

Veikko Vuorijärvi

Koestamon jäähdytysvesipumppujen taajuusmuuttajakäyttö

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Opinnäytetyö

8.5.2018

Tekijä Otsikko	Veikko Vuorijärvi Koestamon jäähdytysvesipumppujen taajuusmuuttajakäyttö
Sivumäärä Aika	41 sivua + 4 liitettä 8.5.2018
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	sähkövoimatekniikka
Ohjaajat	Käyttöpäällikkö Kari Pärssinen Lehtori Arja Ristola
<p>Insinööritö tehtiin ABB Oy:n Helsingin Motors & Generators -yksikön sähkökonekoestamoon. Koestamossa koestetaan 0,4–15 kV:n jännitteellä syötettäviä vaihtovirtasähkökoneita. Koestuksessa koneille tehdään mekaanisia ja sähköisiä testejä, joilla varmistetaan, että koneiden ominaisuudet ja suorituskyky ovat vaaditulla tasolla.</p> <p>Työn tavoitteena oli suunnitella koestamon käytössä olevien vesijäähdytysjärjestelmän pumppujen moottorien muuttaminen taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Taajuusmuuttajalla saavutetaan parempi pumppujen säädettävyys, joka parantaa pumppujen energiatehokkuutta. Työssä suunniteltiin laitteiston kokoonpano sekä taajuusmuuttajan ohjaus ja parametrit vesijäähdytysjärjestelmässä. Laitteistolle mitoitettiin myös komponentit ja suojalaitteet.</p> <p>Laitteiston kokoonpano suunniteltiin koestamon vaatimusten, asiaankuuluvien standardien ja taajuusmuuttajan ohjekirjojen perusteella. Laitteistolle valittiin ja mitoitettiin tarvittavat komponentit ja suojalaitteet standardien ja taajuusmuuttajan ohjekirjojen mukaan. Taajuusmuuttajan ohjaus vesijäähdytysjärjestelmässä suunniteltiin lämpötila- ja paineantureita käyttäen. Taajuusmuuttajan parametrit testattiin demotaajuusmuuttajalla.</p> <p>Työn lopputuloksena saatiin suunnitelma laitteistosta ja taajuusmuuttajien konfiguraatiosta, joiden perusteella asennus pystytään toteuttamaan. Laitteiston asennuksen ja käyttöönoton jälkeen voidaan selvittää, kuinka suuri energiansäästö on mahdollista saavuttaa. Käyttöönoton jälkeen voidaan myös arvioida, toimiiko laitteisto suunnitellusti, ja miten sitä voidaan mahdollisesti kehittää.</p> <p>Työtä voidaan hyödyntää vastaavissa pumppuihin ja taajuusmuuttajiin liittyvissä projekteissa. Työstä saatiin käsitys taajuusmuuttajien ominaisuuksista sekä mitta-anturien avulla ohjattavista prosesseista.</p>	
Avainsanat	Taajuusmuuttaja, pumput, oikosulkumoottori, parametrit

Author Title	Veikko Vuorijärvi Frequency Converter Use of Cooling Water Pumps
Number of Pages Date	41 pages + 4 appendices 8 May 2018
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electrical Engineering
Specialisation option	Electrical Power Engineering
Instructors	Kari Pärssinen Maintenance Manager Arja Ristola Senior Lecturer
<p>This Bachelor's study was carried out for ABB Motors & Generators machine test field department in Helsinki. The function of the test field is to test electric machines supplied by 0.4–15 kV AC voltage.</p> <p>The goal was to design frequency converter use of existing cooling water pumps. The goal of the frequency converter use was to improve control of the pumps which results in better energy efficiency. This study focused on designing hardware and frequency converter configurations for the cooling water system. Configuration of the frequency converter consists of controlling the device in the water system and setting parameters for the device.</p> <p>The hardware configuration was designed according to the requirements of the test field, adequate standards and manuals of the frequency converter. Necessary components and electrical protection devices were sized according to standards and manuals. Control of the frequency converter in the water system was designed using pressure and temperature sensors. The parameters of the frequency converter were designed according to the process and tested with a demo device.</p> <p>The result was a design of the hardware and frequency converter configurations. Installation of the assembly is to be carried out according to the design. Following the installation and commissioning, achieved energy savings may be concluded.</p> <p>This thesis serves as reference to similar projects regarding pumps and frequency converters. A conception was also received of features of frequency converters and of processes controlled using measurement sensors.</p>	
Keywords	Frequency converter, pumps, induction motor, parameters

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Koestamon vesijäähdytysjärjestelmä	2
3	Pumpun pyörimisnopeuden säätö taajuusmuuttajalla	4
4	Oikosulkumoottori	4
4.1	Rakenne	4
4.2	Toimintaperiaate	5
4.3	Oikosulkumoottorin käyttötapoja	8
4.4	Oikosulkumoottorin taajuusmuuttajakäyttö	8
4.5	Oikosulkumoottori pumppukäytössä	10
5	Taajuusmuuttaja	10
5.1	Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja	10
5.2	Ohjaus- ja säätötavat	13
5.3	Taajuusmuuttajan mitoitus	14
6	Taajuusmuuttajan ohjaus ja parametrit	16
6.1	Taajuusmuuttajan ohjaus vesijäähdytysjärjestelmässä	16
6.2	Taajuusmuuttajan parametrit	19
7	Laitteiston komponentit, suojaus ja piirikaaviot	26
7.1	Taajuusmuuttajan ohituskytkentä	26
7.2	Kaapeleiden valinta ja mitoitus	27
7.3	Syötön erotus- ja ohjauslaitteet	29
7.4	Laitteiston suojaus	30
7.5	Laitteiston piirikaaviot	36
8	Yhteenveto	39
	Lähteet	40
	Liitteet	
	Liite 1. Laitteistojen 1 ja 2 piirikaaviot	
	Liite 2. Taajuusmuuttajien 1 ja 2 kytkentäkuva	
	Liite 3. Laitteiston 3 piirikaaviot	
	Liite 4. Taajuusmuuttajan 3 kytkentäkuva	

1 Johdanto

Insinööri työ tehdään ABB Oy:n Helsingin Motors & Generators -yksikön sähkökonekoestamoon. Koestamon tehtävänä on koestaa Helsingin konetehtaalla valmistettuja 0,4–15 kV:n jännitteellä syötettäviä vaihtovirtasähkökoneita. Koestuksessa koneille tehdään mekaanisia ja sähköisiä testejä, joilla varmistetaan, että koneiden ominaisuudet ja suorituskyky ovat vaaditulla tasolla.

Työn tavoitteena on suunnitella koestamon käytössä olevien vesijäähdytysjärjestelmän pumppujen moottorien muuttaminen taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Taajuusmuuttajalla saavutetaan parempi pumppujen säädettävyys, joka parantaa pumppujen energiatehokkuutta. Työssä suunnitellaan tarvittavan laitteiston kokoonpano sekä taajuusmuuttajan ohjaus ja parametrit vesijäähdytysjärjestelmässä. Laitteistolle mitoitettiin myös komponentit ja suojalaitteet. Suunnittelu tehdään koestamon vaatimusten, asianmukaisten standardien ja taajuusmuuttajan valmistajan ohjeiden mukaisesti.

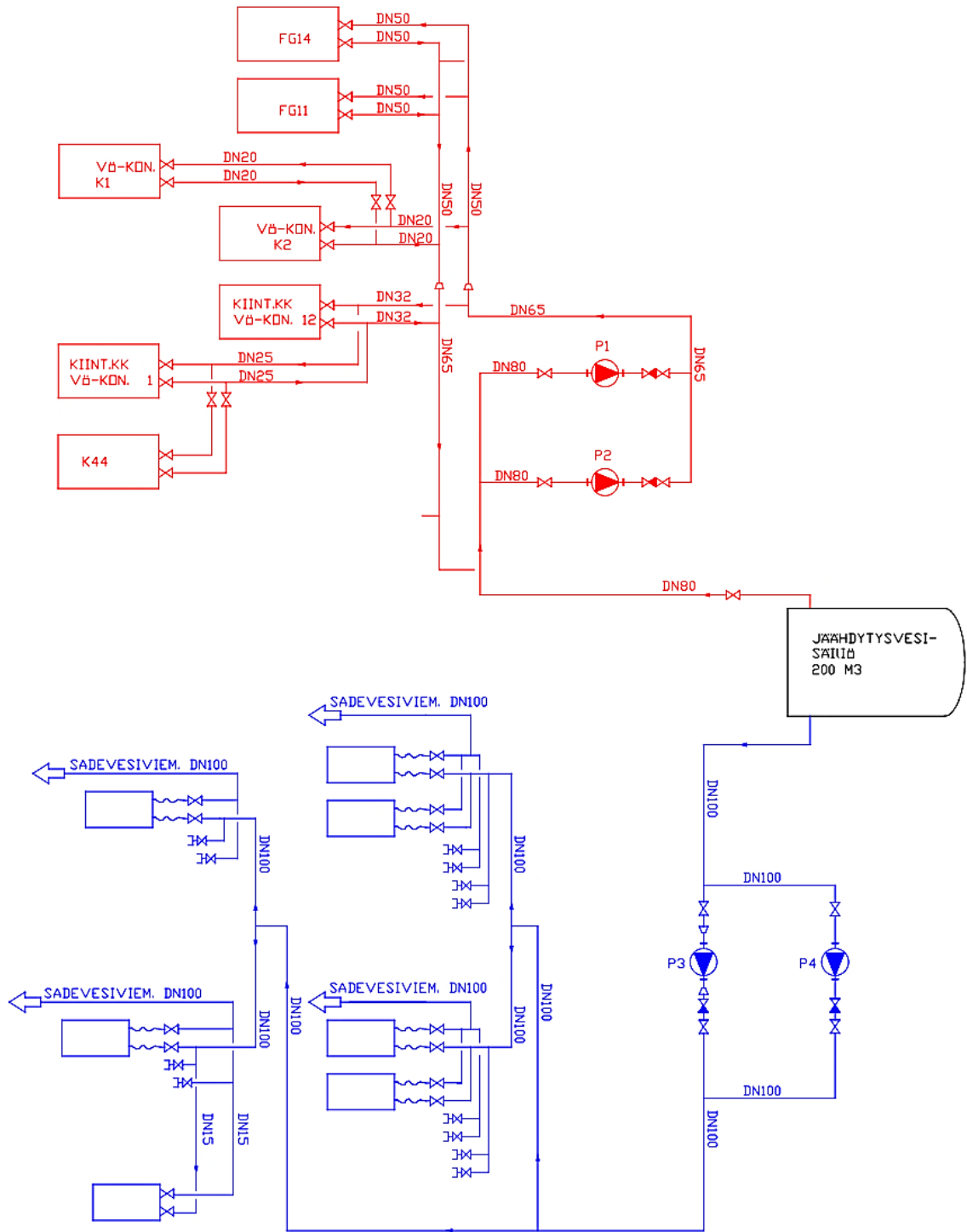
ABB Group on kansainvälinen johtava teknologia-alan yritys, joka toimii sähköistyksen, robotiikan, liikkeenohjauksen sekä teollisuusautomaation ja sähköverkkojen alalla. ABB toimii yli 100 maassa ja työllistää yli 135 000 henkilöä, joista Suomessa noin 5 300. (ABB:stä lyhyesti 2018.)

2 Koestamon vesijäähdytysjärjestelmä

Koestamon vesijäähdytysjärjestelmässä (kuva 1) on kaksi erillistä vesilinjaa, joiden vesisyöttö tulee samasta säiliöstä. Molemmissa vesilinjoissa on kaksi pumppua rinnakkain.

Vesilinjassa 1 pumpput (P1 ja P2) ovat jatkuvasti toiminnassa, ja pumppujen moottorit on kytketty suoraan verkkoon. Tavoitteena on, että taajuusmuuttajakäytössä toinen tai molemmat pumpput ovat päällä tarpeen mukaan. Näin ei turhaan käytetä kahta pumppua tilanteessa, jossa jäähdytysvettä tarvitaan vähemmän. Pumppujen moottorit ovat teholtaan 4 kW. Vesilinja 1 jäähdyttää kolmea taajuusmuuttajaa, neljää öljykoneikkoa ja yhtä muuntajaa. Linjassa vesi kiertää takaisin tankkiin. Veden virtausta ei voi säätää.

Vesilinjassa 2 vain pumppu P3 on käytössä. Moottori on kytketty pehmokäynnistimellä verkkoon, ja käyntikäsky annetaan koestamosta. Tavoite on muuttaa käytössä olevan pumpun moottori taajuusmuuttajakäyttöiseksi. Pumppujen moottorien tehot ovat 30 kW. Vesilinjasta 2 saadaan jäähdytysvettä koestamon koekentille. Koekentillä tarvitaan jäähdytysvettä koestettaville vesijäähdytteisille sähkökoneille. Veden virtausta säädetään koestamosta kuristamalla venttiilillä. Vesi ei kierrä takaisin tankkiin, vaan ohjataan viemäriin. Pumppu P4 on varakäyttönä, mutta sitä ei ole kytketty verkkoon.



Kuva 1. Koestamon vesijäähdytysjärjestelmä. Punaisella vesilinjal 1 ja sinisellä vesilinjal 2.

3 Pumpun pyörimisnopeuden säätö taajuusmuuttajalla

Taajuusmuuttajalla voidaan säätää pumpun pyörimisnopeutta pumppua käyttävän sähkömoottorin syöttötaajuutta muuttamalla. Pyörimisnopeuden säädöllä voidaan pumpun energiatehokkuutta parantaa. (Energiatehokkaat pumput 2011: 8.)

Kuristussäädössä veden virtausta rajoitetaan venttiilillä. Näin saadaan lisättyä painehäviötä, mikä vähentää tilavuusvirtaa. Painehäviön kasvattaminen lisää kuitenkin pumpun häviöitä, joten kuristussäätö ei ole energiatehokas säätötapa. (Energiatehokkaat pumput 2011: 8.)

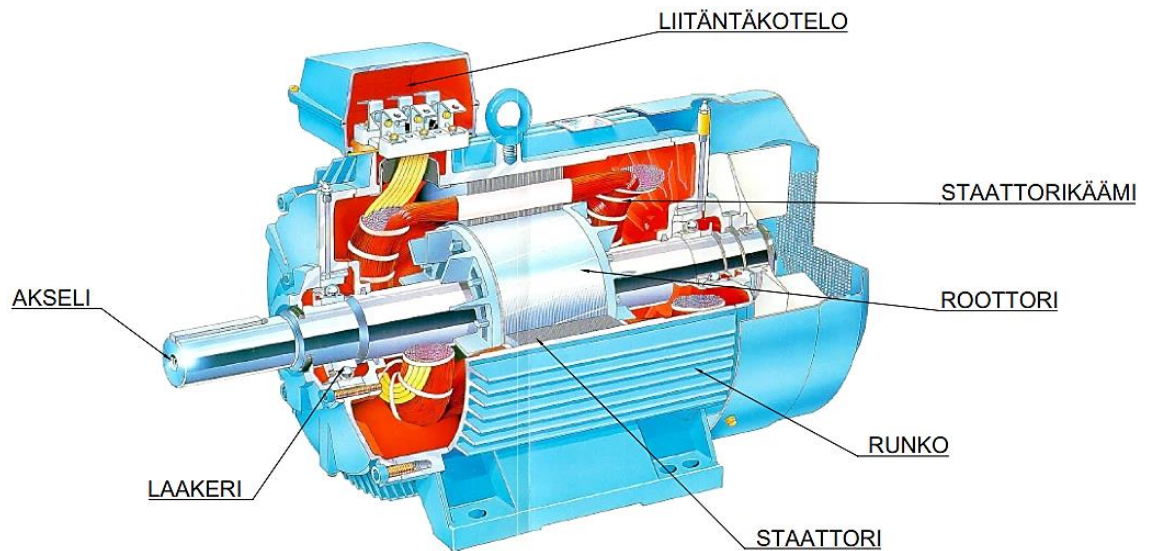
Taajuusmuuttajalla toteutetussa pyörimisnopeuden säädössä saadaan pumppu toimimaan eri toiminta-arvoilla lisäämättä juurikaan pumppauksen häviötä. Pyörimisnopeussäädössä pumpun hyötysuhde pysyy korkeana, kun toimitaan lähellä pumpun mitoituspistettä. Toimintapisteen siirtyessä kauemmaksi mitoituspisteestä hyötysuhde kuitenkin huononee. (Energiatehokkaat pumput 2011: 8–9.)

4 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottori on yksinkertaisen rakenteensa ja kestäväytensä ansiosta yleisin teollisuudessa käytetty sähkökonetyyppi. Se on myös edullisin konetyyppi verrattuna tahti- tai tasavirtakoneeseen. Oikosulkumoottoria voidaan käyttää myös generaattorina. (Hietalahti 2012: 55.)

4.1 Rakenne

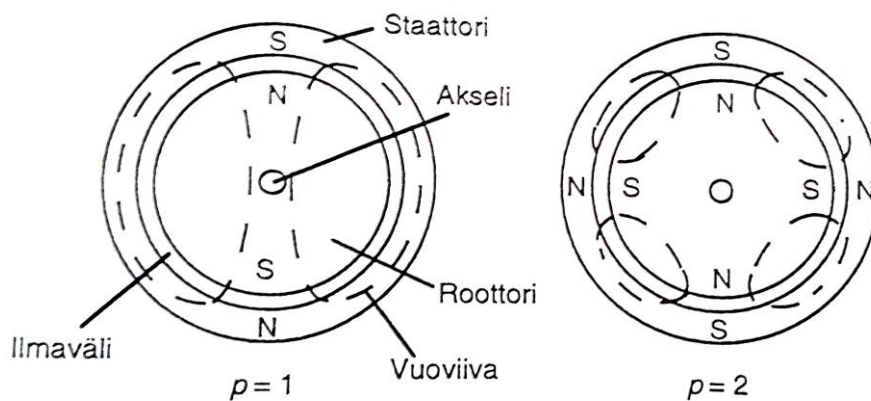
Oikosulkumoottorin voi ajatella koostuvan kahdesta osasta: staattorista ja roottorista. Staattori on liikkumaton, ja sen sisällä on pyörivä roottori. Staattorin ja roottorin välissä on ilmaväli. Kolmivaiheisen oikosulkumoottorin staattorissa on kolmivaihekäämitys. Roottorin käämitys taas kostuu urissa olevista sauvoista, jotka on yhdistetty päistään toisiinsa oikosulkurenkailla. (Niiranen 2000: 18, 29.) Oikosulkumoottorin poikkileikkaus on esitetty kuvassa 2. Moottorin osia staattorin ja roottorin lisäksi ovat mm. runko, akseli, laakerit sekä liittimet syöttökaapeleille.



Kuva 2. Oikosulkumoottorin rakenne (Pehmökäynnistinopas 2011: 4).

4.2 Toimintaperiaate

Oikosulkumoottorin toiminta perustuu pyörivään magneettikenttään, joka syntyy staattorin kolmivaihekäämityksessä kulkevan kolmivaiheisen vaihtovirran avulla. Magneettivuo kulkee staattorista roottoriin ja takaisin. Magneettikentällä on yksi pohjois- ja etelänapa, jotka muodostavat napaparin. (Niiranen 2000: 18–21.) Kuvassa 3 on esitetty staattorivirtojen synnyttämät magneettikentät.



Kuva 3. Yksi- ja kaksinapaparisien moottorin staattorivirtojen synnyttämät magneettikentät. Magneettikentän napoja merkitään N-pohjoisnapa ja S-etelänapa. (Niiranen 2000: 21.)

Staattorissa syntyvän pyörivän magneettikentän kenttäviivat leikkaat roottorikäämyksen sauvoja, jolloin roottorisauvoihin indusoituu lähdejännite. Roottorisauvoihin indusoituva jännite synnyttää roottorikäämykseen roottorivirran, joka synnyttää oman magneettikenttensä. Syntynyt roottorin magneettikenttä pyörii staattorin magneettikentän kanssa tahdissa ja saa roottorin pyörivään liikkeeseen. (Hietalahti 2012: 55–56.)

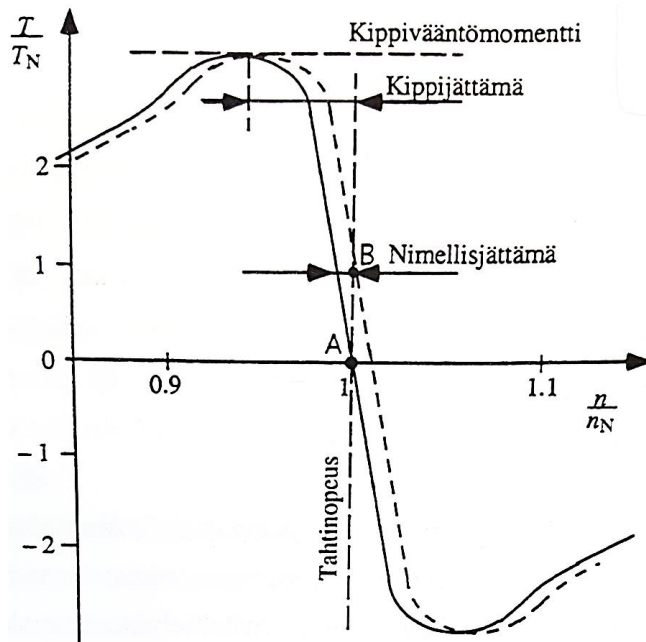
Roottori aloittaa pyörimisen moottorin vääntömomentin ollessa suurempi kuin pyörimistä vastustava kuormitusmomentti. Koneen pyörimisnopeus kasvaa sellaiseen arvoon, että moottorin sähköinen vääntömomentti ja kuormittava vastamomentti ovat yhtä suuret. Induktion säilyttäminen roottorissa edellyttää, että sen mekaanisen pyörimisnopeuden tulee olla pienempi kuin staattorin luoman magneettikentän. Jos roottorin pyörimisnopeus olisi sama kuin staattorikentällä, eivät roottorikäämyksen sauvat leikkaisi kenttäviivoja, jolloin ei syntyisi lähdejännitettä eikä vääntömomenttia. (Hietalahti 2012: 56.)

Moottorin magneettikentän pyörimisnopeus eli tahtinopeus n_s määräytyy Auran & Tonterin (1996: 125) mukaan napapariluvun ja syöttävän verkon taajuudesta yhtälöllä 1:

$$n_s = 60 \frac{f}{p} \quad (1)$$

p on napapariluku (lkm)
 f on taajuus (Hz).

Kuten edellä todettiin, oikosulkumoottorin todellinen pyörimisnopeus on aina tahtinopeutta pienempi. Nopeuseroa tahti- ja pyörimisnopeuden välillä kutsutaan jättämäksi. Kuvassa 4 on esitetty oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä. Oikosulkumoottorin tuottama vääntömomentti on verrannollinen jättämään kohtuullisen laajalla alueella tahtinopeuden läheisyydessä. Kuitenkin jättämän kasvaessa vääntömomentti kasvaa entistä hitaammin ja lopulta kääntyy laskuun. Oikosulkumoottorin maksimivääntömomenttia kutsutaan kippivääntömomentiksi ja vastaavaa jättämää kippijättämäksi. Moottoria käytetään yleensä reilusti alle kippijättämän, koska sen ylittyessä moottorin ottama virta kasvaa huomattavasti. (Niiranen 2000: 29–30.)



Kuva 4. Oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrä (yhtenäinen viiva) pyörimisnopeuden funktiona (Niiranen 2000: 29).

Oikosulkumoottorin suhteellinen jättämä s voidaan laskea Niirasen (2000: 30) mukaan kaavalla 2:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} * 100 \% \quad (2)$$

n_s on moottorin tahti nopeus
 n on moottorin pyörimisnopeus.

Oikosulkumoottorin momentti T on riippuvainen moottorin akselitehosta ja kulmanopeudesta yhtälön 3 mukaisesti (Hietalahti 2012: 25).

$$T = \frac{P_m}{\omega} = \frac{P_m}{2\pi * f} = \frac{60}{2\pi} * \frac{P_m}{n} \quad (3)$$

P_m on moottorin akseliteho
 ω on moottorin kulmanopeus.

Moottorin akseliteho P_m saadaan laskettua hyötysuhteen η avulla, kaavalla 4 (Hietalahti 2012: 25).

$$P_m = P_s \eta \quad (4)$$

η on hyötysuhde.

Moottorin sähköinen teho P_s saadaan yhtälön 5 mukaan laskettua moottorin jännitteestä, virrasta ja tehokertoimesta (Hietalahti 2012: 25).

$$P_s = \sqrt{3} * U * I * \cos\phi \quad (5)$$

U on moottorin jännite
 I on moottorin virta
 $\cos\phi$ on moottorin tehokerroin.

4.3 Oikosulkumoottorin käyttötapoja

Suorakäyttö

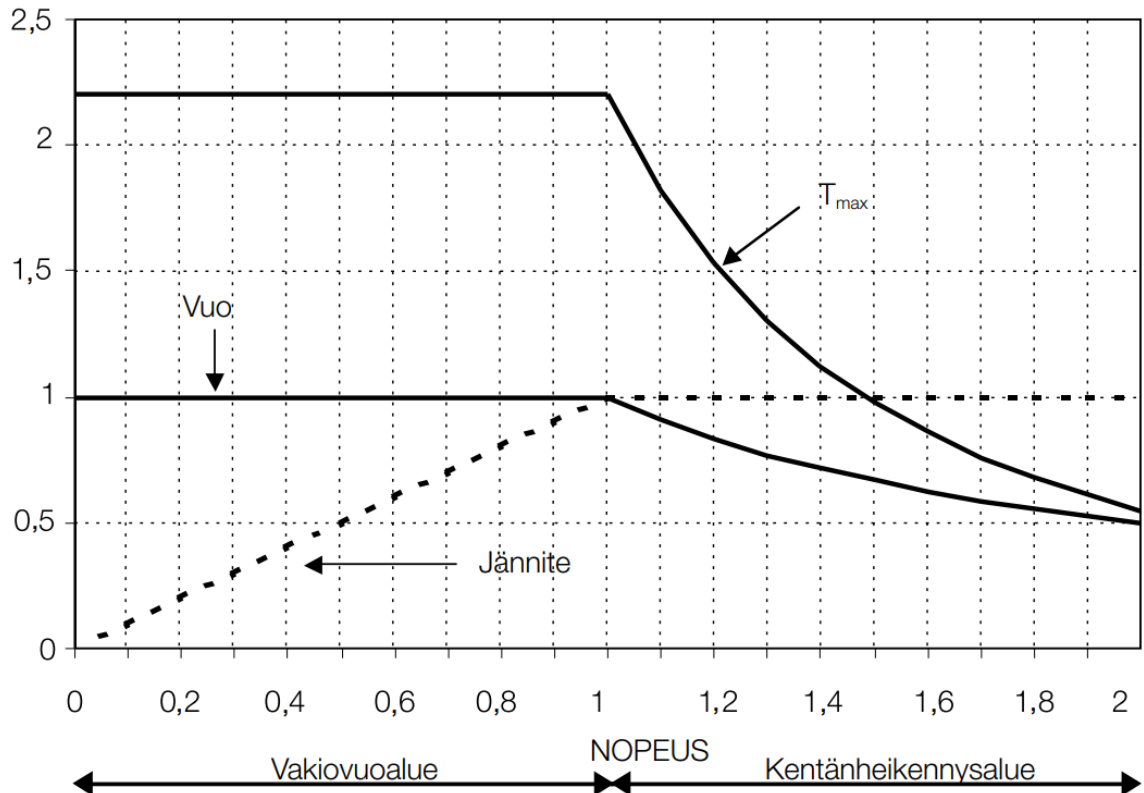
Suorakäytössä eli DOL-käytössä (Direct On Line) oikosulkumoottoria käytetään suoraan sähköverkosta. Se on myös oikosulkumoottorin yleisin käyttötapo. Käynnistyslaitteisto koostuu ainoastaan pääkontaktorista ja lämpö- tai ylikuormitusreleestä. Suorassa käynnistyksessä moottorin ottama käynnistysvirta on suuri: noin 5–10 kertaa nimellisvirran suuruinen. Käynnistyksen aikana myös käynnistysmomentti on suuri, mikä voi aiheuttaa räsitusta laitteille. (Pehmokäynnistinopas 2011: 13; Mäkinen & Kallio 2004: 138.)

Käyttö pehmokäynnistimellä

Pehmokäynnistin nostaa vähitellen moottorille syötetyn jännitteen lähtöjännitteestä täydeksi jännitteeksi. Pehmokäynnistimellä käynnistysvirtaa voidaan pienentää, koska jännitteen pienentyessä myös virta sekä momentti pienenevät. Jännitteen puolittuessa laskee myös virta noin puoleen ja momentti neljännekseen maksimista. Käynnistysvirta voidaan rajoittaa esimerkiksi 3–4-kertaiseksi nimellisvirtaan nähden. (Pehmokäynnistinopas 2011: 18, 57.)

4.4 Oikosulkumoottorin taajuusmuuttajakäyttö

Oikosulkumoottorin pyörimisnopeuteen voidaan vaikuttaa syöttöjännitteen taajuutta muuttamalla. Moottorin toiminta-alue taajuusmuuttajakäytössä voidaan jakaa vakiovuoja kentänheikennysalueisiin, jotka on esitetty kuvassa 5. Aluetta moottorin nimellisnopeuteen asti kutsutaan vakiovuoalueeksi ja nimellisnopeuden yläpuolella kentänheikennysalueeksi. (Niiranen 2000: 22; Hietalahti 2012: 25.)



Kuva 5. Kentänheikennys ja vakiovuoalueet. Oikosulkumoottorin jännite, vuo ja momentti pyörimisnopeuden funktiona. (Tekninen opas nro. 7 2001: 11.)

Kuvaajasta nähdään, että vakiovuoalueella moottorilta saadaan maksimimomentti koko kierrosnopeusalueella nimellisnopeuteen asti. Kentänheikennysalueella moottorin jännitteen pysyessä vakiona ja taajuuden kasvaessa vuo pienenee kääntäen verrannollisesti suhteessa moottorin pyörimisnopeuteen, ja maksimimomentti pienenee kääntäen verrannollisesti nopeuden toiseen potenssiin. (Hietalahti 2012: 25–27.)

Tämä voidaan perustella yhtälön 6 avulla. Moottorin akselin pyöriessä moottorin liittimiin indusoituu vastasähkömotorinen voima, joka on verrannollinen magneettivuon suuruuteen ja moottorin pyörimisnopeuteen.

$$e = \frac{d\psi}{dt} = \omega * \psi \quad (6)$$

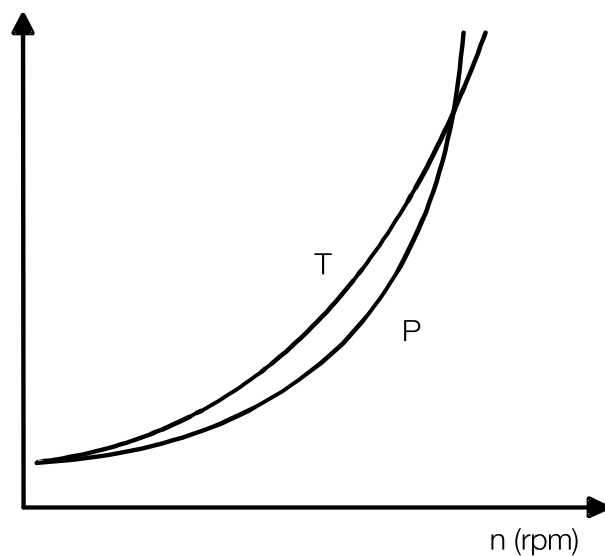
e on vastasähkömotorinen voima
 ψ on staattorin magneettivuo
 ω on moottorin pyörimisnopeus.

Yhtälöstä nähdään, että vuon pysyessä vakiona ja nopeuden kasvaessa myös moottorin liittimien välinen jännite kasvaa. Moottorin eristeiden ominaisuuksista johtuen ei jänni-

tettä voida kuitenkaan nostaa yli nimellisjännitteen. Moottorin nopeuden ylittäessä nimellispisteen jännitettä ei siis voida enää kasvattaa, joten vuon tulee pienentyä. (Hietalahti 2012: 25–27.)

4.5 Oikosulkumoottori pumppukäytössä

Pumppukäytöt ovat neliöllisen momentin käyttäjiä, eli pumpun vastamomenttikäyrä on neliöllinen. Neliöllinen vastamomentti on yleisin kuormitustyyppi teollisuudessa. Momentti on neliöllisesti riippuvainen pyörimisnopeudesta, ja teho on verrannollinen nopeuden kuutioon. (Hietalahti 2012: 4.) Kuvassa 6 on esitetty neliöllisen momentin kuvaaja.



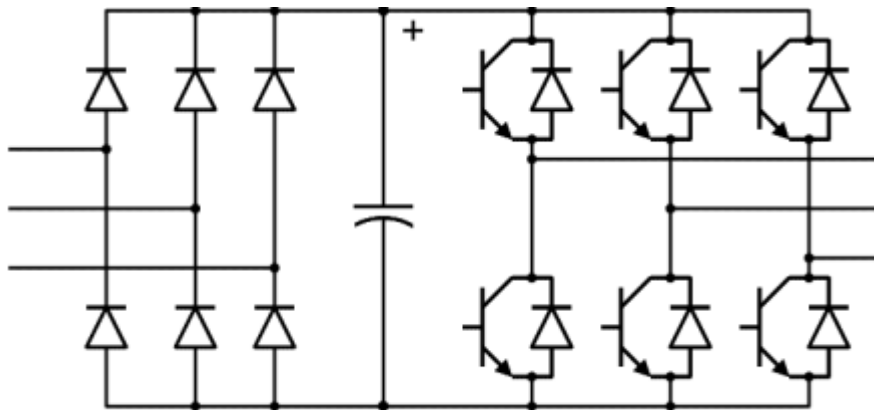
Kuva 6. Neliöllisen momentin käyttö. Vastamomentti T ja teho P pyörimisnopeuden funktiona. (Tekninen opas nro. 7 2001: 20.)

5 Taajuusmuuttaja

5.1 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja (VSI Voltage Source Inverter) koostuu tasasuuntaajasta, tasajännitevälipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Tasasuuntaaja muuttaa vaihtosähkön ensin tasasähköksi ja vaihtosuuntaaja takaisin säädettäväksi vaihtosähköksi. Jännitevälipiirissä on kondensaattori, joka pienentää tasajännitteen aaltoisuutta. Välipiirissä voi olla

myös kuristin, joka tasoittaa jännitteen muutoksia. (Niiranen 2000: 48–50.) Kuvassa 7 on esitetty yleisimmän jännitevälipiiritaajuusmuuttajan rakenne.

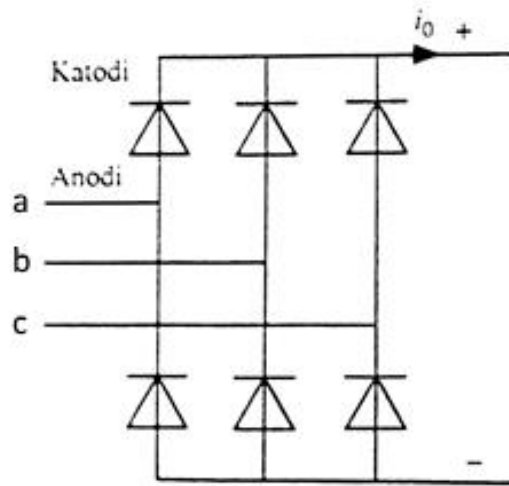


Kuva 7. Yleisimmän jännitevälipiiritaajuusmuuttajan rakenne. Vasemmalla diodeilla toteutettu kuusipulssitasasuuntaaja, keskellä välipiiri ja kondensaattori sekä oikealla IGB-transistoreilla toteutettu vaihtosuuntaaja. (Ravantti 2014: 3.)

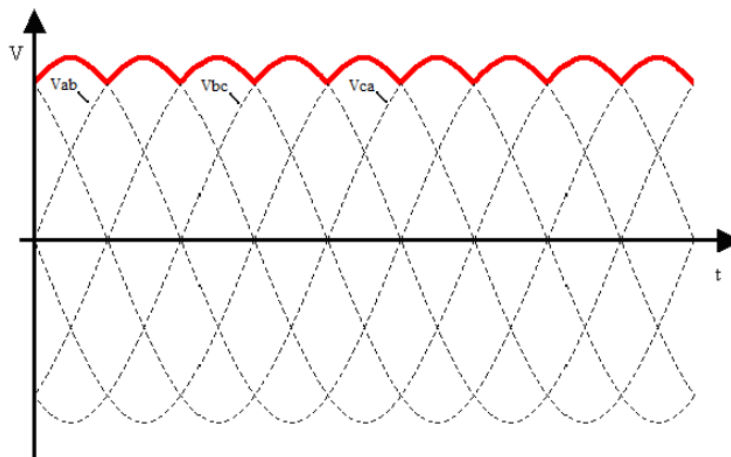
Tasasuuntaaja

Tasasuuntaaja toteutetaan yleensä diodeilla. Diodi on puolijohdekomponentti, joka päästää sähkövirran kulkemaan vain yhteen suuntaan, anodilta katodille. Diodi syttyy eli alkaa johtaa sähköä, kun anodi tulee katodiin nähden positiiviseksi. (Niiranen 2000: 40–42.)

Yleisin käytetty tasasuuntaaja on kuusipulssitasasuuntaaja, joka koostuu kuudesta diodista. Kuusipulssitasasuuntaajan tuottama tasajännite muodostuu kuudesta pulssista yhden verkkojakson aikana. Kommutointi eli virran siirto diodilta toiselle tapahtuu kolmi-vaiheisen syöttöjännitteen pakottamana. Yläpuolen kolmesta diodista johtaa aina se, jonka vaihejännite on positiivisin, kun taas alapuolen diodeista johtaa aina se, jonka vaihejännite on negatiivisin. (Niiranen 2000: 40–44.) Kuvissa 8 ja 9 on esitetty kuusipulssinen diodisilta ja sen tuottama tasajännite.



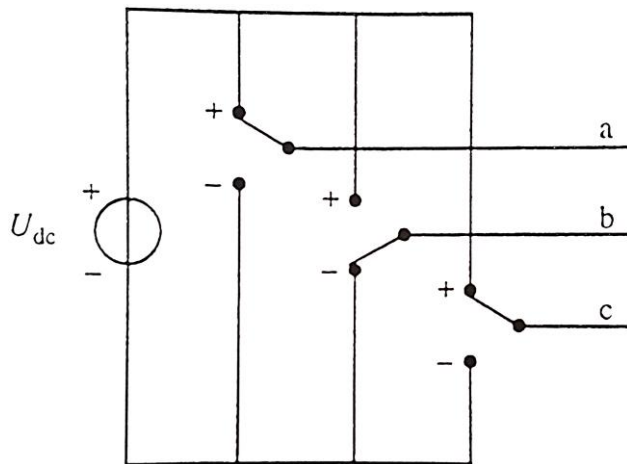
Kuva 8. Kuusipulssinen diodisilta (Niiranen 2000: 42).



Kuva 9. Kuusipulssisen diodisillan tuottama tasajännite on merkitty punaisella ja verkon pääjännitteet katkoviivoilla (Farin ym. 2009: 42).

Vaihtosuuntaaja

Vaihtosuuntaaja (kuva 10) muuttaa välipiirin tasasähkön säädettäväksi vaihtosähköksi. Jännitevälipiirivaihtosuuntaaja toteutetaan IGBT-transistoreilla. IGBT (Insulated Bipolar Transistor) on ohjattava transistori, jolla on riittävä kytkentänopeus ja jännitekestoisuus. IGBT-komponenteilla toteutettu vaihtosuuntaaja mahdollistaa myös riittävän hyvän säädön dynamiikan. (Niiranen 2000: 47, 50.)



Kuva 10. Vaihtosuuntaajan periaatekuva, jossa IGB-transistoreja mallinnetaan kytkimillä (Niiranen 2000: 48).

5.2 Ohjaus- ja säätötavat

Oikosulkumoottorin ohjaus- ja säätötapoja taajuusmuuttajalla ovat skalaariohjaus ja -säätö, vektorisäätö ja suora momenttisäätö. Skalaariohjaus ja -säätö sopivat vähemmän tarkkuutta vaativiin käyttöihin. Vektorisäädöllä saadaan varsin suorituskykyinen käyttö, mutta paras säätötapa on suora momenttisäätö. (Niiranen 2000: 82.)

Skalaariohjaus ja -säätö

Skalaariohjauksessa ei yleensä ole nopeus- eikä vääntömomenttisäätöä. Tästä seuraa, että käytön nopeustarkkuuden määrää jättämän suuruus. Jättämä on oikosulkumoottorilla verrattain pieni, joten skalaariohjauksen tarkkuus riittää moniin käytännön sovelluksiin. Skalaariohjauksessa moottorilta mitataan usein vain virtaa moottorin tai taajuusmuuttajan ylivirran estämiseksi. (Hietalahti 2012: 84.)

Skalaarisäätö on taajuussäätö. Skalaariohjauksesta saadaan skalaarisäätö lisäämällä moottorin virran ja nopeuden mittaukset takaisinkytkennällä. Skalaarisäätö pystyy vääntömomenttisäätöön arvioimalla moottorin pätövirtaa. Koska taajuusmuuttajan pätövirta on verrannollinen moottorin vääntömomenttiin, saadaan vääntömomentille estimaatti. Moottorin vääntömomentti voidaan siis arvioida, mutta moottorimallia skalaarisäätö ei sisällä. Skalaarisäätö ei myöskään pysty vastaamaan nopeisiin vääntömomentin muutoksiin, joten käytön asettuminen uuteen tilaan on hidasta. (Hietalahti 2012: 84–85.)

Vektorisäätö

Vektorisäätö on oikosulkumoottorin magneettikenttäorientoitunut säätö, joka perustuu moottorin dynaamisen tilan tuntemiseen. Vektorisäädössä pyörimisnopeussäätö antaa vääntömomenttisäädölle ohjearvon. Oikosulkumoottorin mitattu virta jaetaan pitkittäiseen sekä poikittaiseen komponenttiin kaksiakselimallin mukaan. Virran pitkittäinen komponentti i_d tuottaa moottorin magnetoinnin, josta saadaan käämivuon oloarvo. Virran poikittainen komponentti i_q tuottaa moottorin vääntömomentin, josta saadaan vääntömomentin oloarvo. Oikosulkumoottorin magnetointia ja vääntömomenttia voidaan siis säätää erikseen. Vektorisäätö hallitsee oikosulkumoottorin sähkömagneettisen tilan huomattavasti paremmin kuin skalaarisäätö, ja se on siten dynaamisilta ominaisuuksiltaan parempi. (Hietalahti 2012: 85.)

Suora momenttisäätö

Suorassa vääntömomenttisäädössä (DTC Direct Torque Control) säädetään suoraan oikosulkumoottorin käämivuota ja vääntömomenttia. Säädössä mitataan kahta moottorin vaihevirtaa, taajuusmuuttajan välipiirin tasajännitettä ja taajuusmuuttajan tehokytkimien asentoja. Mittaustiedot syötetään moottorin adaptiiviseen matemaattiseen malliin, joka laskee käämivuon, vääntömomentin ja pyörimisnopeuden oloarvot. Optimaalinen kytkentälogiikka määrittää tehokytkimien hetkelliset kytkennät vääntömomentin ja käämivuon perusteella. Tärkeimmät ohjausparametrit lasketaan 25 μ s välein eli 40 000 kertaa sekunnissa, jolla saavutetaan erittäin nopea vääntömomenttisäätö. (Hietalahti 2012: 87–94.)

5.3 Taajuusmuuttajan mitoitus

Taajuusmuuttaja valitaan verkkojännitteen ja moottorin akselitehon perusteella. Taajuusmuuttaja tulee myös mitoittaa suurimman käytössä esiintyvän virran perusteella. (Hietalahti 2012: 39.) Vesijäähdytysjärjestelmän pumppujen moottorien nimellisarvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vesijäähdytysjärjestelmän pumppujen moottorien nimellisarvot.

	Jännite (V)	Taajuus (Hz)	Teho (kW)	Virta (A)	Teho- kerroin	Pyörimisno- peus (rpm)
Moottorit 1 ja 2	400	50	4	7,29	0,89	2920
Moottorit 3 ja 4	400	50	30	53	0,89	2957

Moottorien nimellisarvojen perusteella valitaan taajuusmuuttajat valmistajan tuotekatalogista. Taajuusmuuttajien nimellisarvot on esitetty kuvassa 11, johon on myös merkitty valitut laitteet.

		I_N (A)	P_N (kW)
ACQ580-01-02A7-4	R1	2.6	0.75
ACQ580-01-03A4-4	R1	3.3	1.1
ACQ580-01-04A1-4	R1	4	1.5
ACQ580-01-05A7-4	R1	5.6	2.2
ACQ580-01-07A3-4	R1	7.2	3
ACQ580-01-09A5-4	R1	9.4	4
ACQ580-01-12A7-4	R1	12.6	5.5
ACQ580-01-018A-4	R2	17	7.5
ACQ580-01-026A-4	R2	25	11
ACQ580-01-033A-4	R3	32	15
ACQ580-01-039A-4	R3	38	18.5
ACQ580-01-046A-4	R3	45	22
ACQ580-01-062A-4	R4	62	30
ACQ580-01-073A-4	R4	73	37

Kuva 11. Taajuusmuuttajien nimellisarvot tuotekatalogista. Valitut laitteet on merkitty punaisella. (ABB drives for water and wastewater 2018: 16.)

Valmistajan suosituksesta päädyttiin ABB:n ACQ580-taajuusmuuttajiin, koska ne on suunniteltu erityisesti pumppukäyttöön. Taajuusmuuttajissa on monia hyödyllisiä toimintoja, kuten ohjelma usean pumpun järjestelmille. (ABB drives for water and wastewater 2018: 10.)

6 Taajuusmuuttajan ohjaus ja parametrit

6.1 Taajuusmuuttajan ohjaus vesijäähdytysjärjestelmässä

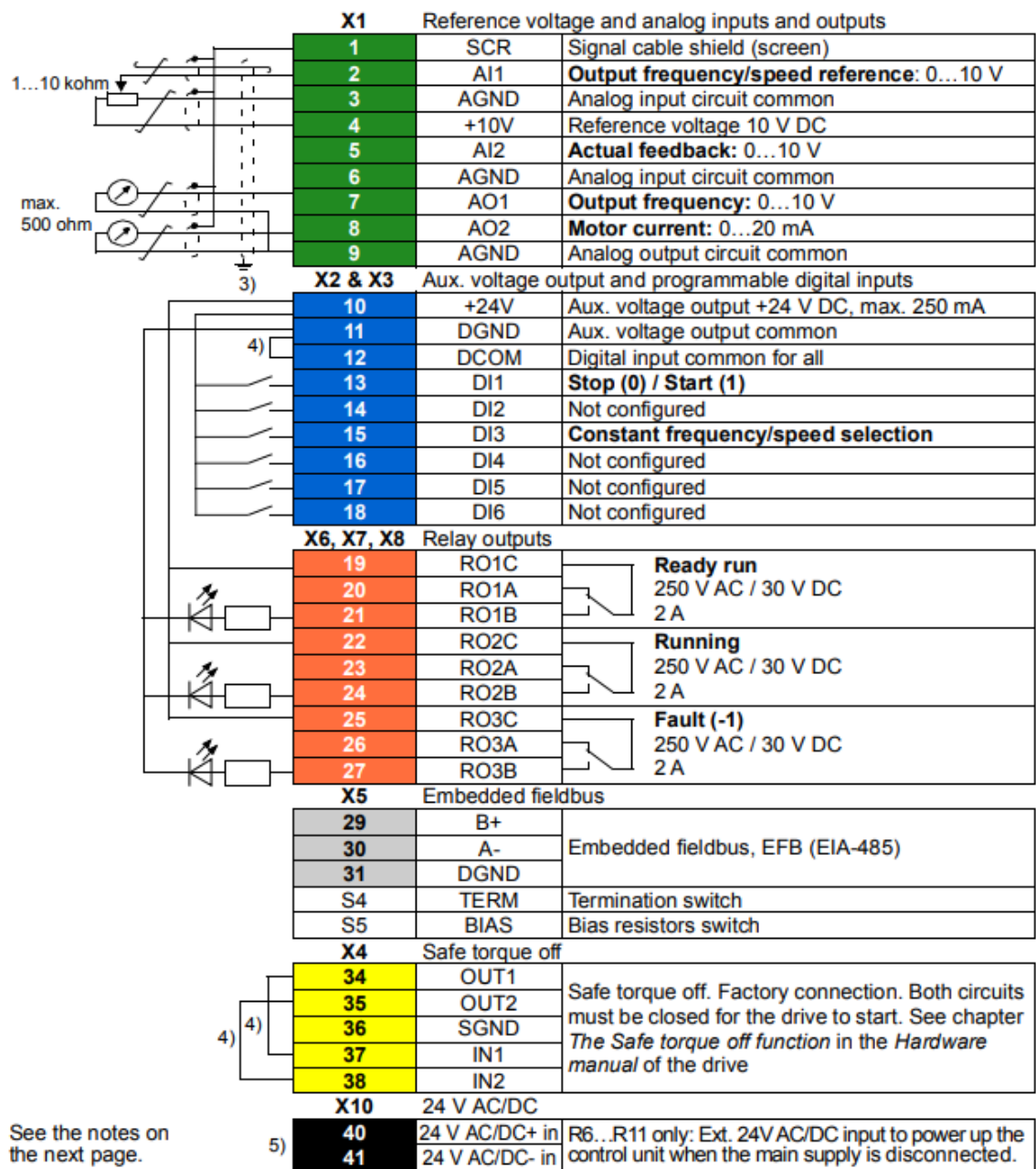
Koestamon vesijäähdytysjärjestelmän pumppujen pyörimisnopeuden säädössä on määritettävä, miten taajuusmuuttajaa ohjataan. Taajuusmuuttajalle voidaan välittää tietoa prosessista mm. paine- tai lämpötila-antureita käyttämällä, ja säätää pumppujen pyörimisnopeutta tiedon perusteella.

Vesilinjassa 1 päädyttiin veden lämpötilamittaukseen meno- ja paluuputkissa. Jäähdytysveden tarve riippuu siitä, kuinka paljon veden lämpötila muuttuu, kun se kiertää järjestelmässä. Lämpötilaerosta päätellään, tarvitseeko pumppujen nopeutta ja sitä kautta jäähdytystehoa, lisätä vai vähentää. Lämpötilaeron kasvaessa nopeutta lisätään ja vastaavasti eron pienentyessä nopeutta vähennetään. Veden on myös kierrettävä järjestelmässä koko ajan, että lämpötilamittaus toimii.

Vesilinjassa 2 käytetään painemittausta, jolla pyritään pitämään tietty vakiopaine putkistossa. Paine muuttuu, kun esimerkiksi venttiili koestamossa avataan tai suljetaan. Paineen muuttuessa taajuusmuuttaja säätää pumpun nopeutta ja pyrkii pitämään vakiopaineen putkistossa.

Taajuusmuuttajan ohjausliittymä

Taajuusmuuttajaa voidaan ohjata paikallisesti (local) tai ulkoisesti (external). Paikallisohjausta käytetään kuitenkin yleensä vain käyttöönoton tai huollon aikana. Ulkoisessa ohjauksessa taajuusmuuttajaa ohjataan ohjausliittymän tulo- ja lähtöliittimien (I/O-liittimien) sekä kenttäväyläliitännän kautta. (Firmware manual 2017: 38–39.) Kuvassa 12 on esitetty ohjausliittymän kytkennät.



Kuva 12. ACQ580-taajuusmuuttajan ohjausliittymän oletusarvoiset kytkennät. (Firmware manual 2017: 34.)

Ohjausliittymän analogiatuloja (A1 ja A2) ja -lähtöjä (AO1 ja AO2) voidaan muuttaa jännite- tai virtakäyttöisiksi. Signaaleiksi voidaan asettaa 0/2–10 V tai 0/4–20 mA. (Firmware manual 2017: 46.)

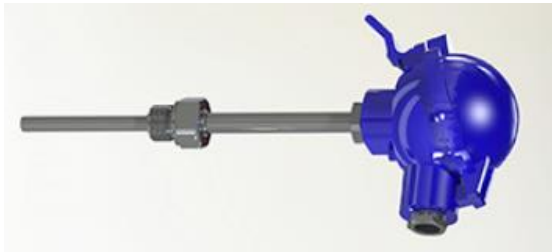
Digitaalitulot (D1–D6) ja ohjelmoitavat relelähdöt (RO1–RO3) voidaan ohjelmoida vapaasti. Digitaalituloille voidaan määrittää eri toimintoja kuten käynti- ja pysäytyskäsky.

Relelähdöt voivat ilmaista taajuusmuuttajan tilaa toimimalla esimerkiksi silloin, kun laite käy tai laitteeseen tulee vika. (Firmware manual 2017: 46.)

Kenttäväyläliitännällä EFB (Embedded fieldbus) taajuusmuuttaja voidaan kytkeä erilaisiin automaatiojärjestelmiin. Taajuusmuuttajat voidaan myös kytkeä toisiinsa kenttäväyläliitännän kautta. (Firmware manual 2017: 46, 60.)

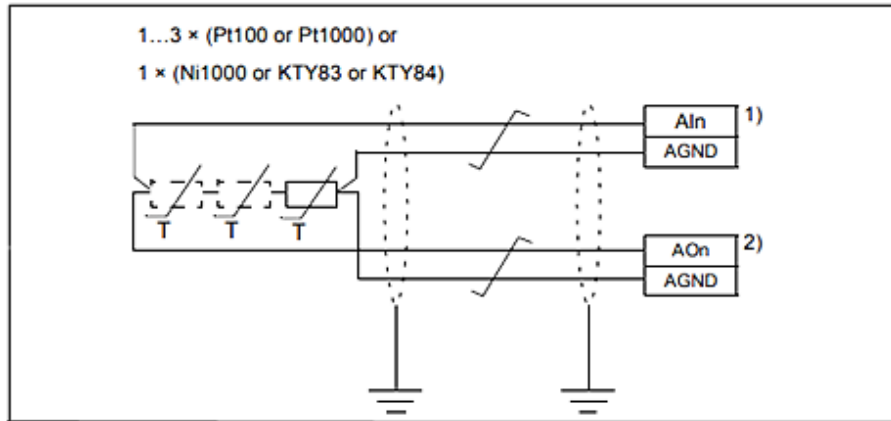
Mitta-anturit

Teollisuudessa yleisesti käytetty lämpötila-anturi on Pt100-anturi. Anturin toiminta perustuu vastusmittausperiaatteeseen, eli anturin vastuksen resistanssi kasvaa lämpötilan noustessa. Vastuksen materiaalina käytetään platinaa ja vastuksen arvo on $100\ \Omega$ lämpötilassa $0\ ^\circ\text{C}$. Vastus kasvaa $0,39\ \Omega$ lämpötilan noustessa yhden asteen. (Miten Pt100-anturi toimii? 2018.) Kuvassa 13 on vesiputkeen liitettävä Pt100-anturi.



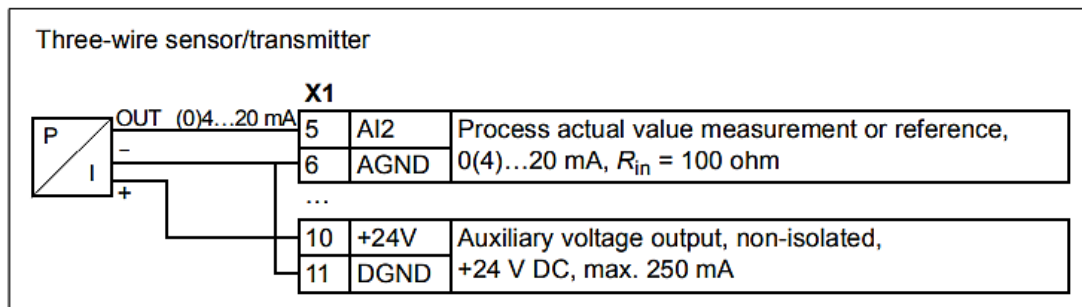
Kuva 13. Vesiputkeen kierteellä asennettava Pt100-anturi (Kierrettävä lämpötila-anturi kaulaputkella 2018).

Taajuusmuuttajaan voidaan kytkeä Pt100-anturi analogiatulon ja -lähdön väliin. Analogiatulosta syötetään herätevirtaa anturille. Kun anturin resistanssi kasvaa, myös jännite anturin yli kasvaa. Taajuusmuuttaja lukee jännitetiedon anturilta. (Firmware manual 2017: 86.) Anturin kytkentä on esitetty kuvassa 14.



Kuva 14. Pt100-anturin kytkentä taajuusmuuttajaan (Hardware manual 2016: 106).

Paineanturilla voidaan mitata painetta ja välittää tieto sähköisenä signaalina eteenpäin (Paineanturit 2018). Tarvittavan paineanturin mitta-alue on 0–10 baaria. Paineanturi voidaan kytkeä analogiatuloon, ja anturin tarvitsema syöttöjännite saadaan taajuusmuuttajan apujännitelähdöstä. Anturin lähettämän virtatiedon tulee olla 4–20 mA. (Hardware manual 2016: 104.) Anturin kytkentä on esitetty kuvassa 15.



Kuva 15. Anturin 3-johdinkytkentä taajuusmuuttajaan (Hardware manual 2016: 104).

6.2 Taajuusmuuttajan parametrit

Taajuusmuuttaja otetaan käyttöön asettamalla parametrit. Parametrilla tarkoitetaan säädettävissä olevaa taajuusmuuttajan toimintaohjetta. Parametointiin käytettiin ABB:n Drive composer -PC-ohjelmaa ja ACQ580-demotaajuusmuuttajaa. Demotaajuusmuuttajalla pystytään testaamaan, miten asetetut parametrit vaikuttavat esimerkiksi PID-säätimen toimintaan.

Ulkoinen ohjaus ja moottorin tiedot

Taajuusmuuttajan ulkoisen ohjeen lähteeksi valitaan ulkoinen ohjauspaikka Ext2 parametriryhmästä 19 *Operation mode*. Ryhmästä 20 *Start/stop/direction* asetetaan digitaalitulo DI1 käynnistys- ja pysäytyskomentojen lähteeksi ulkoisessa ohjauspaikassa. Ryhmästä 22 *Speed reference selection* valitaan ohjauspaikalle Ext2 nopeusohjeen lähteeksi PID-säädin. (Firmware manual 2017: 141–145, 155). Parametrit on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Ulkoisen ohjauksen parametrit kaikkiin taajuusmuuttajiin.

Parametrinro	Nimi	Arvo
19.11	Ext1/Ext2 selection	EXT2
20.06	Ext2 commands	In1 start
20.08	Ext2 in1 source	DI1
22.18	Ext2 speed ref1	PID

Moottorien tiedot syötetään parametriryhmään 99 *Motor data*. Moottorin ohjaustavaksi voidaan valita joko skalaari- tai vektorisäätö. (Firmware manual 2017: 292–294.) Taulukoissa 3 ja 4 on esitetty taajuusmuuttajien moottoriparametrit.

Taulukko 3. Taajuusmuuttajien 1 ja 2 moottoriparametrit.

Parametrinro	Nimi	Arvo
99.04	Motor control mode	Vector
99.06	Motor nominal current	7,3 A
99.07	Motor nominal voltage	400 V
99.08	Motor nominal frequency	50 Hz
99.09	Motor nominal speed	2920 rpm
99.10	Motor nominal power	4 kW
99.11	Motor nominal cosΦ	0,89

Taulukko 4. Taajuusmuuttajan 3 moottoriparametrit.

Parametrinro	Nimi	Arvo
99.04	Motor control mode	Vector
99.06	Motor nominal current	53 A
99.07	Motor nominal voltage	400 V
99.08	Motor nominal frequency	50 Hz
99.09	Motor nominal speed	2957 rpm
99.10	Motor nominal power	30 kW
99.11	Motor nominal cos Φ	0,89

Mitta-anturit

Taajuusmuuttaja 1 parametroidaan Pt100-anturien kytkemistä varten. Riittää, että vain toiseen taajuusmuuttajaan kytketään Pt100-anturit, koska laitteet yhdistetään toisiinsa kenttäylän kautta. Parametriryhmästä 12 *Standard AI* valitaan analogiatuloille yksiköksi voltti. Analogialähdöt asetetaan syöttämään herätevirtaa anturille ryhmästä 13 *Standard AO*. Ryhmästä 35 *Motor thermal protection* valitaan lämpötilalähteiksi Pt100-anturit. (Firmware manual 2017: 125–132, 199–202.) Taulukossa 5 on esitetty muutetut parametrit.

Taulukko 5. Taajuusmuuttajan 1 parametrit Pt100-antureille.

Parametrinro	Nimi	Arvo
12.15	AI1 unit selection	V
12.25	AI2 unit selection	V
13.12	AO1 source	Temp sensor 1 excitation
13.22	AO2 source	Temp sensor 2 excitation
35.11	Temperature 1 source	1 x Pt100 analog I/O
35.21	Temperature 2 source	1 x Pt100 analog I/O

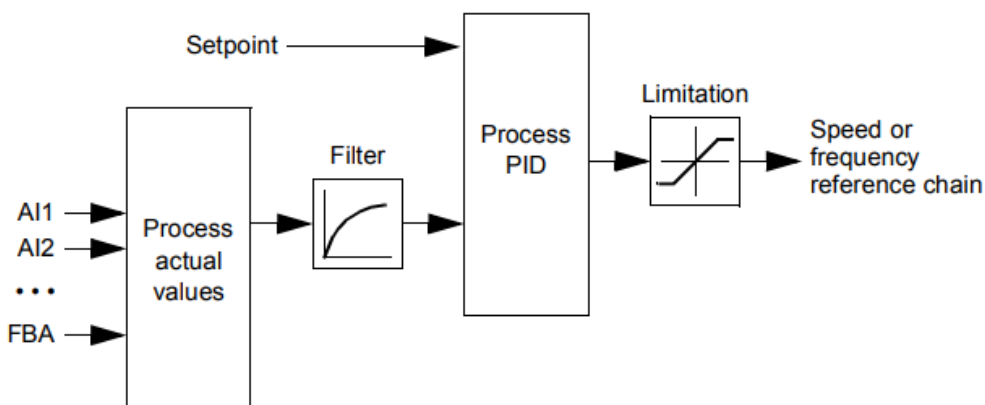
Taajuusmuuttajan 3 analogiatulo AI1 on asetettava milliampeeritiedoksi paineanturia varten. Minimiarvoksi asetetaan 4 mA ja maksimiksi 20 mA. Lisäksi analogiatulo skaalataan 0–10 baariin, eli anturilta tuleva 4 mA:n virtatieto on 0 baaria ja 20 mA:n 10 baaria. (Firmware manual 2017: 125–126.) Taulukossa 6 on esitetty parametrit anturin kytkemiselle.

Taulukko 6. Taajuusmuuttajan 3 parametrit paineanturille.

Parametrinro	Nimi	Arvo
12.15	AI1 unit selection	mA
12.17	AI1 min	4 mA
12.18	AI1 max	20 mA
12.19	AI1 scaled at AI1 min	0 (bar)
12.20	AI1 scaled at AI1 max	10 (bar)

PID-säädin

PID-säädintä voidaan käyttää prosessimuuttujien, kuten paineen tai virtauksen, ohjaimiseen. PID-säädössä taajuusmuuttajaan kytketään prosessin ohjearvo (setpoint) ja oloarvo (feedback). PID-säädin ohjaa taajuusmuuttajan nopeutta, ja se pyrkii pitämään prosessin oloarvon ohjearvon määrittämällä tasolla. (Firmware manual 2017: 57.) Kuvassa 16 on esitetty PID-säätimen yksinkertaistettu lohkokaavio.



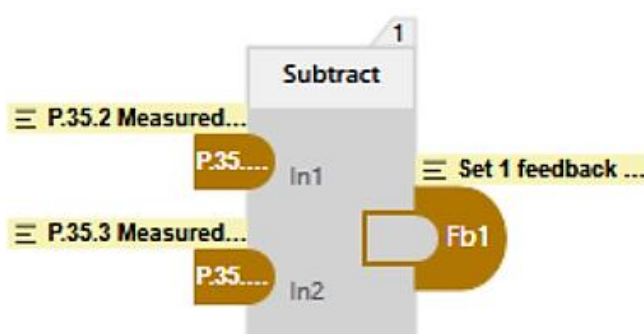
Kuva 16. PID-säätimen yksinkertaistettu lohkokaavio (Firmware manual 2017: 57).

PID-säädin konfiguroidaan parametriryhmästä 40 *Process PID set 1*. Säätimelle asetetaan:

- oloarvon lähde (Set 1 feedback 1 source)
- oloarvo (Set 1 internal setpoint 1)
- oloarvon minimi- ja maksimirajat (Set 1 setpoint min, Set 1 setpoint max)
- lähdön minimi- ja maksimirajat (Set 1 output min, Set 1 output max), joilla voidaan rajoittaa moottorin käyttöaluetta.

Taajuusmuuttajien 1 ja 2 PID-säätimien kanssa käytetään lisäksi adaptiivista ohjelmointia (Adaptive programming). Adaptiivisella ohjelmoinnilla voidaan laajemmin mukauttaa taajuusmuuttajan toimintaa. Ohjelmointiin käytetään Drive composer -PC-ohjelmaa. (Firmware manual 2017: 43.)

Adaptiivisella ohjelmalla luotiin toimintalohko, joka laskee tulevien signaalien erotuksen ja lähettää sen haluttuun sijaintiin. Tulosignaalit ovat parametrit 35.02 *Measured temperature 1* ja 35.03 *Measured temperature 2*, eli Pt100-antureiden mittaamat lämpötilat. Laskettu lämpötilaero lähetetään PID-säätimen oloarvoksi (*Set 1 feedback 1 source*). Toimintalohko on esitetty kuvassa 17.



Kuva 17. Adaptiivisella ohjelmoinnilla luotu toimintalohko.

Vesilinjassa 1 veden lämpötilaero ilman jäädytettävien laitteiden kuormitusta on noin 2 astetta. Isolla kuormituksella lämpötilaero on noin 10 astetta. Tämän perusteella päädyttiin siihen, että PID-säätimen ohjearvoksi asetetaan 5 astetta sekä minimi- ja maksimirajoiksi 0–10 astetta. Oloarvon lähteeksi asetetaan rakennettu toimintalohko. Asetetaan lähdön minimirajaksi 1500 rpm ja maksimiksi 2920 rpm eli moottorin nimellisaika. PID-säätimen parametrit on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Taajuusmuuttajien 1 ja 2 PID-säätimen parametrit.

Parametrinro	Nimi	Arvo
40.08	Set 1 feedback 1 source	Adaptive program
40.10	Set 1 feedback function	ln1
40.21	Set 1 internal setpoint 1	5 (°C)
40.26	Set 1 setpoint min	0 (°C)
20.27	Set 1 setpoint max	10 (°C)
40.36	Set 1 output min	1500 rpm
40.37	Set 1 output max	2920 rpm

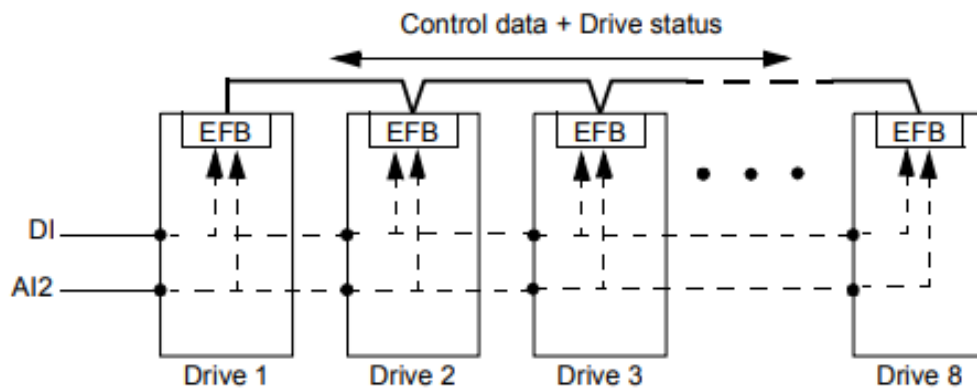
Vesilinjassa 2 maksimipaine on 10 baaria. Paineen halutaan koestamossa olevan noin 8 baaria, mutta paineanturin ja koestamon välillä paine laskee jonkin verran. Tämän perusteella asetetaan PID-säätimen ohjearvoksi 9 baaria sekä minimi- ja maksimirajoiksi 6–10 baaria. Oloarvon lähteeksi asetetaan paineanturi, eli analogiatulo AI1. Asetetaan lähdön minimirajaksi 1250 rpm ja maksimiksi 2957 rpm. Parametrit on esitetty taulukossa 8.

Taulukko 8. Taajuusmuuttajan 3 PID-säätimen parametrit.

Parametrinro	Nimi	Arvo
40.08	Set 1 feedback 1 source	AI1 scaled
40.10	Set 1 feedback function	ln1
40.21	Set 1 internal setpoint 1	9 (bar)
40.26	Set 1 setpoint min	6 (bar)
20.27	Set 1 setpoint max	10 (bar)
40.36	Set 1 output min	1250 rpm
40.37	Set 1 output max	2957 rpm

Monipumppuohjelma

Monipumppuohjelmalla (IPC Intelligent Pump Control) voidaan ohjata usean pumpun järjestelmiä. Ohjelma kasvattaa ensin yhden pumpun nopeutta ja jos nopeus ei ole riittävä, käynnistetään uusi pumppu. Ensimmäisen pumpun nopeutta vähennetään vastaavasti, jotta veden virtaus on tasaista. Taajuusmuuttajat kytketään toisiinsa kenttäväyläliitäntän (EFB) kautta. (Firmware manual 2017: 60.) Kuvassa 18 on esitetty monipumppuohjelman periaatekuva.



Kuva 18. Monipumppuohjelman periaatekuva. Käyntikäsky tulee digitaalitulosta ja prosessitieto analogiatulosta (Firmware manual 2017: 60).

Monipumppuohjelma konfiguroidaan parametriryhmästä 76 *Multipump configuration*. Ohjelmalle asetetaan järjestelmän moottorien määrä (number of motors), suurin sallittu samanaikaisesti päällä olevien moottorien määrä (max number of motors allowed) sekä moottorien käynnistys- ja pysäytysnopeudet. Käynnistyspisteen (start point) ylittyessä uusi moottori käynnistetään. Pysäytyspiste (stop point) vastaavasti määrittää, milloin moottori pysäytetään. (Firmware manual 2017: 256–260.) Taulukossa 9 on esitetty monipumppuohjelman parametrit.

Taulukko 9. Taajuusmuuttajien 1 ja 2 monipumppuohjelman parametrit.

Parametri nro.	Nimi	Arvo
76.21	Multipump configuration	IPC
76.25	Number of motors	2
76.27	Max number of motors allowed	2
76.30	Start point 1	2900 rpm
76.41	Stop point 1	2400 rpm

7 Laitteiston komponentit, suojaus ja piirikaaviot

Laitteiston suunnittelussa, komponenttien valinnassa ja suojauksessa pitää noudattaa voimassa olevia standardeja ja valmistajan ohjeita.

Standardi SFS-EN 60204-1 *Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: yleiset vaatimukset* esittää koneiden sähkölaitteistoille vaatimuksia ja suosituksia. Koneen sähkölaitteisto koostuu mm. sähkömoottorista, kaapeleista sekä suojaus- ja muista komponenteista. (SFS-EN 60204-1 2006: 16–18.)

Kaapelien valinnassa ja asennuksessa pitää noudattaa standardia SFS 6000-5-52 *Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät*. Standardissa esitetään erilaisia asennustapoja, johtimien suurimpia sallittuja kuormitettavuuksia ja korjauskertoimia kaapeliryhmille ja ympäristön lämpötiloille. (SFS 6000-5-52 2017.)

Standardi SFS 6000-4-41 *Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta* käsittelee sähköiskulta suojaamista sähköasennuksissa. Suojausmenetelmä voi koostua perussuojauksesta ja erillisestä vikasuojauksesta, kuten syötön automaattisesta poiskytkennästä. (SFS 6000-4-41 2017.)

Standardi SFS 6000-4-43 *Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus* määrittää, miten johtimet suojataan ylivirran vaikutuksilta. Äärijohtimet voidaan suojata ylikuormitukselta ja oikosululta syötön automaattisesti poiskytkevällä suojalaitteella. (SFS 6000-4-43 2017.)

7.1 Taajuusmuuttajan ohituskytkentä

Taajuusmuuttaja voi heikentää sähkömoottorikäytön luotettavuutta, koska se saattaa olla herkempi vikaantumiselle tai häiriöille kuin moottorin käyttö suoraan sähköverkosta.

Koestamon vesijäähdytysjärjestelmä on tärkeä tuotannolle, joten käyttökatkoksen haitta on suuri. Järjestelmän varma toiminta voidaan taata ohituskytkennällä. Taajuusmuuttajille 1 ja 2 rakennetaan ohituskytkennät, joilla käytetään tarvittaessa moottoreita DOL-

käyttönä. Taajuusmuuttajalle 3 rakennetaan ohituskytkentä, jossa jätetään käytössä oleva pehmokäynnistin paikalleen.

7.2 Kaapeleiden valinta ja mitoitus

Taajuusmuuttajan ja moottorin syöttökaapeliksi sopii symmetrisesti suojattu kolmijohdin-kaapeli, jolla on konsentrinen suojajohdin. Moottorikaapelin tulee olla lisäksi EMC-häiriö-suojattu. (Hardware manual 2016: 60.)

Taajuusmuuttajan syöttökaapelina voidaan käyttää MCMK-kaapelia. Kaapelin rakenne on Prysmian Groupin (2017a) mukaan seuraava:

- johdin: yksi- tai muutamalankainen kuparijohdin
- eristys: PVC-muovi
- konsentrinen johdin: kuparilankakerros ja kuparivastakierre
- ulkovaippa: PVC-muovi.

Moottorikaapeliksi sopii MCCMK-kaapeli. Kaapelissa on samankaltainen rakenne kuin MCMK:ssa, ja se on lisäksi EMC-häiriösuojattu (Prysmian Group 2017b).

Syöttökaapelit mitoitetaan standardin SFS 6000-5-52 (2017) liitteen 52B mukaan. Kaapelia mitoitettaessa on tiedettävä ympäristön lämpötila, asennustapa ja kuormitettujen piirien lukumäärä.

Mitoitetaan ensin syöttökaapelit laitteistoille 1 ja 2. Seuraavassa luetellaan kohteessa olevat asennusolosuhteet:

- ympäristön lämpötila: 30 °C
- asennustavat: B2 ja E
- ryhmässä olevien kaapelien lukumäärä: 9
- kaapelitikkaiden lukumäärä: 2.

Ympäristön lämpötilan korjauskerroin on standardin SFS 6000-5-52 (2017: 50) taulukon B52.14 mukaan 1,00. Standardin taulukosta B.52.20 (s. 56) katsotaan kaapelitikkaiden ja kaapelien lukumäärälle korjauskertoimeksi 0,73.

Lasketaan kaapelin vaadittu kuormitettavuus moottorin nimellisvirralla:

$$k = \frac{I_N}{0,73} = \frac{7,3 A}{0,73} = 10 A$$

Standardin SFS 6000-5-52 (2017: 46) taulukosta B.52.10 nähdään, että kuormitettavuutta vastaavan johtimien nimellispoikkipinnan tulee olla vähintään 1,5 mm².

Kaapelin putkessa oleva osuus katsotaan standardin SFS 6000-5-52 (2017: 40) taulukosta B.52.4. Korjauskerrointa ei tarvita, koska kaapeli on putkessa yksin. Kuormitettavuutta vastaavan johtimien poikkipinnan tulee olla vähintään 1,5 mm². Valitaan kuitenkin 2,5 mm²:n poikkipinta, koska se kestää paremmin moottorin käynnistysvirran suorakäynnistyksessä.

Mitoitetaan laitteiston 3 syöttökaapelit seuraaviin asennusolosuhteisiin:

- ympäristön lämpötila: 40 °C
- asennustapa: E
- kaapelien lukumäärä: 9.

Kaapelien lukumäärän korjauskerroin on standardin SFS 6000-5-52 (2017: 56) taulukon B.52.20 mukaan 0,78 ja lämpötilan korjauskerroin taulukon B52.14 (s. 50) mukaan 0,87.

Kuormitettavuudeksi saadaan:

$$k = \frac{I_N}{0,73} = \frac{53 A}{0,78 \cdot 0,87} = 78 A$$

Standardin SFS 6000-5-52 (2017: 46) taulukosta B.52.10 nähdään, että kuormitettavuutta vastaavan johtimien nimellispoikkipinnan tulee olla vähintään 16 mm². Valitaan kuitenkin 25 mm²:n poikkipinta, koska 78 A on hyvin lähellä 16 mm²:n poikkipinnan maksimikuormitettavuutta.

Taulukossa 10 on esitetty mitoitettut syöttökaapelit ja niiden pituudet.

Taulukko 10. Valitut syöttökaapelit.

Kohde	Tyyppi	Pituus (m)
Taajuusmuuttajien 1 ja 2 syöttökaapelit	3 x 2,5 + 2,5 MCMK	3
Moottorien 1 ja 2 syöttökaapelit	3 x 2,5 + 2,5 MCCMK	20
Taajuusmuuttajan 3 syöttökaapeli	3 x 25 + 16 MCMK	10
Moottorin 3 syöttökaapeli	3 x 25 + 16 MCCMK	70

7.3 Syötön erotus- ja ohjauslaitteet

Koneiden sähkölaitteiston jokaisessa syötössä on oltava syötönerotuskytkin, jolla voidaan tarvittaessa erottaa koneen sähkölaitteisto syöttöverkosta. Odottamattomalta käynnistymiseltä suojaukseen esimerkiksi huollon ajaksi, on myös oltava tarvittavat kytkinlaitteet. (SFS-EN 60204-1 2006: 50–54.)

Syötönerotuslaitteena voidaan käyttää kytkinvaroketta. Kytkinvarokkeessa on yhdistetty kuormakytkin ja varokealusta sulakkeille. Kuormakytkin on käsin ohjattava laite, jota voidaan käyttää kytkimenä ja erotuslaitteena. Kuormakytken pitää pystyä kytkemään ja katkaisemaan piirissä esiintyvät virrat. Moottorikuormituksilla ja induktiivisten kuormitusten kanssa käytetään AC-23-käyttöluokan kytkintä. (Mäkinen & Kallio 2004: 119.)

Odottamattoman käynnistymisen estolaitteena käytetään lukittavaa turvakytkintä moottorin läheisyydessä. Turvakytkin on kuormakytkin, jonka sulkeutuminen voidaan estää luotettavasti (Mäkinen & Kallio 2004: 118).

Moottorin syötönohjaukseen DOL-käytössä käytetään kontaktoria. Kontaktori on päävirrapiiriin sijoitettava sähkömekaaninen kytkin. Kontaktori on toiminnaltaan samanlainen kuin rele, mutta kontaktoria käytetään kuitenkin ohjaamaan pääjännitteitä ja suuria virtoja. Moottorikuormituksilla käytetään yleensä AC-3-käyttöluokan kontaktoreita. (Mäkinen & Kallio 2004: 122)

7.4 Laitteiston suojaus

Standardin SFS-EN 60204-1 mukaan laitteisto on suojattava epäsuoralta kosketukselta jännitteisten osien ja jännitteelle alttiiden kosketeltavien osien välillä tapahtuvan eristysvian sattuessa. Suojaus voidaan toteuttaa syötön automaattisella poiskytkennällä. Laitteisto on myös suojattava oikosulun ja ylikuormituksen aiheuttamalta ylivirralla. Jokaisessa jännitteisessä johtimessa on oltava ylivirran katkaisulaitteet. (SFS-EN 60204-1 2006: 58-60, 64–66.)

Taajuusmuuttaja suojaa moottoria ja moottorikaapelia oikosululta, mutta taajuusmuuttaja ja sen syöttökaapeli on suojattava suojalaitteella (Hardware manual 2016: 66–67). Kuitenkin ohituskytkennässä myös moottori ja moottorikaapeli on suojattava oikosululta suojalaitteella.

Oikosulku- ja vikasuojaus voidaan toteuttaa sulakkeilla. Sulakkeet ovat virtapiiriin asennettavia suojalaitteita, joiden sisällä oleva liuska sulaa ja katkeaa tarpeeksi suurella ylikuormituksella. (Mäkinen & Kallio 2004: 92.)

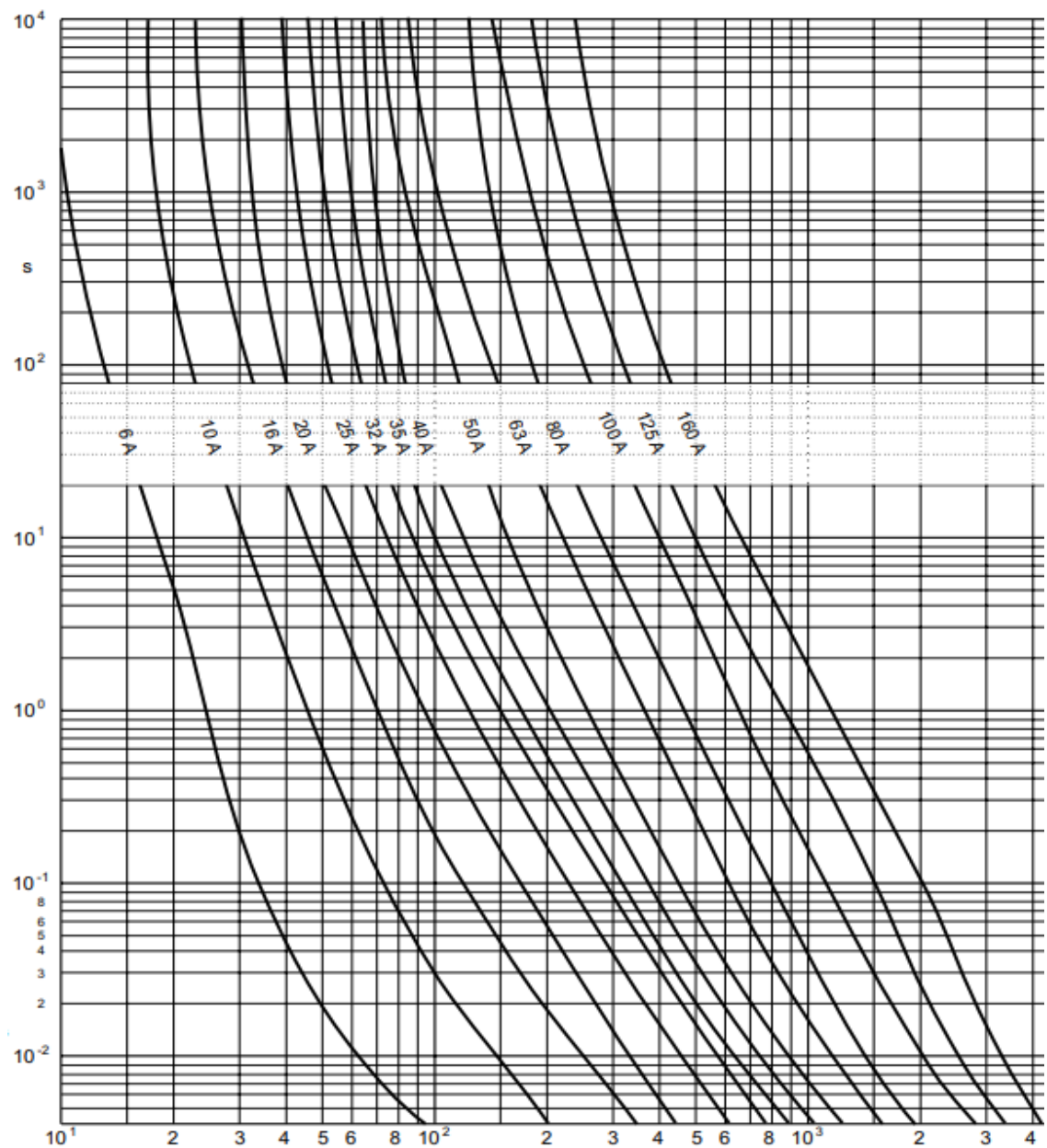
Vikasuojaus

Standardin SFS 6000-4-41 (2017: 8–9) mukaan suurin sallittu poiskytkentäaika vikasuojaukselle on 230 V:n vaihejännitteellä 0,4 s, kun suojalaitteiden mitoitusvirta on korkeintaan 32 A. Mitoitusvirran ylittäessä 32 A on sallittu poiskytkentäaika 5 s. Taajuusmuuttajakäytössä poiskytkentäajan tulee kuitenkin olla korkeintaan 0,5 s (Hardware manual 2016: 147). Taulukossa 11 on esitetty taajuusmuuttajan suojaukseen tarkoitetut suurimmat gG-sulakkeet.

Taulukko 11. Taajuusmuuttajan suojaukseen tarkoitetut suurimmat gG-sulakkeet ja pienimmät oikosulkuvirrat, joilla poiskytkentä toimii 0,5 sekunnissa. Valitut laitteet on merkitty punaisella. (Hardware manual 2016: 147.)

Type ACQ580 -01-	Min. short-circuit current ¹⁾	Input current	gG (IEC 60269)				
			Nominal current	I_t	Voltage rating	ABB type	IEC 60269 size
			A	A	A		
3-phase $U_N = 400$ or 480 V (380...415 V, 440...480 V)							
02A6-4	32	2.6	4	55	500	OFAF000H4	000
03A3-4	48	3.3	6	110	500	OFAF000H6	000
04A0-4	48	4.0	6	110	500	OFAF000H6	000
05A6-4	80	5.6	10	360	500	OFAF000H10	000
07A2-4	80	7.2	10	360	500	OFAF000H10	000
09A4-4	128	9.4	16	740	500	OFAF000H16	000
12A6-4	128	12.6	16	740	500	OFAF000H16	000
017A-4	200	17.0	25	2500	500	OFAF000H25	000
025A-4	256	25.0	32	4000	500	OFAF000H32	000
032A-4	320	32.0	40	7700	500	OFAF000H40	000
038A-4	400	38.0	50	16000	500	OFAF000H50	000
045A-4	500	45.0	63	20100	500	OFAF000H63	000
062A-4	800	62	80	37500	500	OFAF000H80	000

Sulakkeiden pitää kuitenkin myös kestää suorakäynnistyksessä ja pehmokäynnistimellä käynnistettäessä moottorin virta laukeamatta. Moottorien 1 ja 2 nimellisvirta on 7,3 A, joten käynnistysvirta voi olla: $10 * 7,3 A = 73 A$. Moottorin 3 käynnistysvirta pehmokäynnistimellä on noin nelinkertainen. Käynnistysvirta voi siis olla: $4 * 53 A = 212 A$. Kuvassa 19 esitetyissä sulakkeiden toiminta-aikakäyristä nähdään, kuinka kauan gG-sulakkeen toiminta kestää lasketuilla virroilla. 16 A:n sulake kestää 70 A:n virtaa 1 sekunnin, joten on turvallisempaa valita 20 A:n sulake, jonka toiminta-aika on 4 sekuntia. 80 A:n sulakkeen toiminta-aika on 40 sekuntia 200 A:n virralla, mikä on riittävä.



Kuva 19. SIBA gG-sulakkeiden aika-virtä-käyrät. Pystyakselilla aika sekunteina ja vaaka-akselilla virran tehollisarvo ampeereina. (NH-Katalog 2017.)

Suojauksen toimiminen vaatii, että oikosulkuvirta suojalaitteella on riittävän suuri. Kaapelille voidaan laskea suurin sallittu pituus, jolla suojauksen ehdot täyttyvät. Johtopituus / saadaan laskettua D1-kirjan mukaan (2012: 96) yhtälöllä 7:

$$l = \frac{\frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} - z_v}{z_k} \quad (7)$$

c on 0,95

U on pääjännite

I_k on oikosulkuvirta, joka aiheuttaa poiskytkennän vaaditussa ajassa

z_v on suojalaitetta edeltävän verkon impedanssi
 z_k on johtimen impedanssi.

Suojalaitetta edeltävän verkon impedanssi z voidaan laskea D1-kirjan (2012: 95) mukaan yhtälöllä 8:

$$z = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (8)$$

c on 0,95

U on pääjännite

I_k on pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta.

Laitteistojen 1 ja 2 moottorikeskusta syöttävässä keskuksessa on 32 A:n gG-sulakkeet, joten pienin vaadittu oikosulkuvirta 0,4 sekunnin poiskytkentäajalla on D1-kirjan (2012: 94) taulukon 41.5 mukaan 270 A.

Lasketaan edeltävän verkon impedanssi yhtälöllä 8:

$$z_v = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 270 \text{ A}} = 0,81 \Omega$$

Kaapelin likimääräinen impedanssi saadaan D1-kirjan (2012: 96) taulukosta 41.6:

$$z_k = 8,77 \Omega/\text{km}$$

D1-kirjan (2012: 94) taulukon 41.5 mukaan 20 A:n gG-sulake vaatii 145 ampeeria virtaa 0,4 sekunnin toiminta-ajalla. Kaapelin suurin sallittu pituus lasketaan yhtälöllä 7:

$$l = \frac{\frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 145 \text{ A}} - 0,81 \Omega}{2 \cdot 8,77 \Omega/\text{km}} = 40,1 \text{ m}$$

Taajuusmuuttajien 1 ja 2 syöttökaapelien pituus on 3 m ja moottorikaapelien 20 m, joten suojaus toimii.

Laitteistolle 3 lasketaan erikseen kaapelipituudet taajuusmuuttajakäytölle ja ohituskytkennälle. Moottorikeskusta syöttävässä keskuksessa on 160 A:n gG-sulakkeet, joten pienin vaadittu oikosulkuvirta 5 sekunnin poiskytkentäajalla on D1-kirjan (2012: 94) taulukon 41.5 mukaan 950 A. Edeltävän verkon impedanssi on:

$$z_v = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 950 \text{ A}} = 0,23 \Omega$$

Kaapelin likimääräinen impedanssi on D1-kirjan (2012: 96) taulukon 41.6 mukaan:

$$z_k = 0,902 + 1,418 \Omega/\text{km}$$

D1-kirjan (2012: 94) taulukon 41.5 mukaan 80 A:n gG-sulake vaatii 425 ampeeria virtaa 5 sekunnin toiminta-ajalla. 0,5 sekunnin toiminta-ajalla vaaditaan 800 ampeeria taulukon 11 (s. 30) mukaan. Kaapelin suurimmaksi sallituksi pituudeksi taajuusmuuttajakäytössä ja ohituskytkennässä saadaan:

$$l = \frac{\frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 800 \text{ A}} - 0,23 \text{ } \Omega}{0,902 + 1,418 \text{ } \Omega/\text{km}} = 19,1 \text{ m}$$

$$l = \frac{\frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 425 \text{ A}} - 0,23 \text{ } \Omega}{0,902 + 1,418 \text{ } \Omega/\text{km}} = 123,4 \text{ m}$$

Kaapelin pituus on taajuusmuuttajakäytössä 10 m ja ohituskytkennässä 70 m, joten suojaus toimii.

Oikosulkusuojaus

Standardin SFS 6000-4-43 (2017: 12) mukaan missä tahansa virtapiirin kohdassa esiintyvät oikosulkuvirrat on katkaistava ajassa, joka on pienempi kuin aika, jossa johtimet saavuttavat suurimman sallitun lämpötilansa. Enintään 5 sekuntia kestävässä oikosuluissa voidaan yhtälöllä 9 laskea aika t , jossa johtimen lämpötila saavuttaa maksiminsa.

$$t = \left(\frac{k \cdot S}{I} \right)^2 \quad (9)$$

k on kerroin, joka ottaa huomioon johdinmateriaalin resistiivisyyden, lämpötilakertoimen ja lämmönvarauskyvyn sekä sopivat alku- ja loppulämpötilat
 S on johtimen poikkipinta
 I on oikosulkuvirran tehollisarvo.

Kerroin k saadaan standardin SFS 6000-4-43 (2017: 13) taulukosta 43.1.

Tarkistetaan oikosulkusuojaus pienimmällä ja suurimmalla mahdollisella oikosulkuvirralla. Pienin oikosulkuvirta on kaapelin loppupäässä ohituskytkennässä ja suurin kaapelin alkupäässä.

Laitteistojen 1 ja 2 kaapeleiden impedanssi on:

$$z_k = 0,02 \text{ km} * (2 * 8,77 \text{ } \Omega/\text{km}) = 0,35 \text{ } \Omega$$

Suurin oikosulkuvirta kaapelin alkupäässä on 270 A. Lasketaan myös pienin mahdollinen oikosulkuvirta yhtälöllä 8:

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (z_v + z_k)} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0,81 + 0,35) \Omega} = 189,1 \text{ A}$$

Kuvasta 19 (s. 32) nähdään, että sulakkeen toiminta-aika kyseisillä virroilla on alle 0,1 s. Lasketaan yhtälöllä 9 kuinka kauan kestää, että kaapeli saavuttaa maksimilämpötilansa:

$$t = \left(\frac{115 \cdot 2,5 \text{ mm}^2}{189,1 \text{ A}} \right)^2 = 2,3 \text{ s}$$

$$t = \left(\frac{115 \cdot 2,5 \text{ mm}^2}{270 \text{ A}} \right)^2 = 1,5 \text{ s}$$

Kun virran kesto-aika on alle 0,1 s on tarkistettava, että virtaa rajoittavalla laitteella $k^2 S^2$ -arvon on oltava suurempi kuin valmistajan ilmoittama suojalaitteen läpi kulkeva energia It^2 (SFS 6000-4-43 2017: 12).

$$k^2 S^2 = 115^2 \cdot 2,5^2 = 82\,656 \text{ A}^2 \text{s},$$

ja It^2 on valmistajan (NH-katalog 2017) mukaan $760 \text{ A}^2 \text{s}$, joten oikosulkusuojaus toimii.

Laitteiston 3 kaapelin impedanssi on:

$$z_k = 0,07 \text{ km} \cdot (0,902 + 1,418) \Omega/\text{km} = 0,16 \Omega$$

Suurin oikosulkuvirta on 950 A ja pienin:

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (z_v + z_k)} = \frac{0,95 \cdot 400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0,23 + 0,16) \Omega} = 562,5 \text{ A}$$

Kuvan 19 (s. 32) mukaan sulakkeen toiminta-aika kyseisillä virroilla on 0,05 ja 0,5 s. Kaapeli saavuttaa maksimilämpötilansa mukaan ajassa:

$$t = \left(\frac{115 \cdot 25 \text{ mm}^2}{562,5 \text{ A}} \right)^2 = 26,1 \text{ s}$$

$$t = \left(\frac{115 \cdot 25 \text{ mm}^2}{950 \text{ A}} \right)^2 = 9,2 \text{ s}$$

Koska toiminta-aika on alle 0,1 s, tarkistetaan myös k^2S^2 -arvo:

$$k^2S^2 = 115^2 * 25^2 = 82\,656\,kA^2s,$$

ja It^2 on valmistajan (NH-katalog 2017) mukaan 45 500 A²s, joten oikosulkusuojaus toimii.

Ylikuormitussuojaus

Moottorin yllämpenemissuojaus ja syöttökaapelien ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa ylikuormitussuojalla (SFS-EN 60204-1 2006: 70, 188).

Ylikuormitussuojaukseen voidaan käyttää lämpörelettä, joka tarkkailee moottorin verkosta ottamaa virtaa. Moottorin verkosta ottaman virran kasvaessa moottorin käämeissä kulkeva virta kasvaa. Tämä nostaa moottorin käämien lämpötilaa. Lämpörele viritetään niin, että sen mittauselementti lämpenee samalla lailla kuin moottorin käämitys. Kun rele saavuttaa maksimilämpötilansa, se ohjaa kontaktoria, joka katkaisee moottorin syötön. (Aura & Tonteri 1996: 528–529.)

Taajuusmuuttajakäytössä erillistä ylikuormitussuojaa ei tarvita. Taajuusmuuttaja suojaa itseään, moottoria, moottorikaapelia ja syöttökaapelia ylikuormitukselta (Hardware manual 2016: 66–67).

7.5 Laitteiston piirikaaviot

Laitteistojen piirikaavioista saadaan käsitys sähköpiirin komponenttien keskinäisestä vaikutuksesta sekä lisäksi saadaan tietoa fyysisistä liitännöistä. Piirikaaviot esittävät suunnittelu- ja toteutusvaiheessa tarvittavia tietoja hankkeen valmiiksi saattamiseksi, ja ne toimivat myös ylläpidon apuna laitteiston käyttöaikana. (ST-kortti 13.28 2009: 1–2.)

Laitteistot 1 ja 2

Piirikaaviot laitteistoille 1 ja 2 on esitetty liitteessä 1. Laitteistoille rakennetaan uudet keskkukset, joihin saadaan sijoitettua myös ohituskytkennän komponentit. Päävirtapiirit koostuvat seuraavista komponenteista:

- kytkinvaroke Q1
- kuormakytkin Q2
- kontaktori K1
- lämpörele F1
- vaihtokytkin Q3
- turvakytkin Q4.

Laitteistot saadaan erotettua verkosta pääkytkimellä Q1. Vaihtokytkimellä Q3 voidaan valita joko taajuusmuuttaja- tai DOL-käyttö. Vaihtokytkintä käytettäessä pitää taajuusmuuttaja ensin erottaa verkosta kytkimellä Q2. Moottorin syötönohjaukseen käytetään kontaktoria K1 ja ylikuormitussuojana lämpörelettä F1. Kaikki kytkimet pääkytkintä lukuun ottamatta on sijoitettu keskuksen sisään, jotta niitä ei pysty käyttämään ilman tarvittavaa tietoa laitteiston toiminnasta. Moottorin läheisyydessä on myös turvakytkin Q4.

Ohjauspiirillä (piirikaavion oikea puoli) ohjataan päävirtapiiriä. Laitteisto on myös kytketty automaatiojärjestelmään, jolla sen toimintaa voidaan ohjata ja valvoa. Automaatiojärjestelmä on kytketty keskukseseen KK07. Taajuusmuuttajien 1 ja 2 kytkentäkuvasta (liite 2) nähdään taajuusmuuttajien kytkentä automaatiojärjestelmään ja ohjauspiiriin sekä mittantureiden kytkennät. Taajuusmuuttajat on myös kytketty toisiinsa kenttäväylän kautta.

Taajuusmuuttajakäyttö valitaan kytkimen S1 asennolla A. Taajuusmuuttaja käynnistetään automaatiojärjestelmästä, joka ohjaa releitä K2. Rele on kytketty taajuusmuuttajan digitaalitulon D1. Releen vetäessä taajuusmuuttaja saa käyntikäskyn. Käynnistys on estetty, jos taajuusmuuttajakäyttöä ei ole valittu kytkimellä S1 ja vaihtokytkimellä Q3 tai jos turvakytkin Q4 on auki.

DOL-käytössä moottori käynnistetään kytkimen S1 asennolla K. Kontaktorin K1 kela on kytketty ohjauspiiriin, ja kelan tultua jännitteiseksi se ohjaa kontaktorin kiinni. Käynnistys on estetty, jos DOL-käyttöä ei ole valittu vaihtokytkimellä Q3 tai turvakytkin Q4 on auki.

Automaatiojärjestelmä saa myös käy- ja vika-tiedon ohjauspiiristä. Käy- ja vika-tieto on kytketty taajuusmuuttajan relelähtöihin. Käy-tieto kertoo järjestelmälle, että moottori tai taajuusmuuttaja on toiminnassa. Vika-tieto toimii taajuusmuuttajakäytössä taajuusmuuttajan vikaantuessa ja DOL-käytössä lämpöreleen lauetessa.

Laitteisto 3

Piirikaaviot laitteistolle 3 on esitetty liitteessä 3 ja taajuusmuuttajan kytkentäkuva liitteessä 4. Käytössä oleva keskus pidetään ennallaan, ja uusi keskus lisätään ohituskytkennässä tarvittaville komponenteille. Näin asennus voidaan tehdä mahdollisimman pienin muutoksin. Päävirtapiiri (liite 3 s. 1) koostuu seuraavista komponenteista:

- kytkinvaroke Q1
- vaihtokytkin Q2
- kuormakytkin 12Q3
- kontaktori 1K1
- lämpörele 1F2
- vaihtokytkin Q2
- huoltokytkin 1Q1.

Taajuusmuuttajan kytkinvaroke Q1 ja vaihtokytkin Q2 sijoitetaan omaan keskukseen JV-OK3.2. Pehmökäynnistimen kytkentä on keskuksessa JV-OK3. Toimintaperiaate on samanlainen kuin laitteistoilla 1 ja 2.

Laitteisto 3 on myös kytketty automaatiojärjestelmään. Taajuusmuuttaja saa käyntikäskyn automaatiojärjestelmältä. Käynnistys on estetty, jos taajuusmuuttajakäyttöä ei ole valittu kytkimellä 1S1 ja vaihtokytkimellä Q2 tai turvakytkin 1Q1 on auki.

Pehmökäynnistin käynnistetään kytkimen 1S1 asennolla K. Pehmökäynnistin saa käyntikäskyn releeltä 1K3, joka on kytketty ohjauspiiriin. Käynnistys on estetty, jos pehmökäynnistyskäyttöä ei ole valittu vaihtokytkimellä Q2 tai turvakytkin 1Q1 on auki.

Automaatiojärjestelmä saa käy- ja vika-tiedon taajuusmuuttajakäytössä, mutta ei pehmökäynnistinkäytössä.

8 Yhteenveto

Insinööriyön tavoitteena oli suunnitella koestamon vesijäähdytysjärjestelmän pumppujen moottorien muuttaminen taajuusmuuttajakäyttöisiksi. Työ aloitettiin tutustumalla vesijäähdytysjärjestelmään, selvittämällä koestamon vaatimuksia laitteistolle ja tutustumalla taajuusmuuttajien ominaisuuksiin. Varsinaisen suunnittelun perustana olivat koestamon vaatimukset, standardit ja taajuusmuuttajan ohjekirjat.

Työn lopputuloksena saatiin suunnitelma laitteiston kokoonpanosta ja taajuusmuuttajien konfiguraatioista, joiden perusteella asennus pystytään toteuttamaan. Taajuusmuuttajat sekä laitteiston komponentit on hankittu ja asennusta on alettu valmistella. Asennuksen ja käyttöönoton jälkeen voidaan selvittää, kuinka suuri energiansäästö saavutetaan. Käyttöönoton jälkeen voidaan myös arvioida, toimiiko järjestelmä suunnitellusti ja miten sitä voidaan mahdollisesti kehittää. Työtä voidaan hyödyntää vastaavissa pumppuihin ja taajuusmuuttajiin liittyvissä projekteissa. Työstä saatiin käsitys taajuusmuuttajien ominaisuuksista sekä mitta-antureiden avulla ohjattavista prosesseista.

Työn haasteena oli selvittää, miten taajuusmuuttajaa on mahdollista käyttää ja ohjata vesijäähdytysjärjestelmässä. Taajuusmuuttajan ohjekirjoista löytyy kattavat tiedot laitteen toiminnasta ja ominaisuuksista, mutta ilman aiempaa kokemusta on vaikea tietää, miten taajuusmuuttajaa kannattaa käyttää tietyssä prosessissa. Työn tekemistä helpotti huomattavasti se, että taajuusmuuttajan valmistaja kuuluu samaan organisaatioon, johon työ tehtiin. Valmistaja pystyi suosittelemaan sopivaa taajuusmuuttajaa, ja valmistajalta saatiin myös tietoa laitteen ominaisuuksista. Valmistajalta saatiin myös demolaite, josta oli hyötyä taajuusmuuttajan parametroinnissa. Taajuusmuuttajan asennukseen tarvittavien komponenttien, kuten kaapeleiden ja suojalaitteiden, tiedot löytyivät ohjekirjoista. Näiden tietojen perusteella komponenttien valinta oli selkeää.

Työn jatkokehityskohteena on asentaa taajuusmuuttaja myös vesilinjan 2 pumppuun P4. Kahdella pumpulla saataisiin toimintavarmuutta parannettua, koska pumpun ollessa pitkään käyttämättömänä se voi jumiutua, eikä siten välttämättä toimi tarvittaessa.

Lähteet

ABB drives for water and wastewater. ACQ580, 0.75 to 500 kW. 2018. ABB. Verkkoaineisto. <<https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000194172&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>>. Luettu 20.4.2018.

ABB:stä lyhyesti. 2018. ABB. Verkkoaineisto. <<http://new.abb.com/fi/abb-lyhyesti>>. Luettu 24.4.2018.

Aura, Lauri & Tonteri, Antti J. 1996. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY.

D1-2012. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 2012. Espoo: Sähköinfo.

Energiatehokkaat pumput. 2011. Opas energiatehokkaiden pumppujen hankintaan ja pumppausjärjestelmän energiatehokkuuden parantamiseen. Motiva. Verkkoaineisto. <https://www.motiva.fi/files/5343/Energiatehokkaat_pumput.pdf>. Luettu 1.4.2018.

Farin Juho, Peltonen Lasse, Pykälä Marja-Leena & Joutsenvuo-Uski Sanna. 2009. Taa juusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä. Espoo: VTT. Verkkoaineisto. <<http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>>. Luettu 18.4.2018.

Firmware manual. ACQ580 pump control program. 2017. ABB. Verkkoaineisto. <https://library.e.abb.com/public/39344be2b7d64514b94a777fc8664189/AQAD203x_en.pdf>. Luettu 1.4.2018.

Hardware manual. ACQ580-01 drives. 2016. ABB. Verkkoaineisto. <https://library.e.abb.com/public/b119c7559ab944bcb6b0a038927073db/EN_ACQ580-01_HW_A_A5_screen.pdf>. Luettu 1.4.2018.

Hietalahti, Lauri. 2012. Säädetyt sähkömoottorikäytöt. Tampere: Amk-Kustannus.

Kierrettävä lämpötila-anturi kaulaputkella. 2018. SKS Automaatio Oy. Verkkoaineisto. <<http://www.skssensors.fi/tuotteet/lamputila-anturit/2-kierrettava-lamputila-anturi-kaula-putkella/>>. Luettu 1.4.2018.

Miten Pt-100 anturi toimii? 2018. SKS Automaatio Oy. Verkkoaineisto. <<http://www.skssensors.fi/faq/miten-pt100-anturi-toimii/>>. Luettu 1.4.2018.

Mäkinen, Markku J.J. & Kallio, Raimo. 2004. Teollisuuden sähköasennukset. Helsinki: Otava.

NH-Katalog. 2017. SIBA GmbH. Verkkoaineisto. <<http://www.download.siba.de/pdf/artikel/2000013.pdf>>. Luettu 1.4.2018.

Niiranen, Jouko. 2000. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. Helsinki: Otatieto.

Paineanturit. 2018. WIKA Finland Oy. Verkkoaineisto. <https://www.wika.fi/products_pressure_sensors_fi_fi.WIKA>. Luettu 1.4.2018.

Pehmokäynnistinopas. 2011. Helsinki: ABB Oy. Verkkoaineisto. <https://library.e.abb.com/public/d11f99611045fef8c125796e00473a8a/OPAS%20Pehmokaynnistys%20FI12_01.pdf>. Luettu 1.4.2018.

Prysmian Group. 2017a. MCMK 0,6/1 kV. Kosketussuojattu 1 kV voimakaapeli pyöreillä johtimilla. Verkkoaineisto. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20MCMK%201kV%20301017.pdf>. Luettu 18.4.2018.

Prysmian Group. 2017b. MCCMK-HF C-PRo 0,6/1 kV (EMC-Line). Halogeeniton EMC-häiriösuojattu 1 kV voimakaapeli pyöreillä kuparijohtimilla. Verkkoaineisto. <https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/business_markets/markets/downloads/datasheets/cpr%20MCCMK-HF%20C-PRo%20271017.pdf>. Luettu 18.4.2018.

Ravantti, Ari. Taajuusmuuttajat. 2014. Verkkoaineisto. <<http://docplayer.fi/23262203-Ari-ravantti-taajuusmuuttajat-abb-group-november-26-2014-slide-1.html>>. Luettu 24.4.2018.

SFS 6000-4-41. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS 6000-4-43. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

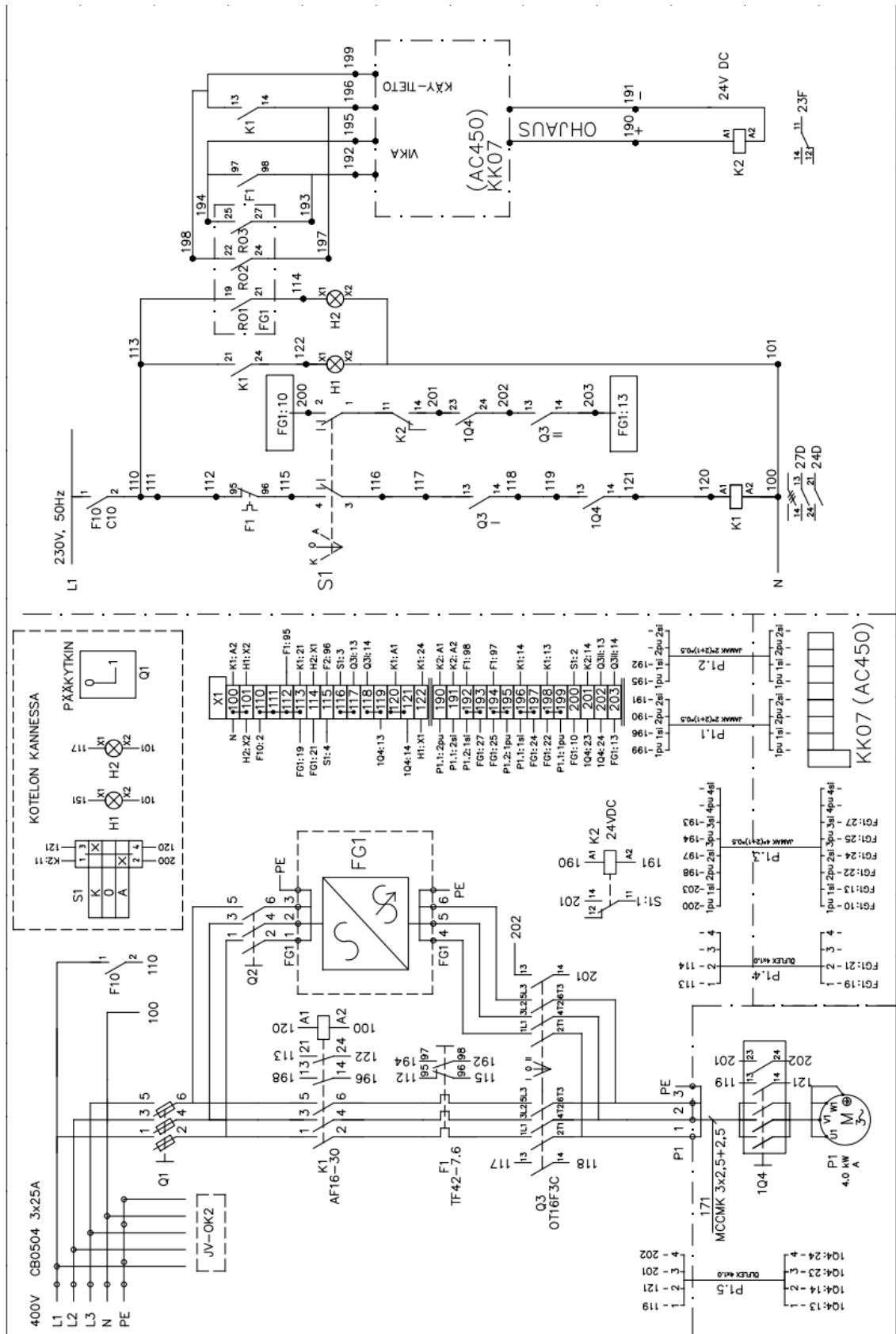
SFS 6000-5-52. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

SFS-EN 60204-1. 2006. Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto.

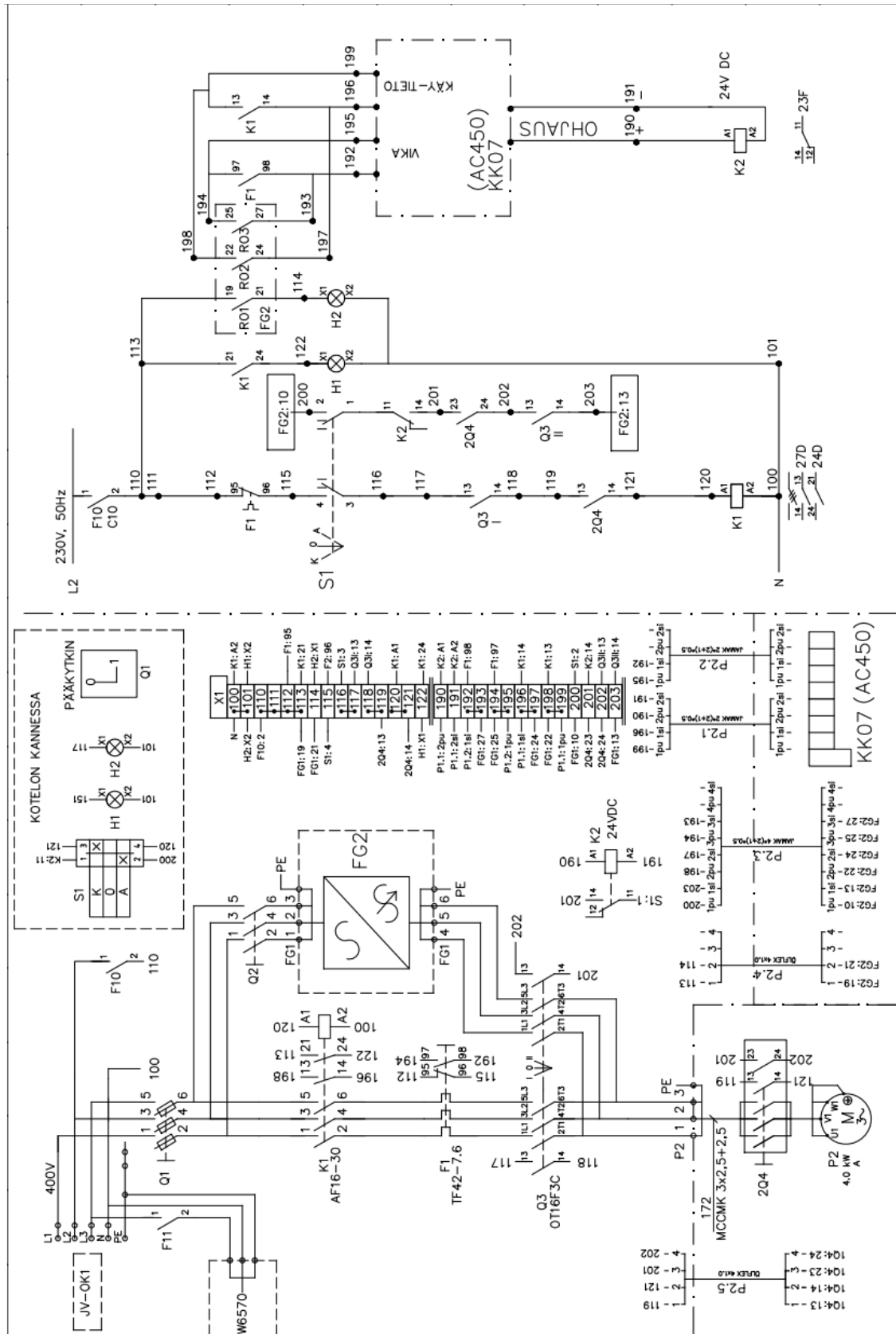
ST-kortti 13.28. 2009. Yleisohjeita sähkö- ja tietoteknisten järjestelmien dokumentoinnista. Espoo: Sähköinfo.

Tekninen opas nro 7. Sähkökäytön mitoitus. 2001. Helsinki: ABB Oy. Verkkoaineisto. <https://library.e.abb.com/public/b11dafa92973be93c1256d2800415027/Tekninen_opasnro7.pdf>. Luettu 1.4.2018.

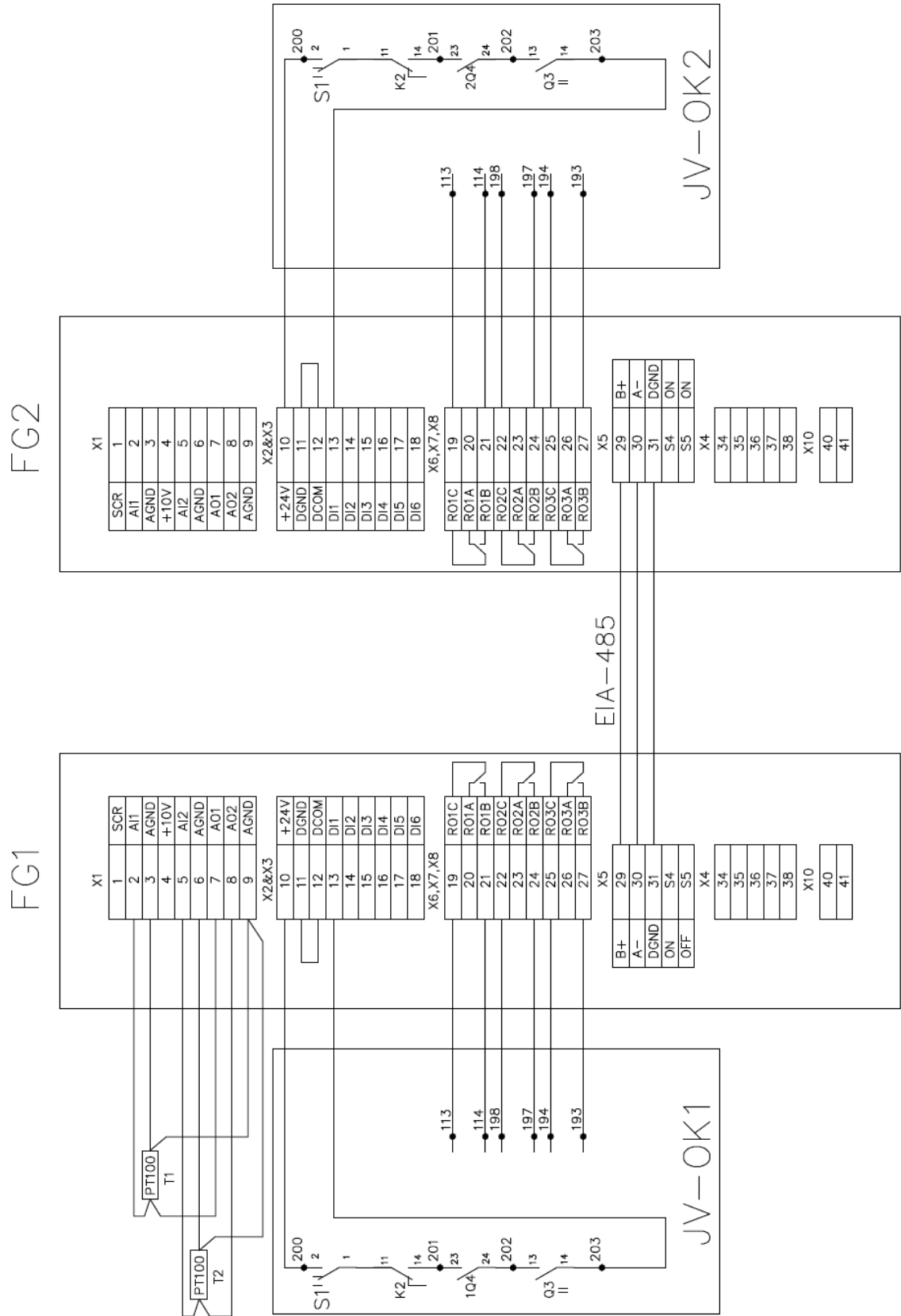
Laitteiston 1 piirikaavio



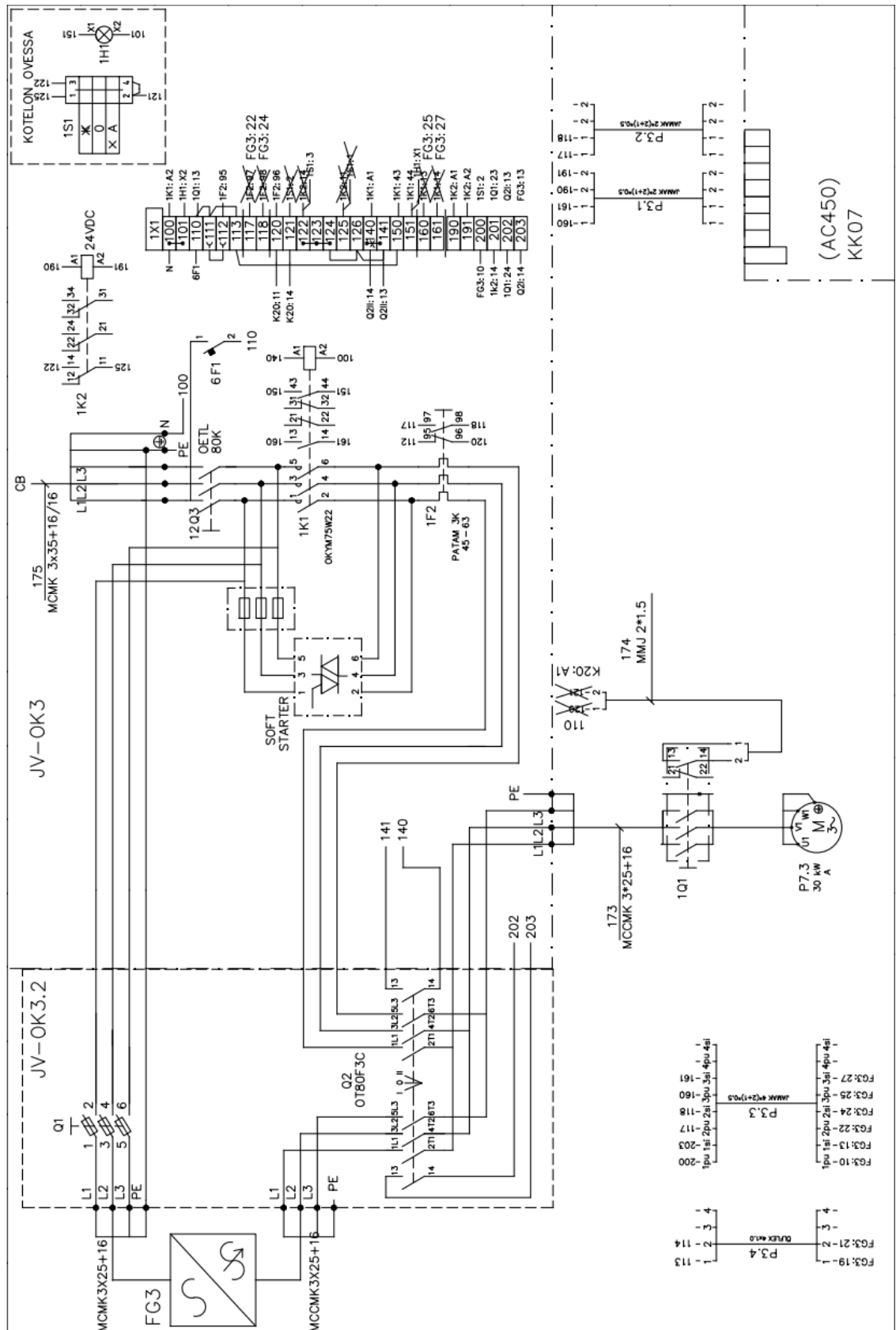
Laitteiston 2 piirikaavio

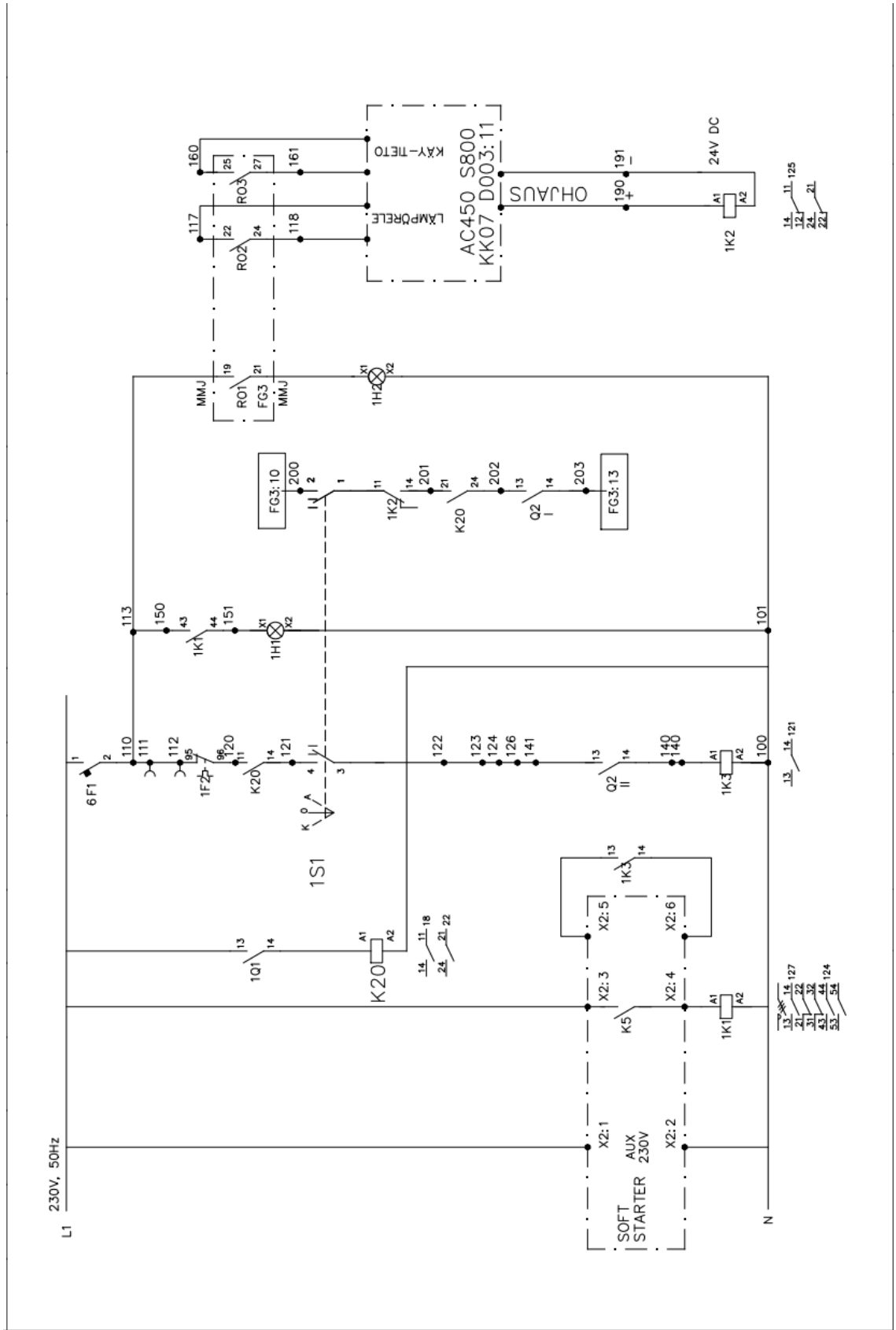


Taajuusmuuttajien 1 ja 2 kytkentäkuva



Laitteiston 3 piirikaaviot





Taajuusmuuttajan 3 kytKentäkuva

