisälämpenemiselle.

Muita haittavaikutuksia

Yliaallot vaikuttavat elektronisiin laitteisiin monella eri tavalla. Jännitesärön aiheuttamat ylimääräiset nollakohdat tai muutokset nollakohtiin sekoittavat laitteita, jotka tarkkailevat jännitteen nollakohtaa. Tällaisia laitteita ovat mm. kellot, puolijohdekytkimet ja katkaisijat.

Katkaisijat

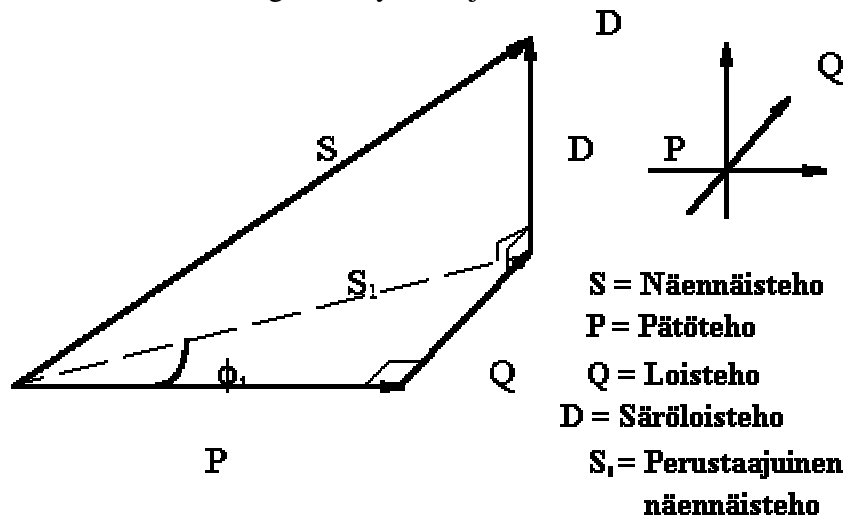
On olemassa tapauksia, joissa virran särön on havaittu vaikuttavan katkaisijan katkaisukykyyn. Ongelma korostuu katkaistaessa pieniä virtoja jolloin virran särö voi olla suhteellisen suuri. Kun särö on suuri, voi virran nousunopeus (di/dt) virran nollakohdassa olla suurempi kuin puhtaalla siniaallolla tehden katkaisutapahtuman vaikeammaksi. Pidentynyt katkaisutapahtuma helpottaa myös valokaaren uudelleensyöttymistä.

Useat ilmakatkaisijat on varustettu erillisellä magneettisella puhalluksella, jonka tarkoituksena on puhaltaa valokaari sammutuskennostoon, jossa valokaari pitenee ja sammuu. Virran särön ollessa suuri katkaisijan puhalluskäämi ei välttämättä pysty puhaltamaan valokaarta sammutuskennostoon. Suuri särö virrassa ei ole todennäköinen sähkönsiirto ja sähkönjakeluverkoissa mutta teollisuusverkoissa resonanssin yhteydessä hyvinkin mahdollinen, missä katkaisijoilta edellytetään varmaa katkaisua. Tutkimusten mukaan tyhjiökatkaisijat ovat vähemmän herkkiä yliaalloille kuin magneettipuhallusta käyttävät ilmakatkaisijat.

Yliaallot heikentävät myös laitteitten ja järjestelmien tehokerrointa, sekä aiheuttavat häviöitä voimansiirrossa. Lisäksi kolmannet yliaallot saattavat aiheuttaa yllättäviä ongelmia pienjänniteverkossa, jos niihin ei ole varauduttu.

Tehokerroin

Tehokertoimen vektoridiagrammi yliaaltoja sisältävässä verkossa.



[Lähde 18]

Näennäisteho lasketaan kaavalla

$$S = \sqrt{3} UI$$

Pätö-, lois- ja säröloisteho saadaan laskettua

$$P = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \phi_1$$

$$Q = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \phi_1$$

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2$$

Tehokerroin perusaallolle ja yliaaltoja sisältävälle järjestelmälle

Perusaallon tehokerroin

$$\phi = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Yliaaltoja sisältävän järjestelmän tehokerroin

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Säröloisteho ei tee työtä kuten ei loistehokaan.

Pienjänniteverkko

Yleensä nollajohdot mitoitetaan vaihejohtimien suuruiseksi. Symmetrisessä lineaarisessa kolmivaihekuormituksessa nollajohdossa ei kulje virtaa, sillä vaihevirtojen summa on nolla. Tilanne on täysin toinen, jos kolmivaiheisessa nelijohtoisessa järjestelmässä on kytkettynä suuri määrä yksivaiheisia epälineaarisia kuormia, kuten esim. toimistorakennuksissa.

Järjestelmässä, jossa on paljon epälineaarisia kuormia, voi nollajohdossa kulkeva kolmas yliaaltovirta olla jopa 1,7-kertainen vaihevirtaan verrattuna. Tästä aiheutuu ylikuumenemis- ja tulipalovaara, sillä nollajohdoissa ei ole sulakkeita. Nollajohdossa kulkeva suuri virta aiheuttaa myös normaalia suuremman jännitehäviön maadoitusnavan ja nollajohdon välille.

On olemassa keinoja, joilla nollajohtojen kuormitusta voidaan vähentää.

Nollajohtojen kuormitus

3-vaiheisessa 4-johtoisessa järjestelmässä osa nollajohdossa kulkevasta perustaajuisesta 50 Hz:n virrasta voidaan minimoida tasapainottamalla eri vaiheiden kuormat. Kolmatta yliaaltovirtaa voidaan pienentää lisäämällä kolmannen yliaallon suodatint.

Ellei kumpikaan näistä ratkaisusta ole käytännöllinen, niin järjestelmään voidaan lisätä ylimääräisiä nollajohtoja siten, että joka vaiheelle on oma nollajohto. Toinen keino on asentaa vaiheille yhteinen ylimitoitettu nollajohto.

Yliaallot häiritsevät myös puhe- ja radiotaajuuksilla toimivia viestijärjestelmiä.

Viestijärjestelmät

Voimalinjojen kuulotaajuudella (100Hz - 5000Hz) olevat yliaallot voivat indusoida puhelinlinjoihin häiriöitä. Häiriön määrä riippuu yliaaltojen määrästä ja voimajohtojen ja puhelinajohtojen keskenäisestä sijainnista. Kaapelointi pienentää häiriöitä. Ylimääräisiltä häiriöiltä vältetään myös, jos voima-, tele- ja datajohtoja ei asenneta teollisuuslaitoksissa samoille tai samansuuntaisille kaapelihyllyille.

Arvioitaessa voimansiirtoverkkojen yliaaltojen haitallisuutta puhelinliikenteelle käytetään ns. psfo-metristä painokerrointa, jolla kerrotaan eri taajuiset yliaallot korvan herkkyyden mukaan.

Puhelinlinjoja ei yleensä enää rakenneta avojohtoina, joten on oletettavaa, että televerkon kehittyessä psfometriset häiriöt vähenevät.

Lehmusvirta J. Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa. Diplomityö TTKK 1982, 91 s.

Lehtonen M. Yliaallot ja niiden haittavaikutukset teollisuuden jakeluverkoissa. Sähkö 57-lehti 11/84, ss. 70-74

Niittymäki R. Loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen aiheuttamat häiriöt Valkeakosken energialaitoksen sähköverkossa. Diplomityö TTKK 1990, 63 s.

Salminen P. Tyristorisuuntaajien synnyttämät yliaallot ja loistehon kompensointikondensaattorit. Sähkö 47-lehti 1974, ss. 12-15

Ruupunen P. Kokemuksia yliaaltohäiriöistä teollisuusverkossa. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Laitinen M. Yliaaltojen vaimentaminen. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Tamsi L. Tasasuuntaaja- ja tyristorikäyttöjen aiheuttamat lisähäviöt syöttävässä muuntajassa. Diplomityö TTKK 1978, 79 s.

Anttila I., Saransaari P. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin. Raportti TTKK 1981, 38 s.

Lehtonen M. Yliaallot ja niiden haittavaikutukset teollisuuden jakeluverkoissa. Sähkö 57-lehti 11/84, ss. 70-74

Suomen sähkölaitosyhdistys. Suositus sähköverkon yliaaltojen rajoittamiseksi. Julkaisu 1990, 17 s.

Balda J. et al. Effects of harmonics on equipment. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 8, No 2, April 1993, ss.672-680

Harmoniset yliaallot tehonsyötössä. Fluke-esite 1995, 16 s.

Yliaaltojen torjunta

Yliaaltosuodattimet

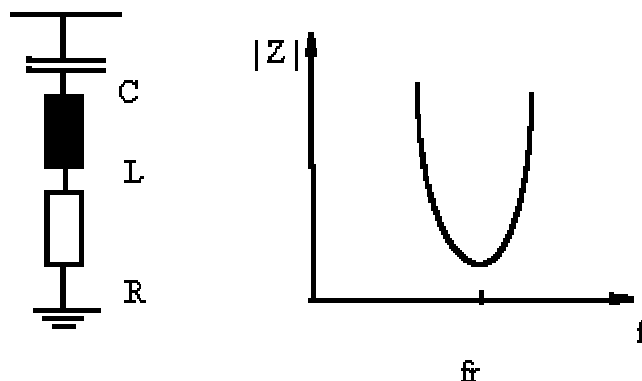
Yliaaltohaittoja pienennettäessä käytettävä keino valitaan teknisten ja taloudellisten seikkojen perusteella. Tällöin on syytä pohtia onko edullisempaa suodattaa yliaaltoja vai estää niiden syntyminen. Voimassaolevat määräykset tulee ottaa huomioon menetelmää valittaessa. Yliaaltosuodattimet voidaan jakaa kahteen ryhmään: passiivi- ja aktiivisuodattimiin.

Passiivisuodatin

Passiivisia suodattimia nimitetään yleisesti imupiireiksi. Imupiirit ovat sarjaresonanssipiirejä, jotka muodostavat tietyn taajuiselle yliaaltovirralla pieni-impedanssisen sulkeutumistien. Suodatus voidaan tehdä joko keskitetysti tai hajautetusti.

Perustaajuudella impedanssin tulee olla mahdollisimman suuri pätötehohäviöiden minimoimiseksi. Imupiiri on perustaajuudellaan kapasitiivinen, joten se tuottaa induktiivista loistehoa ja toimii siten samalla kompensointikondensaattorina.

- Ensimmäisen kertaluokan suodatin



Yhdelle taajuudelle viritetty imupiiri

Imupiirin impedanssikäyrä

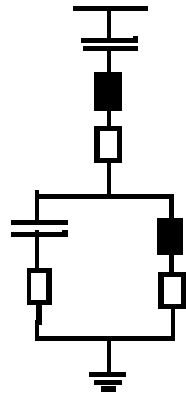
[lähde 8]

Yksinkertaisin suodatin on yhdelle taajuudelle viritetty imupiiri.

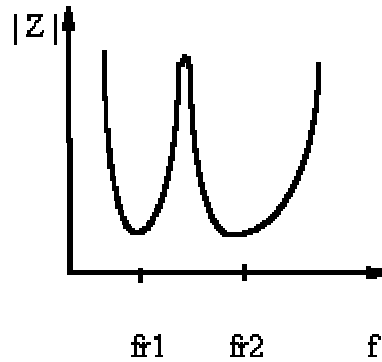
Suodattimen resonanssitaajuus f_r pyritään mitoittamaan mahdollisimman lähelle poistettavan yliaallon taajuutta. Kondensaattorin kapasitanssin määrää yleensä tarvittava perustaajuinen kompensointiteho.

Kytkemällä monta suodatinta rinnan, voidaan kaikki häiritsevät yliaallot poistaa. Tällainen ratkaisu on yleensä liian kallis.

- Toisen kertaluokan suodatin



Kahdelle taajuudelle
virittetty imupiiri



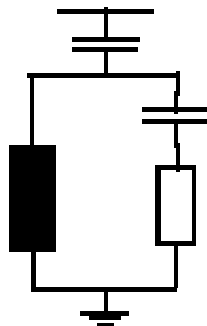
Imupiiirin
impedanssikäyrä

[Lähde 8]

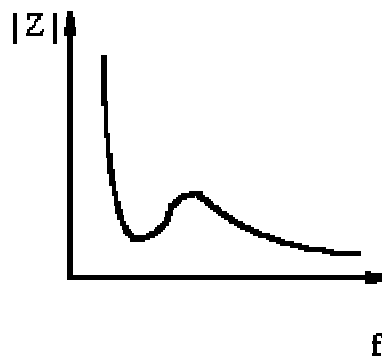
Kaksoisvirittetyllä suodattimella voidaan poistaa kaksi eri yliaaltoa yhtäaikaan. Perustaajuiset häviöt ovat pienemmät kuin kahta erillistä suodatinta käytettäessä.

Vielä kolmannen kertaluvun suodattimet ovat toteuttamiskelpoisia. Jos suodatattavia yliaaltoja on vielä enemmän on turvaututtava laajakaistaiseen suodattimeen.

- Laajakaistainen suodatin



Laajakaistainen
suodatin



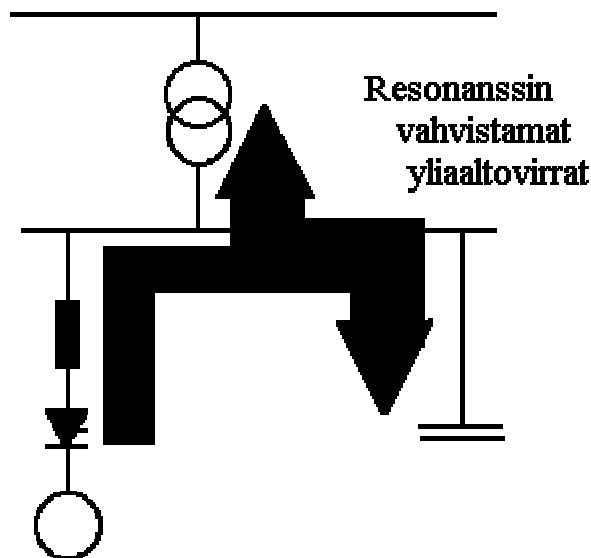
Suodattimen
Impedanssikäyrä

[Lähde 8]

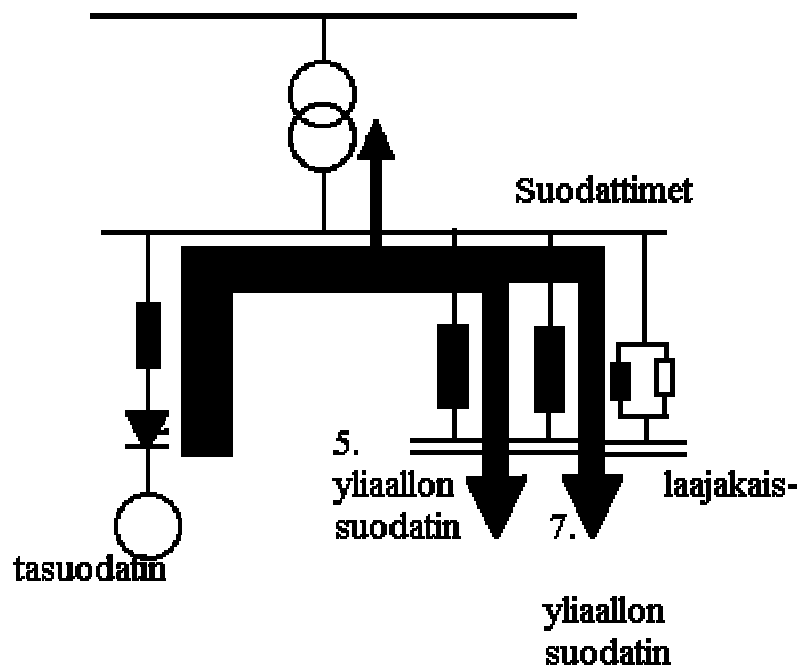
Laajakaistaisia suodattimia on useita eri tyyppiä. Periaatteeltaan ne ovat ylipäästösuoittimia ja niillä voidaan vähentää kaikkia tiettyä taajuutta suurempia yliaaltotaajuuksia.

Jos suodatettavia yliaaltoja on paljon, taloudellisinta on virittää suodatin pienille taajuuksille (250 - 550 Hz) jokaiselle oma suodatin ja suuritaajuisille yliaalloille laajakaistainen suodatin.

Rinnakkaisresonanssi ilman suodattimia



Suodatuksella poistetaan isoimmat yliaallot



[Lähde 9]

Aktiivisuodatin

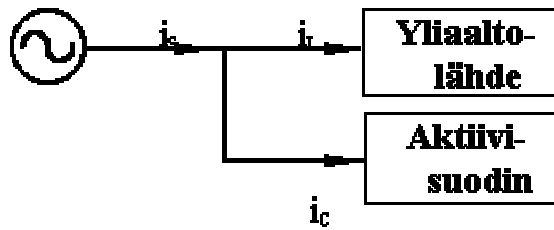
Aktiivisuodatin on tehopuolijohteilla toteutettu säädettävä yliaaltovirtalähde. Se syöttää verkkoon yliaaltoja, jotka ovat vastakkaisessa vaiheessa verkon yliaaltoihin nähden, jolloin ne kumoavat toisensa. Aktiivisuodattimen etuja perinteisiin LC-suodattimiin verrattuna ovat:

- Taajuudeltaan ja suuruudeltaan muuttuvien yliaaltojen suodatus on tehokasta

- Yhdellä suodattimella voidaan suodattaa useita yliaaltoja
- Nopea vaste ja pieni tilantarve

Suodattimet ovat joko jännite- tai virtavälipiirillisiä. Yleensä ne kytketään kuorman rinnalle.

Virta i_c vastaa kuormavirran i_L yliaaltoja, mutta on niihin vastakkaismerkkinen. Tällöin suodattimen virran ja kuormavirran summautuessa kuormavirran yliaallot eliminoituvat ja verkkovirrasta i_s tulee lähes sinimäinen. Suodatin ottaa tarvitsemansa perustajuksen pätötehon verkosta.

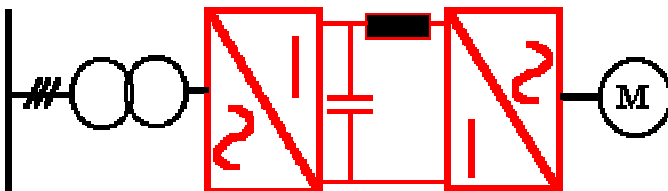


[Lähde 12,15]

Suurimpana esteenä aktiivisuodattimien yleistymiselle on niiden korkea hinta ja suuret häviöt. Sovelluskohteiden lisääntyminen riippuu lähinnä tehokomponenttien kehityksestä.

Suuntaajatekniset keinot

Suuntaajat ovat suurin yliaaltojen lähde. Käytettävän suuntaajan rakenteella ja ohjauksella on merkitystä yliaaltojen syntyyn. Käytettävän suuntaajan valinta riippuu kuitenkin ensisijaisesti teknisistä ja taloudellisista seikoista.



[Lähde 2,17]

Karru E. Sähkönjakeluverkosten yliaaltosuodattimien mitoitusperusteiden selvittely. Diplomityö TTKK 1976, 74 s.

Lehmusvirta J. Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa. Diplomityö TTKK 1982, 91 s.

Lehtonen M. Yliaallot ja niiden haittavaikutukset teollisuuden jakeluverkoissa. Sähkö 57-lehti 11/84, ss. 70-74

Pallaste I. Virtavälipiirillinen aktiivisuodin. Diplomityö TTKK 1994

Tuusa H. Pallaste I. yliaaltojen kompensointi aktiivisuotimilla. TTKK raportti 1991, 59 s.

Anttila I., Saransaari P. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin. Raportti TTKK 1981, 38 s.

Peltola M. Modernin taajuusmuuttajakäytön yliaaltojen vaimennus. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.

Yliaaltojen esiintyminen

Yliaaltojen mittaaminen

Teoreettiset tarkastelut eivät riitä yliaalto-ongelmien paikantamiseksi, vaan tarvitaan myös mittauksia. Mittauksen tavoitteista ja mitattavasta kohteesta riippuu mittaustavan valinta. Joskus voi riittää pelkkä tieto yliaaltojen olemassaolosta.

Mittaustapa

Tavallisimmin mittausten tarkoituksena on selvittää yliaaltojen taajuudet ja amplitudit, joiden perusteella virran ja jännitteen säröt voidaan laskea. Yliaaltojen olemassaolo voidaan yksinkertaisimmin todeta tarkastelemalla jännitteen tai virran käyrämuotoa oskilloskoopilla. Särö voidaan arvioida karkeasti ja päättää onko lisätutkimuksiin aihetta.

Pienjännitteestä yliaaltojen mittaaminen on luonnollisesti yksinkertaisempaa ja helpompaa kuin suurjännitteestä.

Pienjännite

Pienjännitteellä yliaaltojen mittaaminen on helppoa. Markkinoilla on monipuolisia ja pienikokoisia analysaattoreita, joihin mittaussignaali muodostetaan pihtivirtamuuntajalla. Analysaattorit pystyvät erottelamaan eri komponentit jännitteestä ja virrasta. Analysaattorit pystyvät laskemaan mm. tehokertoimen, särön, eri komponenttien suuruudet sekä muodostamaan taajuusspektrin.

Mitattaessa virtaa tai jännitettä yliaaltopitoisessa verkossa on oltava siihen soveltuva mittari. Tavalliset yleismittarit mittaavat tehollisarvoa (RMS), joka antaa oikean tuloksen vain puhtaalle siniaallolle. Oikea tulos saadaan, kun käytetään todellista tehollisarvoa (True RMS) mittaavaa mittaria.

Suurjännite

Suurjännitteen yliaaltojen mittaamisessa suurin ongelma on analysoivan laitteen erottaminen luotettavasti suurjännitteestä siten, ettei mitattavan suureen alkuperäinen käyrämuoto muutu. Koska sähköasemien suunnittelussa ei aikaisemmin ole otettu huomioon tätä mittaustarvetta, on lähes ainoa mahdollisuus mittaussignaalin muodostamiseen mittamuuntajien tai jännitteenjakajien käyttö.

Käytännössä mittamuuntajilla mittaaminen toteutetaan lähes aina virtamuuntajien avulla, koska niiden taajuusvaste on parempi kuin jännitemuuntajilla. Lisäksi virtayliaallot ovat suhteessa isommat kuin jänniteylyliaallot, joten niiden mittaaminen on helpompaa ja tulokset luotettavampia kuin jänniteylyliaaltojen tapauksessa. Saadut mittaussignaalit käsitellään analysaattorilla kuten pienjännitepuolellakin.

Määräykset ja suositukset

Hyvälaatuinen sähkö on sekä tuottajien että kuluttajien etujen mukaista. Kuitenkin yliaaltoja aiheuttavat kuluttajat eivät ole vapaaehtoisesti halukkaita ryhtymään kalliisiin investointeihin, varsinkin jos he itse eivät kärsi niiden haitoista. Siksi tarvitaan määräyksiä, kuinka paljon yliaaltoja kuluttaja saa syöttää verkkoon. Teollisuusverkkoja nämä määräykset eivät koske.

Määräykset

Määräykset ovat aikaisemmin käsitelleet pääasiassa sähköverkon rakentamista, käyttöä ja turvallisuutta. Nykyään määräykset käsittelevät enenevässä määrin myös häiriöitä ja niiden hallintaa koskevia rajoituksia. Useat näistä määräyksistä nojautuvat kansainvälisiin standardeihin.

Sähköverkon yliaaltojen sietokyvystä jaetaan sähkönkäyttäjälle osuus, joka määräytyy käyttäjän ns. referenssivirran avulla.

$$I_{ref} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{ref}}$$

Mittaukset tehdään siten, että ne edustavat tyypillistä käyttötilannetta.

Yksittäiset kotitalouslaitteet eivät muodosta paljon yliaaltoja. Ongelmana on kuitenkin kotitalouslaitteiden suuri lukumäärä.

Kotitalouslaitteet

Suuren lukumääränsä lisäksi ongelmallista kotitalouselektronikassa on käytön samanaikaisuus, esimerkkinä TV:n katselu.

Kotitalous- ja vastaavia sähkölaitteita varten on tehty standardi IEC 555 (SFS-EN 60555) osat 1, 2 ja 3, joista osa 2 käsittelee yliaaltoja. Siinä määritellään laitteiden suurimmat sallitut yliaaltovirrat komponentteittain.

Yliaaltotilanne

IVO Oy on mitannut kantaverkon yliaaltoja useaan otteeseen. Lisäksi sähkölaitokset ovat mitanneet itse jännitteen laatua omissa verkoissaan. Yleisesti voidaan todeta, että Suomen kantaverkossa jännitteen laatu on hyvä kansainvälisestäikin vertailtuna. IVO:n vuonna 1992 suorittamissa mittauksissa 110 kV verkossa ei SLY:n asettamia rajoja kokonaissärön, tai yksittäisten komponenttien osalta ylitetty.

Lähdeluettelo

- [1] Anttila I. Sähköverkon yliaaltoimpedanssin laskenta- ja mittaussmahdollisuudet. *Diplomityö TTKK 1979*, 98 s.
- [2] Anttila I., Saransaari P. Katsaus sähköverkon yliaaltoihin ja niiden aiheuttamiin häiriöihin. *Raportti TTKK 1981*, 38 s.
- [3] Arrilaga J., Bradley D., Bodger P. *Power system harmonics*. John Wiley & Sons Ltd 1985, 336 s.
- [4] Balda J. et al. *Effects of harmonics on equipment*. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 8, No 2, April 1993, ss.672-680
- [5] Baghzouz Y., Gong X. *Analysis of three-phase transformer no-load characteristics*. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol 10, No 1, Feb 1995, ss 18-26
- [6] *Harmoniset yliaallot tehonsyötössä*. *Fluke-esite 1995*, 16 s.
- [7] Havunen I. *Hypermedian käyttö muuntajien ja sähkökoneiden luento-opetuksessa*. *Diplomityö TTKK 1994*, 75 s.
- [8] Karru E. *Sähkönjakeluverkkojen yliaaltosuodattimien mitoitusperusteiden selvittely*. *Diplomityö TTKK 1976*, 74 s.
- [9] Laitinen M. *Yliaaltojen vaimentaminen*. *AEL-INSKO-Koulutus 1996*, *Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa*.
- [10] Lehmusvirta J. *Yliaallot Tampereen kaupungin sähkölaitoksen verkossa*. *Diplomityö TTKK 1982*, 91 s.
- [11] Lehtonen M. *Yliaallot ja niiden haittavaikutukset teollisuuden jakeluverkoissa*. *Sähkö 57-lehti 11/84*, ss. 70-74
- [12] Mikkola M. *Hypermediaesitys yliaaltojen perusteista*. *Diplomityö TTKK 1996*, 87 s.
- [13] Mikkola M. *Yliaallot*. *ToolBook-ohjelma*, 1996.
- [14] Niittymäki R. *Loistehon kompensoinnin ja yliaaltojen aiheuttamat häiriöt Valkeakosken energialaitoksen sähköverkossa*. *Diplomityö TTKK 1990*, 63 s.
- [15] Pallaste I. *Virtavälipiirillinen aktiivisuodin*. *Diplomityö TTKK 1994*
- [16] Partanen J. *Sähkölämpöprosessit*. *Luentomoniste TTKK 1994*
- [17] Peltola M. *Modernin taajuusmuuttajakäytön yliaaltojen vaimennus*. *AEL-INSKO-Koulutus 1996*, *Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa*.

- [18] *Pettersson H. Tietokonejärjestelmä sähköverkon kuormana. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.*
- [19] *Pohto T. Suuntaajakäyttöjen sähkönjakeluverkostoon aiheuttamat yliaallot. Diplomityö TTKK 1976, 93 s.*
- [20] *Ruupunen P. Kokemuksia yliaaltohäiriöistä teollisuusverkossa. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.*
- [21] *Salminen P. Tyristorisuuntaajien synnyttämät yliaallot ja loistehon kompensointikondensaattorit. Sähkö 47-lehti 1974, ss. 12-15*
- [22] *Schalin B. Yliaallot ja valaistus. AEL-INSKO-Koulutus 1996, Yliaallot ja niiden aiheuttamat häiriöt sähköverkossa.*
- [23] *Suomen sähkölaitosyhdistys. Suositus sähköverkon yliaaltojen rajoittamiseksi. Julkaisu 1990, 17 s.*
- [24] *Tamsi L. Tasasuuntaaja- ja tyristorikäyttöjen aiheuttamat lisähäviöt syöttävässä muuntajassa. Diplomityö TTKK 1978, 79 s.*
- [25] *Tuomainen M. Teollisuusverkkojen erityiskysymykset: yliaallot. INSKO 104-86 XI, 33 s.*
- [26] *Waltari, M. Sähkölaki ja sähköntoimitusehdot - kommentaari oikeustapauksineen. Suomen sähköurakoitsijaliiton koulutus ja kustannus Oy 1984. 292 s.*