

9. LOISTEHON KOMPENSOINTI JA YLIAALTOSUOJAUS

9.1. Loistehon kompensointitarpeen määrittäminen

Tietyt sähköverkkoon liitettävät kuormitukset tarvitsevat toimiakseen pätötehon P ohella myös loistehoa Q . Näitä ovat esim. moottorit, purkauslamput ja muuntajat.

Pätö- ja loisteho muodostavat näennäistehon S ;

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (1)$$

jossa S = näennäisteho,
 P = pätöteho ja
 Q = loisteho.

Kuorman ottama virta I lasketaan näennäistehosta;

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U}, \quad (2)$$

jossa S = näennäisteho,
 U = jännite.

Sähköverkko mitoitetaan kokonaisvirran ja näennäistehon perusteella. Kuormituksen loistehontarpeen ilmaisee tehokerroin $\cos \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3)$$

Eri kuormitusten tyypillisiä tehokertoimia on taulukossa 9.1a.

Taulukko 9.1a. Kuormitusten tyypillisiä tehokertoimia.

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

Kompensointitarve voidaan laskea yhtälöstä;

$$Q = \frac{P}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2), \quad (4)$$

jossa Q = loistehon tarve,
 P = kuormituksen pätöteho,
 η = kuormituksen hyötysuhde,
 φ_1 = tehokulma ennen kompensointia ja
 φ_2 = tehokulma kompensoinnin jälkeen.

Laadutettuna suureyhtälönä

$$Q = \frac{P \text{ [kW]}}{\eta} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \text{ [kVAr]} \quad (5)$$

Taulukossa 9.1b on esitetty loistehon tarve (Q/kVAr), kun tehokerrointa parannetaan $\cos \varphi_1$:stä $\cos \varphi_2$:een.

Taulukko 9.1b. Kun halutaan parantaa tehokerrointa arvosta $\cos \varphi_1$ arvoon $\cos \varphi_2$, kerrotaan pätöteho (P/kW) Taulukon 9.1b kertoimella, niin saadaan tarvittava loisteho (Q/kVAr).

cos φ_1	cos φ_2							
	1,00	0,99	0,98	0,97	0,95	0,90	0,85	0,8
0,30	3,18	3,04	2,98	2,93	2,85	2,70	2,56	2,43
0,32	2,96	2,82	2,76	2,71	2,63	2,48	2,34	2,21
0,34	2,77	2,62	2,56	2,52	2,44	2,28	2,15	2,02
0,36	2,59	2,45	2,39	2,34	2,26	2,11	1,97	1,84
0,38	2,43	2,29	2,23	2,18	2,11	1,95	1,81	1,68
0,40	2,29	2,15	2,09	2,04	1,96	1,81	1,67	1,54
0,42	2,16	2,02	1,96	1,91	1,83	1,68	1,54	1,41
0,44	2,04	1,90	1,84	1,79	1,71	1,56	1,42	1,29
0,46	1,93	1,79	1,73	1,68	1,60	1,45	1,31	1,18
0,48	1,83	1,69	1,62	1,58	1,50	1,34	1,21	1,08
0,50	1,73	1,59	1,53	1,48	1,40	1,25	1,11	0,98
0,52	1,64	1,50	1,44	1,39	1,31	1,16	1,02	0,89
0,54	1,56	1,42	1,36	1,31	1,23	1,07	0,94	0,81
0,56	1,48	1,34	1,28	1,23	1,15	1,00	0,86	0,73
0,58	1,40	1,26	1,20	1,15	1,08	0,92	0,78	0,65
0,60	1,33	1,19	1,13	1,08	1,00	0,85	0,71	0,58
0,62	1,27	1,12	1,06	1,01	0,94	0,78	0,65	0,52
0,64	1,20	1,06	1,00	0,95	0,87	0,72	0,58	0,45
0,66	1,14	1,00	0,94	0,89	0,81	0,65	0,52	0,39
0,68	1,08	0,94	0,88	0,83	0,75	0,59	0,46	0,33
0,70	1,02	0,88	0,82	0,77	0,69	0,54	0,40	0,27
0,72	0,96	0,82	0,76	0,71	0,64	0,48	0,34	0,21
0,74	0,91	0,77	0,71	0,66	0,58	0,42	0,29	0,16
0,76	0,86	0,71	0,65	0,60	0,53	0,37	0,24	0,11
0,78	0,80	0,66	0,60	0,55	0,47	0,32	0,18	0,05
0,80	0,75	0,61	0,55	0,50	0,42	0,27	0,13	
0,82	0,70	0,56	0,49	0,45	0,37	0,21	0,08	
0,84	0,65	0,50	0,44	0,40	0,32	0,16	0,03	
0,86	0,59	0,45	0,39	0,34	0,26	0,11		
0,88	0,54	0,40	0,34	0,29	0,21	0,06		
0,90	0,48	0,34	0,28	0,23	0,16			
0,91	0,46	0,31	0,25	0,20	0,13			
0,92	0,43	0,28	0,22	0,18	0,10			
0,93	0,40	0,25	0,19	0,14	0,07			
0,94	0,36	0,22	0,16	0,11	0,03			
0,95	0,33	0,19	0,13	0,08				
0,96	0,29	0,15	0,09	0,04				
0,97	0,25	0,11	0,05					
0,98	0,20	0,06						
0,99	0,14							

Luku 9: Loistetehon kompensointi ja yliaaltosuojaus

Taulukossa 9.1c on moottorikohtaisen (400 V) kompensoinnin valintataulukko. Moottorit kompensoidaan yleensä $\cos \varphi$:n arvoon 0,98. Suuret moottorit kompensoidaan siten, että kompensointiteho on korkeintaan 90 % moottorin tyhjäkäyntitehosta. Taulukko 9.1c. Eri 400 V moottoreiden kompensoinnin valintataulukko.

Tahtikierrosluku: 3000 r/min					
Teho/kW	Kondensaattorin loisteho / kVAr	Ennen kompensointia		Kompensoinnin jälkeen	
		$\cos \varphi_1$	I_N / A	$\cos \varphi_2$	I_N / A
05,5	2,5	0,88	10,5	0,99	9,4
07,5	2,5	0,90	13,8	0,98	12,7
11,0	5,5	0,88	20,0	0,99	18,0
15,0	6,7	0,89	27,0	0,99	24,0
18,5	6,7	0,89	33,0	0,98	30,0
22,0	10,0	0,85	41,0	0,98	36,0
30,0	12,5	0,88	53,0	0,99	47,0
37,0	15,0	0,89	64,0	0,99	58,0
45,0	20,0	0,89	78,0	0,99	70,0
55,0	20,0	0,89	95,0	0,98	86,0
75,0	30,0	0,90	126	0,99	114
90,0	35,0	0,90	151	0,99	137
110,0	40,0	0,90	184	0,99	167
Tahtikierrosluku: 1500 r/min					
5,5	2,5	0,83	11,0	0,95	9,6
7,5	2,5	0,83	14,8	0,92	13,4
11,0	6,7	0,81	22,0	0,98	18,0
15,0	6,7	0,83	29,0	0,96	25,0
18,5	12,5	0,76	39,0	0,97	30,0
22,0	15,0	0,79	44,0	0,99	35,0
30,0	16,6	0,83	56,0	0,99	47,0
37,0	20,0	0,84	68,0	0,99	58,0
45,0	25,0	0,83	83,0	0,99	70,0
55,0	30,0	0,84	100	0,99	85,0
75,0	35,0	0,86	133	0,99	115
90,0	40,0	0,87	157	0,99	138
110	50,0	0,87	191	0,99	168
132	60,0	0,87	229	0,99	201
160	75,0	0,86	280	0,99	243
200	80,0	0,87	345	0,98	305
250	100	0,87	430	0,98	380
315	120	0,87	540	0,98	480
Tahtikierrosluku: 1000 r/min					
5,5	2,5	0,78	11,8	0,90	10,2
7,5	6,7	0,70	18,0	0,96	13,1
11,0	10	0,74	24,0	0,99	18,0
15,0	10	0,78	32,0	0,97	25,0
18,5	10	0,81	36,0	0,97	30,0
22,0	15	0,81	43,0	0,99	35,0
30,0	20	0,81	58,0	0,99	48,0
37,0	20	0,83	69,0	0,98	58,0
45,0	25	0,84	82,0	0,99	70,0
55,0	30	0,84	100	0,99	85,0
75,0	40	0,84	136	0,99	115
90,0	50	0,84	162	0,99	137
110	60	0,84	198	0,99	167

9.2. Kompensoinnin toteutustavat

Yksittäiskompensointia sovelletaan tavallisesti moottoreille, joskus myös purkauslamppuille. Hyvä tapa toteuttaa moottorikohtainen kompensointi on käyttää kondensaattoriyksiköllä varustettua turvakytkintä. Edellytyksenä on, että loistehon vaihtelu käyttöolosuhteissa on pienehkö. Säästö teho- ja jännitehäviöissä tai kaapelimitoituksessa on suurin pitkällä syöttöjohdoilla.

Kojeryhmien kompensointi kiinteillä paristoilla sopii parhaiten kojeryhmille, joissa loistehon vaihtelut ovat pienehköt ja kojeiden etäisyydet keskukselta pienet verrattuna keskusta syöttävään johtoon. Paristo sijoitetaan ryhmäkeskuksen luo, joskus itse keskukseseen, ja varustetaan kytkimellä ja sulakkeilla. Moottoriryhmänkondensaattorin tulee kytkeytyä automaattisesti irti ryhmää syöttävän katkaisijan avautuessa, koska itseherätys voi aiheuttaa ylijännitteen, jos osa moottoreista seisoo.

Keskitettyssä kompensoinnissa kompensointiparistot sijoitetaan pääkeskukseen, josta niille varataan sulakkeelliset lähdöt. Keskitetty kompensointi hoidetaan nykyään pääasiassa automatiikkaparistoilla. Automatiikkaparistossa loistehonsäädin ohjaa tarvittavan määrän kondensaattoriportaita päälle aina kulloisenkin tarpeen mukaan. Tämä estää myös ylikompensoinnin. Mikäli verkossa on yliaaltoja tuottavaa kuormaa, hoidetaan kompensointi joko estokelaparistoilla tai yliaaltosuodattimilla.

9.3. Kompensointilaitteet

Pienjännitekompensointikondensaattorit ($U \leq 1000 \text{ V}$) ovat kuivarakenteisia. Eristeaineena on itsekorjautuva metalloitu muovikalvo. Suurjännitekompensointikondensaattorit ($U > 1000 \text{ V}$) ovat öljykyllästeisiä; eristeaineena on muovikalvo.

Pienjännitekondensaattoreiden ($U \leq 1000 \text{ V}$) häviöt ovat noin $0,5 \text{ W/kVAr}$ ja suurjännitekondensaattoreiden ($U > 1000 \text{ V}$) noin $0,2 \text{ W/kVAr}$.

Pienjännitekondensaattoreita koskee normi IEC 60831. Suurjännitekompensointikondensaattoreita koskee normi IEC 60871.

Muovieristeiset pien- ja suurjännitekondensaattorit ovat pienihäviöisiä, mutta niiden käyttöiän kannalta on tärkeää, että huolehditaan riittävästä ilmanvaihdosta asennuspaikalla, jotta ympäristön lämpötila ei ylitä sallittuja arvoja. Alla olevassa taulukossa 9.3a on kondensaattoreiden maksimilämpötilaluokitus. Lisätietoja lämpötilaluokista saa yllä mainituista normeista ja kondensaattorivalmistajilta.

Taulukko 9.3a. Kondensaattorin maksimilämpötilaluokitus.

Tunnus	Ympäristön lämpötila (°C)		
	Maksimi	Jakson korkein keskiarvo	
		24 h	1 vuosi
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

Ylijännitettä sallitaan $1,10 \times U_N$ ajoittaisesti. Ylivirtaa sallitaan $1,30 \times I_N$. Kun otetaan huomioon suurin kapasitanssitoleranssi +15 %, saattaa virta olla $1,5 \times I_N$.

Kondensaattorit on varustettava purkausvastuksilla, jotka purkavat kondensaattorin jännitteen 75 V:iin 3 minuutissa pienjännitteellä ja 10 minuutissa suurjännitteellä.

Taulukko 9.3b. Tyypillisiä 400 V:n kondensaattoriyksiköiden teknisiä arvoja .

Kondensaattoriyksiköt			
Q kVAr	Nimellisvirta A	Sulake A	Cu-kaapeli
10	14	25	4x4S
12,5	18	35	4x10S
15	22	35	4x10S
25	36	63	4x10S
50	72	125	3x35S+16
70	101	160	3x50+25
100	144	250	3x95+50
120	173	315	2x3x70+35

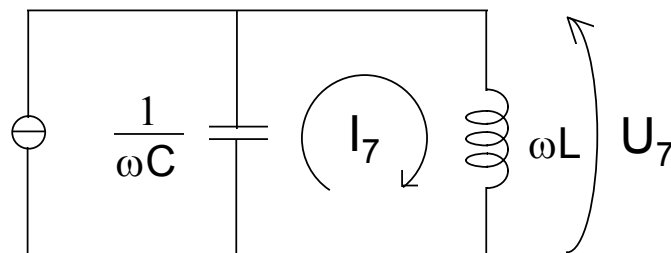
Taulukko 9.3c. Tyypillisiä automatiikkaparistojen teknisiä arvoja.

Automatiikkaparistot				
Q kVAr	Nimellisvirta A	Sulake A	Cu-kaapeli	Portaat kVAr
50	72	100	3x35+16	10+20+20
100	144	200	2x3x35+16	20+40+40
150	217	315	2x3x95+50	3x50
200	288	400	2x3x95+50	4x50
250	361	500	2x3x120+70	5x50
300	433	630	2x3x150+70	6x50

Kondensaattoriyksikön ja -pariston kytkentäkojeen tulee kestää:

- käyttövirta, jatkuvasti vähintään $I = 1,50 \times$ yksikön / pariston nimellisvirta,
- oikosulkuvirta (mahd. etusulakkeiden rajoittama) ja
- kytkentävirtasäys.

Kompensointikondensaattorin kapasitanssi ja syöttävän verkon induktanssi muodostavat aina rinnakkaisresonanssipiirin, joka on resonanssissa yhtälön (1) mukaisella taajuudella. Mikäli verkossa esiintyy yliaaltoja lähellä kyseistä taajuutta, vahvistuvat yliaaltovirrat moninkertaisiksi. Tämä aiheuttaa sähkönlaadun huononemista sekä häiriöiden ja vaurioiden todennäköisyyden kasvua.



KUVA 9.3a. Sijaiskytkentä. Kompensointikondensaattorin ja syöttävän verkon välinen rinnakkaisresonanssi (resonanssi 7:llä yliaallolla).

Rinnakkaisresonanssi (resonanssi) taajuuden järjestysluku on laskettavissa yhtälöstä (1).

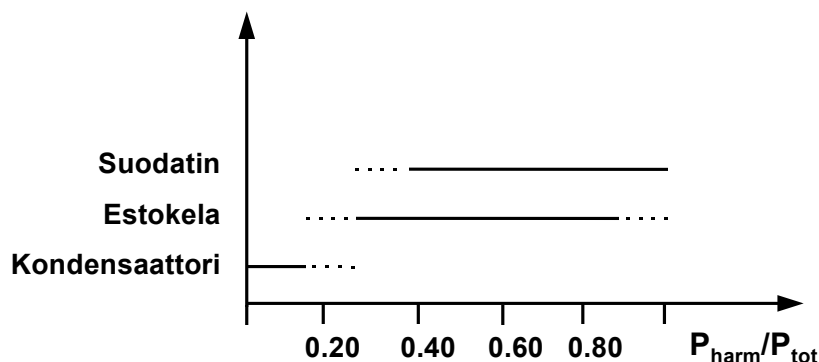
$$n = \sqrt{\frac{S_{SCT}}{Q_C}} \quad (1)$$

jossa n = yliaallon järjestysluku,
 S_{SCT} = verkon oikosulkuteho (kVA) ja
 Q_C = kondensaattoriteho (kVAr).

Jotta resonanssista aiheutuva yliaaltojen vahvistuminen vältetään, yliaaltopitoisen verkon kompensointilaitteet valitaan seuraavasti:

Automaattinen kondensaattoriparisto estokeloilla, jossa kondensaattoriparisto on varustettu estokeloilla, joiden ansiosta rinnakkaisresonanssia verkon kanssa ei voi syntyä. Kela suojaa kondensaattoria yliaalloilta, mutta estokelaparisto ei juurikaan suodata yliaaltoja pois verkosta.

Yliaaltosuodatin tuottaa tarvittavan loistehon ja suodattaa yliaallot pois verkosta. Oikean kompensointilaitteen valintaan laitevalmistajat käyttävät tietokonepohjaisia yliaaltoanalyysijä, mutta yksinkertaistettuna valintasääntö voidaan esittää kuvan 9.3.b mukaisesti.



KUVA 9.3b. Kompensointilaitteen valinta yliaaltopitoiseen verkkoon.

P_{harm} = yliaaltoja tuottava kuorma keskuksessa,
 P_{tot} = keskuksen kokonaiskuorma.

9.4. Yliaaltosuodatus

9.4.1. Yleistä

Yliaallot aiheuttavat sähköverkossa erilaisia ongelmia:

- lisähäviöt verkkokomponenteissa,
- suoja- ja mittalaitteiden virhetoiminnot,
- ATK- ja automaatiojärjestelmien häiriöt ja vauriot,
- televerkon häiriöt,
- nollajohtimen ylikuormitus 3. yliaaltovirrasta ja
- resonanssit kompensointikondensaattoreiden ja verkon välillä.

Resonanssissa yliaaltolähteen tuottama virta vahvistuu moninkertaiseksi kondensaattorin ja syöttävän verkon välisessä rinnakkaisresonanssi-alueessa. Vahvistuneet yliaaltovirrat nostavat myös jännitesäröä THD (U). Seurauksena on huono sähkölaatu, sekä häiriöiden ja vaurioiden todennäköisyyden kasvu.

$$THD(U) = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_{hn}}{U_{50}} \right)^2}, \quad (1)$$

jossa U_{hn} = n:s yliaaltojännite,
 U_{50} = perustajuinen jännitekomponentti,
 THD (U) = jännitesärö.

Toisin kuin muut taajuudet, kolmas yliaaltovirta summautuu nollajohtimeen aiheuttaen ylikuormitusta ja voimakkaita magneettikenttiä.

9.4.2. Yliaaltolähteet sähköverkossa

Epälineaaristen kuormitusten sähköverkosta ottama virta poikkeaa sinimuodosta. Tällainen kuorma on verkon kannalta yliaaltolähde. Tavallisimpia yliaaltolähteitä ovat:

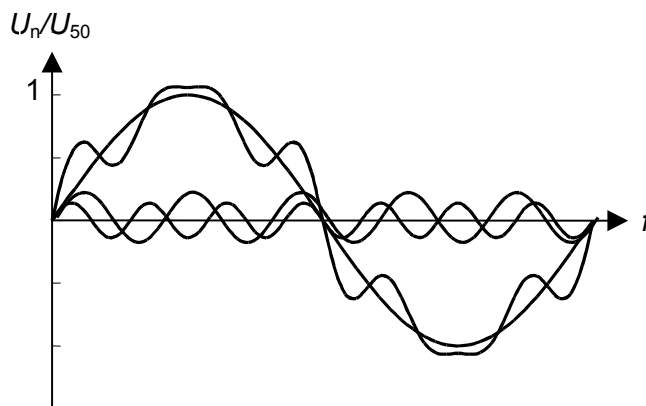
- AC –käytöt (invertterit),
- DC –käytöt,
- UPS –laitteet,
- erilaiset purkauslamput ja
- sähkösuotimet.

Yliaaltolähteen verkkoon syöttämät yliaaltovirrat aiheuttavat verkossa jännitesäröä, THD (U) eli myös jännitteen käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta.

Kolmivaiheiset kuormitukset aiheuttavat parittomia yliaaltotaajuuksia; 5., 7., 11. ja 13. jne. Yksivaiheiset kuormitukset aiheuttavat lisäksi 3. yliaaltoja ja sen kerrannaisia.

Taulukko 9.4a. 6-pulssisen tasasuuntaussillan virtaspektri.

Taajuus / Hz	Virta / %
50	100
250	25
350	12
550	6
650	5



KUVA 9.4a. Yliaaltojen summutuminen perustaajuuteen.

9.4.3. Verkon yliaaltojen määrittäminen

Paras tapa määrittää verkon yliaallot on suorittaa yliaaltomittaukset eri kuormitustilanteilla. Virtayliaallot mitataan keskuksen syötöstä absoluuttiarvoina; esim. 250 Hz, 100 A. Jänniteyliaallot mitataan kokonaissärö-%:na THD (U) keskuksen kiskostosta. Mikäli mittausta ei jostain syystä voi suorittaa, täytyy yliaallot arvioida kuormatietojen perusteella.

Eri yliaaltolähteiden summavaikutusta arvioidaessa voidaan käyttää seuraavia menetelmiä:

- Jos tyristorisuuntaajien ohjauskulmat ovat yhtä suuret tai kyseessä on ohjaamaton diodisuuntaaja, summutuvat yliaaltokomponentit aritmeettisesti.
- Satunnaisesti vaihtelevilla ohjauskulmilla voidaan muodostaa kullakin taajuudella virtojen geometrinen summa, ts. virtojen neliöiden summan neliöjuuri.

9.4.4. Yliaaltoanalyysi

Yliaaltolähteen tuottamien yliaaltovirtojen jakaantuminen verkon eri osiin selvitetään yliaaltoanalyysin avulla. Verkko kuvataan sijaiskytkennällä, joka koostuu komponentteja kuvaavista resistansseista, induktansseista ja kapasitansseista. Virranjakolaskelma suoritetaan erikseen kullekin yliaaltotaajuudelle. Simuloinnin tarkkuus riippuu siitä, kuinka tarkasti eri verkkokomponenttien taajuusriippuvuus on kuvattu sijaiskytkennässä. Yleensä simulointi tehdään tarkoitukseen sopivalla tietokoneohjelmalla.

9.4.5. Yliaaltojen suodatus

Yliaaltojen hallinta sähköverkossa voidaan toteuttaa:

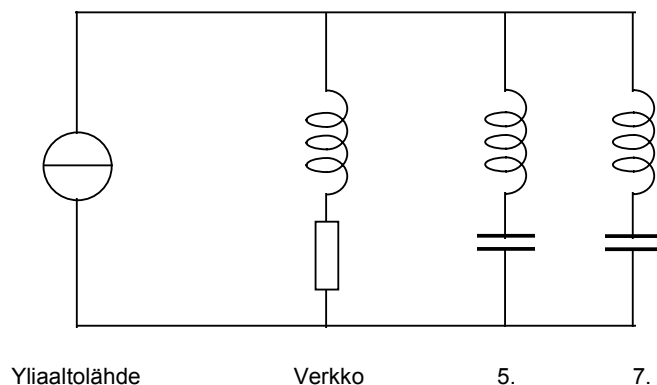
- ylimitoittamalla verkkoa,
- minimoimalla niiden synty ja
- suodattamalla.

Ylimitoittaminen on perinteinen tapa hallita niin yliaaltoja kuin loistehoakin. Se on kuitenkin taloudellisesti epämielikästä.

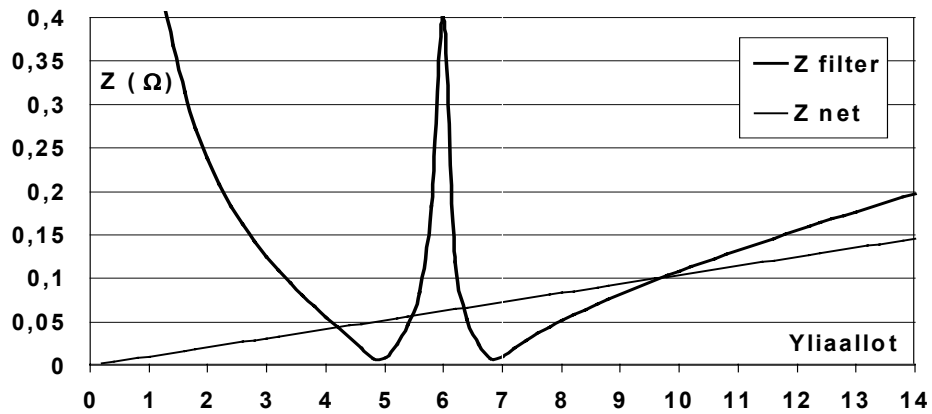
Yliaaltoja voidaan minimoida:

- Käyttämällä uutta puolijohdetekniikkaa (esim. DATAPOWER™).
- Valitsemalla pulssiluku mahdollisimman suureksi. 12 -pulssista suuntaajaa ei kuitenkaan yleensä käytetä kuin suurilla tehoilla ($> 2 \dots 5 \text{ MW}$) tai suurilla virroilla ($> 5 \dots 10 \text{ kA}$).
- Varsinkin suurissa laitoksissa ryhmittelemällä 6-pulssinen tasasuuntaajakuorma jakelu-
muuntajien taakse siten, että puolet muuntajista on kytkentäryhmältään D ja puolet Y.
Tällöin muuntajien välillä oleva 30° vaihesiirto kumoaa 5. ja 7. yliaallon.

Ellei yliaaltoja muilla keinoilla saada haluttuihin rajoihin, on käytettävä **yliaaltosuodattimia eli imupiirejä**. Nämä ovat yliaaltotaajuuksille viritettyjä sarjaresonanssipiirejä. Kukin suodatettava yliaalto vaatii oman suodatinhaaransa. Kuvissa 9.4b ja 9.4c on esitetty suodatetun verkon sijaiskytkentä impedanssikäyrineen.



KUVA 9.4b. Suodatetun verkon sijaiskytkentä



KUVA 9.4c. 5. ja 7. yliaaltosuodattimen impedanssikäyrä.

Yliaaltosuodatin voidaan kytkeä laitoksen yliaaltoja syöttävien kuormien lähelle pienjännitekeskukseen. Toinen vaihtoehto on asentaa suodatin keskijännitekiskostoon.

Yliaaltosuodattimen impedanssi on perustaajuudella kapasitiivinen. Tämä merkitsee sitä, että suodattimet tuottavat perustaajuista loistehoa. Suodatin on laite, joka kompensoi loistehon ja pienentää särön halutulle tasolle.

Toisin kuin muita yliaaltoja, kolmatta (3.) yliaaltoa ei voida suodattaa imupiireillä. Tämä johtuu siitä, että 3. yliaaltovirta summautuu kolmivaihejärjestelmän nollajohtimeen. Kolmannen yliaaltovirran suodattamiseen voidaan käyttää pienjännitejärjestelmän nollajohtimeen asennettavaa ns. THF-suodatinta. THF-suodatin on rinnakkaisresonanssipiiri, joka estää kolmannen yliaaltovirran kulun nollajohtimessa ja vaihejohtimissa.

Yliaaltosuodattimen mitoitus tiedot

Yliaaltosuodatin voidaan mitoittaa seuraavin lähtötiedoin sekä pien- että suurjännitteelle:

- verkkotiedot; nimellijännite ja -taajuus,
- tarvittava perustaajuinen loisteho (kvar),
- yliaaltovirrat ampeereina keskuksen syötössä (täydellä ja tyypillisellä kuormalla) ilman olemassa olevaa kompensointia,

tai

- tieto yliaaltoja tuottavasta kuormasta (esim. 6-pulssi, 500kVA),
- keskuksen oikosulkuteho (muuntajan nimellisteho (kVA) ja suhteellinen oikosulkuimpedanssi (z_k)),
- suodatusvaatimukset (mikäli on). THD (U)_{max.}, maksimivirrat,
- kotelointiluokka, ympäristön lämpötila ja
- asennustila, kaapelointi, olemassa olevat lähdöt.