

Harmonisten yliaaltojen vaikutus johtojen mitoitukseen

Pienjännitesähköasennukset standardin osassa SFS6000-5-52 esitetään johtojen mitoitusperusteet johtimien ja kaapelien kuormitettavuudelle. Lähtökohtana on, ettei eristettyjen johtimien ja kaapelien eristeaineiden lämpötilat nouse liian suuriksi normaali käyttötilanteessa ottaen huomioon myös erilaiset asennusympäristöt.

Johtimien ja kaapelien lämpenemisen aiheuttaa kuormitusvirran synnyttämä häviöteho johdon resistansseissa ($P_{\text{häviö}} = I^2 \cdot R_j$). Lämmön siirtymiseen johdosta ympäristöön ja siis johdon jäähtymiseen vaikuttavat mm. asennustapa, ympäristön lämmönjohtavuus ja ympäristön lämpötila.

Mitoituksessa tulee otetaan huomioon ne johtimet, joissa kulkee normaalitilanteessa virta. Yksivaiheissa asennuksessa on yleensä kaksi kuormitettua johdinta. Kolmivaiheisessa asennuksessa kuormitettujen johtimien määrä vaihtelee kuormituksen symmetrisyyden sekä kuorman mukaan.

Kaikki vaihejohtimet on suojattava ylikuormitussuojalta joitain poikkeuksia lukuun ottamatta. Suojat on sijoitettava sellaiseen kohtaan, jossa muutos esim. johdinpoikkipinnassa, johtolajissa tai asennustavassa pienentää johtimien kuormitettavuutta.

Nollajohtimien mitoitus (SFS 600-5-524)

Nollajohtimien poikkipinta tulee olla yksivaiheisissa virtapiireissä vähintään sama kuin vaihejohtimien poikkipinta.

Monivaihepiirien nollajohtimien poikkipinnan tulee olla vähintään sama kuin vaihejohtimien, kun vaihejohtimien poikkipinta-ala on enintään 16 mm² kuparia tai 25 mm² alumiinia.

Suuremmilla poikkipinnoilla voidaan käyttää vaihejohtimia pienempiä nollajohtimien poikkipinta-aloja, mikäli nollajohtimien virta normaali tilanteessa ei ole suurempi kuin valitun johdinpoikkipinnan kuormitettavuus. Tällöinkin nollajohtimien poikkipinta-ala tulee olla vähintään 16 mm² kuparia tai 25 mm² alumiinia. Lisäksi edellytetään, että nollajohdin on ylikuormitussuojattu. Nollajohtimien ylikuormitussuojaa ei kuitenkaan edellytetä (SFS 6000-4-431.2.1), mikäli nollajohdin on oikosulkusuojattu vaihejohtimien suojalaitteen avulla ja suurin todennäköinen virta normaalissa käytössä on selvästi pienempi kuin nollajohtimien kuormitettavuus.

Kaapelien mitoitus

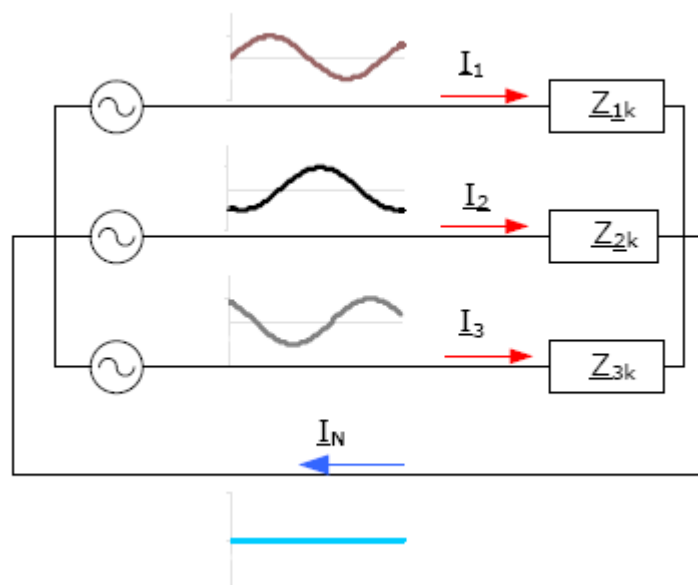
Johtimien ja kaapelien mitoituksessa kolmivaihejärjestelmissä on peruslähtökohtana vaiheiden tasainen kuormitus. Seuraavassa on tarkasteltu erilaisten

kuormitustyyppien vaikutusta vaihe- ja nollajohtimien virtoihin sekä johdinpoikkipintojen valintaan kuormitettavuuden perusteella.

1. Lineaarinen kolmivaihekuorma

1.1. Symmetrinen, lineaarinen kolmivaihekuorma

Vaiheiden symmetrinen kuormitus syntyy silloin, kun vaiheiden kuormien tehot ja tehokertoimet ovat lähes samat ($P_1 \approx P_2 \approx P_3$, $\cos\phi_1 \approx \cos\phi_2 \approx \cos\phi_3$). Lineaarisen kuorman impedanssi pysyy vakiona. Mikäli jännite on sinimuotoista, ovat vaihevirrattkin sinimuotoisia, samansuuruisia ja niillä on sama vaihesiirto ko. vaiheen vaihejännitteeseen nähden. Nollajohtimen virta muodostuu vaihevirtojen summana, jolloin vaihesiirroissa keskenään olevat samansuuruisen vaihevirtojen summa on nolla.



Kuva 1 Symmetrinen, lineaarinen kuorma

Kolmivaiheissa kaapelissa tai johtimien muodostamassa johdotuksessa on kuormituksen ollessa symmetrinen siis kolme kuormitettua johdinta. Tällöin johdinpoikkipinnat voidaan valita standardin liitteen 52B kuormitustaulukoiden ja korjauskertoimien perusteella.

Taulukko 1 Esimerkki (osa) taulukosta B.52-2

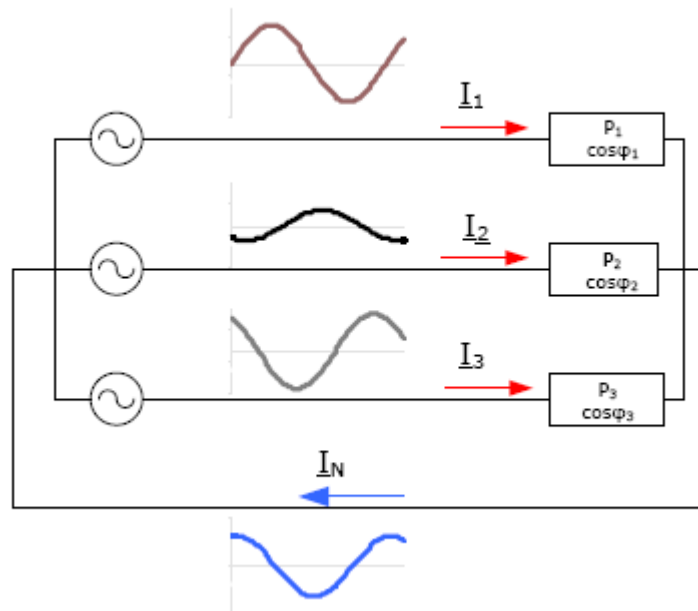
Taulukko B.52.2 – Kuormitettavuudet ampeereina asennustavoilla A, B, C ja D. PVC-eristeiset kupari- tai alumiinijohtimet, yleensä kolme kuormitettua johdinta, pienillä poikkipinoilla myös kaksi kuormitettua johdinta. Johtimen lämpötila: 70 °C. Ympäristön lämpötila: 25 °C ilmassa, 15 °C maassa

Johtimen nimellinen poikkipinta mm ²	Taulukon B.52.1 mukainen referenssiasennustapa						
	A		B		C		D
	kolme kuormitettu a johdinta	kaksi kuormitettu a johdinta	kolme kuormitettu a johdinta	kaksi kuormitettu a johdinta	kolme kuormitettua johdinta	kaksi kuormitettua johdinta	Kolme kuormitettua johdinta
1	2	3	4	5	6	7	8
Kupari							
1,5	14	15	16	17,5	18,5	20	26
2,5	19	20	21	24	25	29	35
4	24	27	29	32	34	38	46
6	31	34	36	40	43	49	57
10	41	46	49	55	60	67	77
16	55	60	66	73	80	90	100
25	72	79	85	95	102	119	130
35	88	97	105	118	126	146	160
50	105		125		153		190
70	133		158		195		240
95	159		190		236		285
120	192		240		274		325

1.1.

1.2. Ei-symmetrinen, lineaarinen kolmivaihekuormitus

Kun kolmivaiheiseen virtapiiriin kytketään yksivaiheisia laitteita, muodostuu tilalle, jossa vaihevirit eivät ole samanlaisia. Kuormat voivat olla joko teholtaan erisuuruisia tai niillä on erilainen tehokerroin ($P_1 \neq P_2 \neq P_3$ ja/tai $\cos\phi_1 \neq \cos\phi_2 \neq \cos\phi_3$).



Kuva 2 Epäsymmetrinen, lineaarinen kuorma

Eri tehoisten vaihekuormien aiheuttamat virrat ovat siis erisuuruisten, jolloin myös nollajohtimeen syntyy näiden virtojen summavirta. Mikäli vaiheiden tehokertoimet ovat lähellä toisiaan, on nollajohtimen virta enintään suurimman vaihevirran suuruinen. **Kaapelinkoko valitaan suurimman vaihevirran perusteella** (SFS 6000-

523.6.2) ja käyttäen mitoitusaulukoiden "kolme kuormitettua johdinta"-sarakkeita. Nollajohtimen virran aiheuttama lisälämpeneminen kompensoituu vajaasti kuormitettujen vaiheiden virtojen aiheuttamalla sallittua pienemmällä lämpenemisellä.

Esimerkki: Kuvassa 3 on esitetty vaihe- ja nollajohtimien virtojen hetkellisarvot seuraavilla esimerkkitehoilla:

Vaihe 1:

- valaisinteho $P_1=1500$ W, $\cos\phi_1=1$

Vaihe 2:

- valaisinteho $P_2=500$ W, $\cos\phi_2=0,9$

vaihe 3

- - valaisinteho $P_3=1500$ W, $\cos\phi_2=0,5$

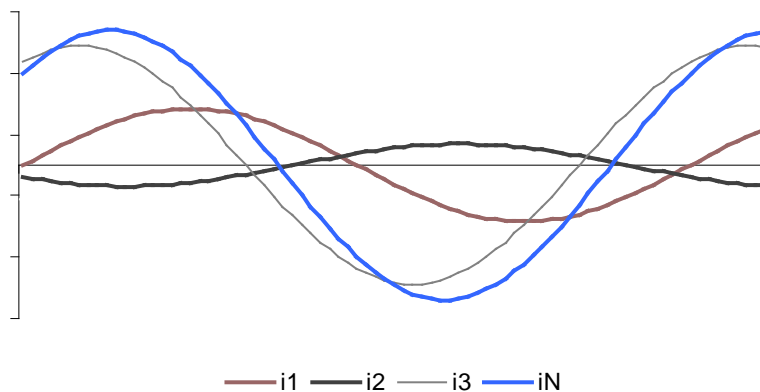
Virtojen tehollisarvoiksi esimerkissä tulee

$$I_1 = 6,5 \text{ A}$$

$$I_2 = 2,4 \text{ A}$$

$$I_3 = 13 \text{ A}$$

$$I_N = 14,9 \text{ A}$$



Kuva 3 Esimerkin tehoja vastaavien virtojen hetkellisarvot

Kun kaapelin mitoitus tehdään suurimman vaihevirran (13 A) perusteella, on vaihe- ja nollajohtimien aiheuttama lämpövaikutus kaapelissa on pienempi kuin, jos kaikissa vaiheissa olisi sama 13 A:n virta.

$$(P_{\text{häviö},1}/s=3 * (13 \text{ A})^2 * r_j = 507 \text{ A}^2 * r_j$$

$$P_{\text{häviö},2}/s= [(6,5 \text{ A})^2 + (2,4 \text{ A})^2 + (13 \text{ A})^2 + (14,9 \text{ A})^2] * r_j = 441 \text{ A}^2 * r_j.$$

1.3. Vaihevirrat samansuuruiset, eri tehokertoimet

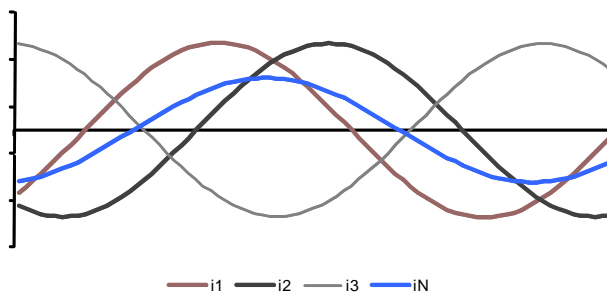
Pelkkä vaiheiden tehojen tasaaminen ei riitä estämään nollajohtimen virran muodostumista. Mikäli vaihekuormitusten tehokertoimet eroavat merkittävästi toisistaan, muodostuu nollajohtimeen virta, jonka suuruus voi olla jopa suurempi kuin suurin vaihevirta.

Esimerkki 2

Kolmivaihekuormituksen on tehot:

Vaihe	Pätöteho P [W]	Tehokerroin $\cos\phi$	Virta [A]
L1	2100	0,7	13
L2	3000	1	13
L3	2700	0,9	13
N			7,8

Vaikka vaihevirrat ovat samansuuruiset, aiheuttaa eri tehokertoimet (erilaiset vaihekuormat) nollajohtimeen merkittävän virran.



Kuva 4 Esimerkkiä 2 vastaavat virtojen hetkellisarvot

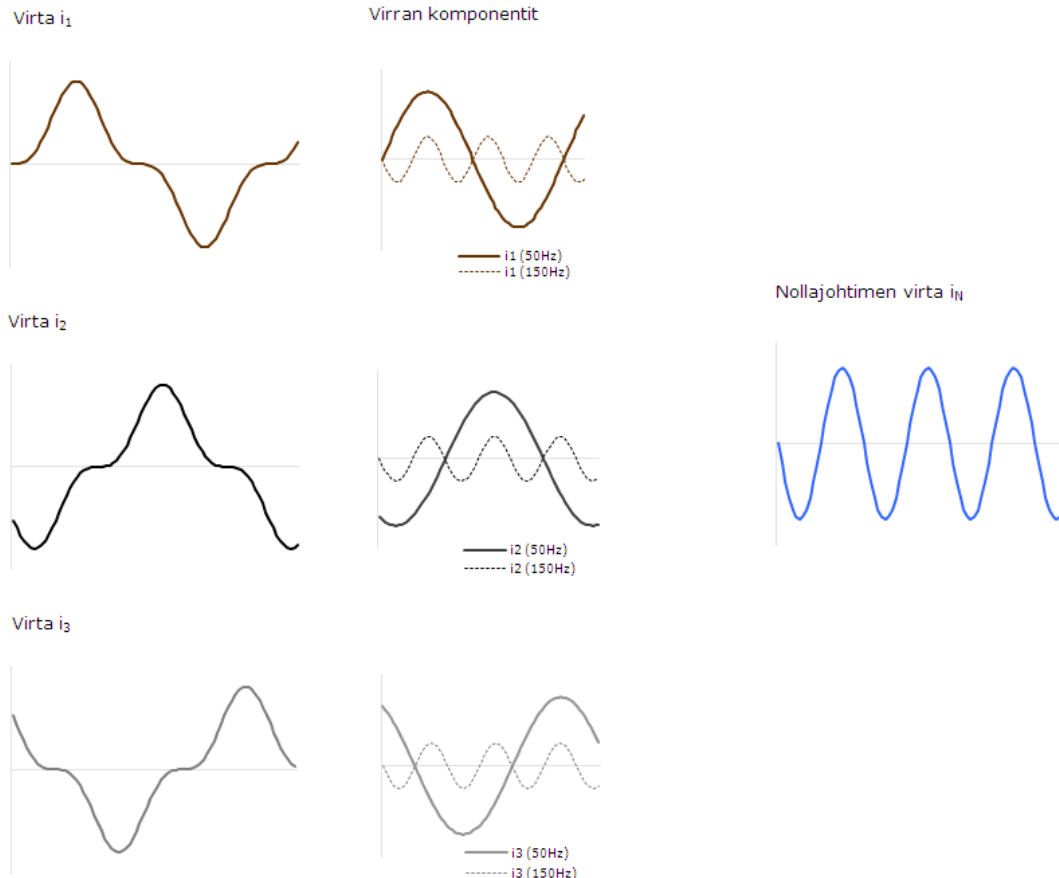
Esimerkkitalanteessa 2 johtoa lämmittävä teho on n. 10 % suurempi verrattuna tilanteeseen, jossa on vain kolme kuormitettua johdinta. SFS 6000-5-52 ei anna tähän suoraan mitoitusperiaatetta.

Nollajohtimen poikkipinta-ala tulee olla näissäkin tapauksissa riittävä, ettei sen tai kaapelin muiden johtimien lämpötilat nouse liian suureksi. Mitoituksessa voidaan käyttää korjauskertoimia, joilla otetaan huomioon kuormitettujen johtimien määrä (taulukko B.52.17).

Lisäksi on huomattava, ettei esimerkiksi vain mittaamalla vaihevirtojen tehollisarvot voida päätellä nollajohtimen virtaa. Ts. vaikka kaikkien vaihevirtojen tehollisarvot ovat samat voi nollajohtimessa olla merkittävän suuruinen virta.

2. Epälineaarinen kolmivaihekuormitus

Epälineaarinen kuorman virta ei ole sinimuotoinen, vaan koostuu 50 Hz:n perusaallon lisäksi parittomista yliaalloista (150 Hz, 250 Hz, jne). Harmonisten yliaaltojen kolmella jaolliset yliaallot ovat samanvaiheisia, jolloin ne summautuvat yhteen nollajohtimen virraksi.



Kuva 5 Kolmannen yliaallon summautuminen nollajohtimeen

Johdossa aiheuttaa häviöitä ja kaapelin lämpenemistä vaihejohtimien virtojen tehollisarvot sekä nollajohtimen virran tehollisarvo. Nollajohtimen virta siis saattaa muodostua suureksi ilman, että osa vaiheista olisi vajaakuormitettuna.

Mikäli harmonisten yliaaltojen osuus on yli 15 %, nollajohdin ei saa olla vaihejohtinta pienempi (SFS 6000-5-523.6.3)

Standardin SFS 6000-5-52 liitteessä 52E esitetään menetelmä, jonka perusteella johtimien mitoitus voidaan tehdä. Mitoitusmenetelmässä on otettu huomioon vain kolmas yliaalto.

Taulukko E.52.1 Yliaalloista johtuvat 4- tai 5-johdinkaapeleissa käytettävät korjauskertoimet

Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta %	Korjauskerroin	
	Mitoitus tehdään vaihevirran perusteella	Mitoitus tehdään nollajohtimen virran perusteella
0 – 15	1,0	–
15 – 33	0,86	–
33 – 45	–	0,86
>45	–	1,0

HUOM. Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta on kolmannen yliaallon virran tehollisarvon suhde kokonaisvirran tehollisarvoon prosentteina.

Kuva 6 Taulukko SFS 6000/2012 E.52.1

Taulukossa E52-1 annetaan korjauskertoimet sen perusteella, mikä on kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta. Prosenttiosuus saadaan **kolmannen yliaallon tehollisarvon suhteesta vaihevirran kokonaistehollisarvoon.**

Esimerkki eri mitoitusvaihtoehdoista, kuormitus symmetrinen:

Vaihevirran mitoitus $I_{L, rms} = 13 \text{ A}$ ($= I_B$)

1) Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta 0 % $\Rightarrow I_{150}=0 \text{ A}$

Kaapelin mitoitus tehdään vaihevirran mukaan

Kolme kuormitettua johdinta

Esim. asennustapa C (taulukko B.52-2) \Rightarrow

Johdinpoikkipinta $1,5 \text{ mm}^2$

$$I_B \leq I_n \leq I_z \Rightarrow I_B = 13 \text{ A} \Rightarrow I_n = 16 \text{ A} \Rightarrow I_z \geq 16 \text{ A} \Rightarrow \text{johdinpoikkipinta } 1,5 \text{ mm}^2$$

2) Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta 15 % \Rightarrow

$$I_{150} = 0,15 * 13 \text{ A} = 2 \text{ A}$$

Kaapelin mitoitus tehdään vaihevirran mukaan, käytetään korjauskerrointa 0,86

Kolme kuormitettua johdinta

Esim. asennustapa C (taulukko B.52-2) \Rightarrow

Johdinpoikkipinta $2,5 \text{ mm}^2$

$$I_B \leq I_n \leq I_z \Rightarrow I_B = 13 \text{ A} \Rightarrow I_n = 16 \text{ A} \Rightarrow I_z \geq 16 \text{ A} \Rightarrow \text{johtoa mitoittava} \\ \text{virta } I_t = I_z / 0,86 = 18,6 \text{ A} \Rightarrow \text{johdinpoikkipinta } 2,5 \text{ mm}^2$$

3) Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta 33 % \Rightarrow

$$I_{150} = 0,33 * 13 \text{ A} = 4,3 \text{ A}$$

Kaapelin mitoitus tehdään nollajohtimen virran mukaan, käytetään

korjauskerrointa 0,86

$$I_{\text{Nolla}} = 3 * 0,33 * 13 \text{ A} = 13 \text{ A}$$

Korjauskerroin ottaa huomioon kaikki neljä johdinta (kolme vaihejohtimen ja nollajohtimen virrat)

Esim. asennustapa C (taulukko B.52-2) \Rightarrow

Johdinpoikkipinta $2,5 \text{ mm}^2$

$$[I_B \leq I_n \leq I_z \Rightarrow I_B = 13 \text{ A} \Rightarrow I_n = 16 \text{ A} \Rightarrow I_z \geq 16 \text{ A} \Rightarrow \text{johtoa mitoittava} \\ \text{virta } I_t = 3 * 0,33 * 16 / 0,86 = 18,6 \text{ A} \Rightarrow \text{johdinpoikkipinta } 2,5 \text{ mm}^2]$$

4) Kolmannen yliaallon osuus vaihevirrasta 45 % \Rightarrow

$$I_{150} = 0,45 * 13 \text{ A} = 5,9 \text{ A}$$

Kaapelin mitoitus tehdään nollajohtimen virran mukaan, käytetään

korjauskerrointa 1

$$I_{\text{Nolla}} = 3 * 0,45 * 13 \text{ A} = 17,6 \text{ A}$$

Korjauskerroin ottaa huomioon kaikki neljä johdinta (kolme vaihejohtimen ja nollajohtimen virrat)

Esim. asennustapa C (taulukko B.52-2) \Rightarrow

Johdinpoikkipinta 4 mm^2

$$[I_B \leq I_n \leq I_z \Rightarrow I_B = 13 \text{ A} \Rightarrow I_n = 16 \text{ A} \Rightarrow I_z \geq 16 \text{ A} \Rightarrow \text{johtoa mitoittava} \\ \text{virta } I_t = 3 * 0,45 * 16 / 0,86 = 25,1 \text{ A} \Rightarrow \text{johdinpoikkipinta } 4 \text{ mm}^2]$$

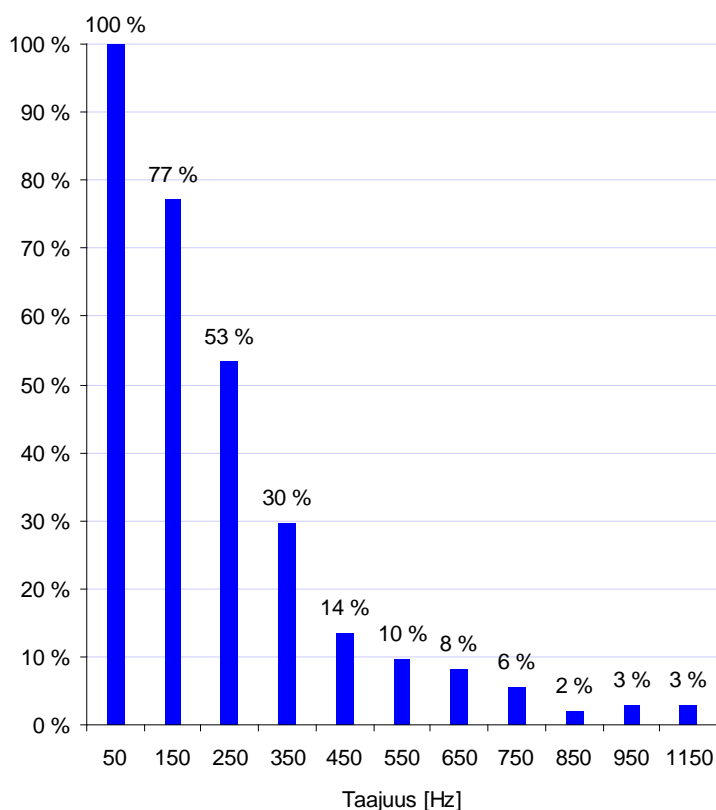
¹ Huomaa. SFS 6000-433.1 HUOM 1: I_B on äärijohtimen suunniteltu virta tai nollajohtimen virta, jos se kolmansien yliaaltojen takia on suurempi kuin äärijohtimen virta.

Yhteenveto mitoituksesta

Kuormitettujen johtimien määrä kolmivaihejärjestelmässä	Kuorma	Kaapelia mitoittava virta
3	Symmetrinen, lineaarinen kolmivaihekuorma <ul style="list-style-type: none"> • Kaikissa vaiheissa (lähes)sama teho ($P_1 \approx P_2 \approx P_3$, $\cos\phi_1 \approx \cos\phi_2 \approx \cos\phi_3$) • Virta sinimuotoinen • Nollajohtimen virta ≈ 0 	Vaihevirta
3-4	Epäsymmetrinen kuormitus <ul style="list-style-type: none"> • Vaiheissa erilainen kuormateho ($P_1 \neq P_2 \neq P_3$ ja/tai $\cos\phi_1 \neq \cos\phi_2 \neq \cos\phi_3$) • Virta sinimuotoinen • Nollajohtimessa kulkee epäsymmetrian aiheuttama jäännösvirta 	Suurin vaihevirta
4	Epälineaarinen kuorma <ul style="list-style-type: none"> • Kaikissa vaiheissa voi olla sama teho ($P_1 \approx P_2 \approx P_3$, $\cos\phi_1 \approx \cos\phi_2 \approx \cos\phi_3$) • Virta epäsinimuotoinen Nollajohtimen virta $\neq 0$	Vaihe- tai nollajohtimen virta

Harmonisten virtojen tehollisarvojen määrittely

Yliaallot esitetään yliaaltospektrinä, jossa eri taajuuksien sinikomponenttien suuruutta verrataan suhteessa perusaallon suuruuteen.



Analysaattorin antama prosenttimäärä kertoo siis yliaaltokomponentin suuruuden 50 Hz:n perusaalltoon nähden. Virran tehollisarvo saadaan yliaaltokomponenteista neliösumman avulla.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum I_i^2} = \sqrt{I_{50}^2 + I_{150}^2 + I_{250}^2 + \dots}$$

Esimerkkispektrin suhteellisten arvojen avulla voidaan laskea eri komponenttien ja kokonaisvirran suhde.

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{50}^2 + (0,77 * I_{50})^2 + (0,53 * I_{50})^2 + \dots} \Rightarrow$$

$$I_{RMS} = I_{50} * 1,42$$

	I_{50}	I_{150}	I_{250}	I_{350}	I_{450}	I_{550}	I_{650}	I_{750}	I_{850}	I_{950}	I_{1150}
Osuus 50 Hz:n perusaallosta [%]	100 %	77 %	53 %	30 %	14 %	10 %	8 %	6 %	2 %	3 %	3 %
Tehollisarvon suhde kokonaisvirran tehollisarvoon [%]											
$I_{RMS,n}/I_{RMS}$	71 %	54 %	38 %	21 %	10 %	7 %	6 %	4 %	1 %	2 %	2 %

Nollajohtimeen summautuu kaikista vaiheita 150 Hz, 450 Wz, 750 Hz:n jne virran komponentit. Esimerkkitapauksessa nollajohtimen virraksi, jos kaikissa vaiheissa on samanlainen kuormitus, tulee nollajohtimen virraksi yli 1,6 –kertainen virta vaihejohtimen virran tehollisarvoon verrattuna.

$$I_N = 3 * \sqrt{I_{150}^2 + I_{450}^2 + I_{750}^2 + \dots} \Rightarrow$$

$$I_N = 3 * 0,78 * I_{50} \Rightarrow$$

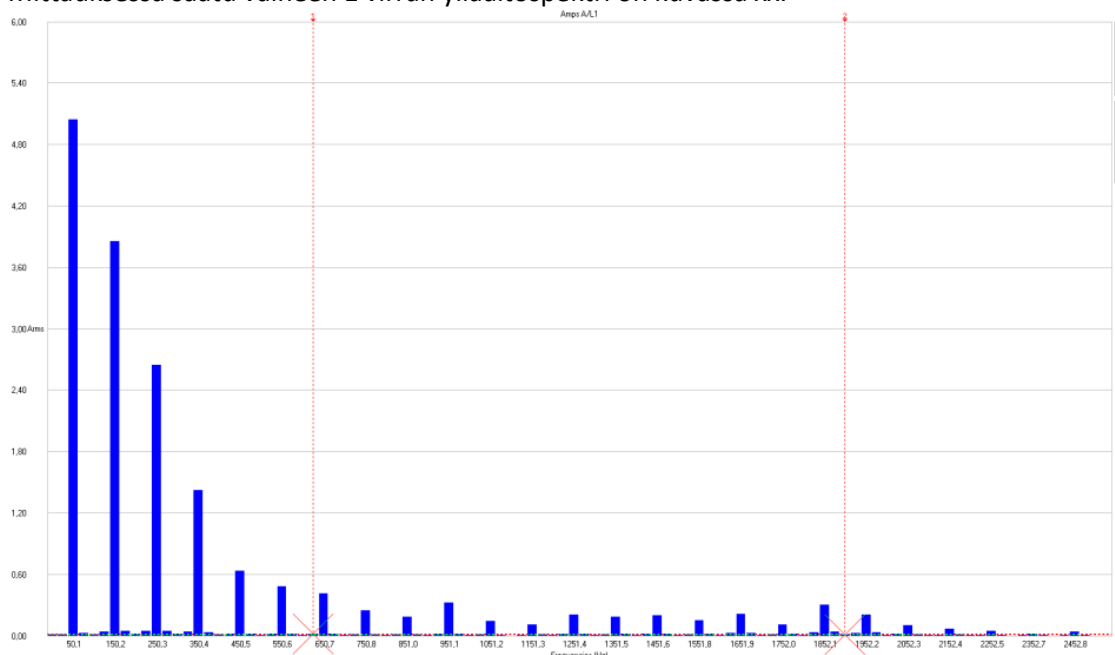
$$I_N = 3 * 0,78 * \frac{I_{RMS}}{1,42} \Rightarrow$$

$$I_N = 1,66 * I_{RMS}$$

Mittaustuloksia

Seuraavassa on esitetty mittaustuloksia tilanteesta, jossa kolmivaiheiseen verkkoon on kytketty joka vaiheeseen kuormaksi tietokoneiden sama määrä hakkuriteholähteitä.

Mittauksessa saatu vaiheen 1 virran yliaaltospektri on kuvassa xx.



Mittauksessa on virran komponentit tehollisarvoina. Vaiheen 1 kokonaisvirta saadaan siis näiden arvojen neliösumman neliöjuurena

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum I_i^2} = \sqrt{I_{50}^2 + I_{150}^2 + I_{250}^2 + \dots} = 7,1A$$

Vastaavasti nollajohtimen virta saadaan kunkin laskettua 150 Hz, 450 Hz, jne komponenteista.

Taulukko xx. Virtojen mitat komponentit ja niistä laskettu kokonaisvirran tehollisarvo.

	L1	L2	L3	N
I_{50}	5,0	4,6	4,6	
I_{150}	3,9	3,9	3,7	11,5
I_{250}	2,7	2,6	2,4	
I_{350}	1,5	1,4	1,3	
I_{450}	0,6	0,6	0,6	1,8
I_{550}	0,5	0,5	0,5	
I_{650}	0,4	0,5	0,4	
I_{750}	0,3	0,3	0,3	0,9
I_{RMS}	7,1	6,8	6,6	11,7

Laskenta vastaa mitaamassa saatuja virtojen tehollisarvoja.

Taulukko xx. Vaihe- ja nollajohtimista mitatut virtojen tehollisarvot.

	L1	L2	L3	N
$I_{rms} [A]$	7,1	6,8	6,5	11,8

Johtopäätelmät

Sähköverkossa on yhä enemmän elektronisia laitteita, jotka aiheuttavat harmonisia yliaaltoja ryhmä- ja nousujohtoihin. Kolmivaiheisissa virtapiireissä ei siis mitoituksen perustana voi käyttää vain vaihevirtoja, vaan myös nollajohtimen virta tulee arvioida. Tarvittaessa virtapiirin mitoitus tehdäänkin nollajohtimen virran perusteella, jolloin

- nollajohdin ei ylikuormitu
- koko kaapelin lämpötila ei nouse liian korkeaksi.

Lisäksi ryhmäjohtossa tulee pääsääntöisesti käyttää yksivaiheisia ryhmiä erityisesti ATK-pistorasiaryhmissä ja vastaavissa asennuksissa.