



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

—  
Mikko-Petteri Vilhunen

# Koestusgeneraattorijärjestelmän sähkösuunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Insinöörityö

20.1.2020

Tekijä Otsikko	Mikko-Petteri Vilhunen Koestusgeneraattorijärjestelmän sähkösuunnittelu
Sivumäärä Aika	57 sivua + 2 liitettä 20.1.2020
Tutkinto	insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Ammatillinen pääaine	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	lehtori Arja Ristola käyttöpäällikkö Jaakko Virtanen
<p>Insinööriyön tavoitteena oli toteuttaa yhden koestusgeneraattorijärjestelmän sähköjärjestelmän suunnittelu. Koestusgeneraattorijärjestelmällä syötetään tehtaan sisäistä sähköverkkoa, jolla mahdollistetaan sähkönsyöttäminen tehtaassa koestettaville sähkökoneille. Työn toimeksiantaja oli Helsingin Pitäjänmäen ABB Oy Motors and Generators tehdas, jossa valmistetaan kolmivaiheisia sähkömoottoreita ja generaattoreita. Työssä keskityttiin pienjännitekaapeloinnin suunnitteluun ja toteutukseen sekä koestusgeneraattorijärjestelmän pääkomponentteihin, johon kuuluvat taajuusmuuttaja, syöttömuuntaja, induktiomoottori sekä tahtigeneraattori.</p> <p>Työ aloitettiin tutustumalla koestusgeneraattorijärjestelmän toimintaan ja sen käyttöön. Aluksi tutustuttiin järjestelmän pääkomponenttien toiminnan teoriaan ja rakenteeseen, sekä millaisia erityyppisiä ratkaisuja kyseisiä komponenteista on olemassa. Työn alussa perehdyttiin myös siihen millaisia ongelmia järjestelmän suuri 6300 A nimellisvirta voi aiheuttaa järjestelmän kaapeloinnille, pääkomponenteille sekä ympäristölle.</p> <p>Koska järjestelmän pääkomponentit oli hankittu jo ennen työn aloittamista, keskityttiin työssä järjestelmän pienjännitekaapeloinnin toteuttamiseen. Kaapelointi haluttiin toteuttaa niin, että siitä aiheutuvat häviöt ja häiriöt saataisiin pidettyä mahdollisimman vähäisinä, joka on ongelma järjestelmissä, joissa käytetään suuria virtoja.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin selvitys siitä, miten pienjännitekaapelointi tulisi toteuttaa koestusgeneraattorijärjestelmän pääkomponenttien välille niin, että kaapelointi kestää järjestelmän suuren nimellisvirran eikä kaapeloinnista aiheutuvat tehohäviöt ja häiriöt kasvaisivat liian suuriksi.</p>	
Avainsanat	pienjännitekaapelointi, taajuusmuuttaja, generaattori

Author Title Number of Pages Date	Mikko-Petteri Vilhunen Electrical Planning of the Testing Generator System 57 pages + 2 appendices 20 January 2020
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical and Automation Engineering
Professional Major	Electric Power Engineering
Instructors	Jaakko Virtanen, Maintenance Manager Arja Ristola, Senior Lecturer
<p>The goal of this study was to perform the electrical planning of a new testing generator system. The study was done for the ABB Motor &amp; Generator factory in Helsinki Pitäjänmäki which produces 3-phase electrical motors and generators. Testing generator system is used to supply electricity for the electrical network that is located inside the factory. The electrical network is then used to supply the electrical machines that are located in the factory test field.</p> <p>The study began by studying the theory and managing of a testing generator system. The first step was to familiarize with the main components of a testing generator system and see what kind of solutions are available for these components in today's market. The main components included a frequency converter, a supply transformer, an induction motor and a synchronous generator. The second step was to study what kind of problems the systems high nominal current could cause inside the system and the other systems surrounding it.</p> <p>Because the main components of the system were acquired before the beginning of this study, the focus of this study was to concentrate on the low voltage cabling plan of the system. The goal for the cabling was to keep the electrical losses and the disturbances that the high nominal current causes in the cables as low as possible. These are common problems in systems with high current.</p> <p>As result of this study, a plan for the low voltage cabling was devised. By doing the low voltage cabling according to this study, the electric losses of the cables and the disturbances inside and outside the system can be kept at minimum.</p>	
Keywords	Low voltage cabling, frequency converter, generator

## Sisällys

### Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Tehtaan sisäistä sähköverkkoa syöttävä koestusgeneraattorijärjestelmä	2
3	Koestusgeneraattorijärjestelmän syöttömuuntaja	3
3.1	Muuntajan rakenne ja toimintaperiaate.	3
3.2	Taajuusmuuttajan syöttömuuntajan mitoittaminen	6
3.3	Muuntajan mahdollinen sijoituspaikka	8
4	Kaapelointi muuntajalta taajuusmuuttajalle	10
4.1	Taajuusmuuttajan syöttökaapeleiden mitoitus	10
4.2	Taajuusmuuttajan syöttökaapeloinnin toteutus	16
4.3	Syöttökaapeleiden sijoitus ja niistä aiheutuvien haittojen ehkäisy	21
4.4	Syöttökaapeleissa aiheutuvat häviöt ja muut haitalliset ilmiöt	22
4.5	Syöttökaapeleiden sähköisten häviöiden laskenta.	25
4.6	Sähkömagneettinen yhteensopivuus	29
5	Vetokonetta ohjaava taajuusmuuttaja	31
5.1	Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja	32
5.2	Taajuusmuuttajasta aiheutuvat häiriöt syöttöverkkoon	36
5.3	Taajuusmuuttajalla tuotetusta sähköstä aiheutuvat rasiukset kaapelille	38
5.4	Taajuusmuuttajan lähtökaapeloinnin toteutus	40
5.5	Taajuusmuuttajan lähtökaapeloinnista aiheutuvat häviöt	43
5.6	Lähtökaapeleiden sijoitus ja niistä aiheutuvien haittojen ehkäisy	45
6	Vetokoneena toimiva induktiomoottori	45
7	Koestusgeneraattorina toimiva tahtigeneraattori	51
8	Yhteenveto	57
	Lähteet	58
	Liitteet	

Liite 1. Vetokoneen tekniset tiedot

Liite 2. Tahtigeneraattorin tekniset tiedot

## Lyhenteet

$\mu$	Muuntosuhde.
B	Suskeptanssi.
c	Kapasitanssi pituusyksikköä kohti.
$\cos\alpha$	Tasasuuntaajan ohjauskulma.
DC	Tasasähkö.
DTC	(Direct Torque Control) Suora vääntömomentin säätö.
E	Käämiin indusoitunut lähdejännite.
$E_1$	Ensiökäämin sähkömotorinen jännite.
$E_2$	Toisiökäämin sähkömotorinen jännite.
EMC	(Electromagnetic compatibility) Sähkömagneettinen yhteensopivuus.
f	Vaihtosähkön taajuus.
$F_1$	Magnetointikäämin alkupää.
$F_2$	Magnetointikäämin loppupää.
$f_k$	käämityskerroin.
g	Konduktanssi pituusyksikköä kohti.
Hz	Hertsi.
I	Virta.
$I'$	Mitoitusvirta.
IGBT	Insulated-gate bipolar transistor.
$I_r$	Roottorivirta.
$I_u$	Katkaisijan jatkuva virta.
k	Muuntajan kuormitettavuus.
$k_1$	Lämpötilan määräämä korjauskerroin.
$k_2$	Muiden virtapiirien läheisyyden määräämä korjauskerroin.
l	Induktanssi pituusyksikköä kohti.
l	Pituus.
N	Käämin kierrosten lukumäärä.
n	Yliaallon järjestysluku.
n	Pyörivän sähkökoneen roottorin nopeus.
N	Magneettinen pohjoisnapa.
$N_1$	Ensiökäämin kierrosluku.
$N_2$	Toisiökäämin kierrosluku.
$n_N$	Epätahtimoottorin nimellinen nopeus.
$n_s$	Staattorin magneettikentän pyörimisnopeus.

$p$	Vaihtosähkökoneen napapariluku.
$P_h$	Pätötehohäviö.
$Q_c$	Tuotettu loisteho.
$Q_h$	Loistehohäviö.
$r$	Resistanssi pituusyksikköä kohti.
$r/\text{min}$	Kierrosta minuutissa.
$s$	Epätahtimoottorin suhteellinen jättämä.
$S$	Magneettinen etelänapa.
SFS	Suomen standardisoimisliitto (ruots. Finlands Standardiseringsförbund).
$S_N$	Nimellinen näennäisteho.
$U_1$	Ensiökäämin liitinjännite.
$u_1$	Syötetty jännitepulssi.
$U_1$	U-vaiheen käämin alkupää.
$U_{1N}$	Nimellinen ensiöjännite.
$U_2$	Toisiökäämin liitinjännite.
$U_2$	U-vaiheen käämin loppupää.
$U_{2N}$	Nimellinen toisiojännite.
$u_r$	Heijastunut jänniteaalto.
$U_v$	Vaihejännite.
$V_1$	V-vaiheen käämin alkupää.
$W_1$	W-vaiheen käämin alkupää.
$V_2$	V-vaiheen käämin loppupää.
$W_2$	W-vaiheen käämin loppupää.
VSI	(Voltage source inverter) Jännitevälipiirivaihtosuuntaaja.
$X$	Reaktanssi.
$X_C$	Kapasitiivinen reaktanssi.
$X_L$	Induktiivinen reaktanssi.
$Y$	Admittanssi.
$Z$	Impedanssi.
$Z_1$	Suhteellinen ominaisimpedanssi ennen epäjatkuvuuskohtaa.
$Z_2$	Suhteellinen ominaisimpedanssi epäjatkuvuuskohdan jälkeen.
$\omega$	Kulmataajuus.
$\Phi$	Magneettivuo.
$\Phi_m$	Magneettinavan päävuo.

## 1 Johdanto

Motors and Generators -yksikön tehtaassa valmistettujen sähkökoneiden viimeisiin valmistusvaiheisiin kuuluu loppukoestus. Koestus suoritetaan kaikille tehtaassa valmistetuille koneille. Koestus koostuu erilaisista kokeista ja mittauksista. Niillä varmistetaan, että kone on asiakkaan toiveiden mukainen ja että se vastaa sen käytön asettamia vaatimuksia.

Yksi tärkeimmistä koestukseen liittyvistä välineistä on koestusgeneraattori ja siihen liittyvät apulaitteet. Koestusgeneraattoreita on tehtaalla useita, ja niillä syötetään koekentän sisäistä sähköverkkoa, jolla mahdollistetaan halutunlaisen sähkön syöttäminen koestettavalle koneelle, ja samalla vältetään häiriöiden aiheutuminen valtakunnan sähköverkkoon. Valmistettavien koneiden tehojen kasvaessa käytössä olevien koestusgeneraattoreiden kapasiteetti tulee jäämään tulevaisuudessa riittämättömäksi. Tämän takia koestusgeneraattorijärjestelmää on päivitettävä lisäämällä siihen uusi ohjattava generaattori vanhan vuonna 1965 valmistetun G22-generaattorin tilalle. Samalla on myös päivitettävä generaattoria pyörittävä vetokone ja vetokoneen ohjausyksikkö.

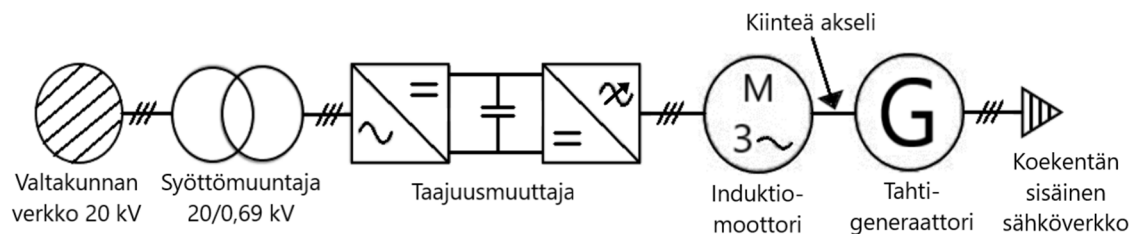
Insinööriyön aiheena on yhden uuden koestusgeneraattorijärjestelmän osakokonaisuuden suunnittelu. Koska projekti on laaja ja sen toteutus on pitkäkestoinen, tässä insinööriyössä keskitytään tarkemmin järjestelmän pienjännitekaapeloinnin suunnitteluun ja järjestelmän pääkomponentteihin, joihin kuuluvat tahtigeneraattori, induktiomoottori, taajuusmuuttaja ja taajuusmuuttajan syöttömuuntaja.

ABB:n Pitäjänmäen Motors and Generators -yksikön tehtaalla kehitetään ja valmistetaan muun muassa suurjännitemoottoreita, pienjännite- ja suurjännitegeneraattoreita sekä kestopagneettimoottoreita. ABB:n moottori- ja generaattoriliiketoiminta työllistää maailmanlaajuisesti 13000 henkilöä, joista 900 työskentelee Helsingissä. [1.]



## 2 Tehtaan sisäistä sähköverkkoa syöttävä koestusgeneraattorijärjestelmä

Koestusgeneraattorijärjestelmää syötetään omalla syöttömuuntajalla, jonka ensiöpiiri on kytketty valtakunnan 20 kV:n sähköverkkoon. Syöttömuuntajan toisiopiiri on kytketty jännitevälipiirilliseen taajuusmuuttajaan, jolla ohjataan pienjänniteinduktiomootoria, jonka akseli on liitetty tahtigeneraattorin akseliin. Koestusgeneraattorina käytetään erillismagneetointia tahtigeneraattoria, jolla tuotetaan kolmivaiheista vaihtosähköä tehtaan sisäiseen sähköverkkoon, kun generaattorin akselia pyöritetään mekaanisesti induktiomootorin avulla. Tätä sisäistä sähköverkkoa käytetään syöttämään koekentällä koestettavia koneita. Kuvassa 1 on yksijohdinpiirros koestusgeneraattorijärjestelmästä.



Kuva 1. Koestusgeneraattorijärjestelmä.

Koska koestettavat koneet eivät ole sähköisiltä suureiltaan samanlaisia, ja erilaiset koekentällä suoritettavat testit vaativat eri suuruisia ja taajuisia syöttöjännitteitä, halutaan koestusgeneraattorin tuottaman jännitteen suuruuteen ja taajuuteen vaikuttaa. Tahtigeneraattorin antamaa jännitettä voidaan säätää muuttamalla tahtikoneen magneetointia. Koekentälle syötettävän sähkön taajuuden muuttamiseen vaaditaan generaattorin pyörimisnopeuden muuttamista eli käytännössä generaattoria pyörittävän induktiomootorin pyörimisnopeuden muuttamista. Tämä on mahdollista induktiomootorin syöttämiseen käytetyn taajuusmuuttajan avulla.

Taajuusmuuttajaa tullaan syöttämään 690 V:n kolmivaiheisella jännitteellä taajuusmuuttajalle suunnitellusta syöttömuuntajasta, jonka ensiöpiiri on kytketty Helsingin kaupungin 20 kV:n verkkoon.

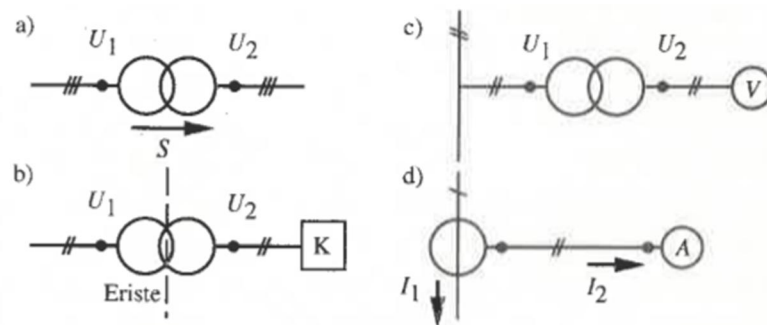
### 3 Koestusgeneraattorijärjestelmän syöttömuuntaja

#### 3.1 Muuntajan rakenne ja toimintaperiaate.

Vaihtosähkötekniikan yksi tärkeimmistä komponenteista on muuntaja, jota käytetään sen nimen mukaisesti muuntamaan vaihtosähkön jännite tasosta toiseen.

Muuntajat voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääryhmään: Voima- eli tehomuuntajiin, mittamuuntajiin ja suojamuuntajiin. Voimamuuntajan tarkoituksena on muuntaa jännitettä sähkötehoa vaativien tarpeiden mukaan. Mittamuuntajien tehtävänä on muuntaa mitattava virta tai jännite sellaiseen arvoon, että mittaus voidaan suorittaa turvallisesti. Suojamuuntajia käytetään sähkölaitteiden eristämiseen normaalista sähköverkosta. [2, s. 7.]

Kuvassa 2 on jaoteltu muuntajat niiden tehtävien mukaan.



Kuva 2. Muuntajat jaoteltuna niiden tehtävien mukaan. Kuvassa a) on voimamuuntaja, b) on suojamuuntaja, c) on jännitemuuntaja ja d) on virtamuuntaja. [2, s. 7.]

Muuntajan toiminta perustuu Faradayn lakiin, joka on esitetty kaavassa 1.

$$E = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

E on indusoitunut lähdejännite  
 $d\Phi$  on magneettivuon muutos  
 dt on kulunut aika.

Faradayn lain mukaan lähdejännite, jonka magneettivuo indusoi käämiin, on suoraan verrannollinen magneettivuon muutosnopeuteen.

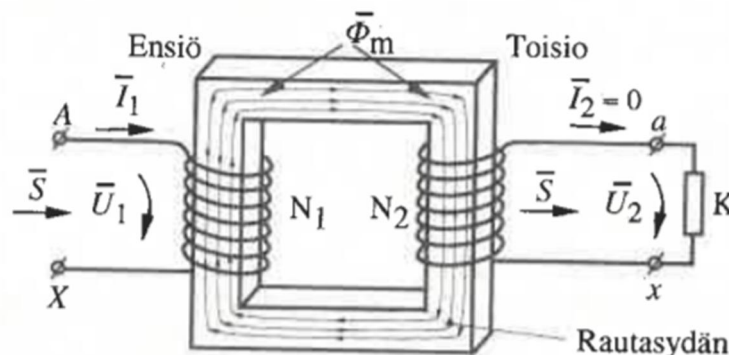
Jos käämissä on enemmän kuin yksi kierrosluku, indusoi muuttuva magneettikenttä jokaiseen kierrokseen saman lähdejännitteen, joten kaava voidaan muuttaa muotoon 2.

$$E = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2)$$

jossa N on käämissä olevien kierrosten lukumäärä.

Sähkömagneettinen induktio toimii molempiin suuntiin. Induktiovirran suunta on aina sen mukainen, että se pyrkii vastustamaan magneettivuon muutosta. Tätä ilmiötä kutsutaan Lenzin laiksi. Sanallisesti ilmaistuna Lenzin laki tarkoittaa, että magneettivuon kasvaessa, pyrkii induktiovirta pienentämään magneettivuota ja magneettivuon pienentyessä, pyrkii induktiovirta lisäämään magneettivuota. [3, s. 2/15.]

Kuvassa 3 on esitetty ihanteellinen yksivaiheinen tehomuuntajan. Puhuttaessa ihanteellisesta eli häviöttömästä muuntajasta tarkoitetaan muuntaja, jonka rautasydämessä ei synny rautahäviöitä eikä muuntajan käämeissä synny virtalämpöhäviöitä. Tällaisen muuntajan hajavuo on nolla, joten sama magneettivuo lävistää ensiö- ja toisiokäämiin.



Kuva 3. Yksivaiheinen tehomuuntaja. [2, s. 8.]

Muuntajan ensiökäämiin syötetty vaihtosähkö luo muuttuvan magneettivuon, joka siirtää sähkötehoa ensiökäämistä toisiokäämiin muuntajan rautasydämen kautta. Ensiökäämissä on  $N_1$  kierrosta. Ensiökäämiin syötetty sähköteho  $S$  synnyttää muuttuvan magneettivuon  $\Phi_m$ , joka kulkee rautasydäntä pitkin muuntajan toisiokäämiin, jossa on  $N_2$  kierrosta ja indusoi tähän sähkötehon  $S$ . [2, s. 7–8.]

Yksivaihemuuntajan muuntosuhde  $\mu$  on nimellisen ensiöjännitteen suhde nimelliseen toisiojännitteeseen. Muuntajan nimellisjännitteillä tarkoitetaan muuntajan tyhjäkäynnin aikaisia käämien liitinjännitteitä, jotka ovat leimattu muuntajan arvokilpeen. Muuntosuhde voidaan laskea kaavalla 3. [2, s. 9–10.]

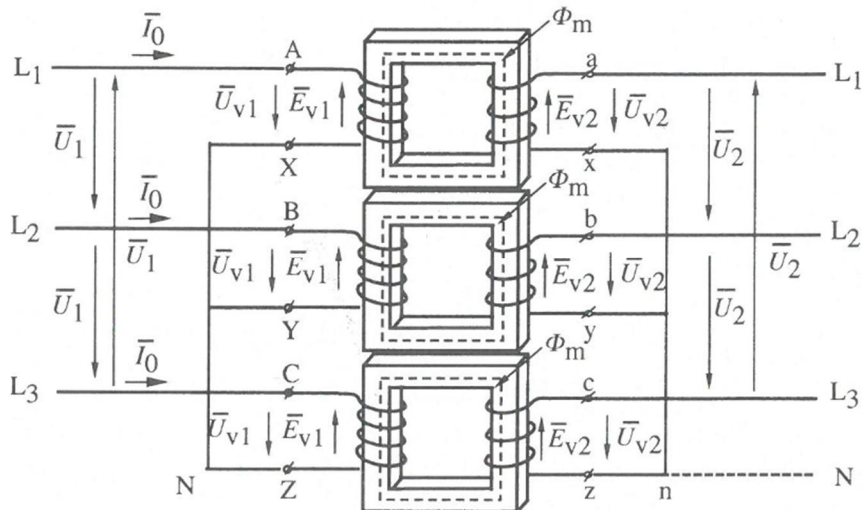
$$\mu = \frac{U_{1N}}{U_{2N}} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3)$$

$U_{1N}$  on nimellinen ensiöjännite  
 $U_{2N}$  on nimellinen toisiojännite  
 $U_1$  on ensiökäämin liitinjännite  
 $U_2$  on toisiokäämin liitinjännite  
 $E_1$  on ensiökäämin sähkömotorinen jännite  
 $E_2$  on toisiokäämin sähkömotorinen jännite  
 $N_1$  on ensiökäämin kierrosluku  
 $N_2$  on toisiokäämin kierrosluku [2, s. 10]

Kaavassa muuntajan ensiökäämiin vaikuttava jännite on nimellisjännitteen suuruinen eli  $U_1 = U_{1N}$ . Tällöin myös toisiokäämin liitinjännite on nimellisjännite eli  $U_2 = U_{2N}$ . Kaava 3 pätee vain silloin kun käsitellään ihanteellista muuntajaa, koska tällöin  $U_1 = E_1$  ja  $U_2 = E_2$ . [2, s. 10.]

Kolmivaiheinen muuntaja saadaan yksinkertaisesti rakennettua kytkemällä kolmen yksivaiheisen muuntajan ensiö- ja toisiokäämi tähteen tai kolmioon. Kytkentöjen ei tarvitse olla samat ensiö- ja toisiopuolella. [2, s. 38–39.]

Tähtikytkennässä yhden käämin yli vaikuttava jännite on 57,7 % pääjännitteestä ja käämin virta on sama kuin vaihevirta. Kolmiokytkennässä yhden käämin yli vaikuttava jännite on sama kuin pääjännite mutta käämissä kulkeva virta on 57,7 % vaihevirrasta. Siksi tähtikytkentä sopii käyttöihin, joissa on iso jännite ja pieni virta ja kolmiokytkentä niihin, joissa on pieni jännite ja iso virta. Tähtikytkentä on myös valittava silloin kun tarvitaan tähtipiste maadoittamista tai vinokuormittamista varten. Kuvassa 4 on kolmivaiheinen muuntaja, jonka ensiö- ja toisiokäämit on kytketty tähteen. [4, s. 142.]



Kuva 4. Kolmivaiheinen tehomuuntaja, jossa kolmen yksivaiheisen muuntajan ensiö- ja toisio-  
käämit on kytketty tähteen. [2, s. 31.]

Tehomuuntajat voidaan jakaa kahteen ryhmään. Jakelu- eli pientehomuuntajiin kuuluvat muuntajat, joiden yläjännitepuolen nimellijännite on  $U_{1n} \leq 20$  kV, alajännitepuolen nimellijännite on  $U_{2n} = 400$  V ja teho on  $S_n \leq 3250$  kVA. Näitä suuremmat nimellijännitteiset ja -tehoiset muuntajat luetellaan suurtehomuuntajiksi. [2, s. 65.]

Rakenteeltaan muuntajat ovat hyvin yksinkertaisia, koska niissä ei ole liikkuvia osia. Lähes kaikki muuntajat ovat öljyeristettyjä. Valuhartsisia eli kuivamuuntajia käytetään paikoissa, joissa öljyeristetyn muuntajan käyttö on kielletty tai kallista öljyn vaatimien erikoistoimenpiteiden takia. Tällaisia ympäristöjä ovat esimerkiksi sellaiset tilat, joissa öljyeristeinen muuntaja aiheuttaa palovaaran tai ympäristöriskin. [2, s. 69.]

### 3.2 Taajuusmuuttajan syöttömuuntajan mitoittaminen

Syötettävän käytön eli kuorman suuruus määrää muuntajan tehon ja syöttöverkon jännite sekä kuorman nimellijännitteen suuruus määrää muuntajan muuntosuhteen. Muita tärkeitä huomioon otettavia asioita muuntajaa valittaessa ovat muuntajan asennuspaikka ja sen vaikutukset muuntajan rakenteeseen sekä muuntajan sähköhäviöiden aiheuttamat kustannukset. [5, s. 82.]

Taajuusmuuttajan syöttömuuntajan mitoitukseen käytettiin ACS880-sähkösuunniteluopasta, jossa on annettu selkeät ohjeet IGBT-syöttöyksiköllä tai jarrutusenergiaa hyödyntävällä tasasuuntaajayksilöllä varustetun taajuusmuuttajan syöttömuuntajan valinnalle.

Ohjeet ovat seuraavanlaiset [6, s. 15]:

- 1 Määritä muuntajan nimellisteho seuraavalla yhtälöllä:  $S_n \text{ (kVA)} = 1,16 \cdot \text{moottorin akselitehojen summa (kW)}$ .
- 2 Määritä muuntajan toisiokäämin nimellisjännite taajuusmuuttajan nimellisen tulojännitteen mukaan.
- 3 Varmista, että muuntaja vastaa taajuusmuuttajan sähköverkkovaatimuksia, joihin kuuluvat:
  - Nimellinen tulojännite, sallittu jännitevaihtelu ja epätasapaino.
  - Nimellinen taajuus ja sallittu vaihtelu.
  - Oikosulkukestoisuus (IEC) tai oikosulkuvirtasuojaus (UL tai CSA)
- 4 Pyydä muuntajan valmistajalta lisätietoja muuntajan valitsemista varten.

Lisähuomautuksen ohjeissa on että, jos taajuusmuuttajan teho on suurempi kuin 500 kVA ja siinä on IGBT-syöttöyksikkö, on käytettävä taajuusmuuttajille ja moottoreille suunniteltua muuntajaa tai muuntajaa, jossa on kaksi toisiokäämiä, joista toinen on suunniteltu taajuusmuuttajille ja moottoreille. [6, s. 15.]

Lisähuomautus koskee suunniteltavaa koestusgeneraattorijärjestelmää. Taajuusmuuttajassa on verkkosilta, joka käyttää IGBT-transistoreja. Koestusgeneraattorijärjestelmälle tulee oma tehomuuntaja, joka syöttää ainoastaan tätä yhtä koestusgeneraattorijärjestelmää.

Edellä olevien ohjeiden ja induktiomoottorin nimellisarvojen avulla taajuusmuuttajan syöttömuuntajan nimelliseksi tehoksi saadaan:

$$S_N = 1,16 \cdot 6500 \text{ kW} = 7540 \text{ kVA}$$

Koska muuntajan teho on 690 V:n toisiojännitteeseen nähden hyvin suuri, jouduttiin käyttöä varten suunnittelemaan erikoismuuntaja yhteistyössä ABB:n Vaasan Transformers -yksikön kanssa, koska kyseisillä nimellisarvoilla olevia muuntajia ei ole sarjatuotannossa.

Muuntajan kuormitettavuutta alentaa taajuusmuuttajan aiheuttamat virran yliharmoniset aallot. Yliaallot aiheuttavat pyörrevirtoja ja virran ahtautumista, joka kasvattaa niiden osuutta kuormitushäviöistä. Muuntaja on valmistettava siten, että kuormitushäviöt taajuusmuuttajakäytössä eivät ylitä puhtaalla sinimuotoisella muuntajan nimellisvirralla aiheutuvia kuormitushäviöitä. [5, s. 81–82.]

### 3.3 Muuntajan mahdollinen sijoituspaikka

Muuntajan alajännitepuolella vaikuttava virta on suurempi yläjännitepuoleen verrattuna. Suurempi virta vaatii kaapeleilta suurempaa poikkipinta-alaa. Suurempi virta aiheuttaa myös enemmän häviöitä kaapeleissa, siksi muuntajan ihanteellinen sijainti on mahdollisimman lähellä kulutus pistettä, muuntajan alajännitepuolen kaapeleiden pituuden lyhentämisen takia [7, s. 49]. Tässä tapauksessa muuntajan ihanteellinen sijainti on rakennuksen sisällä mahdollisimman lähellä muuntajalla syötettävää taajuusmuuttajaa.

Suunniteltaessa rakennuksen sisällä olevaa muuntamoaa on varmistettava se, että muuntajan asennus, käyttö ja huolto voidaan toteuttaa esteettömästi. Rakennuksessa sijaitsevan muuntamon on täytettävä ympäristöministeriön julkaisussa E1 määritellyt rakennuksen paloturvallisuuden vaatimukset, jotka määrittävät muuntamossa olevien palavien aineiden ja rakenteiden perusteella. Öljyeristeiset muuntajat ovat suurempi paloturvallisuusriski kuin kuivamuuntajat, mutta kuivamuuntajien korkean hinnan takia ne ovat vähemmän käytetty vaihtoehto öljyeristeisiin verrattuna. [7, s. 49.]

Muuntajaa asennettaessa sisälle on varmistettava, että muuntajan käytössä syntyvä lämpö pääsee siirtymään pois vapaasti, eikä muuntaja pääse ylikuumentumaan. Tämä ei välttämättä ole mahdollista koestusgeneraattorikäytössä kellarin ahtauden sekä riittämättömän ilmanvaihdon takia. [7, s. 49.]

Muuntaja aiotaan sijoittaa kuvassa 5 esitetyn muuntamon katolle. Muuntamo sijaitsee tehtaassa sisällä.



Kuva 5. Syöttömuuntajan mahdollinen sijoituspaikka.

Sijainti on hyvä häviöitä ajatellen, koska alajännitepuolen kaapelointi saadaan pidettyä lyhyenä. Muuntaja ei ole myöskään tehtaassa työntekijöiden tiellä tai välittömässä läheisyydessä.

Jotta muuntajan sijoittaminen sähkötilan katolle on mahdollista, on kattoa vahvistettava nykyisestä muuntajan painon takia. Muuntajan painoa ei vielä tiedetä, koska se valmistetaan erityisesti tätä käyttöä varten. ABB:n tuoteluettelossa on ilmoitettu saman tehoisen muuntajan kokonaispainoksi 15400 kg, joka on todennäköisesti hyvin lähellä tulevan syöttömuuntajan kokonaispainoa [8, s. 23].



On myös varmistuttava siitä, ettei tilassa käytettävien siltanostureiden koukut pääse kosketuksiin muuntajan sähköisten liitoksien kanssa tai muutenkaan vaurioittamaan muuntajaa.

## 4 Kaapelointi muuntajalta taajuusmuuttajalle

Suunniteltaessa järjestelmän kaapelointia suurin haaste oli siirrettävän tehon suuruus. Induktiomoottorin nimellinen teho on 6,5 MW ja tämän kyseisen tehon siirto tapahtuu kolmivaiheisella 690 V:n jännitteellä, jonka seurauksena taajuusmuuttajaan asennetun katkaisijan jatkuva virta  $I_u$  on mitoitettu 6300 ampeerille.

Kun puhutaan näin suurista virroista, on otettava paljon muitakin ominaisuuksia huomioon kuin vain kaapelin kuormitettavuus.

### 4.1 Taajuusmuuttajan syöttökaapeleiden mitoitus

Kaapelissa kulkevan virran suuruus määrää pääsääntöisesti kaapelin poikkipinta-alan ja ympäristötekijät kaapelin tyypin. Kaapelin kuormitettavuuden määrää sen kyky siirtää virran aiheuttama lämpö ympäristöön. [5, s. 183.]

Jos käyttökohteeseen mitoitetaan liian pieni kaapeli, ylittyvät valmistajan sille määritellyt lämpötilarajat, jonka pitkäaikaisena seurauksena on kaapelin eristeen eliniän lyhentyminen. Kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavat sen materiaali, eristysmateriaali, lämpötila, asennustapa, kaapelireitti, kaapelin tai kaapeleiden lähellä sijaitsevat muut virtapiirit ja laitteet sekä muut ympäristötekijät. [5, s. 183.]

Lähtökohta kaapelin mitoitukseen on kuorman vaatima virta  $I$ . Tätä virtaa redusoidaan kuormituskertoimien avulla, jotka määritellään kaapelin kuormitettavuuteen vaikuttavien tekijöiden avulla. Kuormituskertoimia nimitetään myös korjauskertoimiksi. Kaikki kuormituskertoimet pienjänniteasennuksille on määritelty standardissa SFS 6000. [5, s. 184.]

Ensimmäiseksi selvitetään, mikä on kaapelireitin ympäristön lämpötila. Jos kaapeli kulkee usean eri lämpötilan läpi, valitaan korjauskerroin  $k_1$  korkeimman lämpötilan mukaan.

Taulukossa 1 on lueteltu korjauskertoimia kaapelin eristysmateriaalin ja ympäristön lämpötilan mukaan [5, s. 184].

Taulukko 1. Vapaasti ilmassa olevien kaapeleiden korjauskertoimet muille ympäristön lämpötiloille kuin 30 °C. [9, s. 265.]

Ympäristön lämpötila <sup>a</sup> °C	Eristys			
	PVC	PEX ja EPR	Mineraali <sup>a</sup>	
			PVC:llä päällystetty tai paljas ja kosketeltavissa 70 °C	Paljas, ei kosketeltavissa 105 °C
10	1,22	1,15	1,26	1,14
15	1,17	1,12	1,20	1,11
20	1,12	1,08	1,14	1,07
25	1,06	1,04	1,07	1,04
30	1,00	1,00	1,00	1,00
35	0,94	0,96	0,93	0,96
40	0,87	0,91	0,85	0,92
45	0,79	0,87	0,78	0,88
50	0,71	0,82	0,67	0,84
55	0,61	0,76	0,57	0,80
60	0,50	0,71	0,45	0,75
65	-	0,65	-	0,70
70	-	0,58	-	0,65
75	-	0,50	-	0,60
80	-	0,41	-	0,54
85	-	-	-	0,47
90	-	-	-	0,40
95	-	-	-	0,32

<sup>a</sup> Korkeammilla ympäristön lämpötiloilla sovelletaan valmistajan antamia arvoja.

Taulukosta nähdään, että kaapelit ovat mitoitettu 30 °C:n lämpötilalle ja jos lämpötila poikkeaa siitä, vaikuttaa se kaapelin kuormitettavuuteen.

Kun tiedetään käytettävän kaapelin rakenne ja siinä käytettävät materiaalit, asennustapa sekä kaapelin sijoitus muihin virtapiireihin voidaan määriteellä seuraava kuormituskerroin. Kaapeleiden siirtokyky on riippuvainen sen lähistölle asennetuista muista kaapeleista, mikä otetaan huomioon korjauskertoimella  $k_2$ . Taulukosta 2 ja 3 voidaan määritellä korjauskertoimen  $k_2$ . [5, s. 184.]

Taulukko 2. Korjauskertoimet usean kaapelihyllylle asennetun yksijohdinkaapelin ryhmille verrattuna yhden yksijohdinkaapelin ryhmän kuormitettavuuteen vapaasti ilmassa. [9, s. 273.]

Taulukon A.52.3 mukainen asennustapa			Hyllyjen tai tikkaiden lukumäärä	Kolmivaihepiirien lukumäärä hyllyllä tai tikasta kohden			Käytetään korjauskertoimina seuraaville kuormitettavuusarvoille
				1	2	3	
Rei'itetyt kaapelihyllyt (HUOM. 3)	31	<p>Koskettavat toisiaan</p>	1	0,98	0,91	0,87	Kolme kaapelia vaakatasossa
			2	0,96	0,87	0,81	
			3	0,95	0,85	0,78	
Rei'itetyt kaapelihyllyt pystytasossa (HUOM. 3)	31	<p>Koskettavat toisiaan</p>	1	0,96	0,86	-	Kolme kaapelia pystytasossa
			2	0,95	0,84	-	
Tikas, tuet, kiinnikkeet yms. (HUOM. 3)	32 33 34	<p>Koskettavat toisiaan</p>	1	1,00	0,97	0,96	Kolme kaapelia vaakatasossa
			2	0,98	0,93	0,89	
			3	0,97	0,90	0,86	

HUOM. 1 Arvot ovat keskiarvoja taulukoiden B.52.8 – B.52.13 kaapelityypeistä ja ko'ista. Arvojen hajoama on yleensä alle 5 %.

HUOM. 2 Kertoimet soveltuvat yksikertaisille kaapelikerroksille kuten yllä on esitetty ja ne eivät ole voimassa silloin, kun kaapelit ovat useammassa kuin yhdessä kerroksessa ja koskettavat toisiaan. Sellaisten asennusten kertoimien arvot voivat olla huomattavasti pienempiä ja ne pitää määrittää asianmukaisilla menetelmillä.

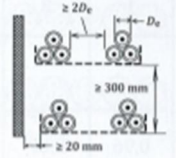
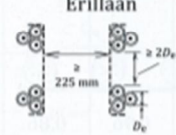
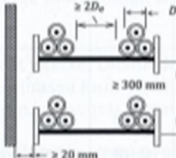
HUOM. 3 Arvot on annettu hyllyjen pystysuoralle etäisyydelle 300 mm ja vähintään 20 mm kaapelihyllyn ja seinän väliselle etäisyydelle. Pienemmällä etäisyyksillä arvoja pitäisi pienentää.

HUOM. 4 Arvot on annettu hyllyjen väliselle suoralle etäisyydelle 225 mm hyllyt asennettuna selät vastakkain. Pienemmällä etäisyyksillä kertoimia pitäisi pienentää.

HUOM. 5 Piireissä, joissa on enemmän kuin yksi kaapeli rinnan vaihetta kohti, kutakin kolme kaapelin ryhmää pitäisi käsitellä tämän taulukon mukaan piirinä.

HUOM. 6 Jos piirissä on  $m$  johdinta rinnan vaihetta kohden, silloin korjauskertoimen määrittelemiseksi tätä piiriä pitäisi käsitellä  $m$  piirinä.

Taulukko 3. Jatkoa taulukolle 2. [9, s. 274.]

Taulukon A.52.3 mukainen asennustapa			Hyllyjen tai tikkaiden lukumäärä	Kolmivaihepiirien lukumäärä hyllyllä tai tikasta kohden			Käytetään korjauskertoimina seuraaville kuormitettavuussarvoille
				1	2	3	
Rei'itetyt kaapelihyllyjärjestelmät (HUOM. 3)	31		1	1,00	0,98	0,96	Kolme kaapelia kolmiomuodossa
			2	0,97	0,93	0,89	
			3	0,96	0,92	0,86	
Rei'itetyt kaapelihyllyjärjestelmät pystytasossa (HUOM. 4)	31		1	1,00	0,91	0,89	
			2	1,00	0,90	0,86	
Tikas, tuet, kiinnikkeet yms. (HUOM. 3)	32		1	1,00	1,00	1,00	
	33		2	0,97	0,95	0,93	
	34		3	0,96	0,94	0,90	

HUOM. 1 Arvot ovat keskiarvoja taulukoiden B.52.8 – B.52.13 kaapelityypeistä ja ko'ista. Arvojen hajoama on yleensä alle 5 %.

HUOM. 2 Kertoimet soveltuvat yksikertaisille kaapelikerroksille kuten yllä on esitetty ja ne eivät ole voimassa silloin, kun kaapelit ovat useammassa kuin yhdessä kerroksessa ja koskettavat toisiaan. Sellaisten asennusten kertoimien arvot voivat olla huomattavasti pienempiä ja ne pitää määrittää asianmukaisilla menetelmillä.

HUOM. 3 Arvot on annettu hyllyjen pystysuoralle etäisyydelle 300 mm ja vähintään 20 mm kaapelihyllyn ja seinän väliselle etäisyydelle. Pienemmillä etäisyyksillä arvoja pitäisi pienentää.

HUOM. 4 Arvot on annettu hyllyjen väliselle suoralle etäisyydelle 225 mm hyllyt asennettuna selät vastakkain. Pienemmillä etäisyyksillä kertoimia pitäisi pienentää.

HUOM. 5 Piireissä, joissa on enemmän kuin yksi kaapeli rinnan vaihetta kohti, kutakin kolme kaapelin ryhmää pitäisi käsitellä tämän taulukon mukaan piirinä.

HUOM. 6 Jos piirissä on  $m$  johdinta rinnan vaihetta kohden, silloin korjauskertoimen määrittelemiseksi tätä piiriä pitäisi käsitellä  $m$  piirinä.

Kuormitusvirran  $I$ , ympäristön lämpötilasta määräytyvän korjauskertoimen  $k_1$  ja muista piirin läheisyydessä olevista virtapiireistä määräytyvän korjauskertoimen  $k_2$  avulla voidaan kaavaa 4 käyttäen laskea kaapelin mitoitusvirta  $I'$ .

$$I' = \frac{I}{k_1 k_2} \quad (4)$$

Kaavalla saadulla virralla ja kaikilla tiedoilla, jotka kaapelin asennusreitistä ja -tavasta tiedetään, voidaan käyttöön valita sopivan tyyppinen kaapeli. Kappelivalmistajan kaapelille ilmoitetun kuormitettavuuden tulee olla suurempi kuin kaavassa 5 laskettu virta  $I'$ . [5, s. 184.]

Kaapeloinnin suorittaa Electronic Power Finland Oy, jonka arvion mukaan kaapelointiin vaaditaan jokaista vaihetta kohden seitsemän kappaletta alumiinisia yksivaihevoimakkaapeleita, joiden poikkipinta-ala on  $800 \text{ mm}^2$ . Tämä voidaan tarkastaa kaavan 4 avulla.

Tiedetään, että ympäristön lämpötila on  $30^\circ \text{ C}$  kuumimmassa kohtaa kaapelireitillä. Taulukosta 1 määritelty korjauskertoimen  $k_1$  arvo kyseisellä lämpötilalla on 1,00.

Tiedetään, että kaapelit asennetaan  $800 \text{ mm}^2$  poikkipinta-alaiselle kaapelille tarkoitettuun kytkentärimaan, johon voidaan asentaa 7 kaapelia rinnakkain. Systeemin kaapeloinnin toteuttaminen vaatii sen, että kytkentärimoja asennetaan kolme päällekkäin. Tiedetään myös, että näille kytkentärimoille ei asenneta muiden piirien kaapeleita. Korjauskertoimeksi  $k_2$  määrityy näiden tietojen ja taulukoiden 2 ja 3 avulla 0,95.

Kuormitusvirtana  $I$  käytetään taajuusmuuttajaan asennetun katkaisijan jatkuvaa virtaa  $I_u$ , joka on 6300 A. Näitä tietoja ja kaavaa 4 käyttäen kuormitusvirraksi saadaan

$$I' = \frac{6300 \text{ A}}{1,00 \cdot 0,95} = 6631,6 \text{ A}$$

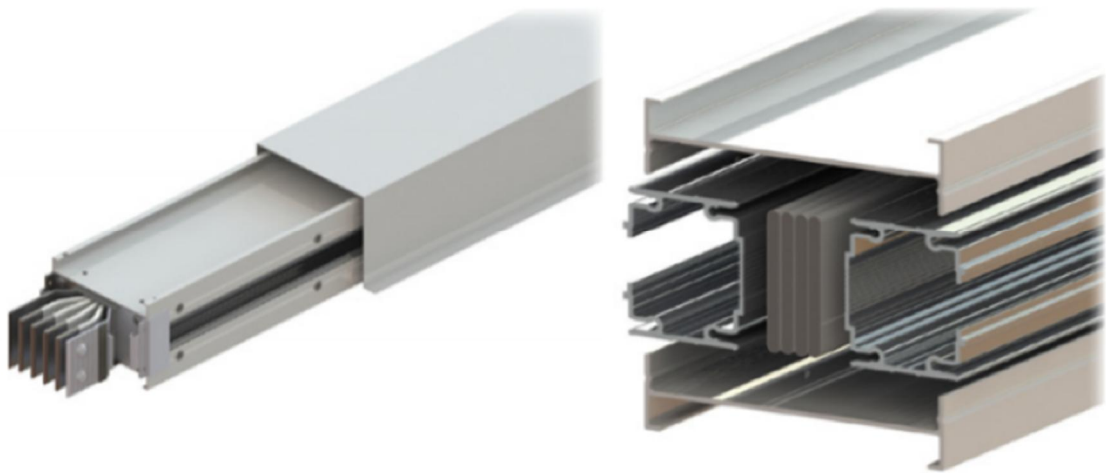
Vaikka taajuusmuuttajan läpi ei voi mennä suurempaa virtaa kuin 6300 A, on pienjännitteenkaapeloinnin kuormitettavuus määriteltävä standardin SFS 6000 mukaan, jottei kaapelin suurin määritelty lämpötila ylity. [9, s. 246.]

Prysmian Group'in AXMK-HF C-PRo-kaapeli on tarkoitettu pienjännitteille ja sitä on saatavana  $800 \text{ mm}^2$ :n poikkipinta-alaisena. Kaapelin teknisissä tiedoissa on määritelty yhden kaapelin kuormitettavuudeksi 1080 A, jos kaapelit on asennettu tasoasennuksena ja johtimien lämpötilat halutaan pysyvän  $70^\circ \text{ C}$ . Jos johtimien lämpötilan halutaan olevan  $90^\circ \text{ C}$ , on kuormitettavuus tällöin 1300 A. Kuormitusvirran ja kaapelin kuormitettavuuden avulla voidaan määritellä tarvittavien kaapeleiden lukumäärä johtimien lämpötilan ollessa  $70^\circ \text{ C}$ . [10, s. 2.]

$$\frac{6631,6 A}{1080 A} = 6,1 \text{ kpl}$$

Koska kaapeleiden lukumäärä on aina ylimitoitettava, saadaan kaapeleiden lukumääräksi seitsemän, joka vastaa EPF:n määrittelemää lukumäärää.

Kaapeloinnin vaihtoehtoisena menetelmänä sähkönsiirrolle voidaan käyttää virtakiskojärjestelmää, joka rakennetaan koteloituista virtakiskoista. Kuvassa 6 on esitetty koteloidun virtakiskon rakenne.



Kuva 6. Koteloidun virtakiskon liitoskohta ja poikkileikkaus. [11, s. 4.]

Eristeellä päällystetyt, alumiinista tai kuparista valmistetut virtakiskot on pakattu kompaktisti ilman ylimääräistä tilaa alumiiniseoksesta valmistetun kotelon sisään. Koteloituja virtakiskoja saa erimuotoisina virtakiskojärjestelmän palasina, jotka mahdollistavat helpon ja nopean asennuksen. Virtakiskojärjestelmän hyötyjä ovat pienemmät sähkömagneettiset häiriöt ja jännitteen alenemat kaapeleihin verrattuna. Järjestelmän rakenne antaa myös kestävyyttä oikosuluista esiintyviä voimia ja sääolosuhteita vastaan. Kompakti rakenne vie myös vähemmän tilaa kaapeleihin verrattuna. [11, s. 4.]

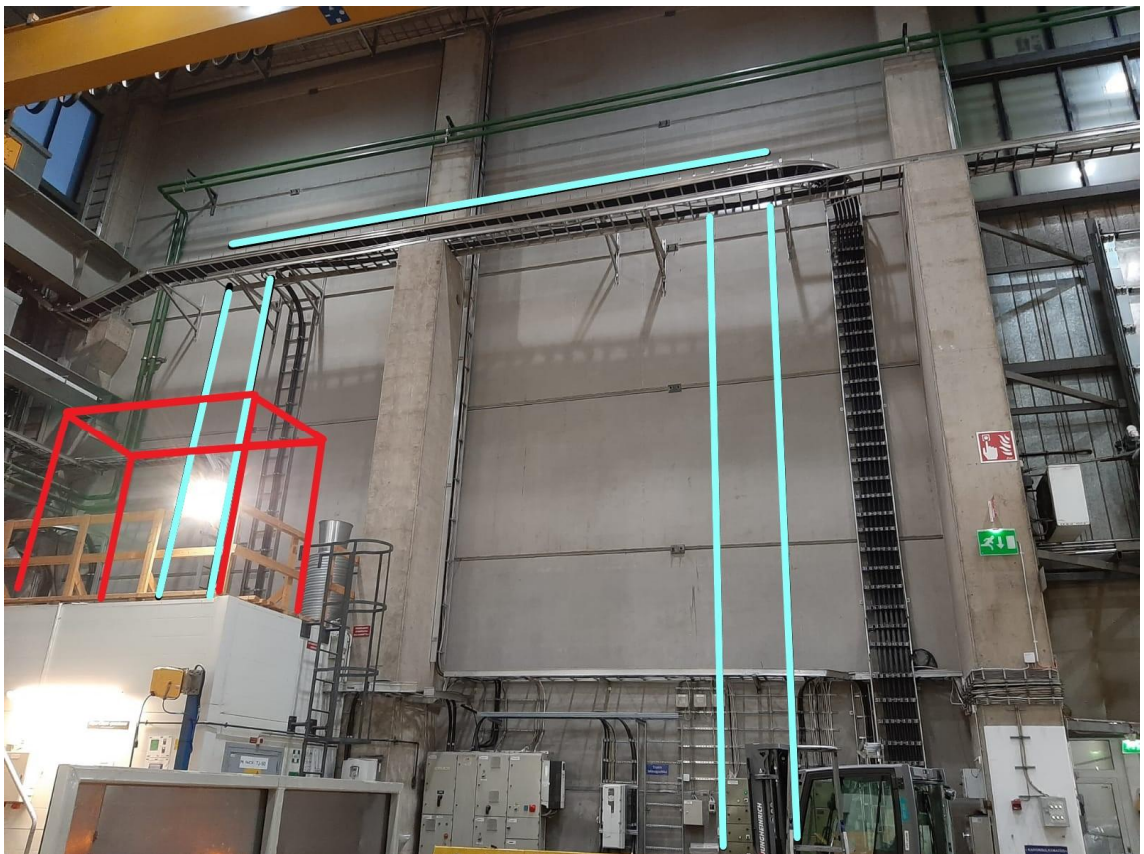
DKC Group-nimisen valmistajan Hercules-virtakiskojärjestelmän suurin nimellisvirta on 6300 A. Kiskosilta sopisi kuormitettavuutensa puolesta koestusgeneraattorijärjestelmän sähkönsiirron toteutukseen. Kiskosillan kiskot on valmistettu kuparista, jonka vuoksi

niissä syntyy vähemmän häviöitä kuin alumiinisissa kaapeleissa. Haittana on suurempi hinta alumiinikaapeleihin verrattuna.

#### 4.2 Taajuusmuuttajan syöttökaapeloinnin toteutus

Koska koko kaapelireitin tekeminen koteloidulla virtakiskolla on liian kallis, päätettiin sähkönsiirto toteuttaa molempia alaluvussa 4.1 mainittuja menetelmiä käyttämällä. Taajuusmuuttajalle tulo joudutaan toteuttamaan virtakiskojärjestelmän avulla, koska taajuusmuuttajan syöttöyksikön kiskot eivät ole sopivia  $800 \text{ mm}^2$ :n kaapelin kaapelikengille ja kaapeleiden sisääntulolle tarkoitettu läpivienti on liian pieni.

Kaapelit tuodaan muuntajalta kaapelitikkaiden avulla tehtaan lattian läpi kellariin kuvan 7 tavoin.



Kuva 7. Kaapeloinnin lähtö tehdashallissa muuntajalta. Muuntajan paikkaa havainnollistettu punaisella ja kaapelireittiä vaaleansinisellä.



Kuva 8. Kaapeleiden tulo kellariin ja reitin jatkaminen kellarissa.

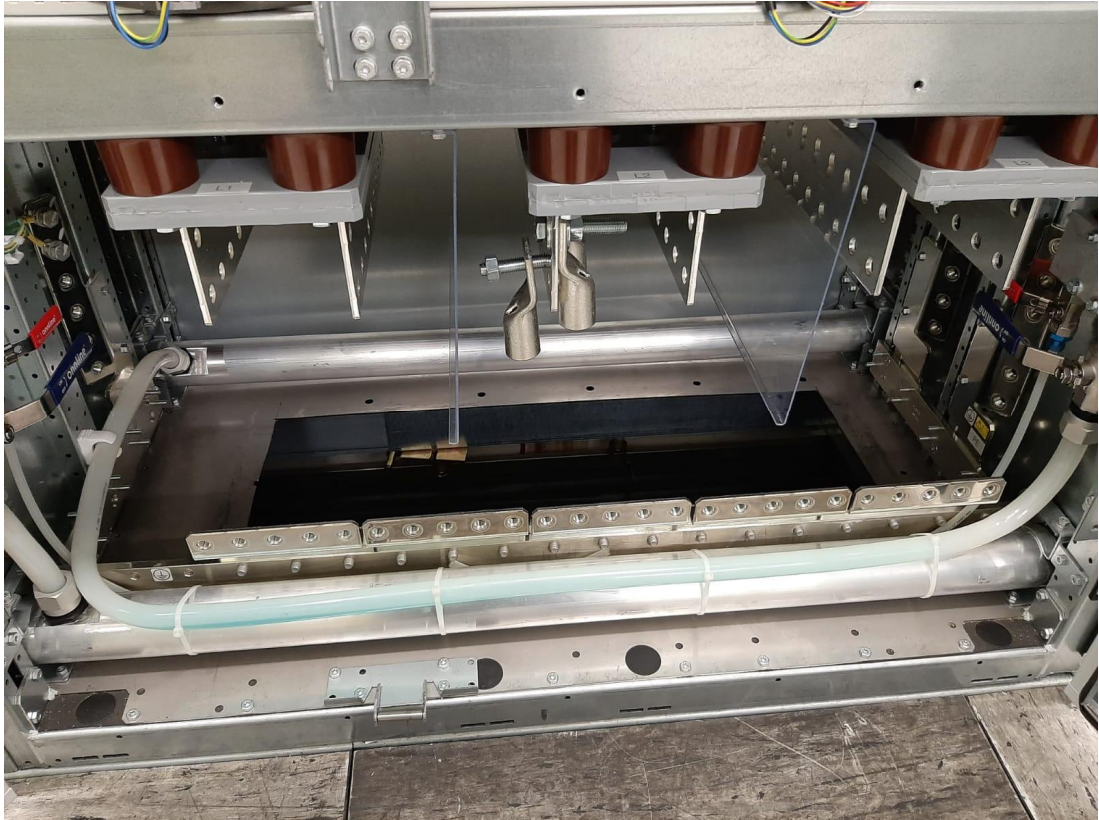
Kaapelit tuodaan kellariin, jossa ne viedään kuvassa 8 näkyvän korotetun lattian alle.





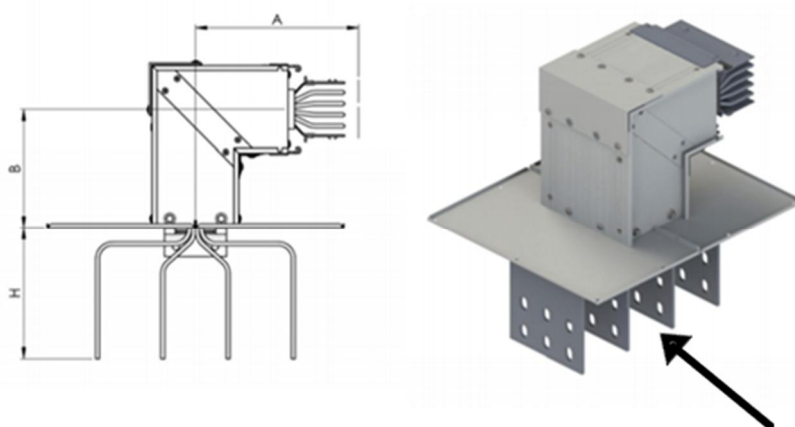
Kuva 9. Kaapelireitti tulo jakokaapille.

Kaapelireitti kulkee lattian alla kellarin käytävää pitkin mustalla havainnoidulle jakokaapille asti kuvan 9 esittämällä tavalla. Jakokaapissa tehdään liitos kaapeleiden ja alaluvussa 4.1 esitetyn Hercules-virtakiskon välille. Virtakisko viedään punaisella havainnollistettua reittiä taajuusmuuttajan syöttökiskoille. Taajuusmuuttajan syöttöyksikkö näkyy kuvan 9 oikeassa reunassa, ja syöttöyksikön kiskot on esitetty kuvassa 10.



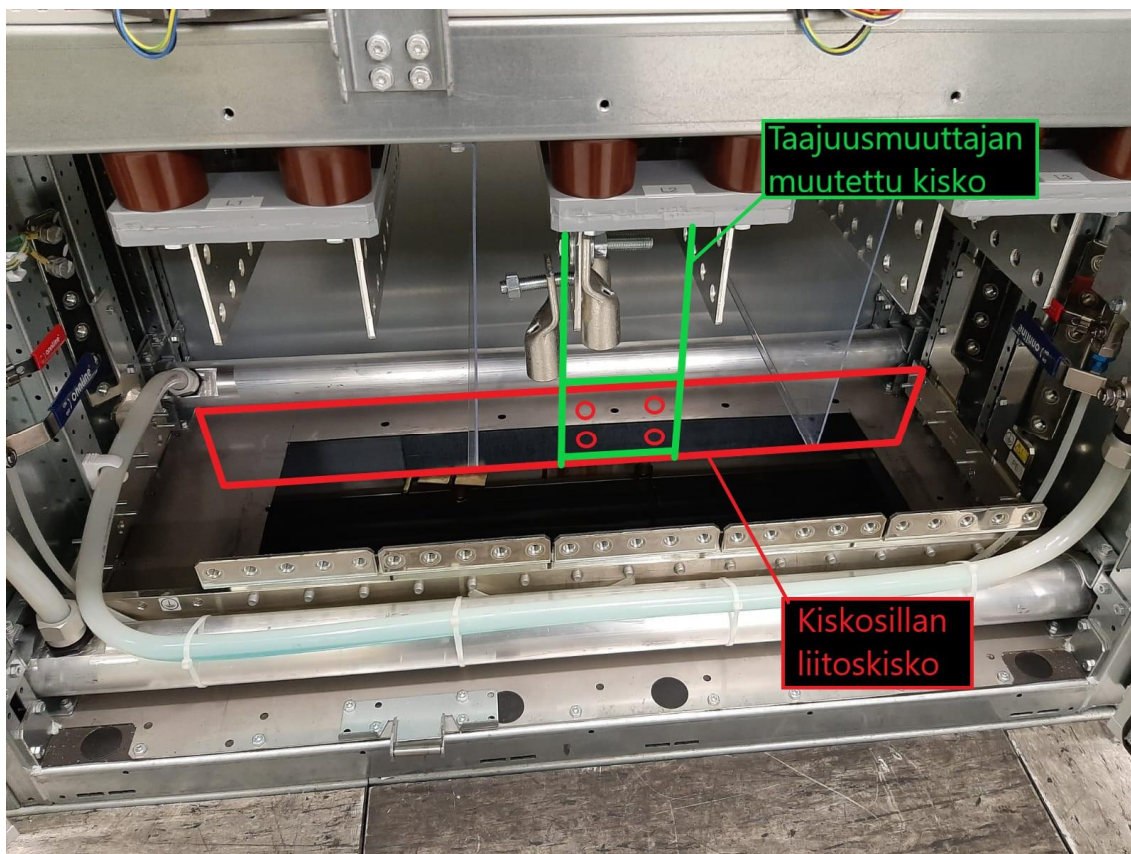
Kuva 10. Taajuusmuuttajan syöttökiskot.

Taajuusmuuttajan syöttöyksikön kiskojen (kuva 10) ja koteloitun virtakiskon välinen liitos toteutetaan kuvassa 11 näkyvän kytkentäosan avulla.



Kuva 11. Hercules virtakiskon kytkentäosa. [11, s. 20.]

Kuvassa 11 nuolella merkittyjen kiskojen pituus on kuitenkin liian pitkä kulmapalassa, joka on tarkoitettu 6300 A:n virtakiskolle. Kiskojen liiallinen pituus aiheuttaa sen, että kulmapalan kiskoja ei voi asentaa taajuusmuuttajan syöttöyksikön kiskojen kanssa saman suuntaisesti. Tästä syystä osaa on käännettävä niin, että taajuusmuuttajan kiskot ovat poikittain kulmapalan kiskoihin nähden. Tämä vaikeuttaa kiskojen yhteensovittamista. Ratkaisuna tähän on taajuusmuuttajan kiskojen muokkaaminen kuvan 12 esittämällä tavalla.



Kuva 12. Taajuusmuuttajan syötön kytkentä.

Kuvassa 10 esitetyt alkuperäiset kiskot vaihdetaan eri muotoisiin kiskoihin, jotka tuodaan alas niin, että ne voidaan kytkeä virtakiskon liitäntäosaan kiskoihin. Kuvassa 12 on havainnollistettu vaiheen L2 muutettu kisko vihreällä ja kiskosillan kulmapalan vaiheen L2 liittokisko punaisella. Taajuusmuuttajan syöttökiskoja muokattaessa tulee varmistaa, että uudet kytkentäkiskot ovat poikkipinta-alaltaan riittävän suuria. Kiskot ovat eristämättömiä. Siksi on tärkeää varmistaa, että ilmavälit maadoitettuihin osiin ja eri vaiheiden

välillä ovat riittävät. Kiskostossa alkuperäiset ilmavälit maata vastaan ovat 100 mm ja vaiheiden välillä 140 mm

#### 4.3 Syöttökaapeleiden sijoitus ja niistä aiheutuvien haittojen ehkäisy

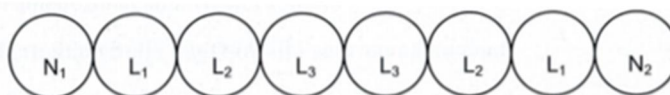
Suuren vaihtovirran takia kaapeleista aiheutuvat magneettikentät voivat muodostua suureksi ongelmaksi ja siksi niitä on pyrittävä vähentämään mahdollisimman tehokkaasti. ACS880-taajuusmuuttajan sähkösuunnitteluohjeessa on lueteltu suosituksia verkko- ja moottorikaapeloinnin osalta, joilla voidaan tehokkaasti vähentää sähkömagneettisen säteilyn syntymistä.

Oppaassa suositellaan käytettävän symmetristä ja suojattua kolmivaihekaapelia, jonka suojavaipan johtokyky on 1/10 vaihejohtimen johtokyvystä. Symmetrinen suojattu kaapeli aiheuttaa vähemmän sähkömagneettista säteilyä koko laitteistossa yksivaihekaapelointiin verrattuna. Tässä käytössä joudutaan kuitenkin käyttämään yksivaiheista kaapelointia, koska pienjännitteistä kaapelia, jonka johtimien poikkipinta-ala on 800 mm<sup>2</sup>, ei ole saatava kolmivaiheisena. [6, s. 22–28.]

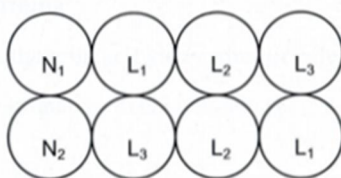
Kaapelit voidaan asentaa myös metalliputkeen tai koteloon, joka on maadoitettu molemmista päistä. Tällöin suojattua kaapelia ei tarvita ja kaapelointi voidaan suorittaa nelijohdinjärjestelmänä ABB:n suositusten mukaan. Jos kaapelointi tehdään useamman metalliputken tai metallikotelon läpi, on putket tai kotelot maadoitettava yhteen sarjaan. Sarja on myös maadoitettava molemmista päistä. [6, s. 22–28.]

Kun asennuksessa käytetään montaa yksivaihekaapelia, on kaapeleina käytettävä samanlaisia, yhtä pitkiä ja samoissa jäähdytysolosuhteissa sijaitsevia kaapeleita, jolloin impedanssit ovat samat ja virranjako on symmetrinen kaapeleiden kesken. [12, s. 240.]

Kuvan 13 mukaisilla sijoitteluilla päästään yksijohdinkaapeleilla lähes symmetriseen virranjakoon [12, s. 240].



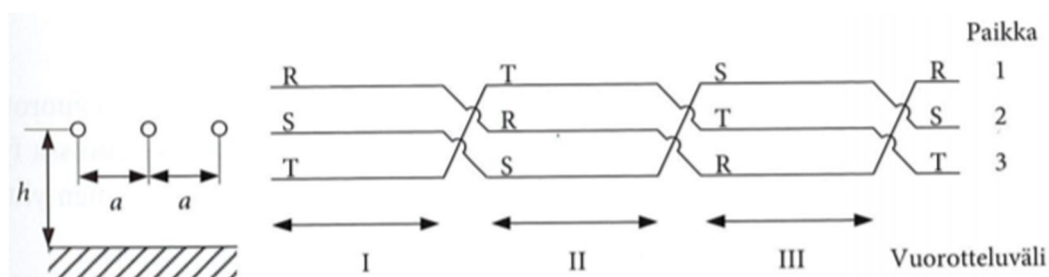
Kuva H.52.1 Erityismuodostelma kuudelle rinnakkaiselle yksijohdinkaapelille tasoasennuksessa (ks. 523.7)



Kuva H.52.2 Erityismuodostelma kuudelle rinnakkaiselle yksijohdinkaapelille asennettuna toistensa päälle (ks. 523.7)

Kuva 13. Yksijohdinkaapeleiden sijoittelukaavio. [9, s. 284.]

Pitkillä siirtoyhteisillä käytetään myös kaapelivuorottelua, jolloin jokainen vaihe kulkee sähköisesti samanarvoisissa paikoissa yhtä pitkän matkan. Kaapelivuorottelu, ei ole kuitenkaan tarpeellista näin lyhyillä siirtomatkoilla. Kuvassa 14 on esitetty tasoasennetun kolmivaiheisen siirtolinjan vuorottelu. [4, s. 322.]

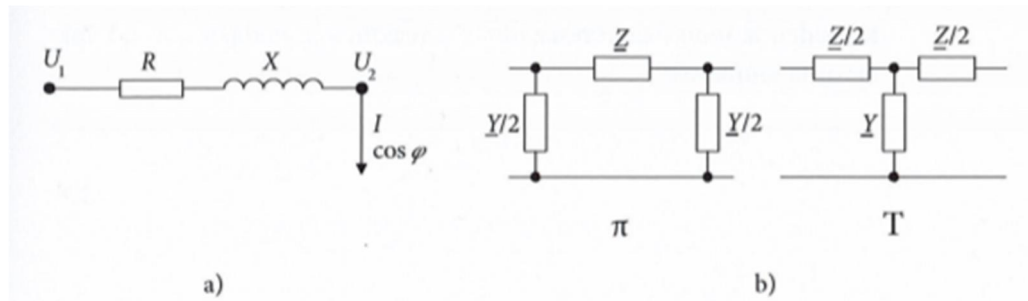


Kuva 14. Vuorottelukaavio [13, s. 107.]

#### 4.4 Syöttökaapeleissa aiheutuvat häviöt ja muut haitalliset ilmiöt

Muuntajien ja sähköjakelujohtojen häviöt muuttuvat lämmöksi. Häviöistä syntyvät korkeat lämpötilat aiheuttavat eristyksien ennenaikaista vanhenemista ja ne voivat myös huonontaa johdinmetallin ominaisuuksia. [13, s. 97; 14, s. 35.]

Johdot sisältävät resistanssia, induktanssia ja kapasitanssia, jotka ovat jakautuneet tasaisesti koko johdon pituudelle. Johdon tehohäviöiden laskemista varten, johto kuvataan yleensä sijaiskytkentöjen avulla, jotka nähdään kuvassa 15. [13, s. 97; 14, s. 35.]



Kuva 15. Sähkönjakelujohdon sijaiskytkentöjä. [14, s. 25.]

Kuvassa 15 b) on esitetty alle 200 km:n voimansiirtojohtojen laskemisessa käytetyt  $\pi$  ja T sijaiskytkennät. Impedanssi  $\underline{Z}$  voidaan laskea kaavalla 5.

$$\underline{Z} = (r + j\omega l) \cdot l \quad (5)$$

$l$  on johdon resistanssi pituusyksikköä kohti  
 $\omega$  on johdossa kulkevan tehon kulmataajuus ( $2\pi f$ )  
 $l$  on johdon induktanssi pituusyksikköä kohti  
 $l$  on tarkasteltavan johdon pituus.

Admittanssi  $\underline{Y}$  voidaan laskea kaavalla 6.

$$\underline{Y} = (g + j\omega c) \cdot l \quad (6)$$

$g$  on johdon konduktanssi pituusyksikköä kohti ( $\frac{1}{R}$ )  
 $c$  on johdon kapasitanssi pituusyksikköä kohti.

Johdon kapasitiivinen virta ja vuotovirta riippuvat sähkökenttien voimakkuuksista, jotka määräytyvät potentiaalierojen mukaan. Siksi johdon konduktanssissa ja kapasitanssissa aiheutuvat häviöt merkitsevät enemmän suurilla jännitteillä ja pitkillä siirtomatkoilla. Esimerkiksi johdon konduktanssia ei yleensä tarvitse ottaa huomioon alle 220 kV:n jännitteillä ja kapasitanssi voidaan jättää huomiotta alle 45 kV:n avojohdoilla. [13, s. 97–99.]

Kuvan 15 b) sijaiskytkentöjä voidaan käyttää kaapeleille ja avojohdoille, mutta niiden ominaisarvojen suuruusluokat eroavat toisistaan kaapeleiden rakenne-erojen vuoksi. Kaapeleiden kapasitanssi on huomattavasti suurempi kuin avojohdon kapasitanssi, mutta koestusgeneraattorijärjestelmän kaapeloinnin häviöitä tarkasteltaessa johdon admittanssi voidaan jättää huomioimatta pienen siirtojännitteen vuoksi. [13, s. 97–99.]

Kuvassa 15 a) on esitetty kuormitetun johdon yksivaiheinen sijaiskytkentä. Kokonaisvirta  $I$  saa kolmivaiheisen johdon pitkittäisresistanssissa  $R$  aikaan pätötehohäviön  $P_h$ , joka voidaan laskea kaavalla 7.

$$P_h = 3 \cdot I^2 R \quad (7)$$

Johdon resistanssiin vaikuttavat johtimen poikkipinta-ala, pituus, käytetyn johtimen materiaali sekä johtimen lämpötila. Vaihtosähköllä johdon resistanssiin vaikuttavat myös virranahtautuminen, josta kerrotaan tarkemmin alaluvussa 5.3 sekä läheisyysvaikutus. Läheisyysvaikutus johtuu siitä, että toistensa läheisyydessä olevissa johtimissa syntyvät magneettikentät vaikuttavat toistensa virrantiheyteen niin, ettei se ole tasainen johtimen poikkipinnalla. [13, s. 100; 14, s. 33–34.]

Kokonaisvirta  $I$  saa myös kolmivaiheisen johdon pitkittäisreaktanssissa  $X$  loistehohäviön  $Q_h$ , jonka voi laskea kaavalla 8 [13, s. 100; 14, s. 33–34].

$$Q_h = 3 \cdot I^2 X \quad (8)$$

Johdon pitkittäisreaktanssi voidaan laskea johdossa kulkevan sähköön kulmataajuuden  $\omega$  ja kaapelin induktanssin  $L$  avulla kaavaa 9 käyttäen [13, s. 97–99].

$$X = \omega L = 2\pi f L \quad (9)$$

Kaavasta voidaan huomata, että taajuuden kasvaessa myös johdon pitkittäisreaktanssi kasvaa.

Johdon poikittaiskapasitanssi tuottaa myös kapasitiivista loistehoa, joka voidaan laskea, joko vaihejännitteen  $U_v$  tai pääjännitteen  $U$ , sekä johdon susceptanssin  $B$  avulla. Tuotettu loisteho  $Q_c$  voidaan laskea kaavalla 10. [14, s. 34.]

$$Q_c = 3 \cdot BU_v^2 = BU^2 \quad (10)$$

Johdon susceptanssi  $B$  voidaan johtaa kaavalla 11 käyttäen johdon maakapasitanssia  $C$  sekä johdossa kulkevan sähköön kulmataajuutta  $\omega$  [13, s. 97–99].

$$B = \omega C = 2\pi f C \quad (11)$$

Kun jänniteaalto kulkee johtavaa materiaalia pitkin ja saapuu kohtaan, jossa impedanssi muuttuu, tapahtuu heijastuminen. Impedanssin epäjatkuvuuskohdasta heijastunut jänniteaalto  $u_r$  voidaan laskea kaavalla 12. [13, s. 97–99.]

$$u_r = u_1 \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (12)$$

$u_1$  on syötetty jännitepulssi  
 $Z_1$  on suhteellinen ominaisimpedanssi ennen epäjatkuvuuskohtaa  
 $Z_2$  on suhteellinen ominaisimpedanssi epäjatkuvuuskohdan jälkeen  
 [15, s. 225–226].

Tällainen impedanssin epäjatkuvuuskohta on myös liitos, jossa johto kytketään kuorman. Jos kuorman ja johdon impedanssit ovat samat ei heijastusta tapahdu. Jos impedanssien ero on korkea voi heijastuva aalto olla lähes yhtä iso, kuin lähetetty aalto. Heijastunut aalto voi summutua lähtevän aallon kanssa aiheuttaen ylijännitepiikkejä. Pahimmassa tapauksessa ylijännitepiikit aiheuttavat osittaispurkauksia, jotka voivat pahimmassa tapauksessa aiheuttaa valokaaren eristeen läpi. [16, s. 12–15.]

#### 4.5 Syöttökaapeleiden sähköisten häviöiden laskenta.

Prysmian Group:in AXMK-HF C-PRo alumiinisen poikkipinta-alaltaan 800 mm<sup>2</sup>:n pienjännitekaapelin vaihtovirtaresistanssiksi pituusyksikköä kohti on ilmoitettu 0,05 Ω/km johdinten lämpötilan ollessa 70 °C. Kaapelireitin pituus muuntajalta taajuusmuuttajalle on



noin 61 metriä. Kun yhden kaapelin pituus on 61 metriä ja kaapeleita on seitsemän rinnan jokaista vaihetta kohden, saadaan yhden vaiheen vaihtovirtaresistanssiksi.

$$R = \left(7 \cdot \frac{1}{0,05 \Omega/km}\right)^{-1} \cdot 0,061 km = 0,44 m\Omega.$$

Syöttökaapeloinnin pätötehohäviö saadaan selville, kun laskettu resistanssin ja nimellinen kuormitusvirta sijoitetaan kaavaan 8.

$$P_h = 3 \cdot (6300 A)^2 \cdot 0,44 m\Omega = 52,4 kW$$

Koska kolmivaihejärjestelmässä jokaisen vaiheen aiheuttamat magneettikentät vaikuttavat muihin järjestelmän kaapeleiden induktansseihin, joudutaan usein laskemaan kaapeleiden keskinäisinduktanssi kaavalla 13.

$$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \frac{a_{eq}}{r_{eq}} \quad (13)$$

$\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti  $4\pi \cdot 10^{-7}$

$\ln$  on luonnollinen logaritmi

$a_{eq}$  on vaihevälitaisyksien geometrinen keskiarvo.

$r_{eq}$  on vaihejohtimen ekvivalenttisäde [13, s. 110].

Vaihevälitaisyksien geometrinen keskiarvo voidaan laskea kaavalla 14.

$$a_{eq} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{23} \cdot a_{13}} \quad (14)$$

$a_{12}$  on vaiheen L1 ja L2 välinen etäisyys

$a_{23}$  on vaiheen L2 ja L3 välinen etäisyys

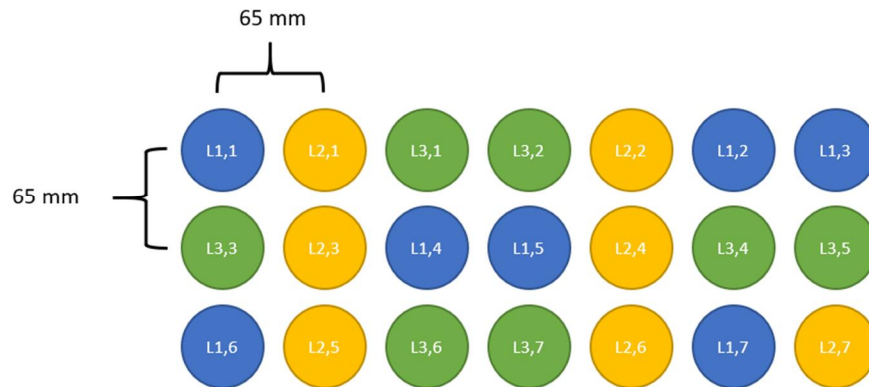
$a_{13}$  on vaiheen L1 ja L3 välinen etäisyys [13, s. 109].

Vaihejohtimien ekvivalenttisäde voidaan laskea kaavalla 15.

$$r_{eq} = e^{-1/4} \cdot r \quad (15)$$

$r$  on osajohdin säde [13, s. 104].

Koska kaapeleita tarvitaan seitsemän vaihetta kohden, tulee kaapeleiden sijoittelun näyttää kuvan 13 yksijohdin kaapeleiden sijoittelun mukaan tältä.



Sinisellä merkityt pallot esittävät vaiheen L1, keltaiset vaiheen L2 ja vihreät vaiheen L3 kaapeleita. 800 mm<sup>2</sup>:n poikkipinta-alaiselle kaapelille tarkoitetussa kiinnitysrimassa vierekkäisten kaapeleiden etäisyys toisistaan on noin 65 mm. Oletetaan myös, että päällekkäin olevien kaapeleiden etäisyys on sama kuin vierekkäin olevilla kaapeleilla. Näiden välietäisyyksien ja ylhäällä näkyvän sijoittelun avulla syntyvät vaihevälietäisyyksien keskiarvot ovat vaiheiden L1 ja L2 välillä noin 156,18 mm, vaiheiden L2 ja L3 välillä noin 144,36 mm ja vaiheiden L1 ja L3 välillä noin 153,62 mm.

Kun vaihevälietäisyydet ovat selvillä, voidaan vaihevälietäisyyksien geometrinen keskiarvo laskea kaavalla 14.

$$a_{eq} = \sqrt[3]{156,18 \text{ mm} \cdot 144,36 \text{ mm} \cdot 153,62 \text{ mm}} = 151,30 \text{ mm}$$

Vaihejohtimien ekvivalenttisäteen laskemiseksi on tiedettävä tarkasteltavan kaapelin säde sekä jokaisen vaiheen kaapeleiden etäisyydet saman vaiheen muista kaapeleista. Vaiheen L1 kaapeleiden etäisyyksien keskiarvo toisistaan on noin 192,52 mm. Vaiheen L2 kaapeleilla etäisyys on noin 160,36 mm ja vaiheen L3 kaapeleilla etäisyys on noin 163,36 mm. Tarkasteltavan kaapelin johtimen säteeksi on ilmoitettu 17 mm. Sijoittamalla nämä tiedot kaavaan 15 saadaan vaiheiden ekvivalenttisiksi säteiksi

$$r_{eqL1} = \sqrt[7]{e^{-1/4} \cdot 17 \text{ mm} \cdot (192,52 \text{ mm} \cdot 6)} = 3,96 \text{ mm}$$

$$r_{eqL2} = \sqrt[7]{e^{-1/4} \cdot 17 \text{ mm} \cdot (160,36 \text{ mm} \cdot 6)} = 3,86 \text{ mm}$$

$$r_{eqL3} = \sqrt[7]{e^{-1/4} \cdot 17 \text{ mm} \cdot (163,36 \text{ mm} \cdot 6)} = 3,87 \text{ mm}.$$

Tällöin vaiheiden ekvivalenttisten säteiden keskiarvoksi saadaan

$$r_{eq} = \sqrt[3]{3,96 \text{ mm} \cdot 3,86 \text{ mm} \cdot 3,87 \text{ mm}} = 3,90 \text{ mm}.$$

Kun vaiheiden ekvivalenttisen säteiden keskiarvo ja vaiheväliden geometrinen keskiarvo tiedetään, voidaan kaapeleiden keskinäisinduktanssi laskea kaavalla 13.

$$L_1 = L_2 = L_3 = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot \ln \frac{151,3 \text{ mm}}{3,9 \text{ mm}} = 0,7 \mu\text{H}/\text{km}$$

Lasketulla keskinäisinduktanssilla yhden vaiheen reaktanssi on taajuuden ollessa 50 Hz on kaavan 9 mukaan.

$$X_L = 2\pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,7 \frac{\mu\text{H}}{\text{km}} = 0,2 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

Tällöin syöttömuuntajan ja taajuusmuuttajan välisellä matkalla, kaapeleista syntyvä reaktanssi on

$$X_L = 0,2 \frac{\text{m}\Omega}{\text{km}} \cdot 0,061 \text{ km} = 0,012 \text{ m}\Omega.$$

Lasketun reaktanssin ja nimellisen kuormitusvirran avulla, syöttökaapeloinnissa aiheutuvan loistehohäviön suuruudeksi saadaan kaavan 8 mukaan.

$$Q_h = 3 \cdot (6300 \text{ A})^2 \cdot 0,012 \text{ m}\Omega = 1,4 \text{ kVar}$$

Koska suljetulla virtakiskolla tehtävä matka on vain kaksi metriä pitkä ja virtakiskon materiaali on kuparia, voidaan siinä aiheutuva pätö- ja loistehohäviö jättää huomioimatta niiden vähäisyyden vuoksi. Ongelmaksi voi kuitenkin muodostua kaapeleiden ja virtakiskon välillä tehtävästä liitoksesta aiheutuva ominaisimpedanssien ero.

Syöttökaapeloinnin impedanssi vaihetta kohden seitsemän kaapelin ollessa rinnan saadaan lasketun vaihtovirtaresistanssin ja reaktanssin avulla näin.

$$Z_1 = \sqrt{\left(\left(7 \cdot \frac{1}{0,05 \Omega/km}\right)^{-1}\right)^2 + (0,2 \text{ m}\Omega/km)^2} = 0,007 \Omega/km$$

Kuparisen Hercules virtakisko, jonka nimellisvirta on 6300 A, impedanssiksi on ilmoitettu 0,015  $\Omega/km$  kiskon lämpötilan ollessa 40 °C. Näiden impedanssien ja kaavan 12 avulla voidaan laskea epäjatkuvuuskohdasta heijastuvan jänniteaallon suuruus syötettyyn jänniteaaltoon verrattuna.

$$u_r = 1 \cdot \frac{0,015 \frac{\Omega}{km} - 0,007 \frac{\Omega}{km}}{0,007 \frac{\Omega}{km} + 0,015 \frac{\Omega}{km}} = -0,36$$

Tuloksesta voidaan nähdä, että liitoskohtaan tuleva jänniteaalto heijastuu takaisin 0,36 kertaisena. Tämä voi kohdatessaan aiheuttaa jännitepiikkejä kohdatessaan vastaan tulevia jänniteaaltoja, mutta piikit tuskin ovat niin isoja, että niistä aiheutuisi vakavia ongelmia.

#### 4.6 Sähkömagneettinen yhteensopivuus

Sähkömagneettisilla häiriöillä tarkoitetaan kaikkia sähkömagneettisia ilmiöitä, joita ei ole tarkoitettu hyötykäyttöön. Sähkömagneettiset häiriöt leviävät laitteiden välillä joko niiden kaapelointia pitkin tai säteilemällä. [17.]

Todennäköisiä sähkömagneettisen häiriön lähteitä ovat

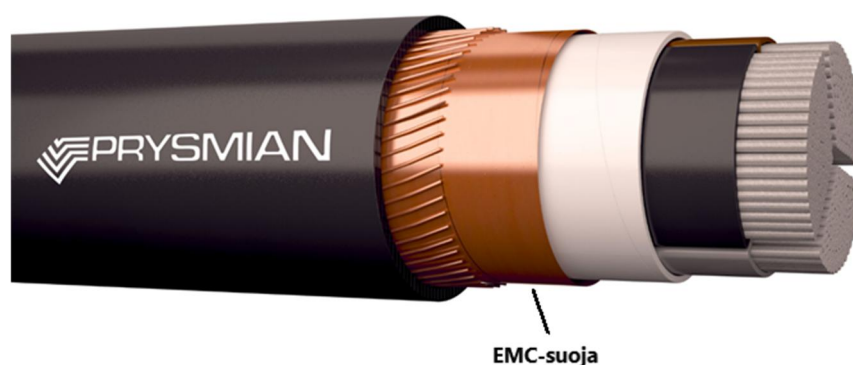
- induktiivisten kuormien kytkinlaitteet
- sähkömoottorit
- loistelamppuvalaisimet
- hitsauskoneet
- tietokoneet
- tasasuuntaajat

- hakkurilaitteet
- taajuusmuuttajat
- hissit
- muuntajat
- keskukset
- jakelukiskot.

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden vaatimuksia määrää EMC-direktiivi, joka koskee kaikkia sähkölaitteita ja laitteistoja, jotka voivat aiheuttaa sähkömagneettisia häiriöitä tai joiden toimintaan sähkömagneettiset häiriöt vaikuttavat. [17.]

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2014/30/EU 3 artikla määrittelee, että ”sähkömagneettisella yhteensopivuudella” tarkoitetaan laitteiston kykyä toimia tyydyttävästi sähkömagneettisessa ympäristössään aiheuttamatta kohtuuttomia sähkömagneettisia häiriöitä muulle samassa ympäristössä olevalle laitteistolle”. [18, s. 6.]

Kaapelointia suunniteltaessa on kiinnitettävä huomiota sähkömagneettisiin häiriöihin, joita käytön kaapeloinnista voi aiheutua kaapelireitin lähellä sijaitseville laitteille. Voimakaapeleista aiheutuvat sähkömagneettiset häiriöt ovat olemattomia eristämättömiin avojohdoin verrattuna. Voimakaapeleiden eristys on itsessään jo suoja häiriöitä vastaan mutta osassa nykypäivän markkinoilla olevista voimakaapeleista on erillinen EMC-suoja, joka vähentää virrasta aiheutuvia sähkömagneettisia häiriöitä. Kuvassa 16 ja 17 on esitetty kaksi Prysmian Groupin tuotevalikoimassa olevaa 1 kV:n voimakaapelia. [4, s. 304.]



Kuva 16. AXCCMK-HF C-PRo [19.]



Kuva 17. AXCMK-HF C-PRo [20.]

Kuvassa 16 olevaan kaapeliin on asennettu ylimääräinen kuparikerros, joka toimii EMC-suojaa lisäävän komponenttina [20].

## 5 Vetokonetta ohjaava taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajat jaetaan kahteen pääryhmään: epäsuoriin ja suoriin taajuusmuuttajiin. Epäsuorat taajuusmuuttajat muuttavat sinimuotoisen vaihtosähkön tasasähköksi ja sen jälkeen taas vaihtosähköksi. Suorissa taajuusmuuttajissa syötetty vaihtosähkö muutetaan suoraan puolijohdinkytkimillä pilkkomalla toisen taajuiseksi vaihtosähköksi. Tällainen suora taajuusmuuttaja on syklokonverterti, mutta siihen ei perehdytä tässä insinöörityössä. [21, s. 48.]

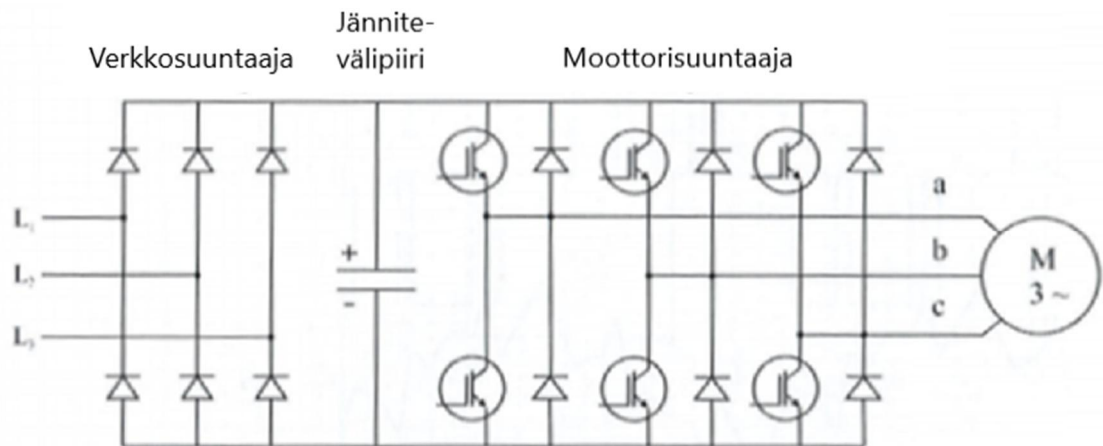
Tahtigeneraattoria pyörittävää oikosulkumoottoria ohjataan ACS880-taajuusmuuttajalla, joka on tarkoitettu pienjännitekäyttöön. ACS880 on kaksitasoinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttaja on esitetty kuvassa 18.



Kuva 18. Vetokonetta ohjaava ACS880 taajuusmuuttaja. Taajuusmuuttajaan kuuluvat modulit rajattu punaisella.

### 5.1 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Välipiirilliset taajuusmuuttajat koostuvat verkkosillasta, välipiiristä sekä moottorisillasta. Jännitevälipiirillisissä taajuusmuuttajissa toiminta perustuu vaiko-suuruisen tasajännitteen käyttöön välipiirissä. Kuvassa 19 on esitetty jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan peruskytkentä. [22, s. 91.]

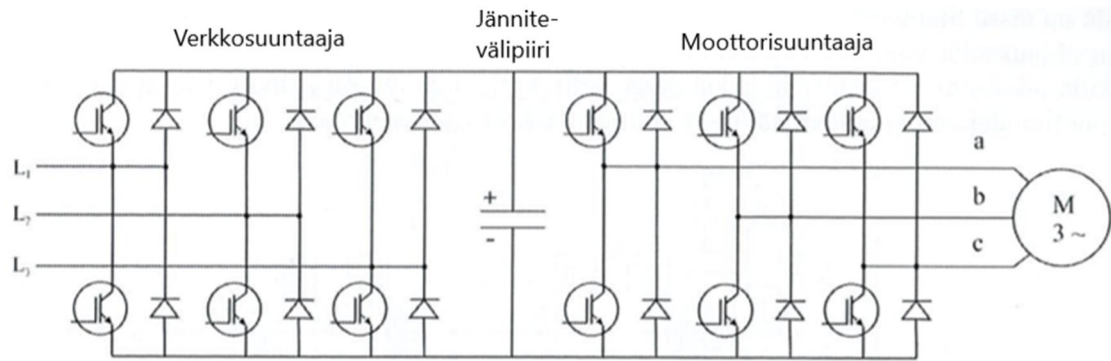


Kuva 19. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja, jonka verkkosuuntaaja on toteutettu diodisillan avulla. [22, s. 91]

Kuvan 19 taajuusmuuttajan verkkosuuntaajaan syötetty kolmivaiheinen vaihtosähkö tasasuunnataan kuusipulssitasasuuntaajan avulla. Tasasuunnattu jännite pyritään tasoittamaan puhtaaksi tasajännitteeksi välipiiriin asennetun kondensaattorin avulla. Taajuusmuuttajan moottorisuuntaaja koostuu kuudesta IGBT-transistorista ja niiden rinnalle kytketyistä nolladiodeista, jotka muodostavat yhdessä kuusi puolijohdekatkojaa. Näiden puolijohdekatkojien avulla välipiirin jännite kytketään moottorin liittimiin, joko välipiirin --navasta tai +-navasta. [22, s. 92.]

Diodeista valmistettu verkkosuuntaaja aiheuttaa verkkoon virran yliharmonisia komponentteja, jotka aiheuttavat verkon impedansseissa jännitehäviöitä. Nämä impedanssien jännitehäviöt aiheuttavat jännitteen säröytymistä. Kyseisellä tasasuuntaajalla ei ole myöskään mahdollista syöttää välipiiristä jännitettä takaisin syöttävään sähköverkkoon. Esimerkiksi moottorin jarrutusilanteessa välipiirin jännite nousee. Tällöin välipiiristä on ohjattava virtaa joko välipiiriin kytkettyyn jarrutusvastukseen tai takaisin syöttävään verkkoon. Jotta virran syöttäminen takaisin verkkoon onnistuisi, on taajuusmuuttaja toteutettava kuvassa 20 esitetyn verkkovaihtosuuntaajan avulla. [22, s. 92–93.]



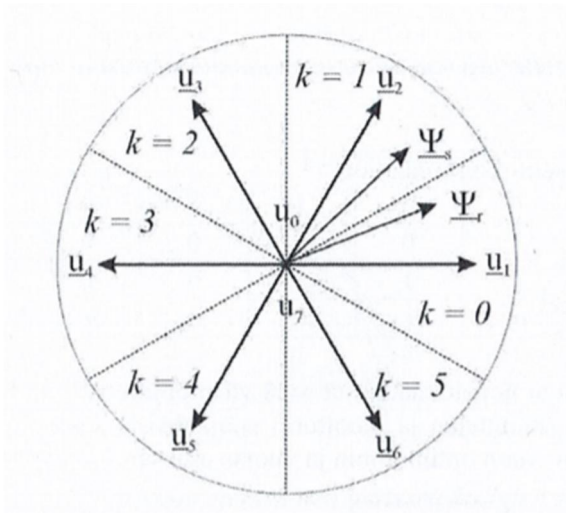


Kuva 20. Taajuusmuuttaja, jonka verkkosuuntaaja on toteutettu IGBT-transistoreilla. [22, s. 93.]

Kuvassa 20 esitetty verkkosuuntaaja voidaan toteuttaa myös tyristorien avulla. Käyttämällä ohjattuja puolijohdekytkimiä verkkosuuntaajassa, voidaan verkon yliaaltorasitusta vähentää diodisiltaan verrattuna. Ohjatut puolijohdekytkimet mahdollistavat myös sen, että välipiirin jännitettä voidaan laskea ja nostaa syöttävästä verkosta riippumatta. [22, s. 76.]

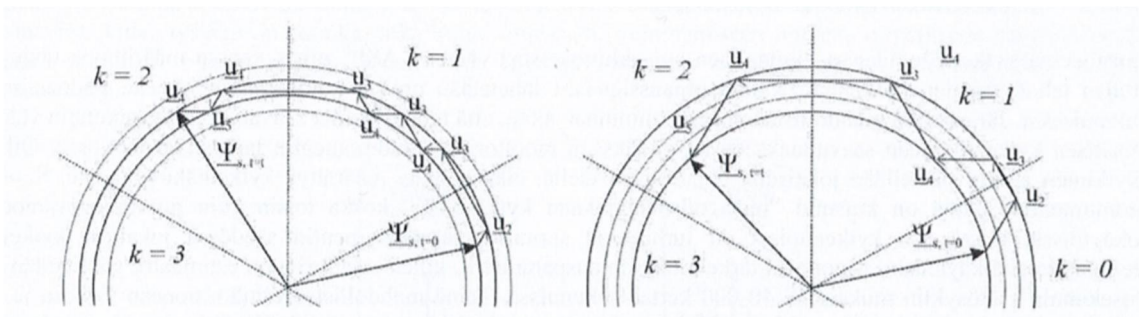
Taajuusmuuttajassa käytetään ABB:n kehittämää suoraa vääntömomentin säätöä, joka tunnetaan paremmin sen englannin kielisestä lyhenteestä DTC (Direct Torque Control). DTC:ssä vääntömomenttia ohjataan suoraan sähkökoneen käämivuota säätämällä. [23, s. 88.]

DTC-säädön verkkosuuntaajan kytkinohjeet muodostetaan käämivuon ja vääntömomentin hystereesissäätöjen sekä staattorivuon arvioidun sijainnin perusteella. Kaksitasoisessa taajuusmuuttajassa vaihtosuuntaajan kytkimillä voidaan muodostaa kahdeksan erilaista jännitevektoria, joista kuusi ovat erisuuntaisia ja itseisarvoiltaan samansuuruisia. Nämä vektorit on nimetty välille  $\underline{u}_1 - \underline{u}_6$ . Jäljelle jäävät kaksi vektoria  $\underline{u}_0$  ja  $\underline{u}_7$  ovat nollavektoreita. Jännitevektorit sijoitetaan vuoympyrään kuvassa 21 esitetyllä tavalla. [23, s. 90.]



Kuva 21. Vuoympyrä, johon jännitevektorit  $\underline{u}_0 - \underline{u}_7$  ovat sijoitettu. Kuvassa  $\underline{\Psi}_s$  on staattorin käämivuovektori ja  $\underline{\Psi}_r$  on roottorin käämivuovektori. [23, s. 91.]

Taajuusmuuttaja vertailee arvioitua vääntömomenttia ja staattorikäämivuota. Näiden vertailutulosten perusteella ohjataan staattorikäämivuovektorin suuntaa käyttämällä jännitevektoreita. Staattorin käämivuovektorin suuruus vaihtelee hystereesirajojen sisällä, jotka on esitetty kuvassa 22. [23, s. 90.]



Kuva 22. Staattorikäämivuovektorin eteneminen hystereesirajojen sisällä. [23, s. 93.]

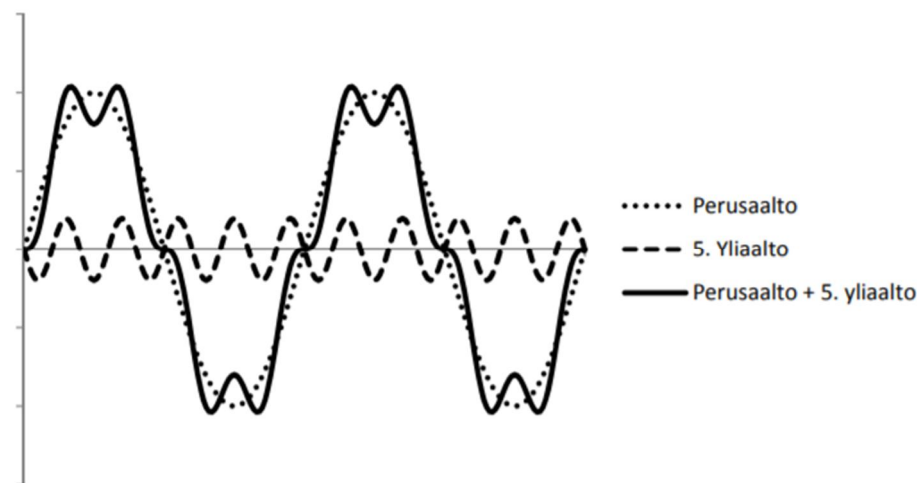
Kuvassa 22 on esitetty, miten jännitevektoreilla ohjataan staattorivuovektorin suuruutta ja suuntaa hystereesirajojen sisällä. Kuvan vasemmalla esitetyt hystereesirajat ovat tiukemmat kuvan oikealla esitettyihin hystereesirajoihin verrattuna. Tiukemmat hystereesirajat tarkoittavat enemmän kytkentöjä moottorisuuntaajan puolijohdinkytkimille, mikä taas kasvattaa puolijohdekytkimien lämpöhäviöitä. Tiukemmilla rajoilla saadaan myös tasaisempi vääntömomentin säätö. [23, s. 92.]

## 5.2 Taajuusmuuttajasta aiheutuvat häiriöt syöttöverkkoon

Yliaallot ovat virran ja jännitteen perustaajuutta korkeampia taajuuskomponentteja. Yliaallot voidaan jakaa harmonisiin ja epäharmonisiin yliaaltoihin.

Harmoniset yliaallot ovat perustaajuuden kokonaisluvun kerrannaisia, jonka järjestysluku  $n$  kertoo, kuinka mones harmoninen yliaalto on kyseessä. Esimerkiksi 50 Hz:n perustaajuuden järjestysluku  $n = 1$ , 100 Hz:n järjestysluku  $n = 2$ , ja 150 Hz:n järjestysluku  $n = 3$ .

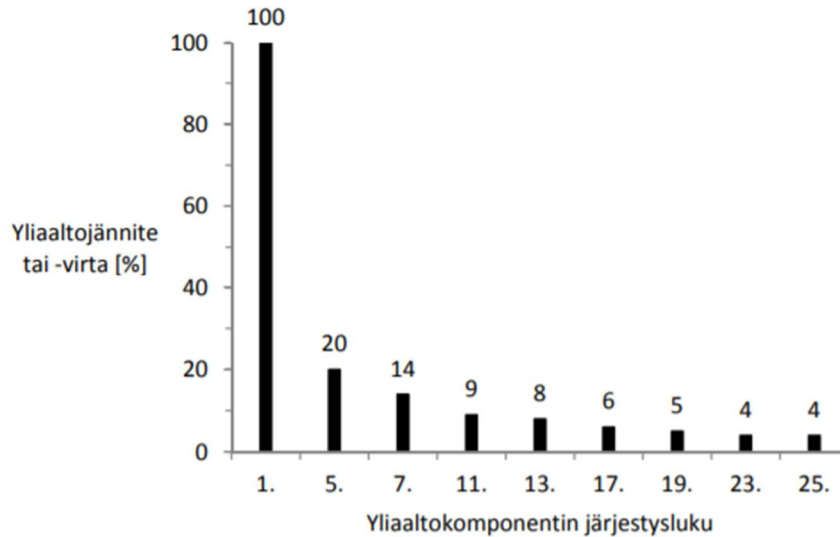
Epäharmonisiksi yliaalloiksi kutsutaan niitä yliaaltoja, joiden taajuudet sijaitsevat kokonaiskerrannaisten välissä. Näiden yliaaltojen vaikutus on huomattavasti pienempi harmonisiin yliaaltoihin verrattuna. Kuvasta 23 nähdään kuinka yliaaltotaajuus vaikuttaa summatuessaan verkon perustaajuuteen. [24, s. 7.]



Kuva 23. Yliaallon ja verkon perustaajuuden summautuminen. [24, s. 7.]

Suuntaajien puolijohdinkytkimet aiheuttavat verkkoon yliaaltovirtoja, jotka aiheuttavat taajuuttaan vastaavia jännitehäviöitä ts. yliaaltojännitteitä verkon impedansseissa. Nämä yliaaltojännitteet muovaavat myös verkon syöttöjännitteestä epäsinimuotoista, joka näkyy verkossa jännitesärönä. [2, s. 426–427; 14, s. 254–255.]

Vaihtojännitteen ja vaihtovirran eri taajuuskomponentit ja niiden voimakkuudet voidaan esittää taajuusspektrin avulla. Kuvassa 24 on esitetty teoreettisen 6-pulssisen tasasuuntaajan virran taajuusspektri. [24, s. 8.]



Kuva 24. 6-pulssisen tasasuuntaajan taajuusspektri [24, s. 8.]

Yliaaltojen komponenttiluokitus kertoo kunkin harmonisen yliaallon vaiheosoittimien pyörimissuunnan kolmivaihejärjestelmässä perustaajuuteen nähden, ja sen avulla voidaan selvittää, onko kyseinen taajuuskomponentti positiivinen, negatiivinen vai nolla. Taulukosta 4 nähdään komponenttiluokittelun 9. yliaaltoon asti. [24, s. 8.]

Taulukko 4. Yliaaltojen eri taajuuksien komponenttiluokittelut. [24, s. 8.]

Järjestysnumero	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
Taajuus [Hz]	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komponenttiluokka	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Yliaallot aiheuttavat myös muita eri haittoja sähköverkkoon, kuten

- lisähäviöitä verkkokomponenteissa
- virhetoimintoja suoja- ja mittalaitteissa
- häiriöitä ja vaurioita ATK- ja automaatiojärjestelmissä
- häiriöitä televerkossa [25, s. 6–7].

### 5.3 Taajuusmuuttajalla tuotetusta sähköstä aiheutuvat rasiutukset kaapelille

Kaapelit voivat ylikuumeta harmonisista yliaaltovirroista aiheutuvien resonanssivirtojen takia, mutta yliaaltovirrat aiheuttavat myös jänniterasitusta kaapelien eristykselle. Jänniterasitus alentaa kaapeleiden käyttöikää ja voi myös joissain tapauksissa johtaa kaapelin vioittumiseen. [26, s. 44.]

Kaapelin oman impedanssin lisäksi verkon virran käyttäytyminen aiheuttaa muutoksia kaapelin impedanssissa, minkä seurauksena syntyy virranahtautumista. Virranahtautuminen on ilmiö, jossa kaapelissa kulkeva vaihtovirta aiheuttaa virtaa vastustavan magneettikentän. Tämän magneettikentän vaikutuksesta impedanssi nousee kaapelin keskellä, minkä seurauksena virran tiheys suurenee kaapelin reunoilla. Tämä kasvattaa johtimen resistanssia, joka taas kasvattaa kaapelin lämpöhäviöitä. [26, s. 45.]

Alue, jolla virta kulkee, pienenee taajuuden noustessa, joten korkeampia taajuuksia omaavat yliaaltovirrat, joita taajuusmuuttajasta aiheutuu, lisäävät virranahtautumista. Kuvassa 25 on esitetty kaapelissa kulkevan virran virrantiheys. Kuvassa on esitetty tummalla värillä ne kohdat, joissa virrantiheys on korkeimmillaan. [26, s. 45.]



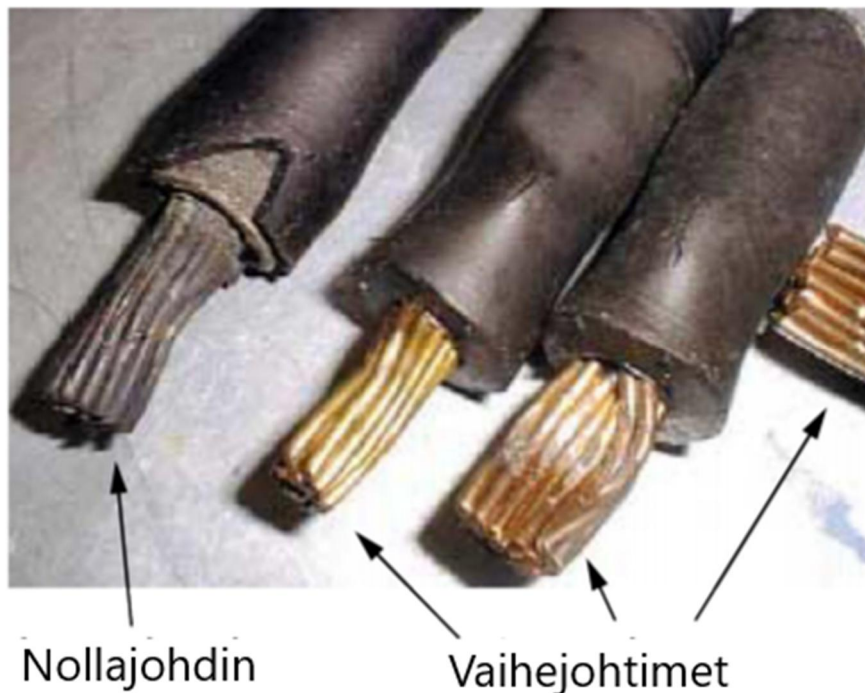
Kuva 25. Virrantiheyden esitys visuaalisesti. [26, s. 77.]

Kuvasta näkee, kuinka virrantiheys on korkeimmillaan johtimen pinnalla ja vaimenee eksponentiaalisesti mentäessä syvemmälle kohti kaapelin poikkileikkauksen keskipistettä. Virran tunkeutumissyvyys  $\delta$  voidaan laskea kaavalla 16.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (16)$$

f on johtimessa kulkevan virran taajuus  
 $\mu$  on johtimen permeabiliteetti  
 $\sigma$  on johtimen sähkönjohtavuus.

Kolmivaihejärjestelmän kaapelit mitoitetaan yleensä sillä periaatteella, että kaikkia vaiheita kuormitetaan saman verran, minkä vaikutuksesta symmetriset kuormat kumoavat toisensa, jolloin nollajohtimessa kulkeva virta pysyy lähes nollassa eikä vinokuormaa synny. Tästä syystä nollajohtimen halkaisija on pienempi kuin vaihejohtimien. Kolmannet harmoniset yliaallot ovat saman vaiheisia, joten ne summautuvat yhteen nollajohtimessa, mikä aiheuttaa nollajohtimen lämpenemistä. Nollajohtimen ylikuormituksesta aiheutuvan hapettumisen voidaan nähdä kuvasta 26. [26, s. 45.]



Kuva 26. Harmonisten yliaaltojen aiheuttama nollajohtimen kuormitus. [26, s. 72.]

#### 5.4 Taajuusmuuttajan lähtökaapeloinnin toteutus

Myös taajuusmuuttajan ja induktiomoottorin välisessä kaapeloinnissa harkittiin koteloidun virtakiskon käyttämistä. Korkean hinnan takia joudutaan taajuusmuuttajan lähtökaapelointi kuitenkin toteuttamaan alumiinisilla pienjännitekaapeleilla, joita käytetään myös taajuusmuuttajan syöttökaapeloinnissa.

Taajuusmuuttajan lähtöyksikkö on jaettu kahteen moduuliin, joista toinen on esitetty kuvassa 27. Moduulien kiskot on yhdistetty, joten kuvassa näkyvän moduulin vaihekiskot ovat samassa potentiaalissa viereisen moduulin vaihekiskojen kanssa.



Kuva 27. Taajuusmuuttajan lähtöyksikön toinen moduuli.

Koska lähdön kaapeleiden läpivientiaukot ovat riittävän tilavia ja lähtökiskot sekä lähtöyksikkö ovat riittävän suuria alumiinisten kaapeleiden kytkemistä varten, voidaan lähtökiskoihin kytkeä kaapelit, mikä ei ollut mahdollista taajuusmuuttajan syöttöpuolella.

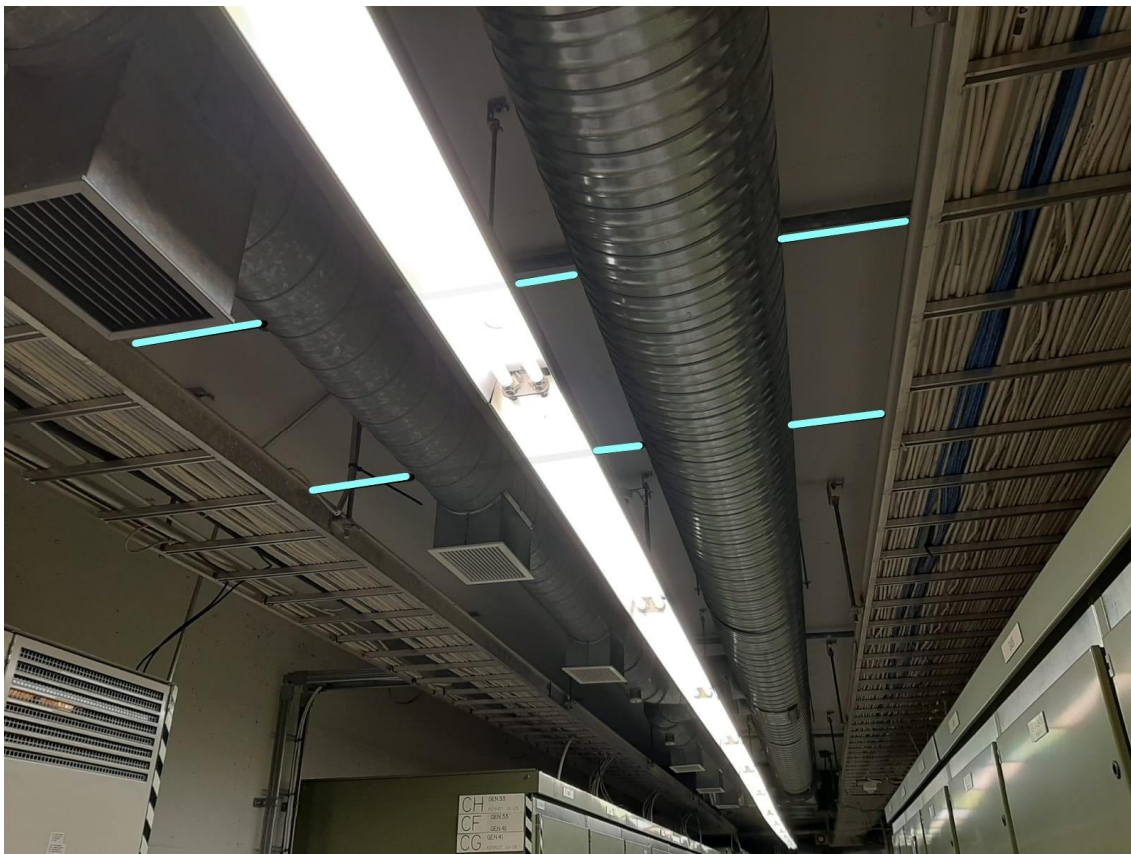
Kaapelit tuodaan ylös kattoon taajuusmuuttajan lähtöyksiköistä kuvan 28 mukaan, koska lähtöyksikössä kaapeleiden läpiviennit sijaitsevat moduuleissa ylhäällä. Kellarikerroksen katossa on myös vapaata tilaa kaapelireitille.



Kuva 28. Kaapeleiden nousu lähtöyksiköltä.

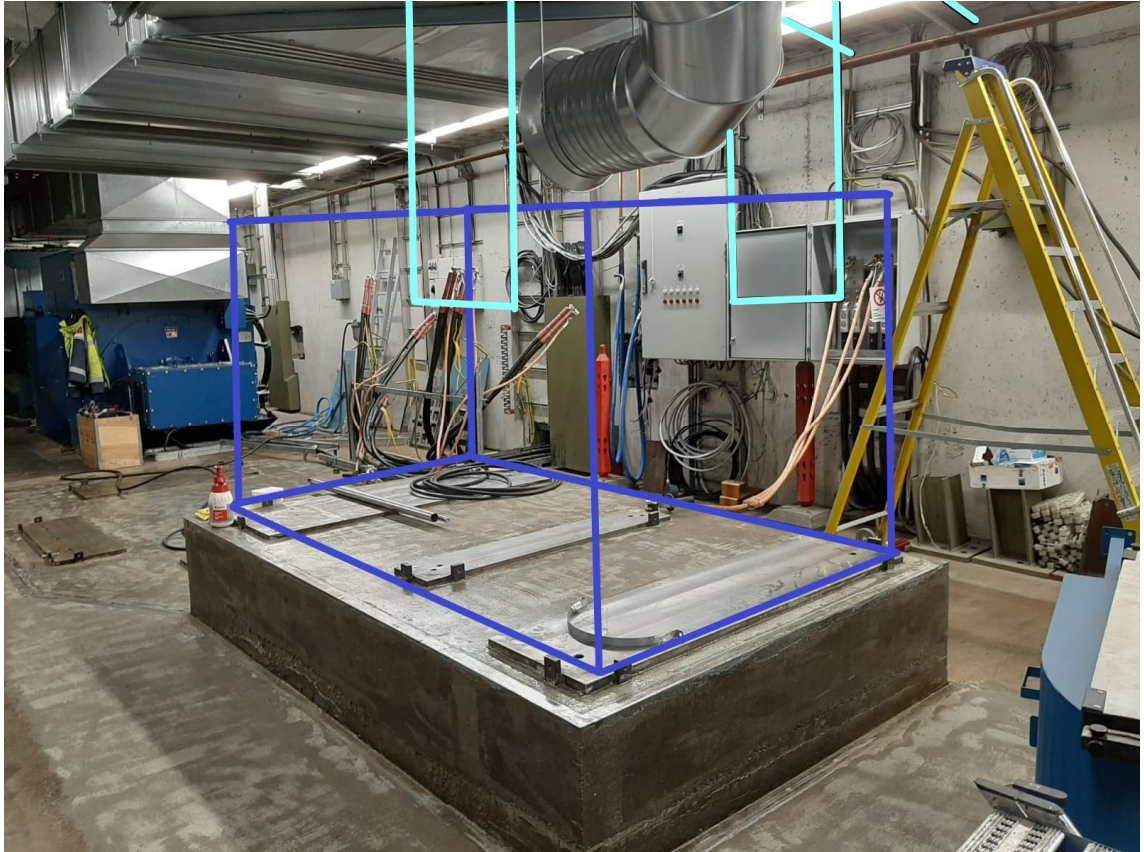
Kaapelit kulkevat kellarin katossa kennojen yli kuvassa 29 näkyvän käytävän toiselle puolelle.





Kuva 29. Vaaleansinisellä havainnoitu kaapelireitti kellarin katossa.

Kaapelit viedään kuvan 29 vasemman puoleisesta seinästä läpi tehtaan konesaliin, jossa osa tehtaan koestusgeneraattoreista sijaitsee. Kaapelit tuodaan alas kuvan 30 mukaisesti koestusgeneraattoria pyörittävälle induktiomoottorille.



Kuva 30. Kaapeleiden tulo sinisellä havainnollistetulle induktiomoottorille.

Koska induktiomoottorissa on kaksi käämistä, joiden käämien päät on jaettu kahteen kytkentäkoteloon, tuodaan kaapelit moottorin molemmille puolille.

### 5.5 Taajuusmuuttajan lähtökaapeloinnista aiheutuvat häviöt

Koska taajuusmuuttajan lähtöpuolen virta on suurimmillaan sama kuin taajuusmuuttajan syöttöpuolella, käytetään lähtöpuolella sama lukumäärä saman poikkipinta-alan omaavia kaapeleita kuin syöttöpuolella.

Moottorin syöttökaapeleiden pituudeksi tulee noin 17 metriä. Kyseisellä pituudella yhden vaiheen resistanssiksi tulee

$$R = \left(7 \cdot \frac{1}{0,05 \Omega/km}\right)^{-1} \cdot 0,017 km = 0,12 m\Omega.$$

Kyseisellä vaiheresistanssilla lähtökaapeloinnista aiheutuva pätötehohäviö on kaavan 7 mukaan.

$$P_h = 3 \cdot (6300 \text{ A})^2 \cdot 0,12 \text{ m}\Omega = 14,3 \text{ kW}$$

Lähtökaapeleista aiheutuva vaihereaktanssi on taas alaluvussa 4.5 lasketun keskinäisinduktanssin mukaan.

$$X_L = 0,2 \text{ m}\Omega/\text{km} \cdot 0,017 \text{ km} = 3,4 \mu\Omega$$

Kyseisestä vaihereaktanssista aiheutuva loistehohäviö on kaavan 8 mukaan.

$$Q_h = 3 \cdot (6300 \text{ A})^2 \cdot 3,4 \mu\Omega = 404,8 \text{ Var}$$

Koko kaapeloinnista aiheutuva pätö- ja loistehohäviö on taajuusmuuttajan lähtöpuolen ja alaluvussa 4.5 laskettujen syöttöpuolen häviöiden summa.

Kokonaispätötehohäviö on siis

$$P_{htot} = 14,3 \text{ kW} + 52,4 \text{ kW} = 66,7 \text{ kW}$$

ja kokonaisloistehohäviö

$$Q_{htot} = 1,4 \text{ kVar} + 404,8 \text{ Var} = 1,8 \text{ kVar}$$

## 5.6 Lähtökaapeleiden sijoitus ja niistä aiheutuvien haittojen ehkäisy

Taajuusmuuttajan ja moottorin välisten kaapeleiden sijoittelussa tulee noudattaa samoja menetelmiä, joita käytettiin taajuusmuuttajan syöttökaapeloinnissa. Koska kaapelointi toteutetaan yksijohdinjärjestelmänä, tulee kaapelit koteloida koko reitin matkalta ja maadoittaa taajuusmuuttajan sähkösuunnitteluohjeiden mukaan taajuusmuuttajan runkoon toisesta päästä ja induktiomoottorin runkoon toisesta. Näin voidaan vähentää tehokkaiden suuresta virrasta aiheutuvien häiriöiden välittyminen ympäristöön, moottorin eristykseen kohdistuvaa räsitusta sekä moottorin laakerivirtoja ja kulumista.

[6, s. 22–28; 12, s. 240.]

## 6 Vetokoneena toimiva induktiomoottori

Epätahtimoottori on eniten käytetty pyörivä sähkökone maailmassa sen yksinkertaisen, edullisen ja kestäväen rakenteen takia. Termin ”epätahti” saa moottori siitä, että sen roottorin pyörimisnopeus poikkeaa staattorikentän pyörimisnopeudesta. Tätä pyörimisnopeuksien eroa nimitetään jättämäksi. Suhteellinen jättämä lasketaan kaavalla 17.

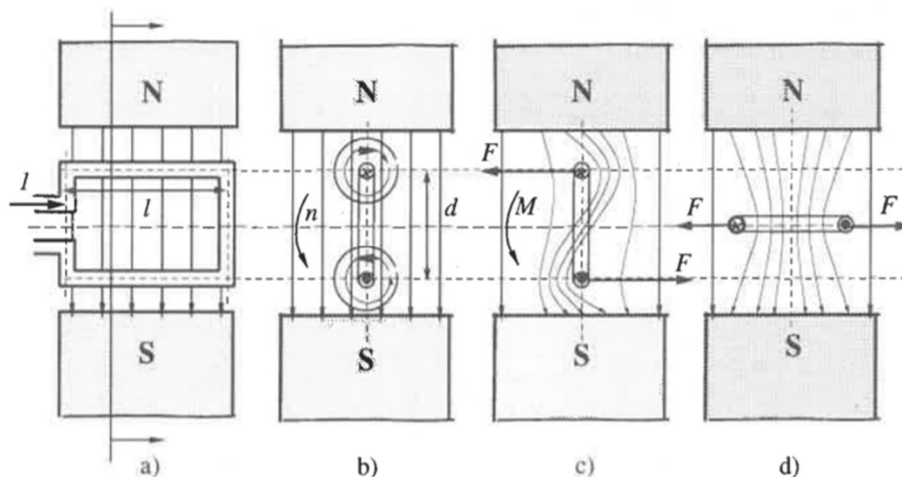
$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \cdot 100 \% \quad (17)$$

$n_s$  on staattorikentän pyörimisnopeus  
 $n$  on roottorin pyörimisnopeus [27, s. 60].

Pääpiirteittäin epätahtikoneen rakenne on hyvin yksinkertainen. Koneen aktiivisiin osiin voidaan luetella staattori ja roottori. Staattorin ja roottorin vuorovaikutuksen ansiosta, sähköenergia voidaan muuttaa mekaaniseksi energiaksi moottorikäytössä tai mekaaninen energia sähköenergiaksi generaattorikäytössä. Koneen passiivisiksi osiksi kutsutaan niitä osia, joiden tehtävänä on välittää mekaaninen energia ja sähköenergia epätahtikoneeseen tai siitä pois. [2, s. 199.]

Epätahtimoottorin toiminta perustuu staattorin magneettikentän sekä johdinsilmukan ympärille sen omasta virrasta aiheutuvan magneettikentän vuorovaikutukseen, josta syntävä voima pyrkii kääntämään johdinsilmukan tason vaakasuoraan asentoon staattorin

magneettikenttään nähden. Johdinsilmukalla kuvataan epätahtikoneen roottoria. Kuvassa 31 on havainnollistettu virrallisen johdinsilmukan staattorin magneettikentässä. [2, s. 139–141]

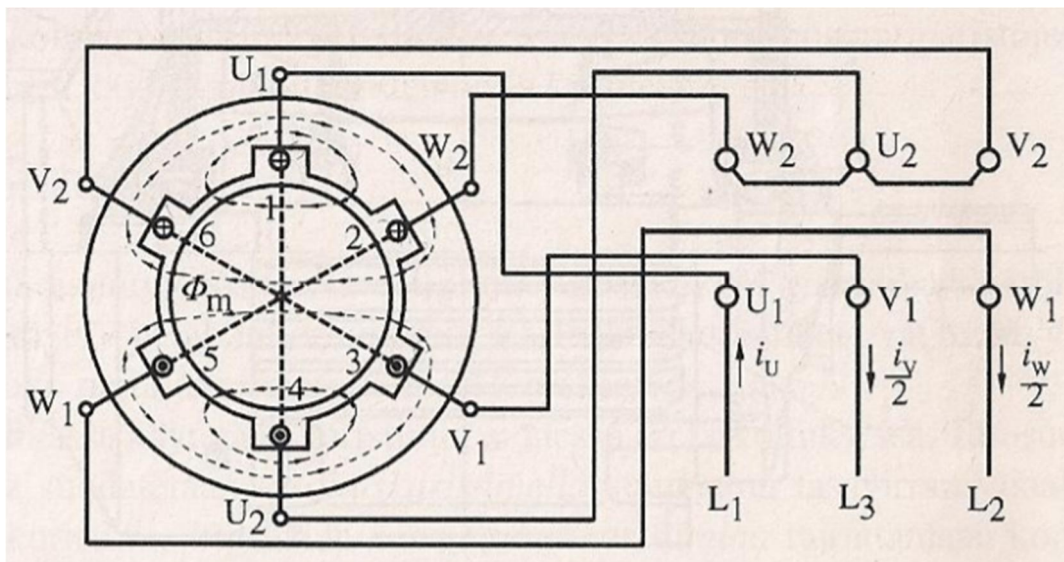


Kuva 31. Virrallinen johdinsilmukka magneettikentässä. [2, s. 141.]

Kuvan 31 kohdassa:

- Staattorin magneettikenttä sekä johdinsilmukka ja siinä kulkevan virran kulku-suunta kuvattuna sivultapäin.
- Staattorin sekä johdinsilmukan virran aiheuttama magneettikenttä.
- Magneettikenttien yhdistymisestä syntyvän resultoivan kentän voima vaikuttaa puolelta, joissa staattorin ja johdinsilmukan magneettiviivat ovat samansuuntaiset puolelle, jossa viivat ovat toisiaan vastaan. Johdinsilmukan ollessa pystyssä staattorin magneettikentän suuntaisesti, on vaikuttavan voiman vääntömomentti korkeimmillaan.
- Johdinsilmukka saavuttaa vaakatason staattorin magneettikenttään nähden, jolloin johdinsilmukkaan vaikuttava vääntömomentti on nolla. [2, s. 141.]

Epätahtikoneille on olennaista se, että staattorin sisälle saadaan aikaiseksi pyörivä magneettikenttä. Kolmivaiheisissa sähkömoottoreissa tämä onnistuu ilman lisälaitteita symmetrisen kolmivaihekäämityksen ja siinä kulkevan vaihtovirran avulla. [2, s. 120.]



Kuva 32. Kaksinapainen kolmivaihekäämitys. [2, s. 120]

Kuvassa 32 on yksinkertaistettu esitys kolmivaiheisen vaihtosähkökoneen staattorikäämityksestä ja sen synnyttämästä magneettikentästä. Kuvassa olevassa staattorissa on kuusi uraa eli kaksi jokaista vaihetta varten. Käämien loppupäät,  $U_2$ ,  $V_2$  ja  $W_2$  on kytketty kuvan mukaan tähteen ja kun käämin alkupäihin,  $U_1$ ,  $V_1$  ja  $W_1$  kytketään kolmivaiheinen jännite alkaa käämeissä kulkea symmetrinen virta, jonka vaikutuksesta staattorin sisälle syntyy kuvan mukainen magneettikenttä. Kuvan mukainen käämitys kehittää magneettikentän, jossa on vain yksi S-napa ja N-napa, joten sen napaluku on kaksi ja napapariluku on yksi. Tällaisen yksinapaparisen koneen magneettikenttä pyörähtää yhden jakson aikana kokonaisen kierroksen. [2, s. 165–167]

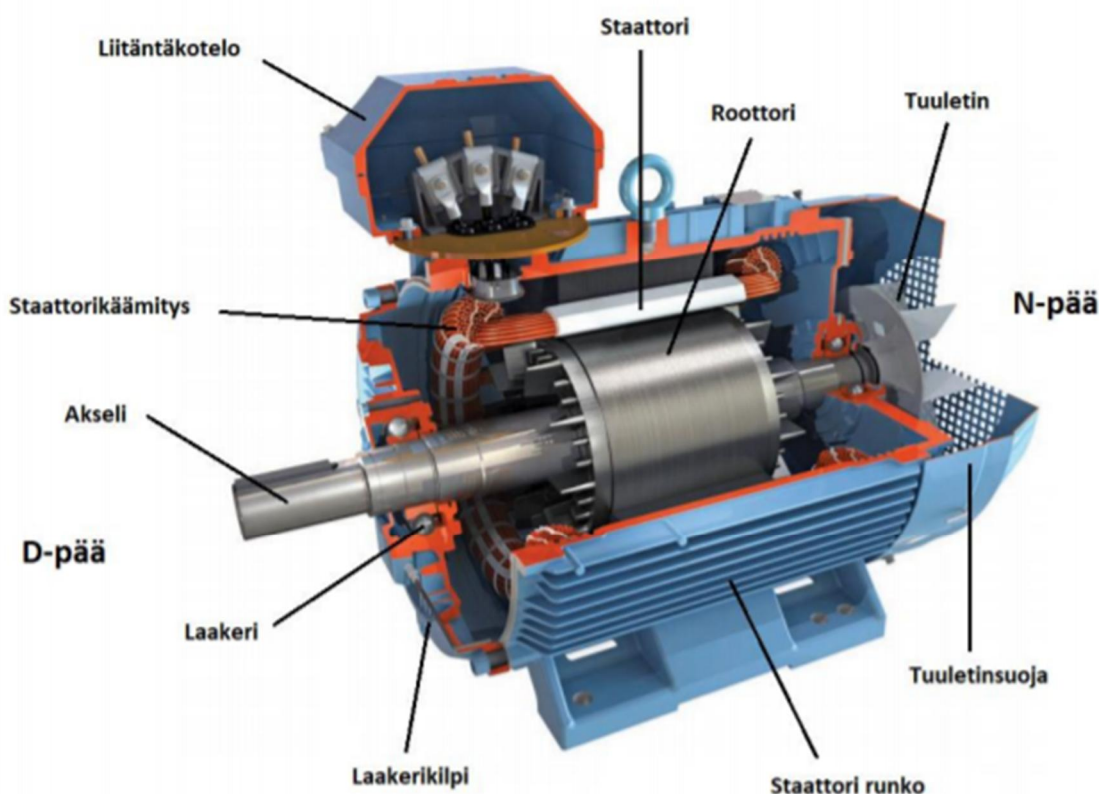
Kun tiedetään staattorin napaparien lukumäärä ja syöttävän verkon taajuus voidaan koneen tahtinopeusnopeus laskea kaavalla 18.

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ r/min} \quad (18)$$

f on syöttävän verkon taajuus  
p on vaihtosähkökoneen napapariluku.

Kaavasta voidaan päätellä, että mitä enemmän vaihtosähkökoneen staattorissa on magneettisia napoja, sitä pienempi on koneen pyörimisnopeus. Epätahtikoneiden roottorit käämitään samalle napaluvulle kuin staattorikäämitys. [2, s. 165–167.]

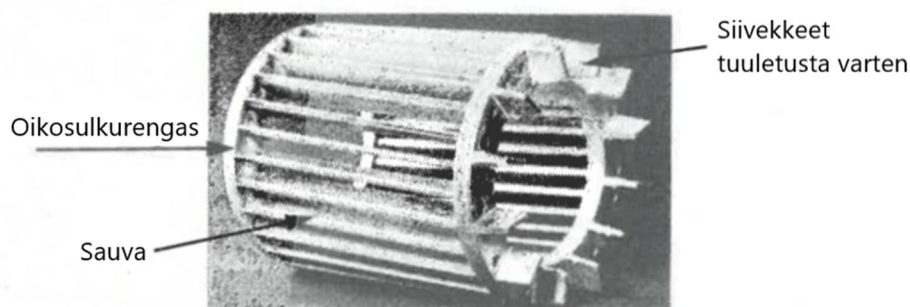
Epätahtimoottorit voidaan jakaa kahteen ryhmään: oikosulkumoottoreihin ja liukurengasmoottoreihin. Molempien moottorityyppien staattorit ovat samanlaisia mutta koneiden roottorit eroavat toisistaan. Tällä hetkellä ylivoimaisesti eniten käytetty epätahtimoottori on oikosulkumoottori, jonka rakennekuva on kuvassa 33. [2, s. 165–167.]



Kuva 33. ABB:n valurautarunkoinen pienjänniteoikosulkumoottori. [27, s. 13.]

Oikosulkumoottorin roottorin käämeihin ei voida syöttää virtaa ulkoisesti. Roottoriin virta saadaan aikaiseksi, kun staattoriin tahtinopeudella pyörivä magneettikenttä leikkaa roottorikäämitystä ilmavälin yli. Tämän seurauksena roottorikäämeihin indusoituu sähkömotorinen voima eli jännite. Indusoitunut jännite aiheuttaa virran oikosuljettuun roottorihäkkiin. [2, s. 165–167; 3, s. 20/24–20/25.]

Kuvassa 34 on esitetty oikosulkumoottorin roottorissa käytettävä käämitys, joka tunnetaan myös nimellä häkkikäämitys.



Kuva 34. Alumiinista valmistettu oikosulkuroottorin häkkikäämitys. [2, s. 166.]

Oikosulkuroottorin levysydämen urissa on joko alumiinista painevalumenetelmällä valemittat tai kuparista tehdyt sauvat, jotka ovat oikosuljettu roottorin molemmista päistä oikosulkurenkailla.

Koestusgeneraattorin vetokoneena käytetään ABB:n suunnittelemaa ja valmistamaa AMI 630L6W BAFTH pienjänniteoikosulkumoottoria, joka on esitetty kuvassa 35.





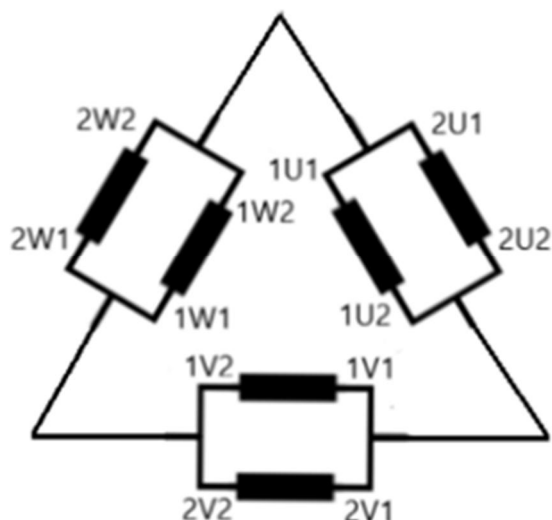
Kuva 35. Vetokoneena toimiva induktiomoottori.

Liitteessä 1 on induktiomoottorin tekniset tiedot sekä koneen rakenne- ja sähkökuva.

Moottori on suunniteltu taajuusmuuttajakäyttöön ja sähkömagneettisia häiriöitä vaimentavaksi kaapeleiden läpivientejä lukuun ottamatta. Moottorissa on F-luokan eristys, ja sen lämpenemäluokka on F. Tämä tarkoittaa sitä, että koneen suurin sallittu lämpenemä on 105 °C ympäristön lämpötilan ollessa 40 °C. Lämpenemä on se lämpötila, jonka veran staattorikämin lämpötila nousee vakiona pysyvään ympäristön lämpötilaan verrattuna, kun moottoria kuormitetaan sen nimellisteholla. Moottorin jäähdytystyyppi on IC 06, joka tarkoittaa sitä, että moottoria jäähdytetään sen ympärillä olevalla ilmalla, koneeseen erikseen liitetyllä puhallinmoottorilla, jota syötetään 50 Hz:n vakiosähköllä.

Moottori on 6-napainen, joten sen tahtinopeus on kaavan 22 mukaan 1000 rpm, kun konetta syöttävän vaihtosähkön taajuus on 50 Hz ja 1400 rpm, kun taajuus on 70 Hz. Moottorin nimellisteho on  $P_N = 6500 \text{ kW}$  ja nimellinen jännite  $U_N = 690 \text{ V}$  molemmilla nopeuksilla. Moottorin staattorissa sijaitsee kaksi identtistä staattorikäimitystä, jotka on

suunniteltu DD-kytkennälle, jolloin molempien staattoreiden vaihekäämit on kytketty rinnan ja nämä rinnakkaiskytkennät kolmioon kuvan 36 tavoin.

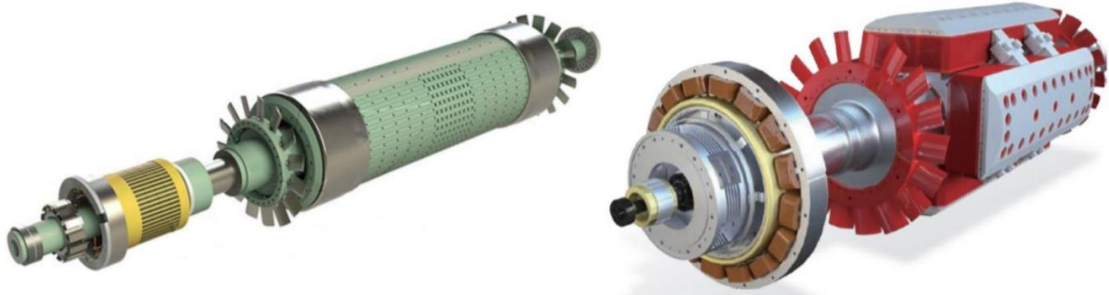


Kuva 36. DD-kytkentä.

DD-kytkennässä moottorin nimellinen virta on 50 Hz:n taajuudella  $I_N = 6287$  A, ja 70 Hz:n taajuudella  $I_N = 6430$  A. DD-kytkennän ansiosta yhden vaiheen virta jakaantuu molempien vaihekäämien kesken tasan, jolloin vaihekäämityksen läpi kulkeva virta on vain puolet nimellisestä virrasta. Toisin sanoen 50 Hz:n taajuudella yhden vaihekäämin läpi kulkeva virta on 3143,5 A ja 70 Hz:n taajuudella 3215 A.

## 7 Koestusgeneraattorina toimiva tahtigeneraattori

Tahtikone on pyörivä sähkökone, jonka roottori pyörii samalla nopeudella staattoriin syntyvän magneettikentän kanssa eli tahdissa. Tahtikoneiden staattorit ovat samanlaisia kuin epätahtikoneissa mutta koneiden roottorit eroavat toisistaan. Kuvassa 37 on esitetty avonapainen ja umpinapainen roottori.



Kuva 37. Tahtikoneen roottorit. Kuvan vasemmalla on umpinaparoottori ja oikealla avonaparoottori. [28, s. 22.]

Tahtikoneiden roottorit koostuvat navoista siksi niitä kutsutaankin usein napapyöriksi. Napapyöriä on kahdenlaisia: avo- ja umpinapaisia. Avonaparoottoreissa magnetointikäämi sijaitsee erillisillä navoilla, jotka ovat kiinnitetty akseliin. Avonapaisia roottoreita valmistetaan Suomessa ja niitä käytetään tahtikoneissa, joiden pyörimisnopeus on matala. Suuret pyörimisnopeudet altistavat navat suurelle keskipakoisvoimalle. Siksi nopeissa tahtikoneissa käytetään umpinaparoottoreita, joissa napakäämit on sijoitettu lieriön muotoisen roottorin pinnalla sijaitseviin uriin. [2, s. 215.]

Tahtikoneita voidaan käyttää epätahtikoneen tavoin sekä moottorina että generaattorina. Vaikka tahtimoottorit ja -generaattorit ovat rakenteeltaan samankaltaisia mutta niiden ulkoiset kytkennät eroavat toisistaan. Tahtikonetta käytetään voimakoneena silloin, kun koneiston tarvitsema teho on suuri ja työkonetta syöttävä sähköverkko on mitoituseltaan riittävän vahva. [2, s. 215–216.]

Tahtigeneraattori muuttaa voimakoneen mekaanisen tehon sähköiseksi tehoksi, jonka se syöttää sähköverkkoon. Kun tahtikoneen roottorikäämiin syötetään tasavirtaa ja roottoria pyöritetään staattorin sisällä, syntyy staattoriin sinimuotoinen lähdejännite kaavan 19 mukaan.

$$E_{mv} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f_k N \Phi_m \approx 4,44 \cdot f_k f N \Phi_m \quad (19)$$

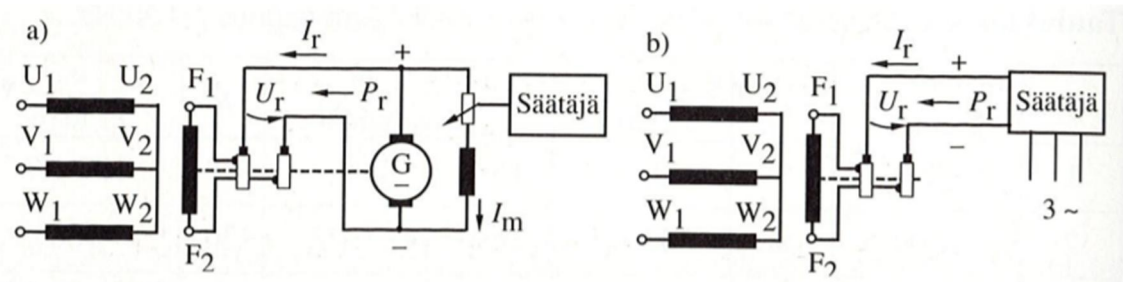
$f_k$  on käämityskerroin

$f$  on taajuus

$N$  on staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset

$\Phi_m$  on yhden magneettinavan päävuo [2, s. 215–216].

Tahtikoneet voidaan jakaa harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin niiden magneetoimis- menetelmien mukaan. Harjallisissa tahtikoneissa roottorin napakäämitykseen syötetään tasavirtaa hiiliharjojen ja akselilla sijaitsevien liukurenkaiden avulla. Harjattomissa ko- neissa roottorin magnetointi tapahtuu generaattorin omalle akselille sijoitetun magnetoin- tikoneen avulla. Koestusgeneraattorin magnetointi on toteutettu hiiliharjojen avulla. Ku- vassa 38 on esitetty harjallisen tahtikoneen roottorin magnetointi kahdella tavalla. [2, s. 217–218.]



Kuva 38. Harjallisen tahtikoneen magneetoimismenetelmät. Kuvassa a) on magnetointi tasasäh- kölähteestä ja b) on magnetointi vaihtosähkölähteestä. [2, s. 218.]

Molemmissa kuvan 48 tapauksissa roottorivirta  $I_r$  syötetään hiiliharjojen kautta pyörivään roottorikämiin  $F_1$ - $F_2$ . Staattoriin indusoituvan jännitteen suuruutta voidaan muuttaa sää- tämällä roottorivirtaa. [2, s. 217–218.]

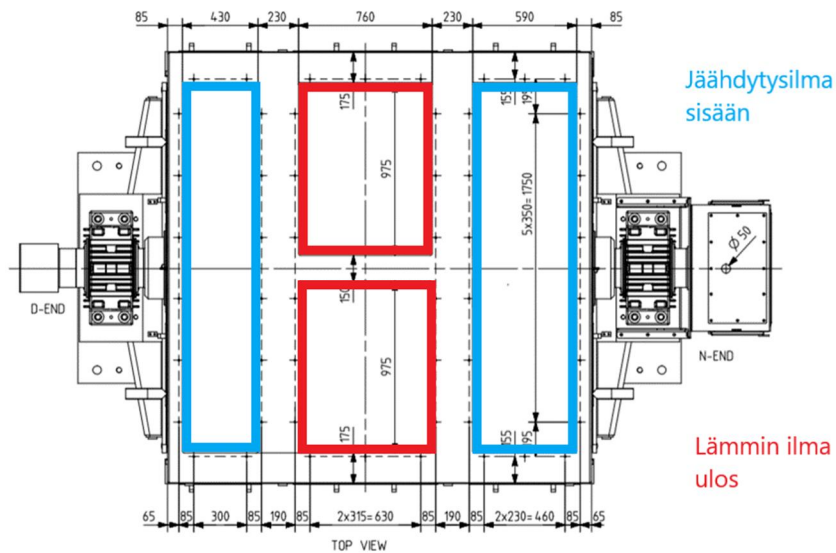
Käyttöön asennettava tahtigeneraattori on suunniteltu koestusgeneraattorikäyttöä var- ten. Generaattorin tyyppi on AMG 1120SR06 PSB, jonka nimellinen näennäisteho on  $S_N = 16691$  kVA. Koestusgeneraattori on esitetty kuvassa 39.

Liitteessä 2 on tahtigeneraattorin tekniset tiedot sekä rakenne- ja sähkökuva.



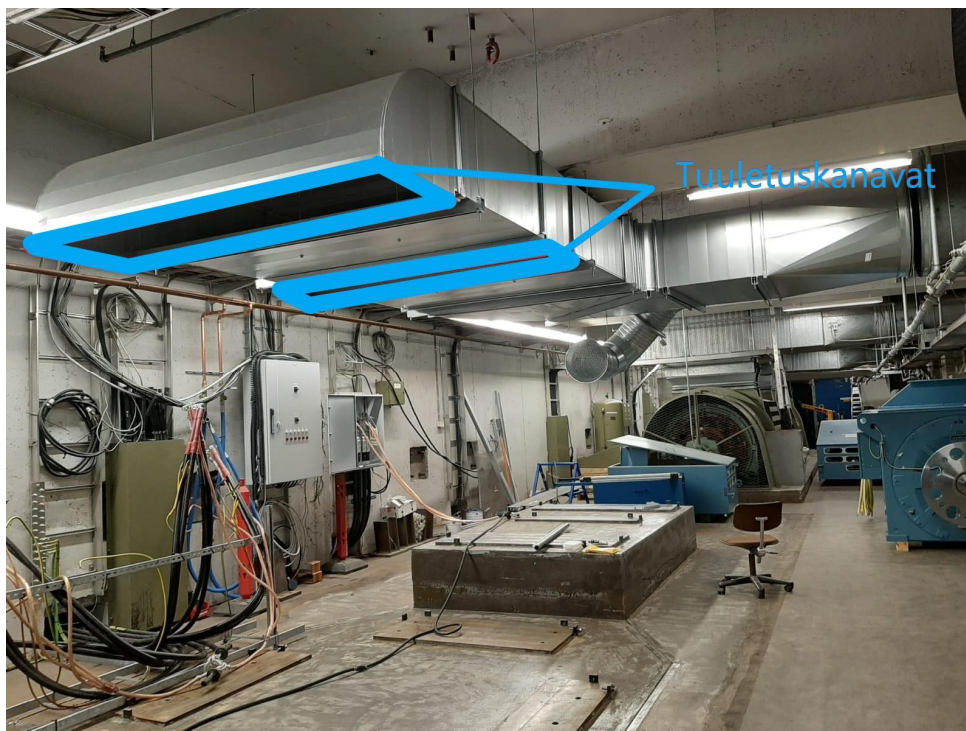
Kuva 39. Koestusgeneraattorina toimiva tahtigeneraattori.

Generaattori on suunniteltu lämpenemäluokan F mukaiseksi. Sen jäähdytystyyppi on myös sama IC 06 kuin vetokoneen. Generaattori jäähdytetään tuuletuskanavan ja erillisten puhallinmoottorien avulla koneen yläpuolella olevien aukkojen kautta. Jäähdytykseen tarkoitetut aukot ovat esitetty kuvassa 40.



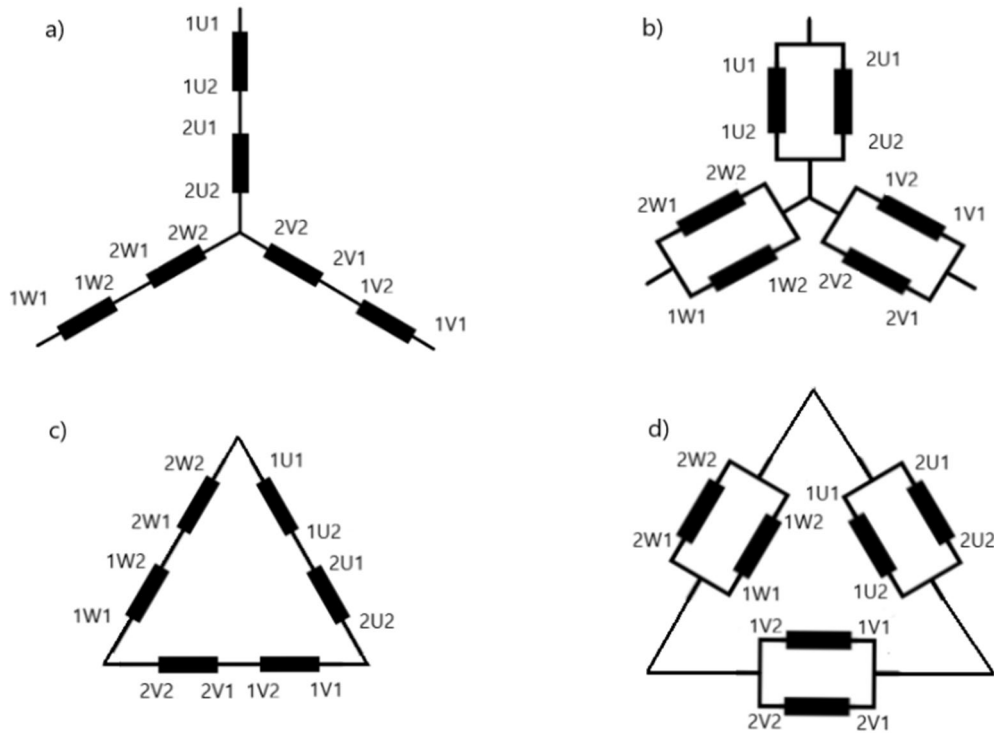
Kuva 40. Generaattorin ilman sisäänottoaukot ja ulostuloaukot.

Jäähdytysilma kulkee sisään yläpuolella olevista päätyaukoista ja ulos vapaasti ympäristöön keskellä sijaitsevasta aukosta. Generaattoriin liitettävä tuuletuskanavat on esitetty kuvassa 41.



Kuva 41. Generaattorin jäähdytykseen käytettävä kanavatuletin.

Generaattorin ja vetokoneen akselit on kytketty mekaanisesti toisiinsa ilman vaihdetta, jonka takia vetokoneen pyörimisnopeus määrää generaattorin syöttämän sähkön taajuuden. Generaattorin staattorissa on kaksi kolmivaihekäämitystä, joiden vaihe-ero on  $60^\circ$ . Staattoreiden käämien alku- ja loppupäät on tuotu samaan kytkentäkoteloon. Tämä mahdollistaa sen, että generaattorin tuottamaan jännitteeseen ja virtaan voidaan vaikuttaa käämien kytkentöjä muuttamalla. Mahdollisia kytkentöjä ovat Y, YY, D ja DD. Kytkennät on esitetty kuvassa 42.



Kuva 42. Koestusgeneraattorin käämien kytkentämahdollisuudet. Kuvassa a) on Y-kytkentä, b) on YY-kytkentä, c) on D-kytkentä ja d) on DD-kytkentä.

Kytkenän muuttuessa generaattorista saatavan jännitteen ja virran nimellisarvot muuttuvat taulukon 5 mukaan nimellistehon pysyessä samana.

Taulukko 5. Generaattorin nimellisarvot eri kytkennöillä taajuuden ollessa 60 Hz.

	Kytkennät			
	Y	YY	D	DD
$U_N$ [V]	14400	7200	8300	4150
$I_N$ [A]	669	1338	1159	2317

## 8 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli yhden koestusgeneraattorisähköjärjestelmän osasuunnittelu. Työssä keskityttiin kaapeloinnin suunnitteluun ja järjestelmän pääkomponenttien teoriaan ja mitoitukseen. Pääkomponentteihin kuuluivat tahtigeneraattori, induktiomootori, taajuusmuuttaja ja taajuusmuuttajan syöttömuuntaja.

Työn lopputuloksena saatiin määriteltyä järjestelmän pienjännitekaapeloinnin toteutus ja kaapeloinnista aiheutuvien häviöiden suuruus. Järjestelmä olisi voitu suunnitella suuremmalle käyttöjännitteelle. Suurempi jännite pienentäisi järjestelmän virtaa, joka taas vähentäisi kaapeloinnissa syntyviä häviöitä. ABB valmistaa Suomessa pienjännitetaajuusmuuttajia ja taajuusmuuttajia valmistava Drives -yksikön tehdas on samalla tehdasalueella Motors and Generators -yksikön tehtaalla kanssa. Sovelluksen erityinen luonne saattaa tuoda esiin ongelmia laitteiston käyttöönoton ja käytön aikana. Tehtaiden fyysinen läheisyys edesauttaa näiden ongelmien ratkaisussa.

Päivitetyn koestusgeneraattorin laskettu takaisinmaksuaika on noin 6–8 vuotta. Vanhan G22-generaattorin vetokoneena käytettiin tasavirtamootoria, johon on haastavaa saada nykypäivänä varaosia. Vanhan koestusgeneraattorijärjestelmän pätötehon syöttökapasiteetti ei myöskään riitä suurelle osalle nykypäivänä tehtaalla koestettaville induktiomootoreille. Vanhaa järjestelmää on käytetty enimmäkseen apugeneraattorina päägeneraattorin rinnalla. Päivityksen myötä koestusgeneraattori täyttää pätöteho vaatimukset ja sitä voidaan käyttää päägeneraattorina.

Koska projekti oli aloitettu jo ennen insinööriyön aloittamista, suurin osa komponenteista oli jo mitoitettu, joten työ sisälsi enemmän projektin dokumentointia kuin itse suunnittelua. Koska muuntajan lopullista sijoituspaikkaa ei vielä tiedetä, tehtiin olettamus muuntajan tulevasta sijaintipaikasta ja työn kaapelointisuunnitelma perustui tähän olettamukseen. Lopullisen sovelluksen valmistumisen ajankohtaa ei voida vielä tarkalleen sanoa. Koska koekentälle on odotettavissa suuria tuotannon kuormia, järjestelmää aiotaan syöttää väliaikaisesti eri muuntajalla. Näin järjestelmää saadaan käyttöön mutta kyseisellä muuntajalla järjestelmää voidaan käyttää vain vajaalla teholla. Koekentän välineitä pyritään päivittämään jatkuvasti mutta tällä hetkellä tämän projektin lisäksi isoja kehitysprojekteja ei lähitulevaisuudessa ole tulossa.




## Lähteet

- 1 ABB Oy, Motors and Generators. 2019. Verkkoaineisto. <<https://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti/suomessa/liiketoiminnat/motors-and-generators>>. Luettu 28.8.2019.
- 2 Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.
- 3 Laughton, M.A & Warne, D.F. 2003. Electrical engineer's reference book. Oxford: Newnes.
- 4 Elovaara, Jarmo & Haarala, Liisa. 2011. Sähköverkot 2. Helsinki: Otatieto.
- 5 Hietalahti, Lauri. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.
- 6 ABB Industrial drives. ACS880 Multidrive -kaapit ja -moduulit. Sähköasennuksen suunnitteluopas. <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000122911&LanguageCode=fi&DocumentPartId=1&Action=Launch>> 16.3.2015. Luettu 24.9.2019.
- 7 Monni, Markku. 2005. Sähköverkkoasennukset. Helsinki: Adato Energia Oy.
- 8 Distribution Transformers, ABB. Tammikuu, 2001. Tuoteseloste. <[http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/5422/mod\\_resource/content/1/Cat%C3%A1logo%20transformadores%20ABB.pdf](http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/5422/mod_resource/content/1/Cat%C3%A1logo%20transformadores%20ABB.pdf)>. Luettu 3.12.2019
- 9 2017. SFS-käsikirja 600-1-1. Helsinki: Suomen Standardisointiliitto SFS ry.
- 10 Prysmian Group, AXMK-HF C-Pro 0,6/1 kV, Alumiininen 1-johtiminen 1 kV voimakaapeli. 2017. Datalehti. <[https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business\\_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20AXMK-HF%20C-PRO%20071217.pdf](https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20AXMK-HF%20C-PRO%20071217.pdf)>. 7.12.2017. Luettu 10.10.2019.
- 11 DKC, Powertech, Hercules. Tuoteseloste. <<https://www.dkcpower.eu/wp-content/uploads/2018/11/powertech-c.pdf>>. Luettu 28.10.2019.
- 12 Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2017. D1-2017, Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Espoo: Sähköinfo Oy.
- 13 Elovaara, Jarmo & Haarala, Liisa. 2011. Sähköverkot 1. Helsinki: Otatieto.

- 14 Lakervi, Erkki & Partanen, Jarmo. 2008. Sähkönjakelutekniikka. Helsinki: Gaudamus.
- 15 Aro, Martti; Elovaara, Jarmo; Karttunen, Martti; Nousiainen, Kirsi; Palva, Veikko. 2015. Suurjännitetekniikka. Otatieto Oy.
- 16 ABB, Effects of AC Drives on Motor Insulation. 1998. Käyttöohje. <<https://library.e.abb.com/public/fec1a7b62d273351c12571b60056a0fd/voltstress.pdf>>. Luettu 29.8.2019
- 17 Sähkömagneettinen yhteensopivuus – EMC. 2019. Verkkoaineisto. TUKES. <<https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/sahkolaitteet/sahkomagneettinen-yhteensopivuus-emc>>. Luettu 29.5.2019.
- 18 EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI 2014/30/EU. <[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL\\_2014\\_096\\_R\\_0079\\_01&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fi/TXT/PDF/?uri=OJ:JOL_2014_096_R_0079_01&from=EN)>. Luettu 29.5.2019.
- 19 Prysmian Group. AXCCMK-HF C-PRo. Verkkoaineisto. <<https://fi.prysmiangroup.com/node/10272>>. Luettu 19.8.2019.
- 20 Prysmian Group. AXCMK-HF C-PRo. Verkkoaineisto. <<https://fi.prysmiangroup.com/node/10271>>. Luettu 19.8.2019.
- 21 Niiranen, Jouko. 1999. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatieto.
- 22 Lindström, Kimmo. 2014. Tasasuuntaajien muodostamat yliaallot. Opinnäyte-työ. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/78445/Lindstrom\\_Kimmo.pdf?sequence=1](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/78445/Lindstrom_Kimmo.pdf?sequence=1)>. Toukokuu 2014. Luettu 13.6.2019.
- 23 Hietalahti, Lauri. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.
- 24 ABB:n TTT-käsikirja 2000-07. Luku 9. Loistehon kompensointi ja yliaaltosuodatus.
- 25 O'Connell, Kevin. 2013. Heating Effects Through Harmonic Distortion on Electric Cables in the Built Environment. <<https://arrow.dit.ie/cgi/viewcontent.cgi?article=1058&context=engdoc>>. 7.2013. Luettu 10.6.2019.

- 26 Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Amk-Kustannus Oy, Tammertekniikka.
- 27 Ohlis, Mikke. 2019. Oikosulkumoottorien liitännät ja staattorien kääminnän virheet. Opinnäytetyö. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/170195/Ohlis\\_Mikke.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/170195/Ohlis_Mikke.pdf?sequence=2&isAllowed=y)>. Luettu 14.1.2020.
- 28 Lehtola, Sami. 2018. Generaattorien jatkuvatoiminen kunnonvalvonta. Opinnäytetyö. <[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/140165/Lehtola\\_Sami.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/140165/Lehtola_Sami.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Luettu 14.1.2020.

## Vetokoneen tekniset tiedot

<b>ABB, Machines</b>	Classifying code or document type		
	<b>Technical Specification</b> P9704HG800		
Customer ref. follows	Saving Ident P9704HG800 B TechSpec.pdf	Date 20 Jun. 18	Pages 1/3

**Technical Specification, Rev: B**

Sales Order	P9704HG
Line item	000800
Position name	6500kW
Description	AMI 630L6W BAFTH
Quantity of identical units	1
Standards	IEC
Potentially Hazardous Atmosphere	No
Max. Ambient Temperature	30 °C
Max. Altitude	1 000 m a.s.l.
Supply Type	ACS880
Output	6 500 kW
Speed	999,6 rpm
Supply	690 V / 3 ph / 50,3 Hz
Temperature Rise Class	F-class
Duty Type	S1
Mounting / Protection / Cooling	IM 1001 / IP 23 / IC 06
Insulation Class	F, vacuum pressure impregnated
Direction of Rotation	Clockwise
Bearings	Standard roller bearings
Bearing Insulation	Insulated DE+ NDE, DE grounded with cable
Terminal Box	Standard air insulated IEC main terminal box
Quality Assurance	ISO 9001 and ISO 14001
Color / Colot code	Standard blue Munsell 8B 4.5/3,25 / MUNSELL8B

## Tietoja vetokoneen tekniset tiedot, suorituskyky

<b>ABB Oy</b> Motors & Generators		Classifying code or document type <b>PERFORMANCE DATA OF MOTOR</b>			<b>ABB</b>	
Department/Author PIE1/VENA	Date of issue 7.6.2018	Lang. En	Rev. date	Our ref. 9704HG800		
Customer ref. Vetokone M22 testikenttä: 6500kW	Saving Ident MPDS-9704HG800EN-A		Rev./Changed by A	Pages 1/1		

## Driven Motor:

Motor type code	AMI 630L6W BAFTH		
Motor type	Squirrel cage Motor		
Mounting designation	IM 1001		
Protected by enclosure	IP 24W		
Method of cooling	IC 06		
Required airflow	4,5 m <sup>3</sup> / s		
Insulation	Class F		
Standards	IEC		
Ambient temperature, max.	30 °C		
Altitude, max.	1000 m.a.s.l.		
Converter supply	ACS 880		
Duty type	S1		
Temp. rise	Class F (RES)		
Connection of stator winding	Delta		
Rated output	0 -	6500 -	6500 - 500 kW
Voltage	0 -	690 -	690 - 690 V
Frequency	0 -	50,34 -	70,50 - 84,04 Hz
Speed	0 -	1000 -	1400 - 1680 rpm
Current	6287 -	6287 -	6430 - 820 A
Power Factor	0 -	0,89 -	0,87 - 0,58
Efficiency	0 -	96,8 -	96,5 - 83,0 %
Relat. maximum torque	0 -	2,2 -	1,4 - 13,9
Rated torque	62107 -	62107 -	44375 - 2842 Nm
Overload	60s every 600s		
Mechanical power	0 -	9450 -	6500 kW
Speed	0 -	1000 -	1400 rpm
Current	9585 -	9585 -	6430 A
Direction of rotation	Clockwise		
Inertia rotor	Approx. 306 kgm <sup>2</sup>		
Bearings	Antifriction		

This performance data is final and the Motor will be manufactured accordingly. All Motor data is subject to tolerances in accordance with IEC. Efficiency based on typical additional load losses acc. measurements.

Motors & Generators Visiting Address  
Strömbergintie 1 B  
HELSINKI  
FINLAND

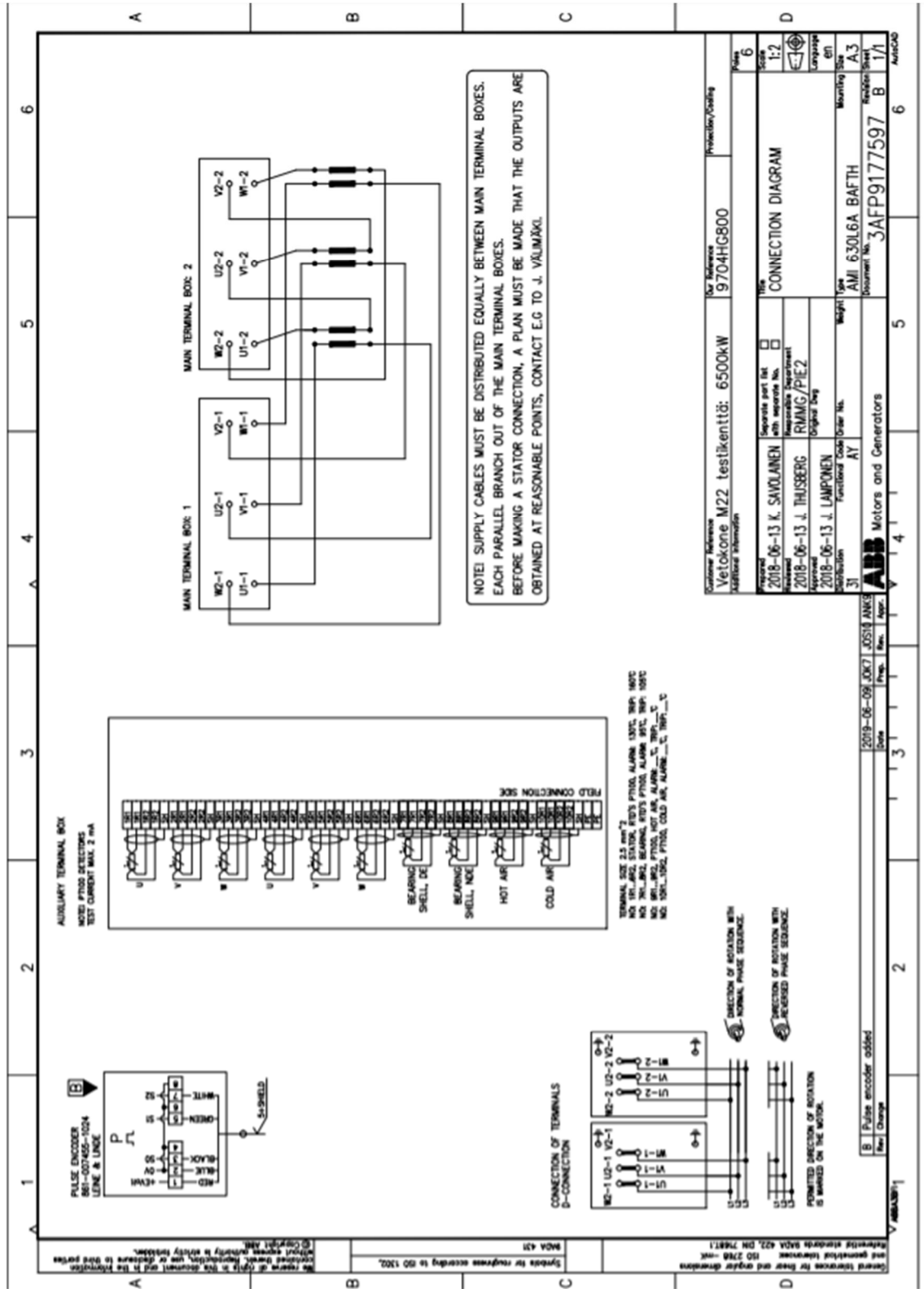
**ABB Oy**  
Postal Address  
P.O.Box 186  
FIN-00381 HELSINKI  
Finland

Telephone      Telefax  
+358 10 222 000    +358 10 222 3565

We reserve all rights in this document and in the information contained therein. Reproduction, use or disclosure to third parties without express authority is strictly forbidden.  
©Copyright 2018 ABB



Vetokoneen tekniset tiedot, sähkökuva



## Tahtigeneraattorin tekniset tiedot

We reserve all rights in this document and in the information contained therein. Reproduction, use or disclosure to third parties without express authority is strictly forbidden. © Copyright 2011 ABB

### TECHNICAL SPECIFICATION

**Project name:** ABB Helsinki Test Generator G22 v.2.0  
**Our reference number:** 6707HG401  
**Customer's reference number:**  
**Customer:** ABB OY, Sähkökoneet  
**Final customer:**  
**Application:** Diesel/Gas engine  
**Type designation:** AMG 1120SR06 PSB


### NOTES

### CONTENTS

#### SECTION:

<b>1</b>	<b>PERFORMANCE DATA (Calculated values)</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>CONFIGURATION AND SCOPE OF SUPPLY</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>ACCESSORIES</b>	<b>7</b>

Revision	Change	Updated by	Date
A	Original	HEKR	06.03.2015

Prep.	Helena Krivetz/PGD	6.3.2015	TECHNICAL SPECIFICATION		No. of sh.
Appr.	PGD				7
Resp. dept.	PGD				
	<b>ABB Oy / Motors and Generators</b>	Document identification	3AFP 67076401	Lang.	Rev. ind.
				cn	A
					Sheet
					1

TEMPLATE: TECHNICALSPECIFICATION.DOT; FILENAME: DG\_SQLGLOVE\_6707HG401\_ASDOC\_6707HG\_401\_A\_TECHSPEC.DOC; PRINTDATE: 3/9/2015 4:34:00 PM; SAVE DATE: 3/9/2015 4:32:00 PM



**1 PERFORMANCE DATA (Calculated values)****TYPE**

Type designation: AMG 1120SR06 PSB

**RATINGS**

Output:	16691	kVA	Direction of rotation (Facing drive end):	CCW
Duty:	S1		Weight:	32700 kg
Voltage:	14400	V	Inertia:	2050 kgm <sup>2</sup>
Current:	669	A	Protection by enclosure:	IP44
Power factor:	0,00	(lead)	Cooling method:	IC3A7
Frequency:	60	Hz	Mounting arrangement:	IM7201
Speed:	1200	rpm		
Overspeed:	1660	rpm		

**STANDARDS**

Applicable standard:	IEC
Marine classification:	None
Hazardous area classification:	None
Temperature rise stator / rotor:	F/F
Insulation class:	F

**ENVIRONMENTAL CONDITIONS (max. values)**

Ambient temperature:	40	°C	Altitude:	1000	masl
Coolant temperature:		°C			

**ASSUMED DATA**

Driving equipment:	PWM Fed induction motor
Appr. mec. power:	TBD KW

**EFFICIENCY in %, AT 115°C**

Load(16691 kVA):		110	%	100	%	75	%	50	%	25	%
Efficiency @ power factor 1,0(lag)		98,13		98,12		97,98		97,52		95,75	

**REACTANCES in %**

XD (U):	109,6	XD' (S):	26,3	XQ'' (S):	19,0	X0 (U):	2,9
XQ (U):	59,7	XD'' (S):	17,3	X2 (S):	18,2	XP (S):	21,7
X1 (U):	13,7	(S) = Saturated value, (U) = Unsaturated value					

**TIME CONSTANTS (SEC.) AT 75 °C**

TD0':	3,049	TD':	0,805	TQ0'':	0,1551	TA:	0,136
TD0'':	0,04061	TD'':	0,02771	TQ'':	0,0543		

 <b>ABB Oy / Motors and Generators</b>	Document identification	Lang.	Rev. ind.	Sheet
	3AFP 67076401	en	A	2

TEMPLATE: TECHNICALSPECIFICATION.DOT; FILENAME: DG\_SQLOLOVE\_6707HG401\_ASDOC\_6707HG\_401\_A\_TECHSPEC.DOC; PRINTDATE: 3/9/2015 4:34:00 PM; SAVEDATE: 3/9/2015 4:32:00 PM

**RESISTANCES AT 20 °C**

Stator winding: 0,0399  $\Omega$       Field winding: 0,7881  $\Omega$

**SHORT CIRCUIT**

Short circuit ratio: 0,98  
 Sustained short circuit current: 2,2 p.u. (rated excitation)  
 > 2.5 p.u. (voltage regulator)  
 Sudden short circuit current: 3850 A (symmetric RMS)  
 9800 A (peak value)

**VOLTAGE VARIATION**

Maximum allowed amount of starting load:

Maximum voltage drop	Power factor	Load
15 %	0.1	8850 kVA
15 %	0.4	9550 kVA
15 %	0.8	13900 kVA
20 %	0.1	12450 kVA
20 %	0.4	13350 kVA

Voltage drop at sudden increase of rated load: 25 %  
 Voltage rise at sudden drop of rated load: 34 %

**REACTIVE LOADING**

Steady state reactive loading at rated excitation: 16700 KVAR (lagging)  
 Steady state reactive loading at zero excitation: 12050 KVAR (leading)

**TORQUE**

Rated load torque (Calculated of rated output in kVA): 132800 Nm

The peak values of sudden short circuit air gap torques:

2-phase short circuit: 720 %      3-phase short circuit: 525 %

**BEARINGS**

D-end: Sleeve, flood lubricated, locked      N.D-end: Sleeve, flood lubricated, free  
 D-end bearing oil flow: 8,4 liter / min      N.D-end bearing oil flow: 8,4 liter / min  
 Oil viscosity: ISO VG 46

**HEAT EXCHANGER**

Mounting: N/A      Coolant inlet direction: Down  
 Cooling air required: 13,0 m<sup>3</sup>/s      Heat dissipation in air: TBD kW

**TERMINAL CONNECTIONS (Defined facing drive end)**

Direction of main connection: Right down  
 Direction of zero connection: Right down

<b>ABB</b> ABB Oy / Motors and Generators	Document identification	Lang.	Rev. ind.	Sheet
	3AFP 67076401	en	A	3

TEMPLATE: TECHNICALSPECIFICATION.DOT; FILENAME: DG\_SQGLGLOVE\_67076401\_ASSDC\_670764\_401\_A\_TECHSPEC.DOC; PRINTDATE: 3/9/2015 4:34:00 PM; SAVE DATE: 3/9/2015 4:32:00 PM





Tahtigeneraattorin tekniset tiedot, sähkökuva

