



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

TUOTTEIDEN LOPPUTESTAUSPAIKAN SÄHKÖJAKELUVERKON SUUNNITTELU

Teollisuudessa käytettävät sähköiset tehonlähteet ja
varaajat

Ville-Matti Pölönen

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2016
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

PÖLÖNEN, VILLE-MATTI:

Tuotteiden lopputestauspaikan sähköjakeluverkon suunnittelu
Teollisuudessa käytettävät sähköiset teholähteet ja varaajat

Opinnäytetyö 62 sivua, joista liitteitä 8 sivua
Huhtikuu 2016

Halikossa operoiva Ellego Powertec Oy:n puolelta lähti ajatus opinnäytetyön teosta. Opinnäytetyön avulla yritys saa eri vaihtoehtoja toteutukseen ja tutkia asioita, jotka ovat oleellisia tulevan laajennuksen kannalta sähköisessä mielessä. Opinnäytetyössä keskitytään erityisesti taajuusmuuttajaan ja moottori-generaattoriin.

Yritykseen kaavallaan laajennusta, jossa varsinainen sähkönsyöttö muuttuu kesällä 2016. Liittymäkoko tuplataan kuormakentille ja moottorin syöttö vaihtuu pehmökäynnisteisestä taajuusmuuttajaohjatuksi. Moottorin (250 kW) akseli on liitetty rullaimella generaattoriin. Generaattori välittää edelleen tehoa neljään testikenttään. Generaattori on tällä hetkellä syöttänyt testikentille noin 100 kW pätötehoa ja suunnitteilla olisi, että generaattori syöttäisi moottorilta saatavan lähes maksimaalisen tehon noin 200–220 kW:a. Opinnäytetyöhön kuuluu myös ohjauksen toteutuksen suunnittelu.

Opinnäytetyössä perehdyttiin myös tehtaan sähköjen suunnittelun perusasioihin. Näihin kuuluvat taajuusmuuttajan mitoitus, etäohjauksen toteutus, suojauksen järjestäminen ja näihin liittyvät teoriat sekä mitoituslaskelmat. Erityisesti tutkinnan alla olivat suojauksen järjestäminen ja etäohjauksen toteutus. Mitoitukset tehtiin standardien mukaan ja mahdollisimman tarkasti.

Asiasanat: taajuusmuuttaja, etäohjaus, generaattori, moottori, suojaus

ABSTRACT

Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Power Electrical Engineering

VILLE-MATTI, PÖLÖNEN:

Electrical Distribution Design of the Final Test Areas for Products
In the Industry used Electrical Power Sources and Accumulators

Bachelor's thesis 62 pages, appendices 8 pages
April 2016

This thesis was commissioned by Ellego Powertec which headquarters is in Halikko. The purpose of this thesis is to give a perspective for alternating choices for the doing phase and explore things which are related to an expansion in an electrical sense. AC drive and the motor-generator –combination which supplies the electricity for the test areas, was studied in this thesis.

In the expansion distribution of electricity will be changed. The expansion was planned to be implemented in the summer 2016. The power connection will be doubled and the power supply to the motor will also be changed from a soft starting device to an AC drive. The motor's (250 kW) axel is attached to the generator's axel. The Generator distributes the electricity to four different so called test areas. Today the generator generates power of 100 kW to the test areas, one at a time. Instead of 100 kW the distribution will be round 200-220 kW after the expansion. The remote control planning was also included in this thesis.

Basic knowledge of electrical design was acquired. This includes AC drive's calculated measurements, realization possibilities for the remote control and the protection and dimensioning calculations. The main focus was on the protection and the remote control. The calculations were done according to the standards and as accurately as possible. There was a lot of exploring of the things related to the thesis and re-examining of the old theories.

Key words: AC drive, Remote Control, Generator, Motor, Protection

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	SÄHKÖSUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTA.....	7
	2.1. Nykyinen testipaikka	7
	2.2. Suunnitteilla oleva testipaikkojen jakelu	8
	2.2.1 Relevantit standardit ja säännökset	9
3	KOMPONENTIT JA MITOITUS.....	10
	3.1. Moottori	10
	3.1.1 Keskipakovoima.....	13
	3.2. Taajuusmuuttaja.....	14
	3.2.1 Taajuusmuuttaja tyypit ja käytöt.....	16
	3.2.2 Taajuusmuuttajan valinta	18
	3.2.3 Taajuusmuuttajan verkostovaikutukset.....	22
	3.2.4 Arvioidut häviöt taajuusmuuttajalle.....	23
	3.3. Generaattori	24
	3.4. Kaapelointi ja jännitteenalenema.....	28
4	SUOJAUS	37
	4.1. Moottori	37
	4.1.1 Vaihtoehto 1	37
	4.1.2 Vaihtoehto 2	40
	4.1.3 Vaihtoehto 3	41
	4.2. Generaattori	42
5	OHJAUS.....	47
	5.1. Taajuusmuuttajan ohjaus	47
	5.2. Vacon NXC.....	48
	5.3. Ohjelmoitava logiikka.....	50
6	YHTEENVETO	53
	LÄHTEET.....	54
	LIITTEET	55
	Liite 1. Moottorin pääpiiri	55
	Liite 2. Moottoripiirin ohjauspiiri	56
	Liite 3. Moottoripiiri turvakytkimelle	57
	Liite 4. Moottori pääpiiri	58
	Liite 5. Generaattorin pääpiiri	59
	Liite 6. Generaattorin ohjauspiiri	60
	Liite 7. Ohjausliittimien signaalit	61
	Liite 8. Taajuusmuuttajan ohjaus ohjelmoitavalla logiikalla	62

LYHENTEET JA TERMIT

σ_{mek}	keskipakovoima, F
η	hyötysuhde
ρ	tiheys, kg/m ³
C''	Poissonin luku
<i>EMC</i>	electromagnetic combability, eli sähkömagneettinen yhteensopivuus
<i>IGBT</i>	insulated gate bipolar transistor, eli suuritehoinen bipolaaritransistori, jonka hila on MOSFETin tavoin eristetty
l	pituus, km
<i>MOSFET</i>	metal-oxide-semiconductor field-effect transistor, eli metallioksidi-puolijohdekanavatransistori/eristehilatransistori
<i>PLC</i>	programmable logic controller, eli ohjelmoitava logiikka
r	resistanssi kilometriä kohden, Ω/km
r	roottorin säde, mm
ΔU	jännitteenalenema, V
Δu	jännitteenalenema prosentteina, %
x	reaktanssi kilometriä kohden, Ω/km

1 JOHDANTO

Ajatus opinnäytetyöstä lähti Ellego Powertec Oy:n teknisen päällikön, Terho Kaikuranan, puolesta. Yrityksen puolelta Pekka Huttunen oli paljon mukana työnohjaamisessa ja toiminut varsinaisena työnohjaajana.

Yritykseen on kaavailtu laajennusta, jossa pyritään säilyttämään nykyinen pääliittymä koko. Laajennuksessa sekä pääkeskuksen että sähköjakelijan kaapin paikkaa siirretään, jolloin uusi syöttökaapeli rakennetaan jakelijan kaapilta uudelle keskukselle. Vanha pääkeskus jää alakeskukseksi. Uusi pääkeskus tulee syöttämään siis vanhaa pääkeskusta sekä EVV (eräs yrityksen varaajatyyppe) tuotantolinjan koekenttää. Tarkoituksena työllä on saada vaihtoehtoja toteutuksille, arvioita häviöistä, jakelun suojauksen huomioiminen ja käyttöpaikkojen etäohjauksen toteutus.

Mielestäni tämä oli mielenkiintoinen valinta opinnäytetyöksi, vaikka kohteena oli melko pieni osa koko sähköjakelusta tehtaassa, vaati se silti asiaan perehtymistä ja monien eri asioiden huomioimista. Koen suunnittelun kiinnostavaksi ja opettavaiseksi. Toivon samalla kehittyväni sähkötekniisessä mielessä. Suunnittelu on paljon muutakin kuin pelkkää piirtämistä. 62 sivusta työstä varsinaisia sähkökuvia on noin 8 sivun verran. Pitää omaksua hyvin pitkälti koko projekti ja kokonaisuus ennen kuin voi aloittaa koamaan yksittäisiä asioita yhtenäiseksi suunnitelmaksi.

2 SÄHKÖSUUNNITTELUN LÄHTÖKOHTA

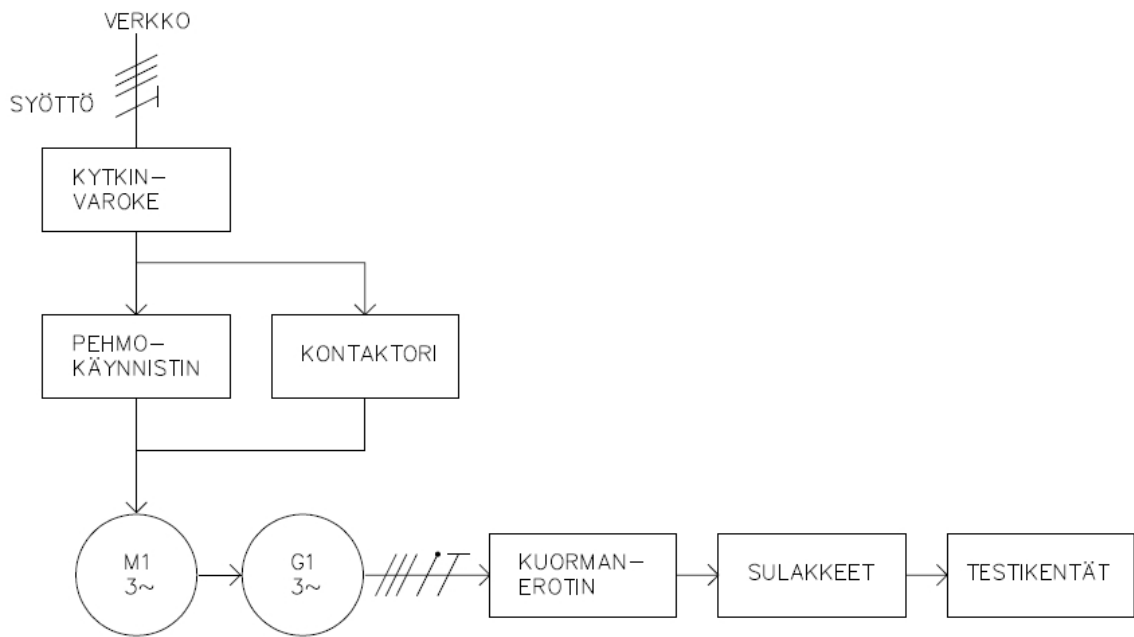
2.1. Nykyinen testipaikka

Tehtaassa on 4 erillistä testipaikkaa/yksikköä, jotka ovat EVV-, lentokenttä-säädin-, tuotekehitys- ja sopimusvalmistusyksikkö. Liittymän syöttö on normaali verkon osalta 400 Vac ja 50 Hz. Jakelu testipaikoille on toteutettu 2 eri tavalla; moottori-generaattorilla (60 Hz) ja normaalilla 3x400 Vac (50 Hz). Näistä ensin mainittu on vaihtoehtoinen. Testaamislaitteiden kuormitus verkolle on luokkaa 100 kW moottori-generaattorilla syötettynä ja suunnitteilla on siis tämän tehon tuplaus. Siinä moottorin akseli on kiinnitetty eräänlaisen välittimen kautta generaattoriin (Kuva 1).



KUVA 1. Moottori-generaattorin kytkentäratkaisu

Kuvan 1 välitin on suhteella 1/1,2, jolloin generaattori pyörii 60 Hz taajuudella moottorin pyöriessä 50 Hz taajuudella. Näillä ratkaisuilla testikentille saadaan kiinteät 50 Hz ja 60 Hz taajuudet. Nykyisen moottorin pehmokäynnistimen tilalle on kaavailtu taajuusmuuttajaa, jolla saadaan taajuusalue vapaammaksi (45–66 Hz tarve). Eri jännitteet säädetään säätömuuntajilla, joilla ulostulojännite voidaan säätää portaittain: 230 V, 400 V, 500 V ja 690 V. Lisäksi generaattorilta on oma jännitteensäädin, joten testikentille jännite voidaan pitää kokoajan 400 V – tasolla. Lohkokaaviona nykyinen sähkönsyöttö testikentille on toteutettu kuvan 2 tapaisesti.



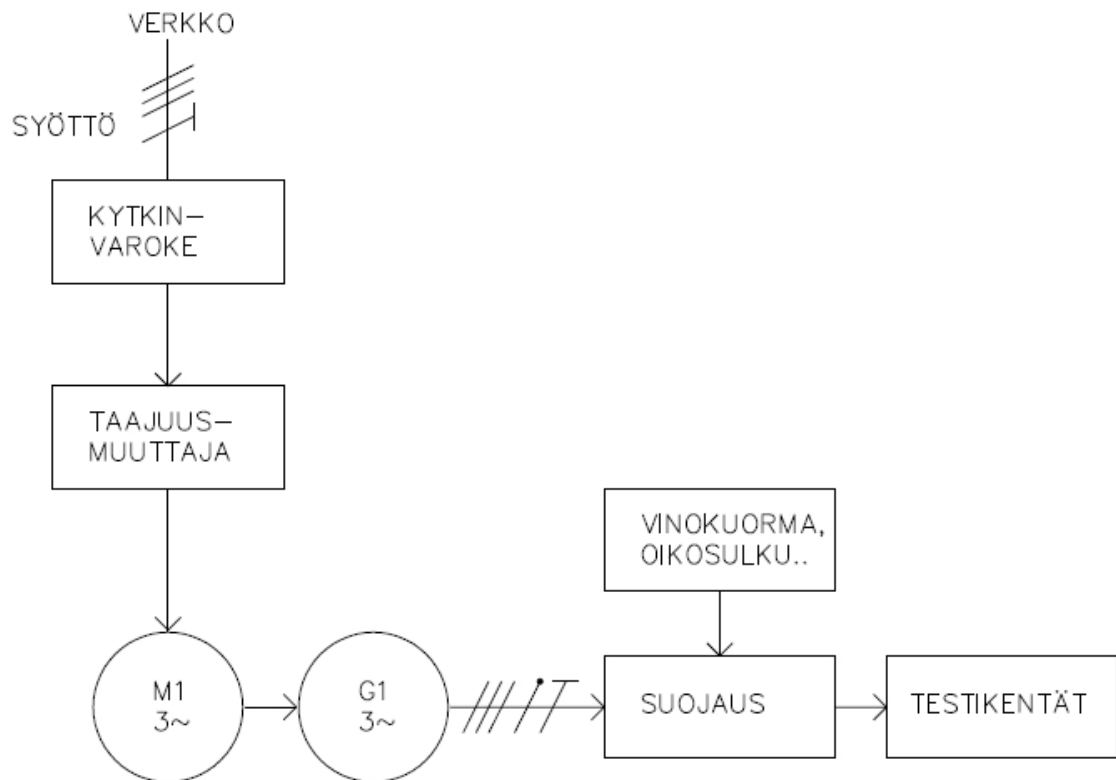
KUVA 2. Sähkönjakelu testikentille

Moottori käynnistetään siis pehmokäynnistimellä, ja kun moottori pyörii nimellisyörimisnopeudellaan, siirretään syöttö kontaktorin kautta. Testikenttien suojaus toteutetaan sulakkein ja kuormanerotimen avulla, joka kommunikoi pehmokäynnistimen kautta. Näin, mikäli pehmokäynnistin on päällä, ei testikenttiä voida käynnistää. Kontaktorihan on päällä, kun moottori on saavuttanut nimellisyörimisnopeutensa.

2.2. Suunnitella oleva testipaikkojen jakelu

Tarkoitus työssä on suunnitella muutokset testipaikkojen sähkönsyöttöön ja jakeluun. Varsinainen jänniteensäätö tapahtuu jo olemassa olevilta sähkökaapeilta, joissa on kapaleen 2.1 kuvailtu jänniteensäätö mahdollisuus säätömuuntajilla. Varsinainen uudistus tulee siis olemaan taajuudensäätö mahdollisuus, käytännössä siis moottorin nopeuden säätö. Sekä taajuuden että jännitteen osalta sallitaan $\pm 10\%$ vaihtelulla. Vain yksi testipaikka kerrallaan voi käyttää jakelua ja jokaiselta testipaikalla tulee olla etäkäyttömahdollisuus syöttölaitteistoon. Moottorin akseli kiinnitetään generaattorin akseliin ilman rullain – ratkaisua. Tehtaaseen suunnitellaan lisäksi uutta pääkeskusta, jolloin vanha keskus jää ryhmäkeskukseksi.

Tuleva sähkönsyöttö testikentille on taas kuvan 3 lohkokaaavion mukainen. Käytännössä taajuusmuuttaja tulee siis uutena komponenttina ja testikenttien tehoja kasvatetaan. Moottorin akseli tulee suoraan kiinni generaattorin akseliin ilman välitintä.



KUVA 3. Tuleva sähkönjakelu testikentille

Generaattorin suojaus menee lisäksi uusiksi, koska tuplattuna testikenttien syöttötehot, samat suojalaitteet eivät enää sovi tarkoitukseen. Suojauksessa on huomioitu mm. vino-kuorma, oikosulku, yli- ja alijännitteet, ylivirta ja maasulku.

Tämän lisäksi ohjaukseen on tutkittu eri vaihtoehtoja. Suojauksesta ja ohjauksesta tarkemmin niiden kappaleiden yhteydessä (4 ja 5).

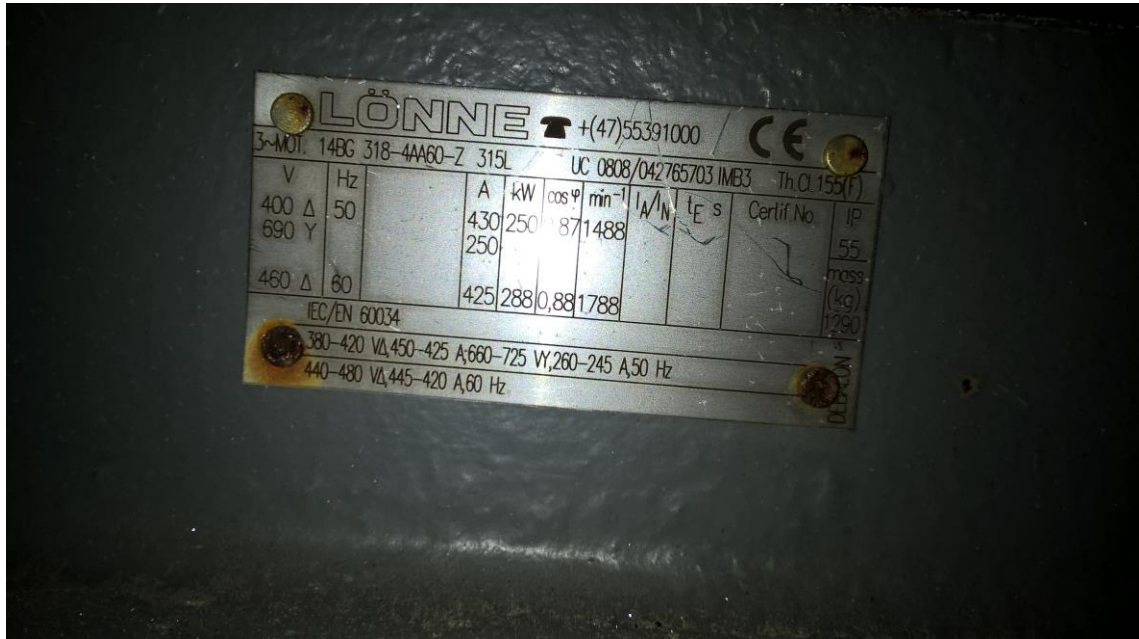
2.2.1 Relevantit standardit ja säännökset

Taajuusmuuttajan osalta, KTM määrittelee sen luokan 1 b laitteeksi, eli enintään 1000 V nimellisjännitteiseksi sähkölaitteistoksi teollisuusrakennuksessa, jonka suojalaitteena toimivan ylivirtasuojan nimellisvirta on yli 35 A. Tämä edellyttää siis sitä, että kun laite otetaan käyttöön, tulee sille tehdä käyttöönottotarkastus ja varmennustarkastus. Sähkölaitteiston haltijan tulee huolehtia näiden toteutumisesta ja varsinaisen varmennustarkastuksen tulee tapahtua 3kk sisällä laitteen käyttöönotosta joko valtuutettu laitoksen tai tarkastajan toimesta. Jossain tapauksissa myös sähköurakoitsija voi tehdä varmennuksen, mikäli hänellä on siihen oikeus. Määräaikaistarkastus tulee tehdä lisäksi 15 vuoden välein. Tarkemmin itse mittauksista on kappaleessa 3.2. (KTM 517 § 3-12.)

3 KOMPONENTIT JA MITOITUS

3.1. Moottori

Moottorin kohdalla ei tehdä investointeja vaan säilytetään vanha 250 kW oikosulku-moottori. Moottorin arvokilpi on esitetty alapuolella (Kuva 4).



KUVA 4. Moottorin arvokilpi

Kuten kilvestä näkyy, 50 Hz taajuudella syöttö voidaan toteuttaa kolmio- tai tähti-, tai tähti-kolmio -kytkennällä. Tähti-kolmio – kytkentä ei ole kuitenkaan tässä tilanteessa edukas, sillä suunnitteilla on taajuusmuuttaja ohjaamaan moottoria. Pääkeskuksen osalta jännitetaso on 400V, joten tämä on moottorin syöttöjännite. Kolmiokytketyllä 50 Hz-taajuudella moottorin nimellinen virta on 430 A, tehokerroin 0,87 ja nimellispyörimisnopeus 1488 rpm. Momenttia ei ole annettu kilvessä, mutta se saadaan nimellispisteen arvojen perusteella kaavalla 1:

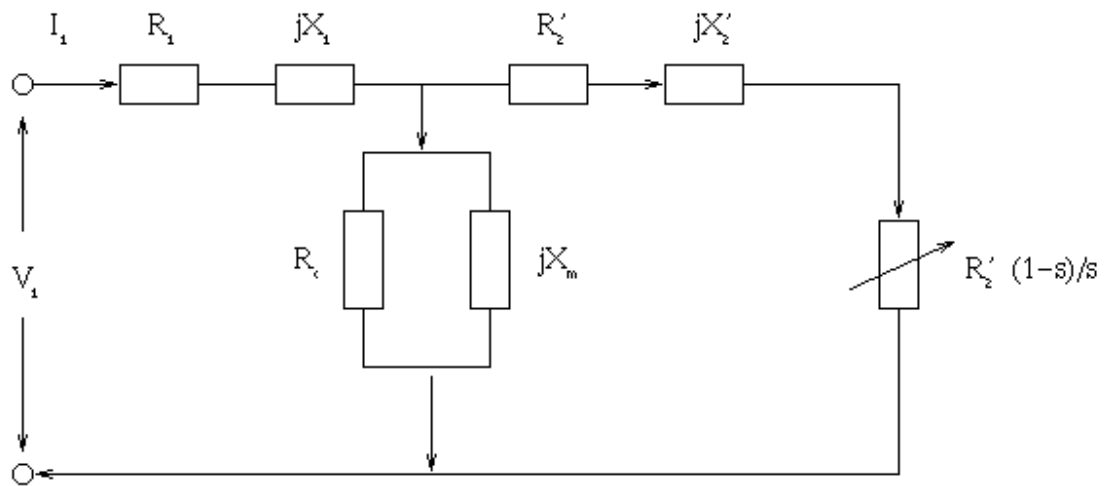
$$T_N = \frac{P_N}{\omega_N} \quad (1)$$

$$T_N = \frac{250 \text{ kW}}{2 \cdot \pi \cdot \frac{1488 \text{ rpm}}{60}}$$

$$T_N = 1604,4 \text{ Nm}$$

Nimellinen momentti on siis 50 Hz taajuudella 1604,4 Nm. Kuten kaavasta nähdään, on samantekevää onko moottori tähti- vai kolmiokytketty, nimellinen momentti pysyy samana. Myöhemmin generaattorin yhteydessä on laskettu 60 Hz vastaava momentti.

Moottorilta haluttu alin taajuus on 45 Hz ja ylin 66 Hz. Moottori ohjaa generaattoria, jonka nimellistaajuus on 50 Hz. Ajatuksena on, että moottorin ja generaattorin akselit ovat vastakkain toisiinsa liitettynä ilman (Kuva 1) välitintä. Aiemmin akseleiden välissä on ollut välitin, jolla välityssuhde on ollut 1 / 1,2. Nyt hankintana on taajuusmuuttaja, joten tilanne on hieman eri, kun 60 Hz voidaan tuottaa suoraan nopeusohjeella. Moottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä on esitetty alapuolella (Kuva 5).



KUVA 5. Moottorin 1~sijaiskytkentä

Kuvassa 5 on esitetty siis moottorin yksivaiheinen sijaiskytkentä, jossa ylähaaran resistanssi R_1 tarkoittaa staattorin resistanssia ja R_2' roottorin resistanssia redusoituna staattorin jännitetasoon. Hajavoiden vaikutus huomioidaan hajareaktanssien avulla: koko vuo ei siirry staattorista roottoriin häviöittä. Hajareaktanssi X_2' on roottorin hajavuon komponentti, joka on redusoitu staattorin hajavuon X_1 jännitetasoon. Magneettiipiirin rautahäviöitä kuvaa vastus R_{fe} , jotka syntyvät pääosin staattorissa ja vastaavan piirin magneetointi reaktanssia jX_m . Oikealla oleva säätövastus kuvaa työkoneneen ottamaa päätotehoja sekä puhallin- ja laakerihäviöitä. (Virtanen 2014.)

Oikosulku- ja tyhjäkäyntikokeella voidaan määrittää laskennalliset arvot komponenteille, joita käytetyn moottorin osalta on tehty ja esitetty taulukossa 1. (Virtanen 2014.)

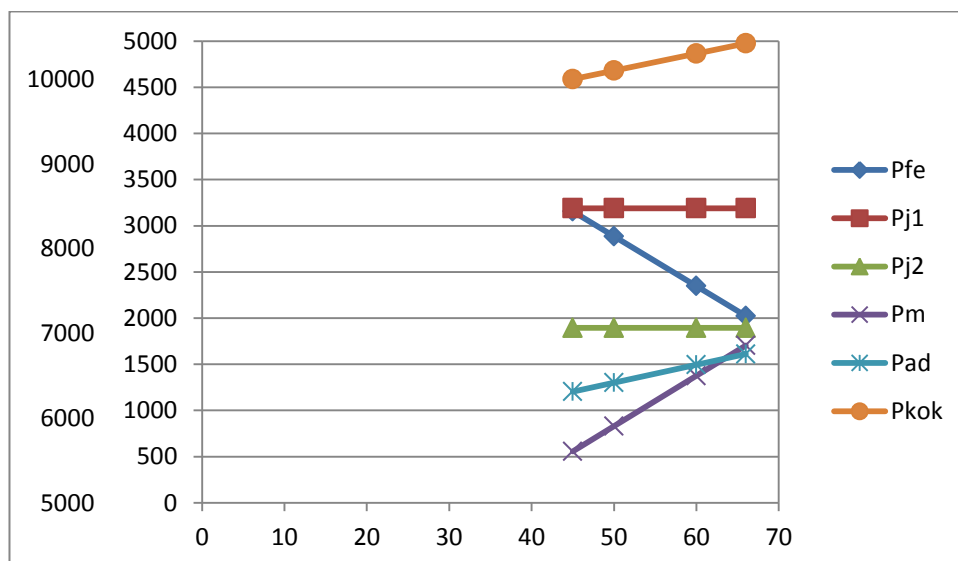
TAULUKKO 1. Valmistajan antamat häviöt eri taajuuksilla

f(Hz)	50	60
U (V)	400	400
I (A)	430	425
ΔP_{fe} (W)	2886	2347
ΔP_{j1} (W)	3189	3063
ΔP_{j2} (W)	1895	1878
ΔP_m (W)	830	1376
ΔP_{ad} (W)	1301	1495
$\Sigma \Delta P$ (W)	10101	10159

Häviöt järjestyksessä ylhäältä alhaalle ovat: rautahäviöt, staattorin kuparihäviöt, roottorin kuparihäviöt, kitka – ja laakerihäviöt ja hajavuohäviöt. Tätä kautta voidaan matemaattisesti määrittellä suorille yhtälöt muotoon kaavalla 2:

$$y = kx + b \quad (2)$$

Y:n paikalle tulee kulloinenkin teho, ja x:n paikalle taajuus. B saadaan ratkaistua yhtälöryhmän avulla. Kitka- ja laakerihäviöt sekä hajavuohäviöt, P_{ad} , on oletettu olevan pelkästään taajuudesta riippuvaisia, johdinhäviöt puolestaan virrasta riippuvaisiksi ja rautahäviöt sekä taajuudesta että jännitteestä. Taajuuden 60 Hz arvot ovat 460 V – jännitetasossa, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia, arvot on redusoitu 400 V -jännitetasoon taulukkoon 1, josta nähdään, että ainoastaan kitka- ja laakerihäviöt sekä hajavuohäviöt ovat suurempia isommalla taajuudella. Häviöt on piirretty taajuuden funktiona kuvioon 1.



KUVIO 1. Häviöt taajuuden funktiona ja 400 V -jännitetasossa

Y-akselilla on kaksi eri arvosarjaa, joista vasemmanpuolella on kokonaishäviöille (5000–10000) ja oikealla puolella oleva (0-5000) on muille arvosarjoille. Kuten mainittiin, johdin häviöt (P_{j1} ja P_{j2}) ovat riippuvaisia virran toiseen potenssiin, ja kuviossa 1 on oletettu virta vakioksi, joten ne ovat x-akselin suuntaisia suoria. Kokonaishäviöt pysyvät käytännössä noin 10000 W luokassa kokoajan. Taajuuden kasvaessa kitka- ja laakerihäviöt sekä hajavuohäviöt kasvavat roottorin kuparihäviöiden tasolle. Ne aiheuttavat yhä enemmän tärinää, kun taajuus ja tätä kautta nopeus kasvavat.

3.1.1 Keskipakovoima

Tehoa ja maksiminopeutta rajoittavat lämpenemän lisäksi keskipakovoiman aiheuttamat roottorin suurimmat sallitut jännitykset, ominaisvärähtelytaajuudet sekä suurimmat sallitut sähköiset ja magneettiset rasitukset. Keskipakovoima tarkoittaa näennäisvoimaa, joka vaikuttaa esimerkiksi ympyräliikettä tekevään kappaleeseen, vetäen sitä kauemmaksi liikkeen keskipisteestä. Keskipakovoiman vastavoima, eli keskihakuvoima, on voima, joka suuntautuu kohti ympyräradan keskipistettä. Mikäli keskihakuvoima on liian pieni, etäännyy kappale ympyräradaltaan ulommas, jolloin pyörimisliikkeen säde kasvaa. Moottorin osalta keskipakovoima lasketaan kaavalla 3. (Pyrhönen 2008.)

$$\sigma_{mek} = C'' \cdot \rho \cdot r^2 \cdot \omega^2 \quad (3)$$

missä C'' on Poissonin luvun huomioiva kerroin roottorin muodolle, johon vaikuttaa valmistusmateriaali sekä muut kaavan 3 suureet. Kaavassa 3 ρ on materiaalin tiheys, r on roottorin säde ja ω mekaaninen (roottorin) kulmanopeus. Muita arvoja ei tiedetä kuin kulmanopeus, joten lasketaan pyörimisnopeuksien suhteen, mikä on suhde nimelliseen ja 66 Hz taajuuksien välillä. (Pyrhönen 2008.)

$$F_{r(50Hz)} = C'' \cdot \rho \cdot r^2 \cdot 9348 \left(\frac{1}{s}\right)^2$$

$$F_{r(50Hz)} = 87385104 m_r r$$

$$F_{r(66Hz)} = C'' \cdot \rho \cdot r^2 \cdot 12564 \left(\frac{1}{s}\right)^2$$

$$F_{r(66Hz)} = 157854096 m_r r$$

$$k(F) = \frac{F_{r(66\text{Hz})}}{F_{r(50\text{Hz})}}$$

$$k(F) = \frac{C'' \cdot \rho \cdot r^2 \cdot 157854096 \left(\frac{1}{\text{s}}\right)}{C'' \cdot \rho \cdot r^2 \cdot 87385104 \left(\frac{1}{\text{s}}\right)}$$

$$k(F) \approx 1,80$$

Tuloksesta huomataan, että jo noin 15 Hz taajuuden kasvatus vaikuttaa keskipakovoiman suuruuteen lähes 2-kertaisesti. Tämä johtuu neliöllisestä kulmataajuudesta kaavassa. Kulmataajuuden tilalla voi käyttää myös taajuutta tai pyörimisnopeutta.

3.2. Taajuusmuuttaja

Taajuusmuuttajien käyttölämpötilat ovat tyypillisesti välillä -10 °C...+50 °C ja näiden lämpötilarajojen välissä niitä voidaan kuormittaa normaalisti. Vaconin tapauksessa maksimi ympäristön lämpötila on 40 °C. Jos taajuusmuuttajalla ohjattu järjestelmä lämpenee liikaa normaaleihin käyttölämpötiloihin nähden, taajuusmuuttaja varoittaa yllämenemisestä ja mahdollisesti pysäyttää prosessin. Tarpeeksi suurilla taajuusmuuttajilla on oma suojaus ja pääkytkin sisällytetty osaksi taajuusmuuttajarakennetta. Tällöin taajuusmuuttaja on sitä varten rakennetussa omassa sähkökaapissaan, kuten tässä tapauksessa onkin. Mikäli näin ei ole, tarvitsee valita sulake, jonka valintaan valmistaja yleensä antaa omat speksinsä. (Hietalahti 2013, 88–89.)

Taajuusmuuttajien hyötysuhde on yleisesti noin 97 % -99 %, eli ne ovat erittäin energiastävällisiä. Hukkaan menevä häviöenergia muodostuu pääasiallisesti lämmöstä ja tämä on otettava huomioon taajuusmuuttajan asennustilaa suunniteltaessa. Mikäli taajuusmuuttaja on asennettu sähkökeskuksen sisälle, tulee riittävästä ilmanvaihdosta huolehtia ylikuumentamisen estämiseksi. Taajuusmuuttajan huoltamiseen kuuluvat riittävän jäähdytyksen varmistaminen ja puhaltimen suodatimen vaihtaminen määräväleihin. Asennustarvikkeiden kunto tarkistetaan silmämääräisesti. (Hietalahti 2013, 138–139.)

Verkosta taajuusmuuttaja ottaa pätötehoa ja oikosulkumoottorin tarvitsema loisteho tuotetaan taajuusmuuttajan jännitevälipiirin kondensaattoreiden avulla. Tästä syystä loistehon kompensoinnissa taajuusmuuttajakäyttöjä ei tarvitse huomioida, ainoastaan yliaaltojen suodatuksesta, mutta mikäli käytössä on IGBT – transistorit, ei yliaaltoja

synny yli sallitun määrän. IGBT – transistori on komponentti, jossa on bipolaaritransistori ja MOSFET yhdessä. Käytännössä valittava taajuusmuuttaja on kuitenkin pieni sä-
röinen. Taajuusmuuttajakäytöt eivät syötä verkkoon oikosulkuvirtaa, kuten suoraan
verkkoon kytketyt moottorit oikosulkutilanteessa. Tämä on keskuksen kannalta melko
iso tekijä sitä valittaessa. (Hietalahti 2013, 88–89.)

Taajuusmuuttajien välipiirissä voi olla jopa 1000 V jännitteitä ja latautuneita konden-
saattoreita. Tästä syystä moottorin kytkentäkotelossa liittimissä saattaa olla jännite,
vaikka taajuusmuuttaja ei edes ole päällä. Siksi laitetta ei kannata avata, jos ei ole varma
turvallisesta työskentelystä ko. laitteen parissa. Sähköisiä mittauksia ei normaalisti teh-
dä, vaan ohjausyksiköstä nähdään kaikki taajuusmuuttajan toimintaan liittyviä sähköisiä
toiminta-arvoja ja tilanne-tietoja. Moottorikaapelin eristysvastusmittauksessa moottori-
kaapelit on irrotettava taajuusmuuttajasta, ettei käyttöönottomittarin tasajännite riko
invertteriä. Mittauksissa tulisi yleensä saada Vaconin tapauksessa mitattua yli 1 MΩ
eristysvastukseksi moottorikaapelille ja verkkokaapelille jokaisen vaihejohtimen ja
maadoitusjohtimen välillä, ja mahdolliselle jarruvastuskaapelille jokaisen johtimen vä-
lillä ja maadoitusjohtimen välillä. (Hietalahti 2013, 89. & Vacon 2013, 55.)

Taajuusmuuttajakäytön kaapeloinneissa huomioon otettavia asioita:

- päävirta- ja ohjauskaapelit asennetaan eri hyllyille tai ainakin hyllyn eri laidoille
- pää- ja ohjausvirtakaapeleiden keskinäiset risteilyt pyrittävä tekemään 90° kul-
missa
- ohjauskaapelina suositellaan käytettävän suojattuja JAMAK- tai NOMAK-
tyyppisiä kaapeleita
- moottorikaapeleina voidaan käyttää MCMK- tyyppisiä kaapeleita, mikäli käyt-
töympäristö on EMC- suojattu mutta usein parempi vaihtoehto on MCCMK.
tyypin kaapeli tarvittaessa kaapelointi voidaan tehdä EMCMK -tyypin kaapelilla
- Verkkokaapelointi voidaan tehdä esimerkiksi MMJ- kaapelilla ja läpivienti kaa-
pelille kumisella kalvotiivisteellä
- Moottorikaapelin läpiviennissä on käytettävä EMC- vaatimukset täyttävää eri-
koisvalmisteista holkkitiivistettä. (Hietalahti 2013, 89.)

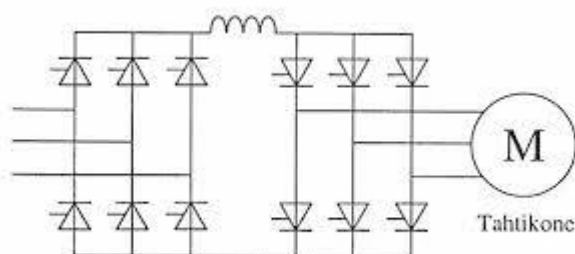
Ensimmäisen käynnistyksen yhteydessä suoritetaan ID- eli testi ajo, jossa muuttaja syöt-
tää moottorille erilaisia jännitepulsseja, mittaa virrasta vastetta ja pyörittää moottorin
akselia eri nopeuksilla. Ajon tarkoituksena on luoda malli moottorista ja sen sähköisistä

ominaisuuksista, kuten hajainduktanssi, roottoriresistanssi jne. Tämä testiajo tapahtuu täysin taajuusmuuttajan ohjaamana ja testin aikana taajuusmuuttaja vertailee annettuja tietoja saamiinsa testituloksiin ID- ajosta. Ennen testiajoa on huolehdittava, että prosessien laitteet kestävät testiajon ja ettei moottorin akselia ole lukittu tai pysäytetty. (Hieta-lahti 2013, 90.)

3.2.1 Taajuusmuuttaja tyypit ja käytöt

Taajuusmuuttajia on kahta eri tyyppiä – välipiirillisiä ja suoria. Suorat taajuusmuuttajat toimivat nimensä mukaisesti niin, että syöttävän vaihtosähköverkon jännite pilkootaan esimerkiksi puolijohdekytkimillä suoraan halutun taajuiseksi ja jännitteiseksi vaihtosähköksi. Välipiirilliset taajuusmuuttajat koostuvat kolmesta eri komponentista, jotka ovat tasasuuntaaja, tasajännite- tai virtavälipiiri ja vaihtosuuntaaja. Jännitteen kannalta tämä tarkoittaa sitä, että vaihtovirta/jännite suunnataan tasasuuntauksella tasavirraksi/jännitteeksi ja edelleen vaihtosuuntaajalla halutun taajuiseksi ja suuruiseksi vaihtovirraksi/jännitteeksi. Komponentit itse suuntaajissa vaihtelevat käyttötarkoituksen mukaan diodeista IGBT -transistoreihin. (Aura & Tonteri 1998, 391–415.)

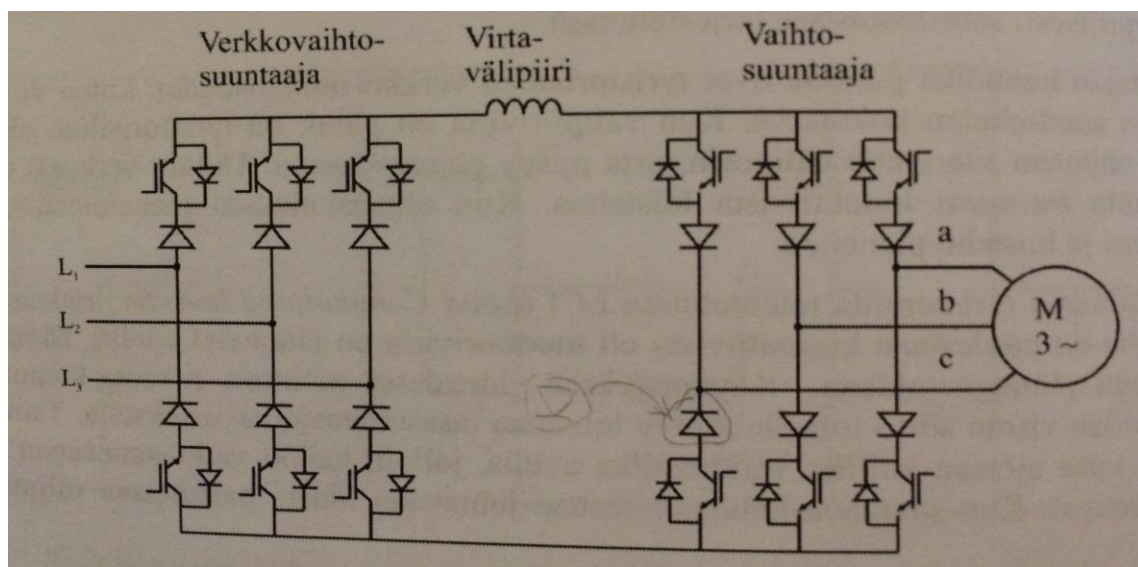
Välipiirilliset taajuusmuuttajat jakaantuvat edelleen virtavälipiirillisiin tai jännitevälipiirillisiin taajuusmuuttajiin sekä näiden yhdistelmään. Näistä ensin mainittu eli virtavälipiirilliset voivat olla joko kuormakommutoituja tai virtavälipiiri-taajuusmuuttajia. Kuormakommutoidussa taajuusmuuttajassa, LCI (load commutated inverter), on kaksi tyristorisiltaa, joista toinen on kytketty verkkoon ja toinen moottoriin, josta on alla esitetty sähköpiirros (Kuva 6). (Aura & Tonteri 1998, 391–415.)



KUVA 6. Kuormakommutoidun taajuusmuuttajan kytkentä (Aura & Tonteri 1998, 391–415.)

Tyristorisillat yhdistää välipiirin kuristin, jonka tarkoituksena on pienentää tasavirran aaltoisuutta. Tehonsyöttö voi olla joko verkkoon tai moottoriin, generaattorikäytössä, esimerkiksi jarrutusilanteessa, välipiirin jännitteen polariteetti on kääntynyt niin että normaali alajännitekiskon jännite on positiivinen (poiketen normaalin tilan negatiivisesta). LCI:n suurin ongelma on tyristorien kommutointi pienillä nopeuksilla, johtuen jännitteen pienuudesta. Tämän seurauksena vääntömomentti on pieni pienillä pyörimisnopeuksilla ja LCI soveltuukin yli 1 MW:n tehoisiin ja yli 1000 rpm pyöriviin tahtikone sovelluksiin, kuten pumppu – ja puhallinkäytöt. (Aura & Tonteri 1998, 391–415.)

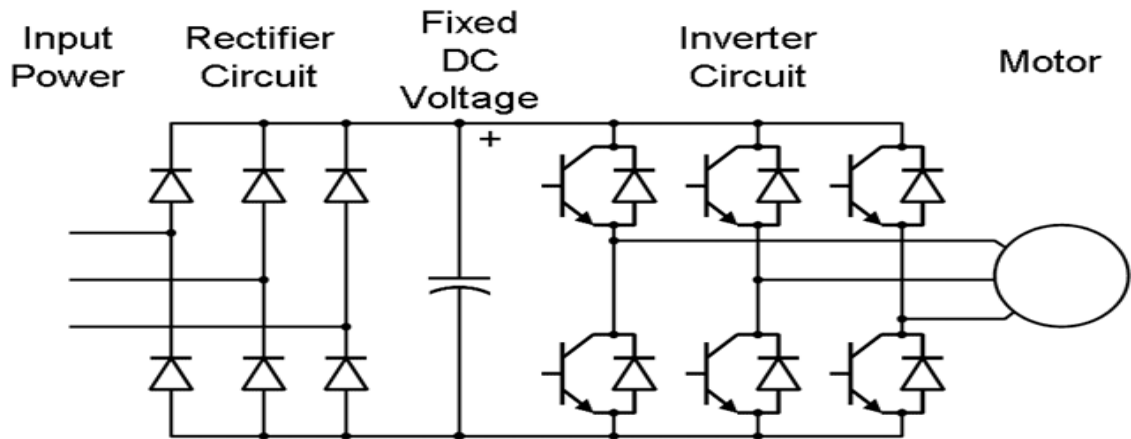
Epätahtikoneen eli oikosulkumoottorin tapauksessa käytetään virtavälipiiritajuusmuuttajaa, CSI (Current Source Inverter), joka saadaan korvaamalla edellisen LCI:n moottorin puoleinen tyristorisilta IGBT – tyristoreilla, jotka mahdollistavat nopean ohjaamisen. KytKentä on esitetty alapuolella kuvassa 7. (Aura & Tonteri 1998, 391–415.)



KUVA 7. Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan kytkentä (Hietalahti 2011, 92.)

Tasasuuntaus voitaisiin toteuttaa tyristoreilla, mutta tässä se on toteutettu IGBT – transistoreilla, jotka mahdollistavat nopean ohjauksen. Transistoreiden kanssa sarjaan on kytketty diodit, transistoreiden huonon estojännitteen keston takia. CSI:lla on mahdollista käyttää pulssinleveysmodulaatiota, joka parantaa ohjausominaisuuksia. Suurin ero GTO tyristorin ja IGBT – transistorin välillä on komponenttien suorituskyvyssä; tyristorin kytkentätaajuus on alle 1 kHz, kun transistorin vastaava 1-8 kHz. Näin IGBT – transistoreilla tuotettu pulssinleveysmodulaatio muistuttaa enemmän siniaaltoa. Yleisesti kytkentätaajuuden kasvattaminen parantaa virran sinimuotoisuutta. Kytkentätaajuudella

tarkoitetaan tässä taajuusmuuttajan sisäistä elektroniikan komponenttien toiminnan taajuutta, kuten pulssinleveysmodulaation suoritustaajuutta, eikä verkon taajuutta. Viimeinen käsiteltävä taajuusmuuttajatyyppe on jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja eli VSI (Voltage Source Inverter). Periaatekuva on esitetty alapuolella (Kuva 8). (Hietalahti 2011, 86–93.)



KUVA 8. Jännitevälipiiritaajuusmuuttaja (Virtanen 2014.)

VSI:n toiminta perustuu välipiirin vakiojännitteeseen, joka saavutetaan tasoittamalla jännite kondensaattorilla. Yleensä tasasuuntaus on toteutettu diodisillalla, mutta sekin on mahdollista toteuttaa ohjattavasti esimerkiksi GTO tyristoreilla. IGBT – transistorit ja nolladiodit muodostavat 6 puolijohdekatkoojaa ja suorittavat ulostulevan vaihtojännitteen muodostamisen. Kuvan 4 mukaisella kytkennällä ohjaaminen tapahtuu ainoastaan pulssinleveysmodulaatiolla, erona GTO transistoreiden jännitteen säätöön. Ohjaamiseen voisi välipiirissä käyttää tasasähkökatkoojaa, mutta pulssinleveysmodulaatio on yleensä (ison kapasitanssin takia) nopeampaa. (Hietalahti 2011, 86–93.)

3.2.2 Taajuusmuuttajan valinta

Taajuusmuuttajan valintaan vaikuttaa käyttötarkoitus, virta ja tätä kautta saatava vääntömomentti. Käytettävä jännitetaso 400 V rajoittaa moottorin virtavaihtoehtoja. Moottori ottaa verkosta leimatun tehon (250 kW), kun 400 V jännitetasossa käytetään kolmiokytkentää. Kolmiokytketylle moottorille 50 Hz taajuudella nimellisvirta on 430 A. Prosessin vaatimuksena on, että lisäksi taajuusalueen tulee ulottua yli 66 Hz, jossa moottoria ohjataan osan ajasta. Näin valitaan esimerkiksi Vaconin valmistama taajuusmuuttaja (Kuva 9).

Verkköjännite	AC-käytön tyyppi	Kuormitettavuus					Moottorin akseliteho		Runko-koko	Mitat ja painot L x K x S (mm)/ kg
		Pieni (+40°C)		Suuri (+40°C)		Maksimi- virta I S	400 V / 690 V			
		Jatkuva nimellis- virta I _L (A)	10% yli- virta (A)	Jatkuva nimellis- virta I _H (A)	50% yli- virta (A)		10% ylikuor- mitus P (kW)	50% ylikuor- mitus P (kW)		
380-500 V 50 / 60 Hz 3~	NXC 0261 5A2H0SSF	261	287	205	308	349	132	110	FR9	606 x 2275 x 605/371
	NXC 0300 5A2H0SSF	300	330	245	368	444	160	132		
	NXC 0385 5A2L0SSF	385	424	300	450	540	200	160	FR10	606 x 2275 x 605/403
	NXC 0460 5A2L0SSF	460	506	385	578	693	250	200		
	NXC 0520 5A2L0SSF	520	572	460	690	828	250	250	FR11	806 x 2275 x 605/577
	NXC 0590 5A2L0SSF	590	649	520	780	936	315	250		
	NXC 0650 5A2L0SSF	650	715	590	885	1062	355	315	FR12	1206 x 2275 x 605/810
	NXC 0730 5A2L0SSF	730	803	650	975	1170	400	355		
	NXC 0820 5A2L0SSF	820	902	730	1095	1314	450	400	FR13	1406 x 2275 x 605/1000
	NXC 0920 5A2L0SSF	920	1012	820	1230	1476	500	450		
	NXC 1030 5A2L0SSF	1030	1133	920	1380	1656	560	500	FR14	2806 x 2275 x 605/2440
	NXC 1150 5A2L0SSF	1150	1265	1030	1545	1854	630	560		
	NXC 1300 5A2L0SSF	1300	1430	1150	1725	2070	710	630	FR13	1606 x 2275 x 605/1150
	NXC 1450 5A2L0SSF	1450	1595	1300	1950	2340	800	710		
NXC 1770 5A2L0SSF	1770	1947	1600	2400	2880	1000	900	FR14	2806 x 2275 x 605/2440	
NXC 2150 5A2L0SSF	2150	2365	1940	2910	3492	1200	1100			

KUVA 9. Vaconin NXC taajuusmuuttajataulukko (Vacon 2014, 15.)

NXC -perheestä kolme muuttajaa sopisi 250 kW moottorille, kun vertaillaan suurinta sallittua virtaa moottorin nimelliseen, saadaan suurimmat momentit eri taajuusmuuttajittain. Esimerkiksi, jos halutaan tietää NXC 0520 5 -tyypin taajuusmuuttajien suurin käytettävä momentti, pitää taulukosta selvittää moottorille suurin sallittu virta. Tämä on annettu oikealla taulukossa moottorin akselitehoittain. Tälle taajuusmuuttajalle suurin sallittu virta on 50 % ylikuormitus, jolloin käytettävissä on 690 A virta. Taulukossa annetut maksimivirrat saavat kestää 2-20 s ja annetut 10 % ja 50 % ylikuormat minuutin kymmenen minuutin välein. Mitoitus on tehty jatkuvien maksimien, eli 10 % tai 50 % kuorman kannalta. Oletuksena, että testikenttiä voidaan kuormittaa ylivirralla minuutti jokaista 10 minuuttia kohden. Momentti vakiovuoalueella saadaan kaavalla 4. (Vacon 2013, 16.)

$$T_{max} = \frac{I_{cont,max}}{I_{N(moottori)}} \cdot T_{N(moottori)} \quad (4)$$

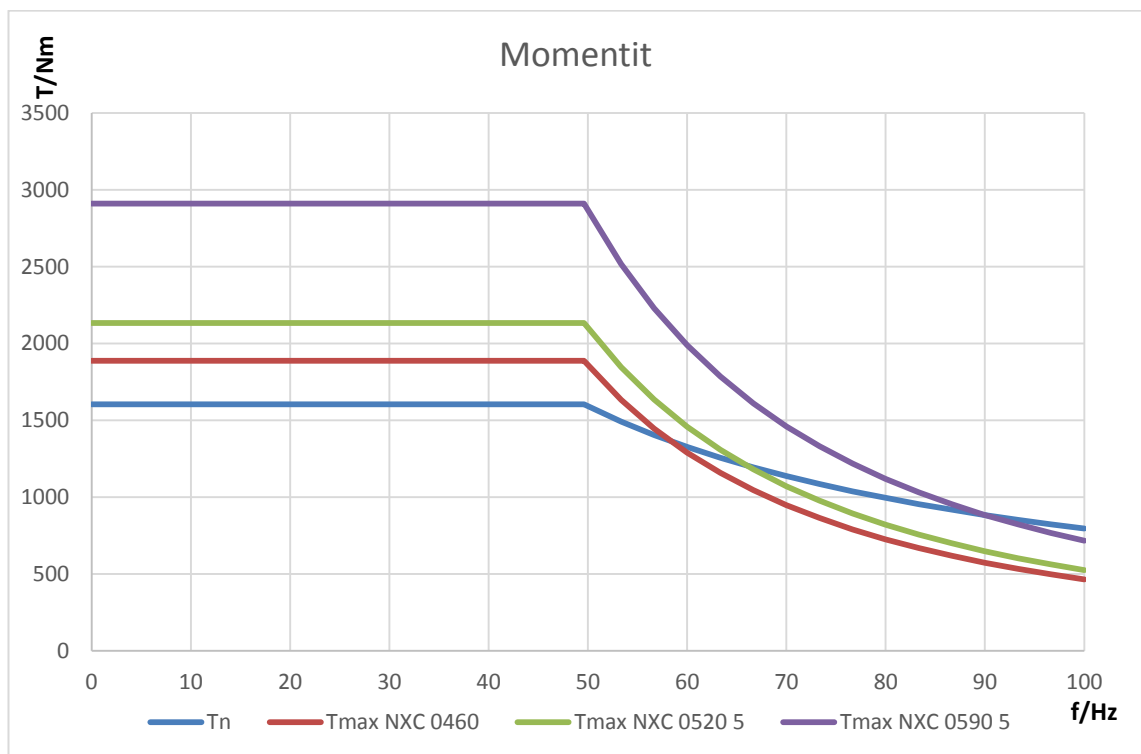
$$T_{max} = \frac{690 A}{430 A} \cdot 1604,4 Nm$$

$$T_{max} = 2574,5 Nm$$

Moottoria voidaan tällä taajuusmuuttajalla kuormittaa 1,6-kertaisella virralla maksimisaan nimelliseen nähden minuutin ajan. Ylimitoituksella saadaan vielä enemmän vääntömomenttiä moottorilta. Kentänheikkensalueella maksimimomentti saadaan kertomalla vakiovuoalueen maksimimomentti nopeuden suhdeluvulla eli kaavana (5):

$$T_{max1} = T_{max} \cdot \left(\frac{n_n}{n_1}\right)^2 \quad (5)$$

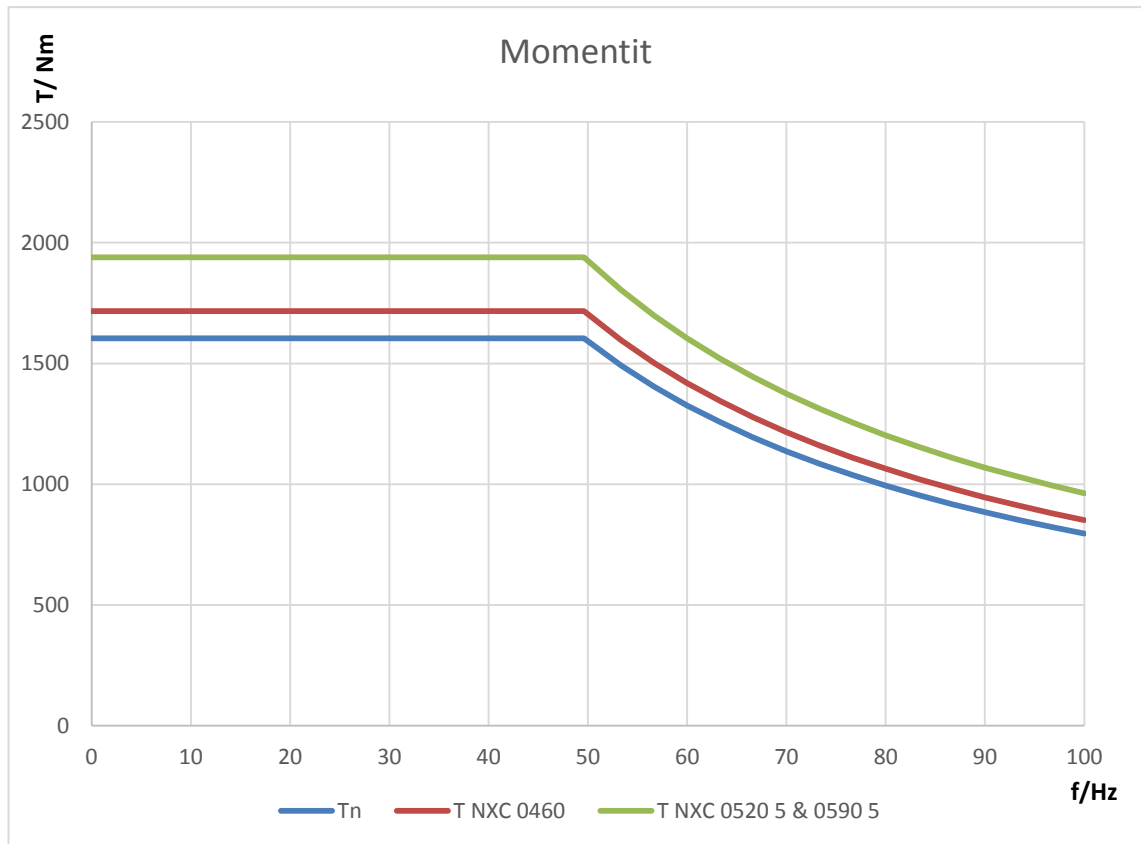
Kaavassa 5 siis on vakiovualueen (ennen nimellistä pyörimisnopeutta) momentti nimellispyörimisnopeuden ja kyseisen pyörimisnopeuden suhteen toisella potenssilla. Vastaavasti saadaan moottorin momentti kentänheikennysalueella, kun jätetään kaavasta 5 pois toinen potenssi nopeuksien suhteesta. Kolmea mahdollista taajuusmuuttajaa on vertailtu alla (Kuvio 2).



KUVIO 2. Maksimimomentit taajuusmuuttajittain ja moottorin nimellismomentti moottorin taajuuden funktiona

Eniten vääntöä saadaan NXC 0590 – tyyppillä. NXC 0590 – taajuusmuuttajalla taajuusalue ulottuu 2600 rpm asti, joka vastaa taajuutena noin 85 Hz. Taajuusalueen rajaa siis kyseinen oikosulkumoottori. Piste, jossa taajuusmuuttajan T_{max} on pienempi/yhtä suuri kuin moottorin T_N , ei moottoria voida enää ajaa. Tämän pisteen jälkeen taajuusmuuttajalla ei voida ohjata suuremmilla taajuuksilla 10 % tai 50 % ylivirralla. Todellisuudessa taajuusmuuttaja tulee hieman ylivoimaa, siten että on ns. ”momenttivaraa”. NXC 0460- ja 0520 -tyypit on laskettu suoraan 10 % ylivirralla, 0590 -tyyppi taas 50 % (Kuva 9).

Jos mitoitus tehdään jatkuvan virran perusteella, tilanne näyttää seuraavalta (Kuvio 3). Sillä kuten kuvasta 9 nähdään, on jokaisen taajuusmuuttajan sallittu jatkuva virta suurempi kuin moottorin nimellinen virta.



KUVIO 3. Jatkuvien sallittujen virtojen perusteella momentit taajuuden funktiona

Kuviossa 3 taajuusmuuttajat NXC 0520 ja 0590 saavat saman jatkuvan virran (Kuva 9) ja tätä kautta saman momentin. 0590 – tyyppillä kuormitus oletetaan suureksi ja 0520 – tyyppillä pieneksi. Todellisuudessa kuormitus on pieni. Sininen käyrä on moottorin nimellinen momentti.

Esimerkiksi NXC 0460 – tyyppin taajuusmuuttajan momentti on 67 Hz taajuudella (2000rpm) noin 1277 Nm. Tällöin saatava teho on:

$$P = 1277 \text{ Nm} \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{2000 \text{ rpm}}{60} \quad (1)$$

$$P = 267,4 \text{ kW}$$

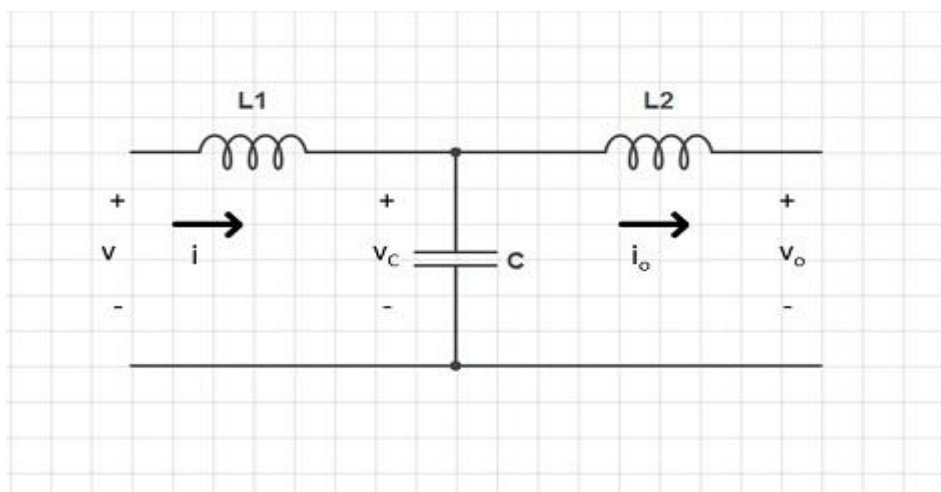
Johtopäätöksenä voi vetää, että mikäli kuorma on 267,4 kW tai alle taajuudella 67 Hz jatkuvasti, NXC 0460 – tyyppi kelpaa hyvin käyttötarkoitukseen.

3.2.3 Taajuusmuuttajan verkostovaikutukset

EMC häiriöiltä säästymiseksi taajuusmuuttaja voidaan varustaa verkkosuotimilla, joka sähköverkon häiriötilanteissa häiriöiden leviämisen verkkoon. Näitä suotimia käytetään erityisesti aktiivisilla komponenteilla eli IGBT mallin avulla toteutetuilla verkko-tasasuuntaajilla. Mikäli sähkönsyötössä tehomuuttajan kuormituksesta yli 70 % on taajuusmuuttajakuormitusta, tavallisesti häiriöitä aiheuttavat yliaallot kompensoidaan yliaaltosuotimilla. Ellegon tapauksessa testikentille haluttu sähkönlaatu on mahdollisimman sinimuotoista, joten hankintaan tulee myös yliaaltosuodin. (Hietalahti 2013, 89.)

Kolmivaiheisessa tasasuuntauksessa 3.yliaalto ja sen kerrannaiset ovat merkityksettömiä, joka on suurin ero yksivaiheiseen tasasuuntaukseen. Verkon yliaaltorasitusta voidaan pienentää esimerkiksi käyttämällä useampaa kuusipulssisiltaa (kolmikäämimuuttaja) esimerkiksi 12-pulssikytkentää tai 24-pulssikytkentää. Näistä jälkimmäinen on tietysti parempi säröilyn kannalta. (Hietalahti 2013, 233–244.)

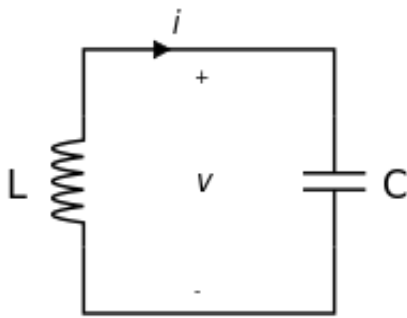
Kytkentävirtasysäys tapahtuu nimensä mukaisesti, kun laite kytketään verkkoon. Tällöin virta voi olla 8- 12-kertainen moottorin nimelliseen nähden. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan tapauksessa voidaan käyttää kondensaattorin kanssa sarjassa ns. käynnistysvastusta, NTC – vastusta tai isotehoisissa käytöissä puoliksi tai täysin ohjattavaa siltarakennetta. Muita vaihtoehtoja ovat ns. suodinkäytöt. Näitä on mm. LC- ja LCL -tyyppiset suotimet, joista ensimmäinen on ns. rajataajuussuodin. Kuvissa 10 ja 11 on esitetty samassa järjestyksessä LCL- ja LC -suodin. (Hietalahti 2013, 233–244.)



KUVA 10. LCL – suodin (Gridlab-D 2013.)

LCL – suodin koostuu nimensä mukaisesti kahdesta kelasta ja yhdestä kondensaattorista. Kondensaattori ja vaihtosuuntaajan puoleinen (oikealla Kuva 10) kela ovat verkkosuuntaajan puoleiseen (vasemmalla Kuva 10) kelaan nähden rinnan.

LCL – suotimessa on kannattavaa kasvattaa kondensaattorin koko niin suureksi kuin mahdollista, jolloin kokonaisinduktanssi saadaan mahdollisimman pieneksi halutulla resonanssitaajuudella ($2L=C$). Vaihtosuuntaajan puoleisen kuristimen tulee olla kuitenkin riittävän suuri vaimentaakseen riittävästi suuntaajalta tulevia yliaaltoja. Vastaavasti verkon puoleisen kuristimen tehtävänä on ehkäistä verkon puolelta tulevia virran yliaaltoja ja myös suojata suodinkondensaattoria ylikuormitukselta. Jos muuntaja on kytketty suoraan verkon puolelta, tulee lisäksi ottaa muuntajan hajainduktanssi huomioon. Käytännössä on mahdollista, että muuntajan hajainduktanssi on niin suuri, että verkon puolelle ei tarvita lainkaan kuristinta. (Hietalahti 2011, 86–93.)



KUVA 11. LC-suodin (LC circuit 2016.)

LC-suodin suodattaa asetettua rajataajuutta suuremmat ja pienemmät taajuudet, näin päästäen vain tietyn taajuisen signaalin. Vastuksen ja kondensaattorin muodostamaa RC – alipäästösuodin voitaisiin myös käyttää tilanteessa, jossa halutaan, että tiettyä taajuutta pienemmät taajuudet läpäisevät suotimen.

3.2.4 Arvioidut häviöt taajuusmuuttajalle

Itse taajuusmuuttajan häviöt riippuvat kuormasta, lähtötaajuudesta sekä käytetystä kytkentätaajuudesta. Vaconin antama karkea häviöteho voidaan selvittää kaavalla 6 (Vacon 2013.):

$$P_{loss} = P_{moottori} \cdot 0,025 \quad (6)$$

Kaavaan tarvitsee sijoittaa vain moottorin teho, joka on 250 kW. Näin karkea arviointi on:

$$P_{loss} = 250 \text{ kW} \cdot 0,025$$

$$P_{loss} = 6,25 \text{ kW}$$

Kun oletetaan, että taajuusmuuttajaa kuormitetaan 5 kertaa viikossa ja noin 6h ajan, häviöt vuotta kohden ovat:

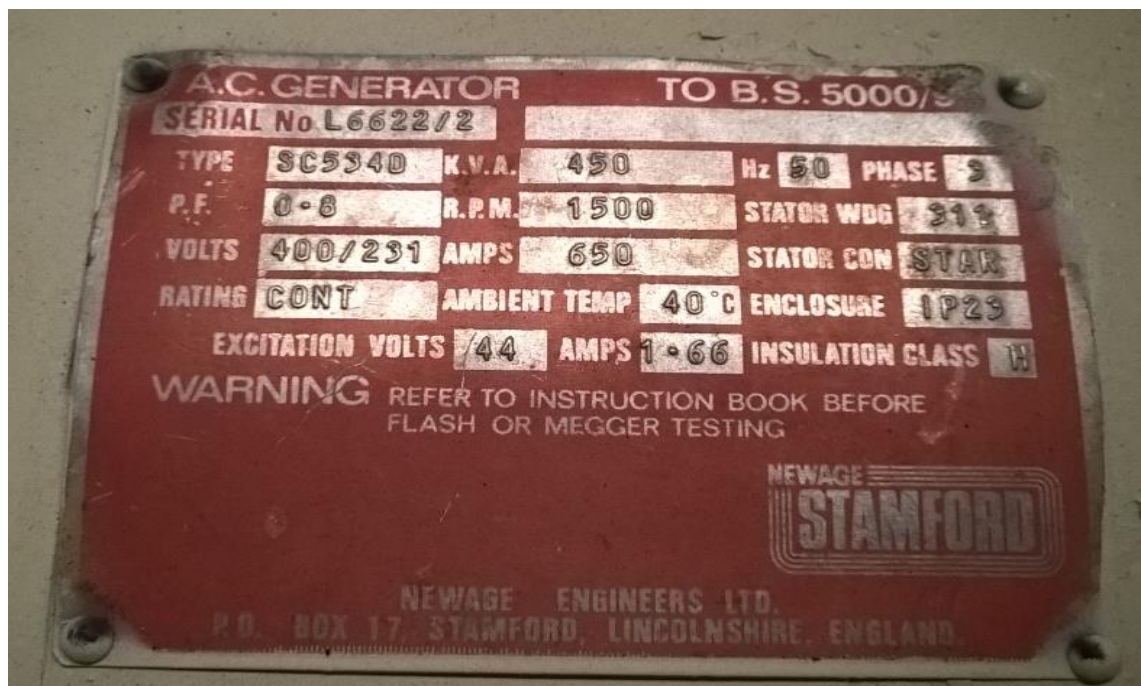
$$P_{loss(365d)} = P_{loss} \cdot 5 \cdot 6 \text{ h} \cdot 52$$

$$P_{loss(365d)} = 9750 \text{ kWh}$$

Lisäksi valmistaja (Vacon) on antanut tiedon, että pienisäröisen NXC-taajuusmuuttajan lämpöhäviöt ovat noin 1,5–2,0 – kertaiset tähän laskettuun arvoon, joka on muiden taajuusmuuttajatyyppeiden 6- ja 12- pulssisilla taajuusmuuttajille. Tällöin lopullinen häviöteho vuotta kohden on välillä 14,6–19,5 MWh. (Vacon 2013, 28.)

3.3. Generaattori

Generaattori on Newage Stamford:in valmistama. Nimelliset arvot on esitetty arvokilvessä (Kuva 12).



KUVA 12. Generaattorin arvokilpi

Generaattorin nimellinen virta on 650 A, kun taas sitä syöttävän moottorin 430 A. Tarkoitus on siis, että moottori-generaattorilla syötetään testikenttiä kuorman ollessa vaihteleva. Kuorma saattaa olla testien aikana symmetristä tai epäsymmetristä. Epäsymmetrisessä tilanteessa vaiheiden virrat eroavat toisistaan, jolloin on kyse vinokuormituksesta. Vinokuorma aiheuttaa koneen ilmväliin tahtikoneelle vastakkaiseen suuntaan pyörivän magneettikentän. Tämä kenttä indusoi jatkuvasti vaimennuskäämitykseen tai roottorirautaan virtoja. Seurauksena tälle on tärinä ja ylimääräiset häviöt. (Hietalahti 2011, 100.)

Normaalistihan syöttö on virran suunnan kannalta myötäkomponentin suuntainen, tämä epäsymmetrian aiheuttama ylivirta synnyttää vastakomponentin. Epäsymmetrinen kuormitusvirta synnyttää eri osiin piiriä jännitehäviöitä, jotka ovat lisähäviöitä normaalin tilanteen lisäksi, ja tätä kautta myös jännitteeseen ilmestyy vastaava epäsymmetrinen vastakomponentti. Edelleen päävuolle syntyy vastainen pyörivä magneettivuo, jonka seurauksena syntyy pyörintää vastustavaa vääntömomenttia, tärinäilmiöitä sekä mahdollisia ylikuumenemisiä roottorissa. Vinokuormia syntyy esimerkiksi yksivaiheisissa ja kaksivaiheisissa oikosuluissa, tai vaikka kaksivaiheisissa kuormituksissa. (Mörsky 1993, 41.)

Tämä virta saattaa pahimmassa tapauksessa aiheuttaa roottorin suojan sulamisen ja sulan alumiinin roiskumisen staattorin käämitykseen. IEC 60034-1 on tätä silmällä pitäen ohjeistanut maksimitason tälle vastakomponenttivirrälle. Generaattorille maksimitaso on 8 %. Valmistajan antama maksimitaso ei ole tiedossa. Tälle ns. vastakomponenttivirrälle voidaan määrittää alin ja ylin sallittu virta eri kuormilla. Ensinnäkin tulee selvittää ylin ja alin virta prosentteina generaattorin nimellisestä virrasta. Tämän jälkeen miinustetaan ylin virta alimman virran % -arvosta. Viimeiseksi jaetaan arvo kolmella, jolloin tulos on vaihekohtainen. Lasketaan ylin ja alin sallittu virran arvo kolmessa eri tapauksessa: 250 kW, 200 kW ja 150 kW kuormalla (Kaava 7). Generaattorin nimellinen tehokerroin on 0,8. Kuitenkin kuorma määrittelee tehokertoimen, oletetaan sen olevan 0,7. (ABB 94.)

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos \alpha} \quad (7)$$

$$I = \frac{250 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,7}$$

$$I = 515,5 \text{ A}$$

Tälle virralle tulee määrittää ylin ja alin virran arvo. Olkoon ylin 110 % tästä arvosta ja alin 70 %. Tällöin ylin virta on 567 A ja alin 360,8 A. Kun jaetaan generaattorin nimellinen virta näillä arvoilla, saadaan ylimmän ja alimman virran prosenttiarvo suhteessa nimelliseen (Kaava 8).

$$I_{ylin(\%)} = \frac{I_{ylin}}{I_N} \quad (8)$$

$$I_{ylin(\%)} = \frac{567 \text{ A}}{650 \text{ A}}$$

$$I_{ylin(\%)} = 87,2 \%$$

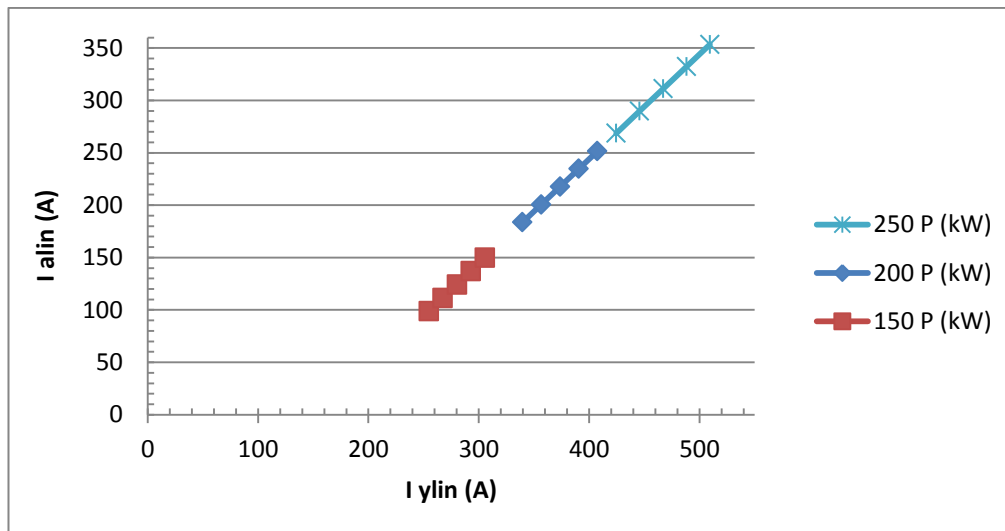
Vastaavalla tavalla alimmalle virralle prosenttiarvo on 55,5 %. Prosenttiarvojen erotus on (87,2 % - 55,5 %) 31,7 %. Kun tämä jaetaan edelleen kolmella, on vaihekohtainen vinokuorma 10,6 %. Arvo ylittää sallitun 8 % rajan, näin näillä virtojen suhteilla generaattoria ei voi kuormittaa. Alle on laskettu taulukkoon (Taulukko 2) eri ylimmän virran perusteella sallitut alimmat virrat.

TAULUKKO 2. Sallitut alimman ja ylimmät virrat arvot sekä prosentteina että ampeereina

<i>ylin virta (%) / I_{N(GEN.)}</i>	<i>ylin virta (A)</i>	<i>alin virta (%) / I_{N(GEN.)}</i>	<i>alin virta (A)</i>	<i>P (kW)</i>
65,3	424,5	41,3	268,5	250
68,6	445,7	44,6	289,8	250
71,8	467,0	47,8	311,0	250
75,1	488,2	51,1	332,2	250
78,4	509,4	54,4	353,4	250
52,2	339,6	28,2	183,6	200
54,9	356,6	30,9	200,6	200
57,5	373,6	33,5	217,6	200
60,1	390,6	36,1	234,6	200
62,7	407,5	38,7	251,5	200
39,2	254,7	15,2	98,7	150
41,1	267,4	17,1	111,4	150
43,1	280,2	19,1	124,2	150
45,1	292,9	21,1	136,9	150
47,0	305,7	23	149,7	150

Ensin on selvitetty tietyllä teholla nimellinen virta ja laskettu tällä virralla 100 – 120 % ylimmälle virralle vastaavat alimmat arvot. Virtoja on verrattu generaattorin nimelliseen (650 A), josta on prosentti arvot taulukossa. Kuten taulukosta nähdään, mitä pienempi

on teho ja tätä kautta virta, sitä suuremmat suhteelliset poikkeamat toisistaan sallitaan virtojen välillä. Tilanteesta on myös piirretty kuvio 4, joka on esitetty alapuolella.



KUVIO 4. Alin sallittu virta ylimmän virran suhteen (3~kuormitus)

X-akselilla on ylimmän virran sallitut arvot ja Y-akselilla vastaavat alimman virran sallitut arvot. Kuvio 4 on suoraan piirretty ylimmän virran ja alimman virran suhteena, jolloin tuloksena saadaan lineaarisesti kasvava suora, joista x-akselille on sijoitettu ylin virta. Noin 510 A ylempällä virralla voi toinen, alempi vaihevirta, olla noin 350 A. Sama tilanne alimmassa pisteessä, jolloin suurempi virta on 255 A, on alin enää noin 100 A. Prosentuaalinen poikkeama toisistaan on siis sitä suurempi, mitä pienempi ylempi virta on.

Tilanne, jossa ainoastaan kaksivaihetta syöttää kuormaa, voidaan laskea käytännössä vastaavasti. Virrallinen ero saa olla 8 % ja yksi vaiheista ei syötä kuormaa, niin käytännössä tämä saadaan kertomalla generaattorin nimellinen virta 24 %.

$$I_{max} = I_N \cdot 24 \%$$

$$I_{max} = 156 \text{ A}$$

Kun tästä virrasta edelleen jaetaan ylimmän ja pienimmän virran ero kolmella, tulee vastaava 8 %. Tämä 156 A on standardin mukainen maksimi 2~syöttö virta. Kun oletetaan, että kaava on pätevä 2 vaiheiseen syöttöön. Mikäli kuorma vaatii suurempaa virtaa, tarvitsee yksi vaihe kytkeä ns. keinokuormaan, jotta vinokuorma ei ylitä.

Generaattoria on aikaisemminkin syötetty moottorilla pehmokäynnistimellä. Nyt kyseessä on taajuusmuuttajakäyttö. Generaattorin momentti saadaan välityssuhteesta (1/1,2). Tällöin ajatellaan moottorin jälkeen vaihde ja generaattori kuormana.

Kaavalla 9 momentti on:

$$T_1 = \frac{T_2}{\eta_v} \cdot \frac{n_2}{n_1} \quad (9)$$

Kaavassa hyötysuhde, η_v , on vaihteen hyötysuhde ja sen voi olettaa olevan 98 % (1-portainen). Koska kyseessä on ylennysvaihde, niin generaattorin momentti saadaan, kun kerrotaan moottorin momentti hyötysuhteella ja jaetaan välityssuhteella. Tilanne vastaa aikaisempaa käyttöä, kun pehmokäynnistimellä käynnistettiin moottori välityssuhteella 1/1,2 generaattoriin nähden. Kaavassa T_1 vastaa siis moottorin momenttia. Generaattorin momentti saadaan kääntämällä kaava 9:

$$\begin{aligned} T_{\text{generaattori}(60\text{Hz})} &= T_{\text{moottori}(50\text{Hz})} \cdot \eta_v \cdot \frac{n_1}{n_2} \\ T_{\text{generaattori}(60\text{Hz})} &= 1604,4 \text{ Nm} \cdot 0,98 \cdot \frac{1488 \text{ rpm}}{1800 \text{ rpm}} \\ T_{\text{generaattori}(60\text{Hz})} &= 1299,8 \text{ Nm} \end{aligned}$$

Mikäli välityssuhde pidettäisiin 1/1, niin generaattorin momentti olisi samanlainen kuin moottorilla (Kuvio 2). Tällä välityssuhteella generaattorin momentti on kuitenkin noin 5/6 moottorin nimellisestä momentista 60 Hz taajuudella.

3.4. Kaapelointi ja jännitteenalenema

Tehtaassa generaattorin jännite pidetään vakiona jänniteensäätäjällä. Kaapelin mitoituksessa on otettu huomioon siis lähinnä virta ja pituudet, ja tätä kautta itse jännitteenalenema. Generaattorilta syötetään tuotekehitys-, EVV-, sopimusvalmistus- ja lentokenttäsiädinyksiköitä. Lisäksi moottorin jännitteenalenema on laskettu käynnistyessä ja normaalitilanteessa.

Jännitteenalenema lasketaan kolmivaiheisella vaihtojännitteellä kaavalla 10:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot (r \cdot \cos \varphi \pm j \cdot x \cdot \sin \varphi) \quad (10)$$

Tästä edelleen suhteellinen jännitteenalenema prosentteina (Kaava 11):

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_N} \cdot 100\% \quad (11)$$

Moottori-generaattorin tehoalue 200–250 kW tulee olla siirrettävissä ilman liiallista jännitteenalenemaa jokaiseen yksikköön, yhteen kerrallaan. Varsinainen maksimiteho on 250 kW. Kun moottorin jännite pidetään 400 V, niin virta on 430 A. Vaconin käyttöohjeen mukaan verkkokaapelit ja tulosulakkeet voidaan mitoittaa moottorin nimellisvirran perusteella, sillä verkkovirta ei ylitä moottorivirtaa.

Tähän virtaan, kun huomioidaan vielä jännitteenalenema (5 %), niin virraksi saadaan kaavalla 12:

$$I_{v(250kW)} = \frac{I_{(250kW)}}{95\%} \quad (12)$$

$$I_{v(250kW)} = \frac{430 A}{0,95}$$

$$I_{v(250kW)} = 452,6 A$$

Mitoitus on tehty D1-2012 käsikirja rakennusten sähköasennuksista mukaisella tavalla. D1-2012 mukaan, jolloin mitoitus tehdään seuraavan sulakekoon (>452,6 A) eli 500 A mukaan. D1-2012 taulukon 43.1 mukaan 500 A sulakekoon sallittu jatkuva kuormitus on vähintään 552 A. (STUL 2012, 134 & 217.)

Asennustapa on vapaasti ilmaan tehtävä, E. Ympäristönä on tehdasalue, jossa kaapeleita ympäröivä lämpötila alle 0 °C talvisin ja kesäisin parhaimmillaan 30 °C. Kaapelit kulkevat kaapelihyllyllään tehtaassa sisällä noin 3.5 m korkeudella, ja hallissa lämpötila on luokkaa 20 °C. Pahin tilanne on siis pihalla, kaapeleiden ollessa vapaasti ilmaan asennettavia lämpötilan ollessa 30 °C. Ilmaan asennettavien kaapelien korjauskerroin 30 °C lämpötilassa on 0,94 taulukosta 52.7. Tarvittaessa voidaan ulkoa oleville kaapeleille rakentaa suoja, jos kesäisin kaapelit ovat aurinkoa vasten. Tilanne kaapeleiden osalta ulkona on kuvassa 13. (STUL 2012, 223.)



KUVA 13. Kaapelointi ulkona

Kuitenkin kaapelit sijoitetaan uudestaan, kun laajennusta aletaan rakentaa. 8 kaapelia tulee omalle tikkailleen, näistä yksi on taajuusmuuttajan syöttökaapeli ja 4 testikentille lähteviä, ja 3 mahdollisia ohjauskaapeleita. Muista kaapeleista johtuva korjauskerroin 8 kaapelille yhdessä kerroksessa tikkailta, tuilla tai kiinnikkeillä on määritetty 0,78 taulukossa 52.11. Ohjauskaapelit voidaan huomioida, jotta saadaan mahdollisimman tarkka tulos. Mikäli ei niitä huomioitaisi, olisi korjauskerroin 0,8, joten sinänsä ne eivät vaikuta paljoa tulokseen. Tämä antaa vähän ylimitoitusta kaapeleille, sillä todellisuudessa kaikkia kaapeleita ei kuormiteta samanaikaisesti, vaan yhtä lähtöä (testikenttää) kerrallaan. (STUL 2012, 224.)

Kaavalla 13 voidaan laskea tarvittava kestettävä virta, I_z . Se saadaan jakamalla suoja-laitteen sallittu minimi jatkuva kuormitus, I'_z , korjauskertoimilla.

$$I_z = \frac{I'_z}{k} \quad (13)$$

$$I_z = \frac{552 \text{ A}}{0,94 \cdot 0,78}$$

$$I_z = 752,9 \text{ A}$$

Yhtälössä k on siis korjauskertoimet kerrottuna yhteen. Syöttö tarvitsee tässä tapauksessa toteuttaa rinnakkaisilla kaapeleilla, sillä asennustavalle poikkipinta-alalle 300 mm^2 suurin sallittu kuormitus on 527 A. Muutenkin Vaconin ohjeen mukaan kuuluu käyttää rinnansyöttöä tälle taajuusmuuttajalle ja moottorille.

Puolet lasketusta virrasta on 376,4 A. Sen perusteella taulukosta 52.1 voidaan valita 185 mm² poikkipinta-alaksi, jonka sallittu kuormitettavuus on 386 A. Kun valitaan rinnakkaisyöttöön kaapeleita, tulisi kaapeleiden olla samaa poikkipinta-alaa, samaa materiaalia, ei haaroitettua ja yhtä pitkiä, koska näin syöttö jakautuu kaapeleiden osalta tasan. Jos tilanne olisi niin, että 2 eri kaapeli poikkipinta-alaa syöttäisivät kuormaa, niin vähempi impedanssinen kaapeli kuormittuisi enemmän, mahdollisesti yli sallitun virran. Näiden vaatimusten voidaan olettaa toteutuvan 2x185 mm² kuparikaapelille. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2012, 14.)

Vertailuksi valmistaja on antanut saman kokoluokan (FR11) NX0590 5 – taajuusmuuttajalle verkko- ja moottorikaapeliksi 2x(3x240+120) mm² ja sulakekoon 700 A, korjauskertoimella 0,7. Kuitenkin todellinen kuormitus eroaa, joten tällä kuormalla kelpaa pienempi poikkipinta-ala sekä sulakekoko. (Vacon 2013, 43.)

Standardin 6000-4-43 mukaan ylikuormitukselta suojaavan suojalaitteen ominaisuuksien on täytettävä:

$$I_B \leq I_N \leq I_Z$$

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z$$

Mitoitusvirta I_B on 440,4 A, suojalaitteen nimellinen virta I_N on 500 A, suojalaitteen jatkuva korjauskerrottu virta I_2 on 752,9 A ja yhteenlaskettu ns. ”varmistusvirta”, joka on 772 A, I_2 . Korjauskerrottu virta I_Z kerrotaan 1,45 saadaan 1120 A. Tällöin jälkimmäinen ehtokin toteutuu, joten sulake toimii myös ylikuormitussuojana. (Suomen Standardisoimisliitto SFS 2012, 6.)

Eli moottorille tuleva kaapeli on poikkipinta-alaa 2x185 mm² kuparikaapelia ja sulake 500 A. Vastaavalla tavalla on laskettu generaattorilta lähtevät syötöt testikentille, kun oletetaan testikentän maksimi kuormaksi 220 kW ja tehokerroin luokkaa 0,7:

$$I = \frac{220 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V} \cdot 0,7} \quad (7)$$

$$I = 454 \text{ A}$$

jossa suojalaitteeksi kelpaa 500 A sulake ja $2 \times 185 \text{ mm}^2$ kuparikaapeli. Syötöksi on käytetty tehoa 220 kW, jolloin mitoitusvirta I_B on 454 A. Ylikuormitussuojaus toteutuu myös näillä lähdöillä, sillä korjauskertoimet ja sulakkeet ovat samat.

Seuraavaksi on laskettu jännitteenalenemaa. Moottorikaapeli tulee keskukselta noin 100 m matkan. Generaattorilta puolestaan lähtee syöttö 4 eri testikenttään, joiden etäisyydet ja yksiköt on kirjattu etäisyydet generaattorilta taulukkoon 3.

TAULUKKO 3. Etäisyydet yksiköittäin

Yksikkö	Etäisyys (km)
Tuotekehitys	0,03
EVV	0,06
Sopimusvalmistus	0,08
Lentokenttäasäätimet	0,10

Moottorikaapelit on yleisesti fiksumpaa valita kuparisina, sillä sähkönkulku on helpompaa niissä (pienempi resistanssi/reaktanssi), jolloin saadaan pienemmät poikkipinta-alat. Myös itse asentaminen on helpompaa tällöin, kun kaapeli ei ole niin paksua. Käynnistys on luonnollisesti pahin tilanne jännitteenaleneman suhteen. Moottoria käynnistettäessä taajuusmuuttajalta saatava maksimivirta on 936 A moottorille 20 s ajan. Tämä on lähinnä teoreettinen laskenta, todellisuudessa moottori voidaan käynnistää usein alle moottorin nimellisen virran. $2 \times 185 \text{ mm}^2$ poikkipinta-alan kuparikaapelille jännitteenalenema saadaan kaavalla 9, kun on laskettu ensin kaapeleiden resistanssi ja reaktanssi (Kaava 14). Resistanssi on $0,125 \text{ } \Omega/\text{km}$ ja reaktanssi $0,08 \text{ } \Omega/\text{km}$. (STUL 2012, 96.)

$$(R + jX) = \left(\frac{1}{r+jx} + \frac{1}{r+jx} \right)^{-1} \quad (14)$$

$$(R + jX) = \left(\frac{1}{0,125 + j0,08} + \frac{1}{0,125 + j0,08} \right)^{-1}$$

$$(R + jX) = 0,0625 + j0,04$$

Moottorin tehokerroin käynnistyksessä on luokkaa 0,3 (sinille 0,954) ja etäisyys keskukselle noin 100 m.

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 0,10 \text{ km} \cdot 936 \text{ A} \cdot (0,0625 \cdot 0,3 \pm j \cdot 0,04 \cdot 0,954) \quad (10)$$

$$\Delta U = 6,9 \text{ V}$$

Jos halutaan pessimistisempi tulos, voidaan laskea ilman imaginääri j:tä:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 0,10 \text{ km} \cdot 936 \text{ A} \cdot (0,0625 \cdot 0,3 \pm 0,04 \cdot 0,954) \quad (10)$$

$$\Delta U = 9,2 \text{ V}$$

Tästä edelleen voidaan jännitteenalenema laskea prosentteina kaavalla:

$$\Delta u = \frac{9,2 \text{ V}}{400 \text{ V}} \cdot 100 \% \quad (11)$$

$$\Delta u = 2,3 \%$$

Eli moottorin käynnistys aiheuttaa keskuksessa noin 2,3 % jännitteenaleneman tällä kaapeli poikkipinta-alalla, tähän lisäksi pitäisi laskea vielä keskuksen kiskoston oma jännitteenalenema. Tehtaassa generaattorin magnetointi aloitetaan vasta, kun moottori pyörii nimellisellä nopeudellaan ja tämän jälkeen kytketään kuormat. Eli käynnistystä ei tarvitse huomioida jännitteenaleneman kannalta. Lentokenttäsäädinyksikölle on pisin matka, noin 100 m.

Generaattorin tehokerroin, kun kuorma on hieman yli puolet nimellisestä, on luokkaa 0,7. Tämä, kun kerrotaan käänteisellä kosinilla ja muunnetaan sinillä, saadaan 0,7141 laskentaa varten. Virtana voidaan käyttää testikenttien syötön maksimitohon 220 kW virtaa, joka on 454 A. Resistanssi ja reaktanssi ovat edelleen samat, sillä käytössä on sama poikkipinta-ala. Käytännössä rinnansyötön resistanssi ja reaktanssi kilometriä kohden ovat puolet näistä arvoista. (STUL 2012, 96.)

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 0,125 \text{ km} \cdot 454 \text{ A} \cdot (0,0625 \cdot 0,7 \pm j \cdot 0,04 \cdot 0,7141) \quad (10)$$

$$\Delta U = 5,1 \text{ V}$$

Jos halutaan edelleen pessimistisempi tulos, voidaan laskea ilman imaginääri j:tä:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot 0,125 \text{ km} \cdot 454 \text{ A} \cdot (0,0625 \cdot 0,7 \pm 0,04 \cdot 0,7141) \quad (10)$$

$$\Delta U = 7,1 \text{ V}$$

Tästä edelleen voidaan jännitteenalenema laskea prosentteina kaavalla:

$$\Delta u = \frac{7,1 V}{400 V} \cdot 100 \% \quad (11)$$

$$\Delta u = 1,8 \%$$

Näin kaapelista aiheutuva jännitteenalenema pysyy hyvin sallituissa $\pm 10 \%$ rajoissa. Jännitteenaleneman puolesta kaapeli voisi olla pienempikin. Todellinen kuormitus ja suojalaite kuitenkin määrittelevät käytetyn kaapeli poikkipinta-alan. Jännitteenalenemat eri yksiköihin kaapeleiden osalta on kirjattu taulukkoon 4.

TAULUKKO 4. Jännitteenalenemat yksiköittäin

Yksikkö	Kaapeli A (mm ²)	I (A)	l (km)	U _h (V)	U _h (%)
Moottori nimellinen	2x(3x185/95)	415	0,1	4,1	1,0
Moottori käynnistys	2x(3x185/95)	936	0,1	9,2	2,3
Tuotekehitys	2x(4x185/95)	454	0,04	2,3	0,6
EVV	2x(4x185/95)	454	0,065	3,7	0,9
Sopimusvalmistus	2x(4x185/95)	454	0,085	4,8	1,2
Lentokenttäasäätimet	2x(4x185/95)	454	0,125	7,1	1,8

Taulukossa 4 on siis yksiköittäin oleelliset tiedot. Moottorille jännitteenalenema on laskettu sekä käynnistystilanteessa, että nimellisessä. Virrat on laskettu tehojen perusteella. Kuten aiemmin mainittu, testikenttien tehona on käytetty 220 kW ja moottorilla 250 kW. Jännitteenalenemat eivät ole kaapelien osalta suuria, pahimmillaan moottorin käynnistyessä, jolloin jännitteenalenema on 2,3 %. Kaapelin poikkipinta-ala, A, sarakeessa on 2x kerroin, sillä syötöt ovat rinnansyöttöjä.

Vaconin mukaan moottorikaapeleissa tulee olla 360⁰:n EMC-maadoitus. Muiden kaapeleiden standardien mukaiset vaatimukset on esitetty taulukossa 5. (Vacon 2013, 34.)

TAULUKKO 5. Standardien edellyttämät kaapelityypit

Kaapelityyppi	L-taso	T-taso
Verkko	1	1
Moottori	2	1/2*
Ohjaus	4	4

L-tasolla tarkoitetaan EN61800-3+A11 mukaista 2.ympäristöä. T-taso on puolestaan kelloille verkoille. Tehtaalla on kyseessä siis L-tason verkko. Numerot tarkoittavat eri kaapelityyppejä – 1 on vahvavirtakaapeli, joka sopii kiinteään asennukseen. 2 on symmetrinen vahvavirtakaapeli, joka on varustettu konsentrisella suojajohtimella. 4 on häi-

riösuojattu kaapeli, joka on varustettu tiiviillä, pieni-impedanssisella suojavaipalla. Ohjauskaapelien tulee olla vähintään 0.5 mm² monijohdinkaapelia, maksimikoko on puolestaan releliittimille 2.5 mm² ja muille 1.5 mm². Kaapeleiden tulee luonnollisesti olla sopivia kyseessä olevalle verkkojännitteelle. (Vacon 2013, 35.)

MCMK – tyyppin kaapeli on kuparivoimakaapeli, jonka johtimet ovat muovieristeisiä (PVC-sekoite) ja vaippa PVC – muovia. Kaapeleiden tiedot ovat taulukoissa 6-7. Moottorikaapelissa on 3 vaihe- ja maadoitusjohdin. Generaattorilta testikentille johtimia on: 3 vaihe-, nolla- ja maadoitusjohdin. Tyypiksi käy MCMK F4B, joka on soveltuva kiinteisiin asennuksiin, niin sisällä kuin ulkonakin. (Reka 2015.)

TAULUKKO 6. MCMK F4B 3x185/95 tekniset tiedot (Reka 2015.)

Jännitetaso	0,6/1 (1.2) kV
Halkaisija (mm)	49
Paino (kg/km)	6900
Pienin taivutussäde (cm)	59
Pienin taivutussäde, kertataivutus (cm)	39
Suurin vetovoima vetopäällä (kN)	20
Suurin vetovoima vetosukalla (kN)	8,5
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi, +20°C (ohm/km)	0,0991
Kuormitettavuus maassa, johdin +65°C (A)	420
Käsittely (°C)	-15
Käyttö (°C)	+70
Oikosulku (°C)	+160
Sähkönumero	06 031 65
Kuormitettavuus ilmassa, johdin +70°C (A)	386

TAULUKKO 7. MCMK F4B 4x185/95 tekniset tiedot (Reka 2015.)

Jännitetaso	0,6/1 (1.2) kV
Halkaisija (mm)	56
Paino (kg/km)	8900
Pienin taivutussäde (cm)	67
Pienin taivutussäde, kertataivutus (cm)	45
Suurin vetovoima vetopäällä (kN)	20
Suurin vetovoima vetosukalla (kN)	8,5
Vaihejohtimen maks. tasavirtaresistanssi, +20°C (ohm/km)	0,0991
Kuormitettavuus maassa, johdin +65°C (A)	420
Käsittely (°C)	-15
Käyttö (°C)	+70
Oikosulku (°C)	+160
Sähkönumero	06 023 85

Kaapelin muita ominaisuuksia on nipussa paloa levittämätön (EN 60332-3-23) ja paloluokka nimenkin mukaan F4B. Toisin kuin moottori- ja verkkokaapeli, tulee ohjauskaapeleiden olla EMC-suojattuja. (Reka 2015.)

Vastaavasti ohjauskaapeleille, joihin voi käyttää vaikka -kaapelia, eli muutamalankaista tinattua kuparikaapelia, ei jännitteenalenemaa saa tulla liikaa. Kontaktoreiden tulee toimia kelajännitteellä, joka on minimissään 0,85 nimellisestä.

Oletetaan ohjauksen virran olevan 20 mA ja kaapelin vaikka poikkipinta-alalta 1,5 mm². Kuparikaapelin resistanssi on tällöin 14,62 Ω/km ja reaktanssi 0,115 Ω/km. Tehokerroin on noin 0,9. Näin pisin sallittu matka saadaan jännitteenaleneman kääntämällä jo esitetty kaava 10:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot l \cdot I \cdot (r \cdot \cos \varphi \pm j \cdot x \cdot \sin \varphi)$$

$$l = \frac{\Delta U}{\sqrt{3} \cdot I \cdot (r \cdot \cos \varphi \pm j \cdot x \cdot \sin \varphi)}$$

$$l = \frac{24 \text{ V} \cdot 0,15}{\sqrt{3} \cdot 20 \text{ mA} \cdot (14,62 \cdot 0,9 \pm j \cdot 0,115 \cdot 0,43589)}$$

$$l = 7,9 \text{ km}$$

Tämä on lähinnä teoreettinen laskentatapa ja oletuksella, että virta on 20 mA. Kuten huomataan, näin pienellä virralla jännitteenalenema on käytännössä olematonta. Ohjauskaapelointiin taajuusmuuttajan osalta tarvitaan EMC-suojattuja ohjauskaapeleita, muiden ohjauskaapeleiden, jotka eivät lähde tai tule taajuusmuuttajalle ei tarvitse olla EMC-suojattuja. Tällöinen, EMC – suojattu, kaapeli on esimerkiksi JAMAK – tyyppin kaapeli.

Taajuusmuuttajan EMC – vaatimukset täyttyvät ainoastaan tehtaalla asetetuilla kytkentätaajuuksilla. Kaapeleiden osalta on käytettävä erityistä läpivientitiivistettä ja EMC-maadoittimet tulee mitoittaa moottorikaapelin koon mukaan. (Vacon 2013.)

4 SUOJAUS

Suojauksen tulee olla selektiivistä, jotta mahdollisimman pieni osa piiristä jää pois käytöstä. Suojauksen tulee myös olla riittävän nopeaa, mutta samalla tarpeeksi herkkä. Herkällä viitataan suojalaitteiden havahtumiseen vikatilanteissa. Suojareleet ja niiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suoja-alueita. Releet tarvitsevat lisäksi toimiakseen muitakin komponentteja, joista mainittakoon mittamuuntajat, katkaisijat ja apuenergiälähteet. Katkaisijat ovat ns. primääripiirin (pääpiiri) osia, jolle releet antavat sulku- ja avauskoskettimiensa välityksellä toimintaohjeita. Itse toimintaa ohjataan apuenergiälähteellä tai toissijaisesti normaalilla jakeluverkon vaihtojännitteellä. Tässä kappaleessa on kuvattu pääpiirit ja niiden ohjauspiirit. (Mörsky 1993, 15–18.)

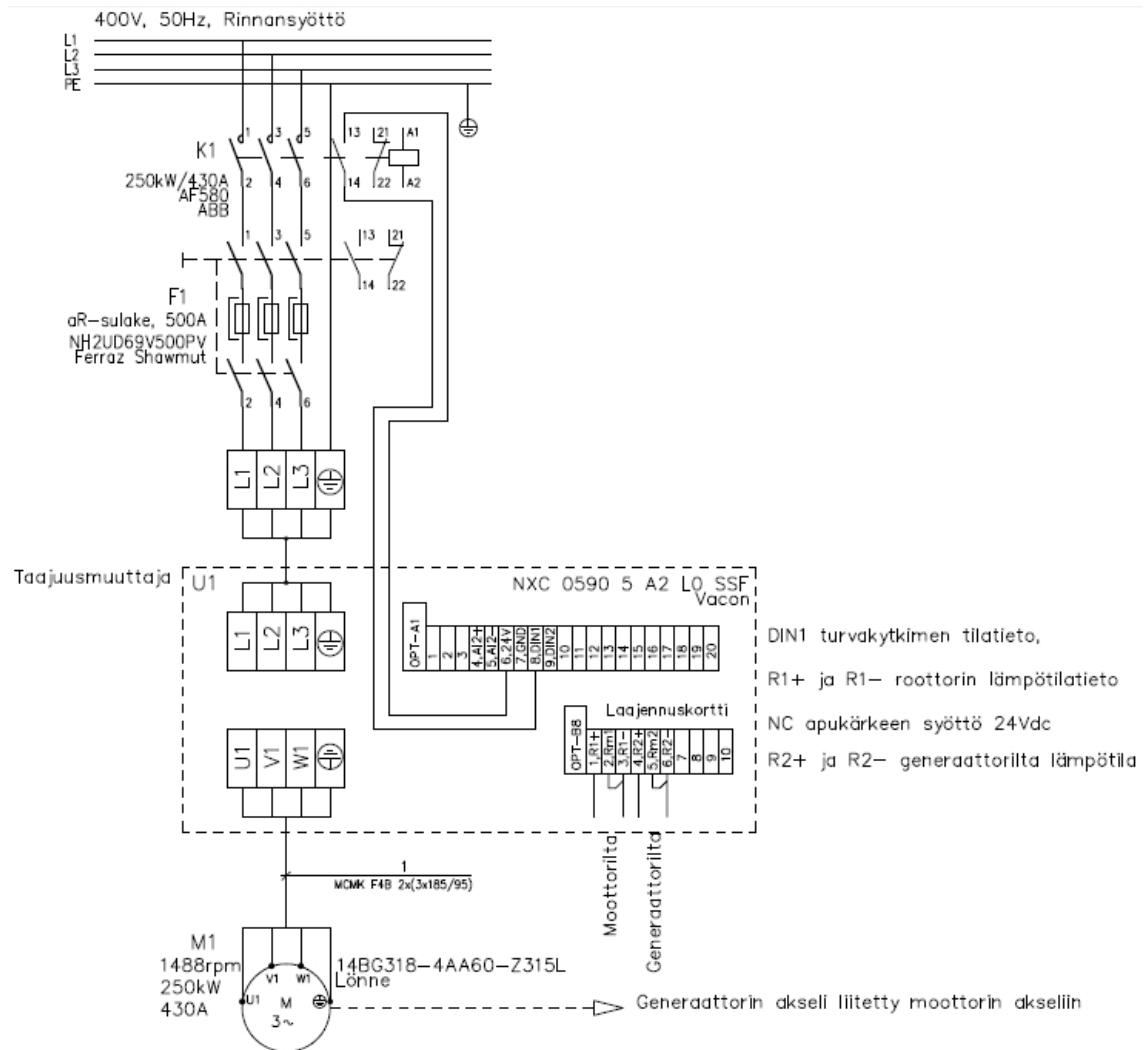
4.1. Moottori

Itse moottorin suojauksen tulisi kattaa ainakin seuraavat: käynnistysrasitus, ylikuormitus, yllämpö, epäsymmetria, ylijännite, alijännite/hetkellinen jännitekatko, sähköverkon oikosulku, staattorin käämi- ja maasulku, alimagnetointi (tahtimoottori), roottorin maasulku, magnetointipiirin vika (tahtimoottori) ja tärinä. Käytännössä nämä on katettu, kun moottorin edessä on taajuusmuuttaja ja sen omassa kaapissa lähdön sulakkeet. Seuraavassa kappaleessa on esitetty taajuusmuuttajan kattama suojaus. Taajuusmuuttajalla tosin olisi hyvä mitata moottorin lämpötilaa lämpötila-anturilla omalla johtimellaan staattorissa. Staattorin maasulku voidaan toteuttaa nollavirtareleellä, joka kytketään kaapelivirtamuuntajan toisioon, mutta maasululta suojautuminen tapahtuu usein luotettavasti taajuusmuuttajan omalla maasulkuvalvonnalla. Tosin käyttömaadoitetussa pienjänniteverkossa oikosulkusuojaus toimii myös maasulkusuojana. Edelleen suojaustasoa voi parantaa vaihejärjestyssuojauksella, joka moottorin pyöriessä väärään suuntaan suorittaa hälytyksen. (Mörsky 1993, 171–186.)

4.1.1 Vaihtoehto 1

Kyseessä on sen verran iso taajuusmuuttajakäyttö, että taajuusmuuttaja sijoitetaan sitä varten rakennettuun sähkökaappiinsa. Valmistajan mukaan laite on suojattu seuraavilta: ylijännite, alijännite, maasulku (vain itse laite), syötönvalvonta (toimii, vain jos jokin vaihe puuttuu), lähtöjännitteenseurvalvonta (vain, jos jokin vaihe puuttuu), ylivirtasuojaus, laitteen yllämpösuojaus, moottorin ylikuormitussuojaus (mikäli järjestelmäohjelmisto

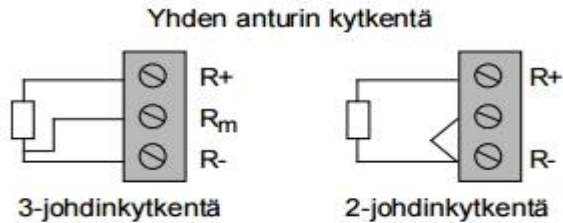
on NXP0002V186 tai uudempi), moottorin jumisuojaus, moottorin alikuormitussuojaus ja riviliittimien 24 Vdc ja 10 Vdc oikosulkusuojaus. Erityisesti pienillä taajuuksilla moottori on vaarassa ylikuormittua termisesti. Tähän voidaan edelleen vaikuttaa positiivisesti moottorin ulkoisella puhaltimella. Moottorin lämpösuojauksen voi säätää parametreilla, Vaconin taajuusmuuttajien osalta parametreilla 9.7–9.10. Tämä ei ole toki välttämätöntä. Näin varsinainen pääpiiri moottoriin asti näyttää seuraavalta (Kuva 14). (Vacon 2014, 20.)



KUVA 14. Moottorin pääpiiri

Kuvassa 14 kontaktorin apukärjen kytkentäpiste 13 on kytketty taajuusmuuttajan apujännitteeseen 24 Vdc (6) ja kytkentäpiste 14 on kytketty taajuusmuuttajan DIN1 tuloon. Näin taajuusmuuttaja on riippuvainen kontaktorin tilasta (päällä/pois). Lisäksi moottorilta on tuotu roottorin lämpötilatieto laajennuskorttiin, johon voidaan tuoda myös generaattorin lämpötilatieto. Moottorin lämpötila tulee OPT-B8 laajennuskortin riviliittimiin R1+ ja R1-. Generaattorin puolestaan R2+ ja R2-. R1- on kytketty R1m, kuten Vaconin

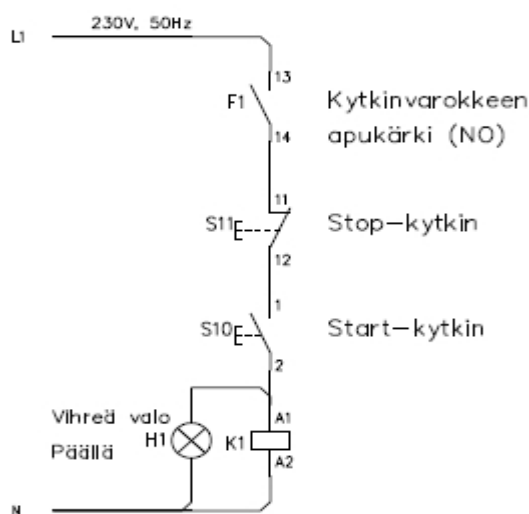
kytkentäohjeessakin. Se on esitetty alapuolella (Kuva 15). Laajennuskortissa on PT100 – anturi, joten se on pakollinen, mikäli halutaan lämpötilatietoa moottorilta tai generaattorilta. (Vacon 2014.)



KUVA 15. Laajennuskortin OPT-B8 kytkentä (Vacon 2014.)

Taajuusmuuttajan kaapin mukana tulee lisäksi sinifiltteri (OSI/lähtösuodin) parantamaan sähkönlaatua, common mode kuristin ja kytkinvaroke. Käytännössä tämä tarkoittaa, sitä että moottori on suojattu jo taajuusmuuttajalla. Lähtöön voidaan valita kontaktori. Kontaktoriksi kelpaa ABB:n valmistama AF580 – tyyppin kontaktori, jonka teho on 250 kW ja nimellinen virta 430 A, jotka vastaavat myös moottorin kilpitietoja. Lämpöreleelle tai ylivirtasuojalle ei ole käyttöä, kun kyseessä on taajuusmuuttajalähtö. Paras tapa moottorin termiseen suojaamiseen on käyttämällä PT-100 elementtejä, jotka mitaavat juuri koneiden lämpötilaa suoraan käämityksestä. (Hietalahti 2013, 87. & ABB 2006.)

Alla on kontaktorin ohjauspiiri kuvassa 16.

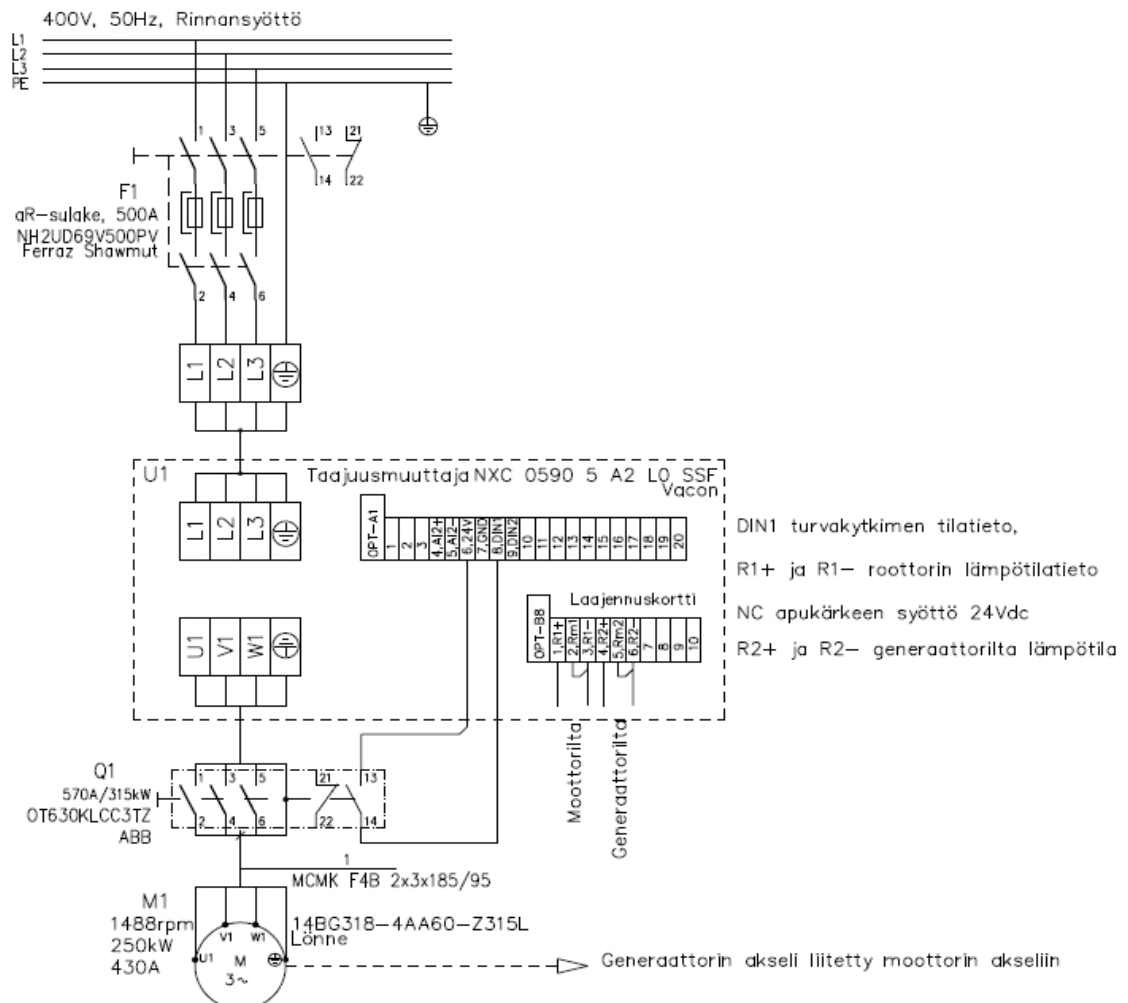


KUVA 16. Moottoripiiriin kontaktorin ohjaus

Ohjauspiiri moottoriin asti on melko simppeli. Apukärkiä tarvitaan 1 ja 2 painiketta (Start ja Stop). Kun kytkinvarokkeen apukärki F_1 on normaalitilassaan (NC), ja Stop – painiketta ei paineta, Start – painikkeella saadaan kela vetäneeksi ja vihreä valo syttyy kaapin oveen. Etuna tässä on, että käynnistäminen/pysäyttäminen voidaan tehdä painonapeilla.

4.1.2 Vaihtoehto 2

Pääpiiri voidaan myös rakentaa ilman kontaktoria, jolloin pääpiiri on seuraavanlainen (Kuva 17). Tässä on myös turvakytkin moottorille. Turvakytkin on ABB:n osalta 400V – jännitetasossa valittava joko tehon 220 kW tai 315 kW mukaan. 315 kW on nimellistä tehoa suurempi, joten se käy paremmin käyttötarkoitukseen. Tyyppi on OT630KLCC3TZ, ja se on ABB:n valmistama koteloitu ja häiriösuojattu turvakytkin. (ABB 2006.)

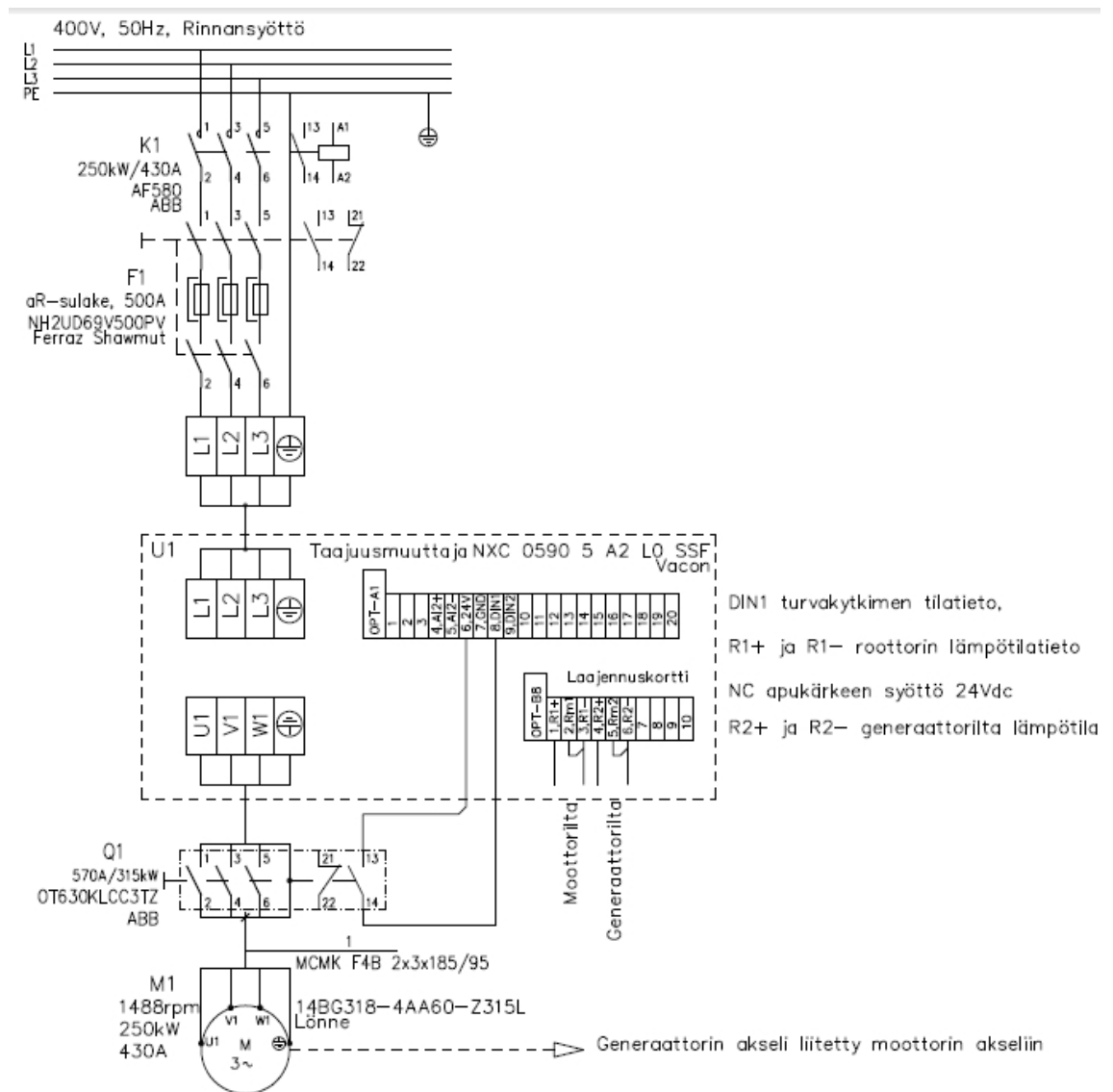


KUVA 17. Moottoripiiri turvakytkimellä

Mikäli kontaktoria ei ole, käynnistyy piiri kun kytkinvaroke on asennossa ”1” ja turvakytkin on kiinni. Kaapelit ovat molemmissa ratkaisussa samat siis MCMK F4B 2x(3x185/95). Piirille ei varsinaisesti ole erillisen ohjauksen tarvetta, vaan taajuusmuuttaja hoitaa turvakytkimen tilan ja moottorin lämpötilan kautta ohjausta.

4.1.3 Vaihtoehto 3

Huollon ja ohjauksen kannalta paras ratkaisu on näiden yhdistelmä. Tällöin pääpiiri näyttää seuraavalta (Kuva 18).



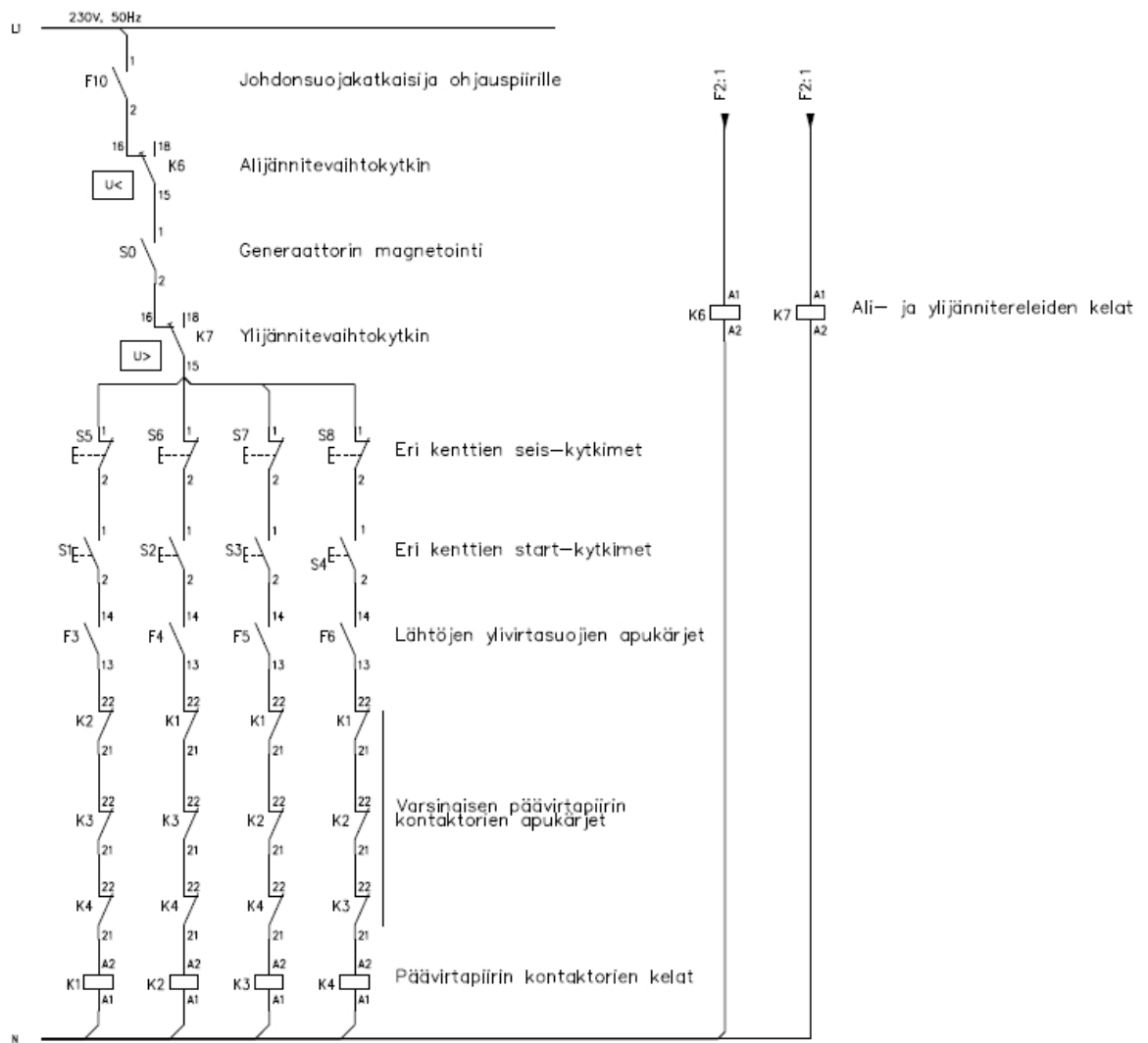
KUVA 18. Pääpiiri

Tässä ratkaisussa on kahden aikaisemman paremmat puolet. Komponentit ovat vastaavat kuin aiemminkin. Ohjauspiiri vastaava kuin vaihtoehto 1 yhteydessä, toki turvakytkimen apukärki tulee kytkeä myös. Mikäli haluttaisiin ”säästöratkaisu”, ainoastaan taa-juusmuuttaja kytkinvarokkeineen olisi ennen moottoria ja mahdollinen laajennuskortti moottorin lämpötilatietoa varten.

4.2. Generaattori

Generaattori syöttää 4 eri testikenttää, ja kun tehoa ohjataan testikenttiin 100–220 kW teholla, tulee myös nämä lähdöt generaattorilta suojata oikosululta. Lähdöt voidaan varustaa sulakkeilla tai kompaktikytkimillä. Kompaktikytkin on sulakkeeton suojaus, joka toimii oikosulkusuojana. Lisäksi kun kuorma on osittain vinokuormaa, tarvitsevat lähdöt varustaa epäsymmetria- eli vinokuormitussuojilla, jotka perustuvat vastakomponentin erilleen pelkistämiseen. Suojausreleelle epäsymmetria asettelut määritellään usein vastakomponentin ja myötäkomponentin suhteella. Epäsymmetriarele voidaan muodostaa ylivirtareleestä varustamalla se suodattimella, joka kykenee erottamaan kuormitusvirrasta vastakomponentin. Valmistajilta saa tarkempaa tietoa suotimista. (Mörsky 1993, 41–45.)

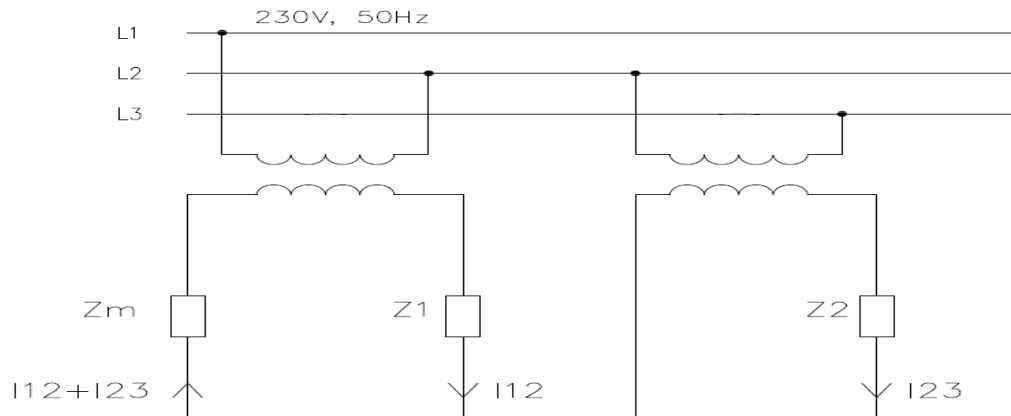
Suojauksen kohteita ovat käytännössä samat asiat kuin roottorilla. Generaattoria tulisi suojata mm. staattorin ylivirralla, staattorin ulkopuoliselta oikosululta, yllämpötilalta, staattorin käämisululta (vaiheiden oikosulku), roottorin vastaavilta, maasululta, epäsymmetriseltä kuormalta, alimagnetoinnilta, ryntäykseltä ja tulipalolta. Tärkeää on myös se, että pelkkä katkaisijan avaus ei riitä vikatilanteessa – vaan magnetointi on myös poistettava ja mahdollisesti päästettävä sammutuskaasu CO₂ generaattoriin. Alla on esitetty sähkökuva generaattorin pääpiiristä (Kuva 19). (Mörsky 1993, 141–169.)



KUVA 20. Generaattorin ohjauspiiri

Kuvassa 19 nuolet $F2:1$ ovat pääpiirin puolelta ensimmäisen vaiheen jännite. Alijännite- ja ylijänniterele ottavat syöttönsä vaiheesta 1 ja samalla vertailevat tätä jännitettä asetettuun yli- tai alijännitelaukaisu arvoonsa. Jännitereleiden kelat saavat syötön siis suoraan, ja ne ovat kelat oikealla alhaalla (K6 & K7). Laukaisu tapahtuu, kun asetettu jännite ylittyy tai alittuu. Jotta mikään pääpiirin keloista (K1-K4) voi saada virtaa, tarvitsee ohjauspiirin johdonsuojakatkaisija olla kiinni ja generaattorin magnetoinnin olla päällä. Jos esimerkiksi testikenttään 1 halutaan syöttö, tarvitsee lisäksi muiden testikenttien syöttö olla pois päältä (kelat K2-K4), sekä lähdön oma ylivirtasuojan apukärki F3 olla kytkettynä. Eri kenttien syöttö käynnistetään start – painikkeella ja vastaavasti pysäytetään stop – painikkeella. Kun magnetointi ei ole päällä, ei generaattorissa ole jännitettä, joten varsinaista ristiin lukitusta ei tarvita. Näin toteutettu syöttö vaatii melko paljon johdottamista ohjauspiirin osalta. Seuraavassa luvussa (5) on pohdittu muita vaihtoehtoja ohjaamiseen.

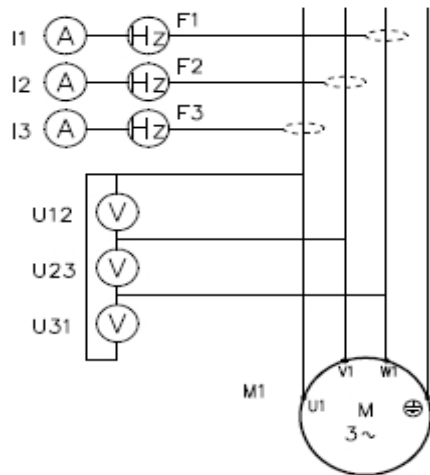
Aiemmin on puhuttu vinokuormasta. Generaattorin osalta tämä voidaan toteuttaa varustamalla ylivirtareleet suotimilla, jotka kykenevät erottamaan kuormitusvirrasta virran vastakomponentin. Mikäli vinokuorma ei ole pääsääntöisesti ilmenevä ”ongelma”, saattaa lämpörele / ylivirtarele riittää hyvin suojaaksi. Periaatteena epäsymmetriareleelle on esitetty alapuolella kuvassa 21. (Mörsky 1993, 41–45.)



KUVA 21. Epäsyymeriareleen kytkentäperiaate

Ajatuksena, että impedanssien Z_1 ja Z_2 läpi kulkevat virrat syöttävät impedanssin Z_m kautta kulkevan summavirran. Tästä Z_m impedanssista kulkevalle virralle voidaan asettaa laukaisu kytkimen kautta primääripiirille, kun esimerkiksi sallittu vaihe-ero virtojen (Z_1 ja Z_2) välillä ylittyy tai alittuu.

Lisäksi moottorin virta, jännite ja taajuus voidaan mitata alla olevan kuvan 22 mukaisesti. Tässä tulee kuitenkin huomioida, että moottorille tuotettu jännite on taajuusmuuttajan takia pulssinleveys moduloitua, joka hankaloittaa sen mittaamista. Fiksumpaa olisi mitata suureet suoraan generaattorilta samaan tapaan.



KUVA 22. Virta, taajuus ja jännitemittaus

Moottorilta voidaan siis mitata joka vaiheen väliltä pääjännite Fluken yleismittarilla, virta taas voidaan mitata virtamuuntajan läpi, josta voidaan samalla mitata taajuus. Virta tarvitsee yleismittarilla asettaa kertomalla se muuntosuhteella, jotta saadaan todellinen virta. Taajuushan on sama piireissä, riippumatta virran arvosta. Kuten mainittu, vastaa-va voitaisiin tehdä generaattorin lähtöön, jossa jännite ei ole moduloitua, vaan teoriassa ainakin sinimuotoista. Tällöin mittaaminen ja samalla tuloksetkin ovat luotettavampia.

5 OHJAUS

Taajuusmuuttajan ohjaus voidaan tehdä joko paikallisesti tai ulkoisesti. Paikallisella ohjauksella ohjaus tapahtuu suoraan taajuusmuuttajan ohjauspaneelilla, joka tehdasympäristö ei ole varsinaisesti ideaalista. Eri valmistajasta riippumatta, local (LOC) -tila tarkoittaa paikallista ohjausta ja remote (REM) – tila kauko-ohjausta.

Taajuusmuuttajan tapauksessa kauko-ohjaus voidaan suorittaa I/O-liittimien kautta, jotka ovat digitaali- ja analogiatuloja. Apujännite saadaan laitteen omista liittimistä, tai tarvittaessa verkosta.

5.1. Taajuusmuuttajan ohjaus

Taajuusmuuttajissa on oma laitekohtainen ohjausyksikkö, jolle annetaan säädetyn käytön perustiedot, seurataan laitteen toimintaa ja hetkellisiä toiminta-arvoja. Tietoja ovat esimerkiksi virta, pyörimisnopeus, pyörimissuunta, teho, energian kulutus ja häiriötiedot. Kun taajuusmuuttaja otetaan käyttöön, se tulee parametroida eli syöttää taajuusmuuttajalle kytketyn moottorikäytön toiminta-arvot. Parametointi voidaan tehdä tietokoneavusteisesti, väyläliittymän avulla automaatiojärjestelmällä tai paikallisesti muuttajan omasta näyttöpaneelistä käsin. (Hietalahti 2013, 75.)

Kytkeä muihin järjestelmiin ja näiden ohjaukset voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Sovellusliittymän avulla mm. taajuusmuuttajan nopeusohje voidaan valita analogiatuloista, kenttäväylältä, vakionopeuksista tai ohjauspaneelilta. Muuttajista löytyy perusominaisuuksina yleisesti:

- digitaalitulot, joille voidaan asettaa erilaisia toimintoja
- digitaali-, rele- ja analogialähdöt ovat vapaasti ohjelmoitavissa
- mahdollisuus kytkeä muuttaja kenttäväylään väyläkohtaisella kortilla

mahdollisuus kytkeytyä muuttajaan tietokoneitse. (Hietalahti 2013, 90.)

Väyläliittymässä taajuusmuuttajaa voidaan käyttää esimerkiksi prosessitoiminnan anturina, koska tällöin kuormituksesta ja nopeudesta voidaan saada esimerkiksi jonkin pumppun virtausarvo. Lisäksi väyläliittymä mahdollistaa Master-Slave -tyyppiset kytkennät, eli esimerkiksi yksi muuttaja on määräävä laite (Master), jonka toimintaa muut taa-

juusmuuttajat (Slave) seuraavat. Väylän avulla tulee mahdolliseksi suurempi määrä I/O liityntöjä, mikä antaa enemmän mahdollisuuksia taajuusmuuttajan ohjauksiin sekä kaapelointi on yksinkertaisempaa. (Hietalahti 2013, 91–92.)

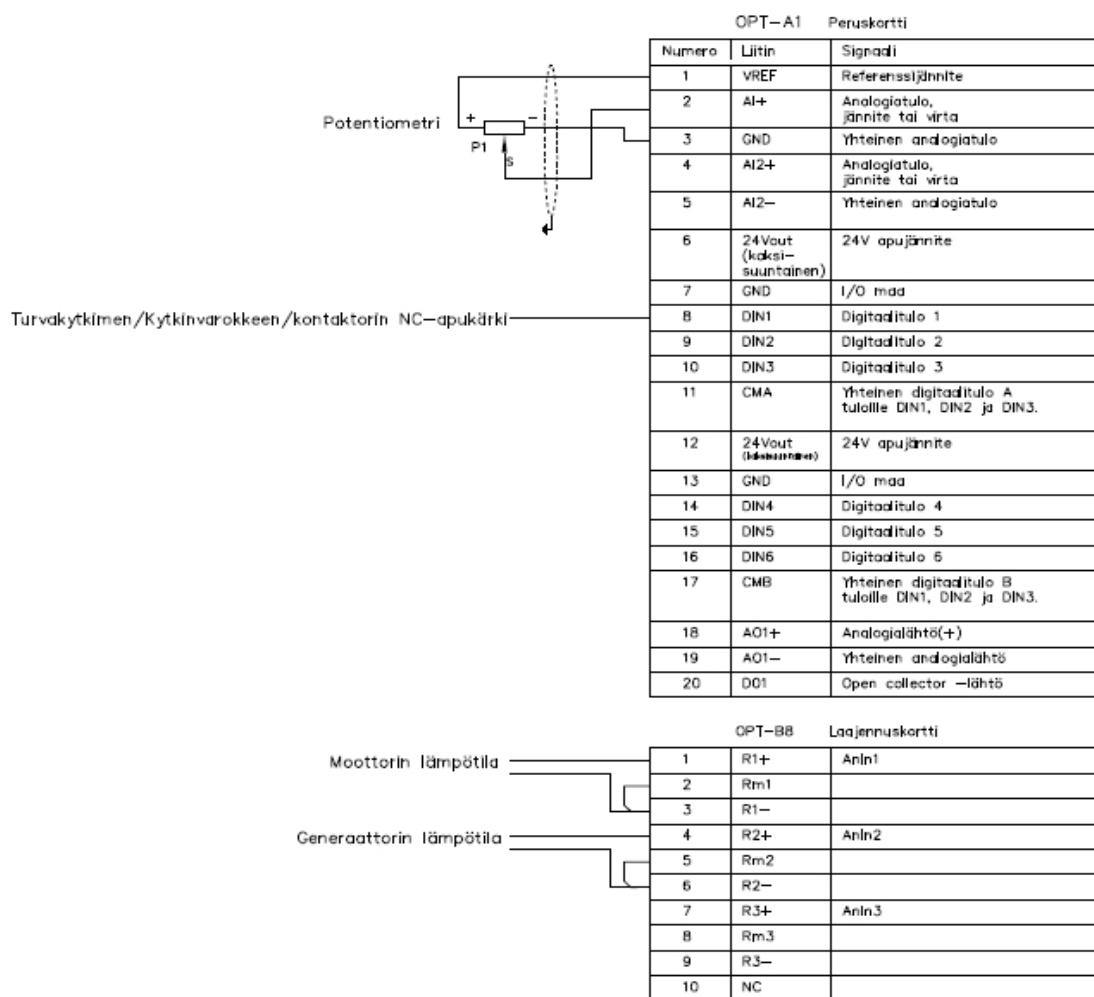
5.2. Vacon NXC

Tulevan taajuusmuuttajan, eli Vaconin valmistaman NXC – sarjan taajuusmuuttajissa on sisäänrakennettu 5 laajennuskorttipaikkaa lisä input/output, kenttäväylä- ja turvakortteja varten. Verkkokuristimen sijasta NXC-taajuusmuuttajassa on LCL-suodatin ja siihen sisältyy vakiovarusteena apujännitemuuntaja. LCL-suodatin sisältää tosin verkko-puolella kuristimen ja AFE (Active Front End/ suom. aktiivinen syöttösilta) -puolella sekä kuristimen että kondensaattorin. Edelleen LCL-suodatin sisältää maapotentiaalia vasten kytketyt kondensaattorit. Kondensaattorien kanssa rinnan kytketään vastukset, joilla puretaan niiden varaus, kun taajuusmuuttaja kytketään pois päältä. Mikäli apujännite on 230 V syötölle, täytyy muuntajan väliulosotot säätää verkkojännitteen mukaan. (Vacon 2013, 32.)

Taajuusmuuttaja on Vaconin takaamana suunniteltu ja valmistettu yleisten, pienjännite-direktiivien ja EMC standardien mukaisesti (EN 60204-1:2006+A1:2009, EN 61439-1:2013, EN 61439:2-2013, EN 61800-3:2004+A1:2012, pienjännitedirektiivi 2006/95/EY ja EMC-direktiivi 2004/108/EY). Tämän lisäksi kojeistokaapin yläpuolella ja eteen tulee jättää tarpeeksi tilaa riittävää jäähdytystä ja huoltotoimenpiteitä varten, tyyppille 0590 5 tarvittava jäähdytysilmamäärä on 3000 m³/h. Ympäristön tulee olla lämpötilaltaan -40.. +70 °C, suhteelliselta kosteudeltaan alle 95 % ja pölytön. Yleiset ohjeet asennukseen ja turvallisuusohjeet löytyvät Vaconin valmistamasta tuotteen manuaalista. (Vacon 2014, 20.)

Paneelilla on 7 eri valikkoa: valvonta-, parametri-, paneeliohjaus-, aktiiviset viat-, vika-historia-, systeemi- ja laajennuskortit-valikko. Ne on nimetty tässä järjestyksessä M1, M2.. M7. Parametrivalikossa (M2) määritetään käskyt, joita käyttäjä haluaa siirtää taajuusmuuttajalle. Paneeliohjausvalikosta (M3) määritetään esimerkiksi ohjauspaikka (riviliitin, paneeli, kenttäväylä) ja stop-painikkeen toiminta (toiminta rajattu / aina käytössä). Samaisen valikon alavalikko (P3.2) näyttää taajuusohjeen ja sallii käyttäjän muokata sitä. Systeemivalikosta (M6) valitaan itse sovellus: perus-, vakio-, paikallis-/kauko-ohjaus-, vakionopeus-, PID-säätö-, erikoiskäyttö- ja pumppu- ja puhallinsovel-

lus. Laajennuskortit-valikosta (M7) voidaan tarkistaa, mitkä laajennuskortit on liitetty ohjauskorttiin, ja tarkastella ja muokata laajennuskorttiin liittyviä parametrejä. Näin, mikäli muokataan analogiatulojen/-lähtöjen signaalien sisältöä, tulee muuttaa ne vastaavan laajennuskorttiparametrin arvoja myös. Ohjauskorttien virta voidaan tuoda myös ulkoisesta lähteestä. Ajatuksena oli myös, että taajuusmuuttajassa on oma ns. sini-filtteri (+OSI), jolloin taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden parametrille (par 2.6.9, ID601) on annettava arvo suotimen määrittelyn mukaan, jotta suodin ei vioitu. Tätä kautta testikentille sähkönlaatu on mahdollisimman hyvää. Alla on esitetty kuva 23, jossa on ohjausliittimien signaalien syöttö. (Vacon 2013, 90–93.)



KUVA 23. Ohjausliittimien signaalit

Potentiometrille käyttöjännite otetaan esimerkiksi taajuusmuuttajan omasta referenssi-jännitteestä ja potentiometrin toinen napa on maan potentiaalissa (GND). Sääto tapahtuu potentiometrilla, ja virta/jännite - ohje syötetään analogia 1 tuloon, jota kautta taajuusmuuttaja säättää nopeuttaan. Laajennuskortin OPT-8 R1 tulon +- ja - napaan on kytketty

roottorin lämpötilatieto ja R2 vastaaviin generaattorin, jolle voidaan taajuusmuuttajalla asettaa maksimiarvo ja samalla valvoa sitä. Turvakytkimen/Kytkinvarokkeen/Kontaktorin tilatieto on tuotu sille tarkoitettuun digitaalituloon 1 (DIN1).

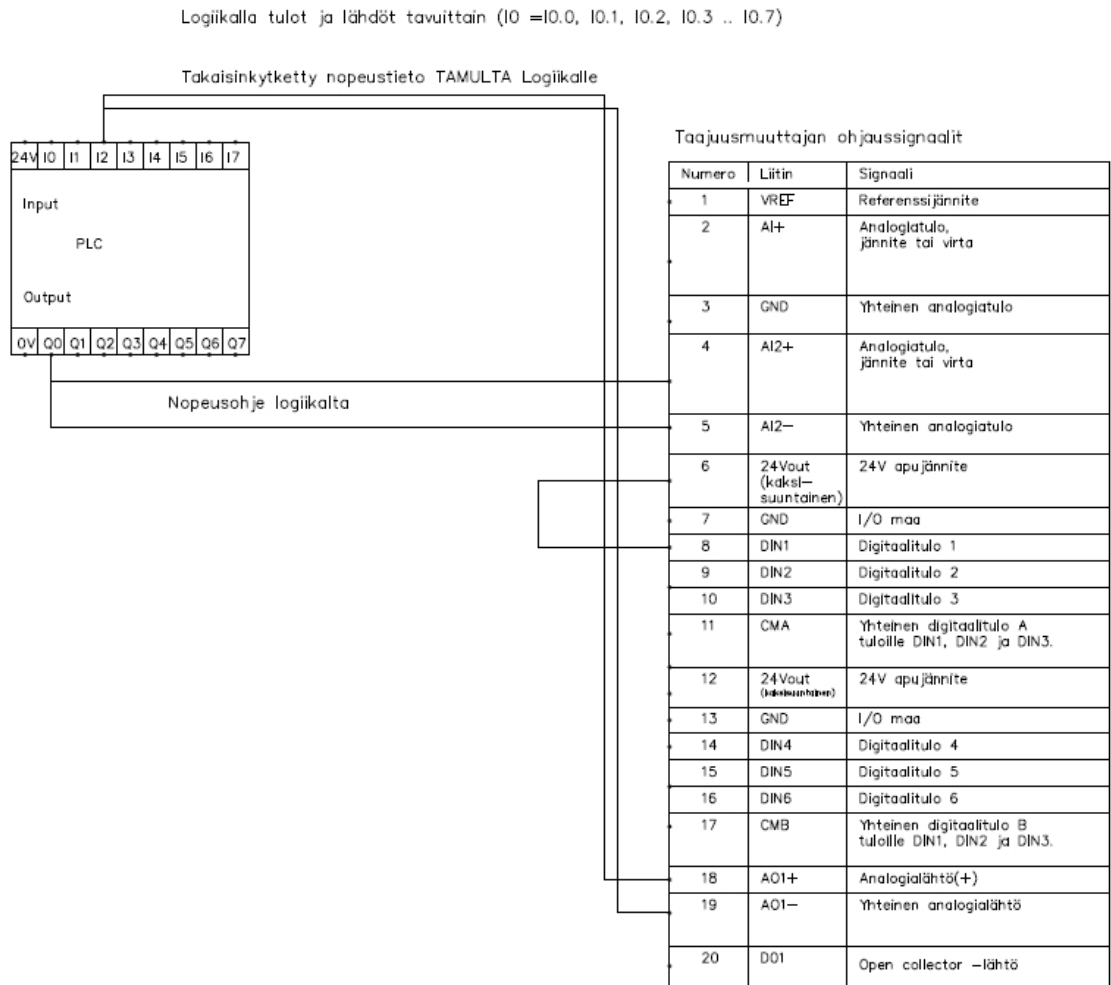
5.3. Ohjelmoitava logiikka

Ohjelmoitava logiikka (PLC, aiemmin PC) on pieni mikroprosessorilla varustettu tietokone, jota käytetään reaaliaikaisten automaatioprosessien, kuten koneiden ohjaukseen. Etuna tässä on se, että yhdellä logiikalla voidaan korvata satoja aiemmin käytettyjä reileitä tai ajastimia. Edelleen logiikoiden vikadiagnostiikka-ominaisuudet helpottavat viikatilanteiden selvittämistä. (Keinänen ym. 2009, 210–229.)

Itse ohjelmoitavassa logiikassa on tulo- ja lähtöportteja, joihin kenttälaitteet (anturi yms) on kytketty. Logiikka ohjaa toimilaitteita (esim. kontaktori) tehdyn ohjelman ja sensoreiden antamien tietojen mukaisesti. Logiikoiden ohjelma on usein toteutettu tietokoneella sitä varten omalla työkalulla, kuten Siemensin Simatic Managerilla.

Ohjelmoitavan logiikan tuloihin kytketään anturit ja lähestymiskytkimet eli ns. ”aistit”. Lähtöihin kytketään toimilaitteet. Logiikan muistiin voidaan kirjoittaa ohjelma, joka valvoo järjestelmän tilaa reaaliaikaisesti. Erona ns. askeltavaan logiikkaan ohjelmoitavalla logiikalla on, että sillä ohjelman kirjoitusjärjestys on vapaasti valittava. Askeltavalla logiikalla ohjelmaa suoritetaan kirjoitetussa järjestyksessä sykleissä - askel askeleelta. Tästä johtuu ohjelmoitavan logiikan nimitys: vapaasti ohjelmoitava logiikka. (Keinänen ym. 2009, 210–229.)

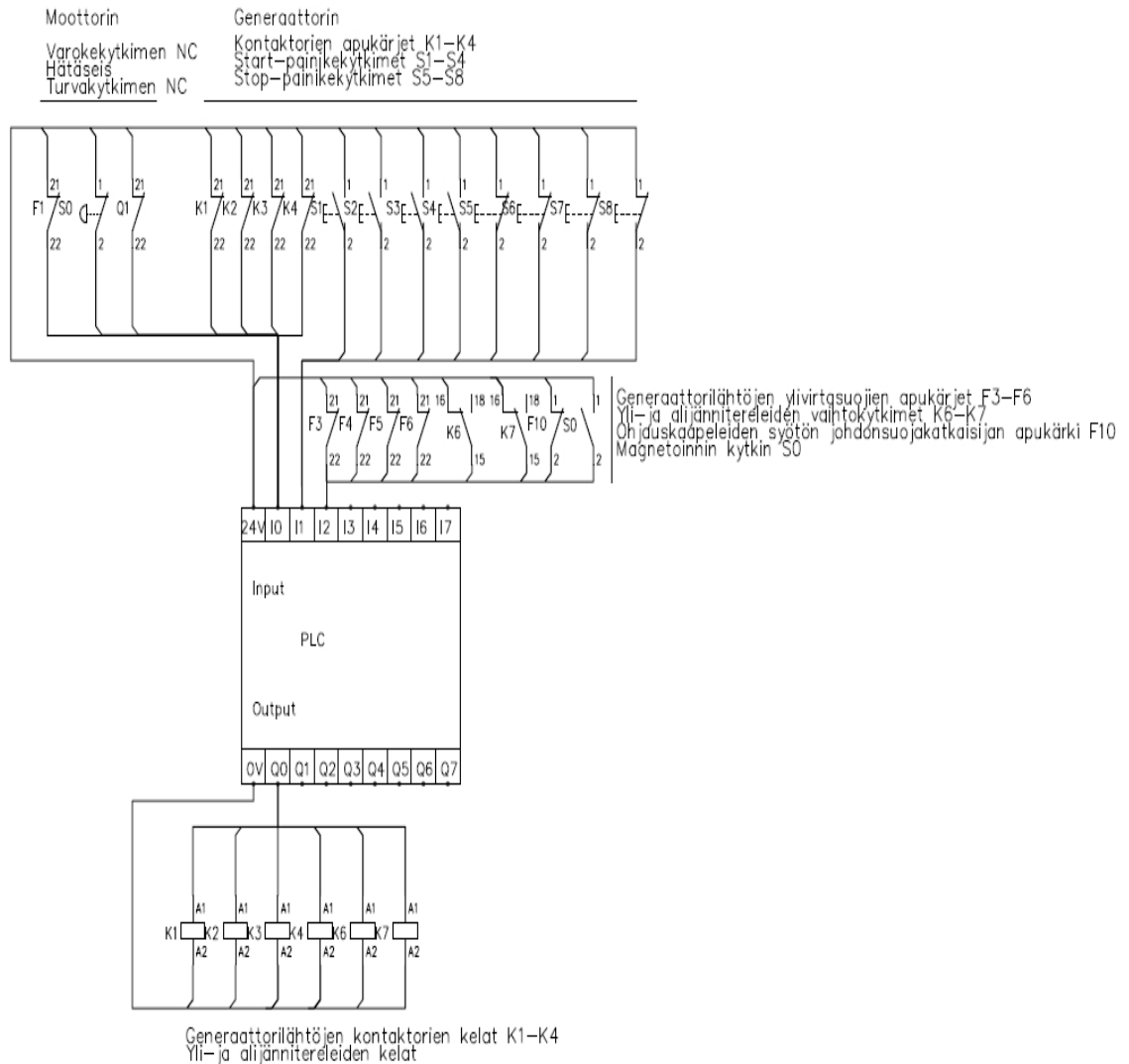
Logiikan muistiin kirjoitetun ohjelman skannaus tapahtuu PLC – järjestelmässä kiertävästi; tuloja ja lähtöjä luetaan ja tallennetaan keskusyksikön muistiin (I/O-muistiin). Ladattua ohjelmaa käydään ohjelmamuistista käsin rivi kerrallaan. Selausaika on luokkaa 0,0005-0,1ms/rivi, riippuen käytetyn logiikan suorituskyvystä. Logiikkaohjattu taajuusmuuttaja on piirretty periaatteena alle (Kuva 24). Ohjelmoitavalla logiikalla saavutettava hyöty on yleensä silloin suurimmillaan, kun tarvitaan paljon kaapelointia tai monta eri ohjausta. PLC:llä voidaan ohjata taajuusmuuttajan nopeussäätöä (Kuva 24) analogisilla signaaleilla ja generaattorilähtöjen kontaktoreja (Kuva 25) digitaalisesti. (Keinänen ym. 2009, 210–229.)



KUVA 24. Taajuusmuuttajan ohjaus ohjelmoitavalla logiikalla

Tässä käynnistys on toteutettu riippuen taajuusmuuttajan omasta apujännitteestä, joka on myös mahdollista kytkemällä DIN1 apujännitteeseen 24 V. Itse ohjaus tapahtuu, niin että logiikalta kytketään jokin lähdöistä taajuusmuuttajan analogisiin tuloon + ja - napaan (AI2+ ja -). Sitten logiikkaan on takaisin kytketty taajuusmuuttajalta sen nopeus, jotta ohjaus olisi mahdollisimman tarkkaa. Lisäksi tulisi logiikkaan kytkeä tilatietoa kontaktoreiden ja muiden kytkimien tilatiedoista, jotta ohjelmoitava logiikka ei syötä nopeusohjetta taajuusmuuttajaan, joka ei ole edes käynnissä. Tässä tapauksessa normaali I/O-riviliitin ohjaus on edukkaampaa edellä mainituista syistä.

Logiikalla voidaan myös ohjata kontakteita ja releitä. Alla on vastaava ohjaus toteutettuna logiikalla, kuin generaattorin ohjauspiiri (Kuva 20). Logiikalla ohjataan myös moottoria tässä. Kuvassa 25 tulot ja lähdöt ovat digitaalisia. Taajuusmuuttajan tapauksessa nopeusohjeet ovat analogisia signaaleja, joten tulee ne myös kytkeä analogisiin tuloihin ja lähtöihin.



KUVA 25. Logiikalla toteutettu ohjaus

Syöttö voidaan toteuttaa ulkoisesti tai logiikalta suoraan kuten kuvassa 25. Yhteen tavuun mahtuu aina 8 eri tuloa tai lähtöä (bittiä). Näin vastaava ohjaus veisi 3 tavua tuloja ja tavun lähtöjä. Käytännössä kaikki kytkimet ja painikkeet sekä apukärjet ovat tuloja. Lähtöjä ovat kohteet, joita logiikka ohjaa kuten kelat ja lamput.

6 YHTEENVETO

Vastaavanlaisia töitä ei tarvitse elämänsä aikana usein montaa kertaa tehdä, joten jo tästä syystä itsestäni on hyvä panostaa opinnäytetyöhön. Työssä kävi ilmi monia uusia asioita. Esimerkiksi suojauksen järjestämiseen on periaatteessa niin paljon eri vaihtoehtoja kuin on tekijöitä. Tämä toisaalta on hyvä asia - toisaalta, kun tarvitsee itse suunnitella ja pohtia parasta ratkaisua, ei asia välttämättä ole yksiselitteinen.

Kaiken kaikkiaan työnä opinnäytetyö oli melko raskas. Työssä oli monia eri juttuja, joista ei välttämättä ollut aikaisemmin kuullutkaan. Perehtyminen ja asioiden selvittely toisaalta kehittivät omaa teoreettista pohjaani.

Mielestäni moottorin kannalta paras valinta suojaukseen on turvakytkimellinen versio, sillä moottorin kannalta suojaus käytännössä järjestyy taajuusmuuttajan ja sen kytkinvarokkeen johdolla. Tähän on tietysti hyvä lisätä lämpötila-anturi moottorin käämityksiin, kuten suunnittelussa onkin ajateltu. Turvakytkimellä voidaan varmasti erottaa moottori ja samalla generaattori jännitteettömäksi, esim. huoltoa varten. Tähän vaihtoehtoon voitaisiin vielä lisätä kontaktori, jolloin ohjaaminenkin on helpompaa.

Generaattorin kannalta tulisi mitata vaiheen yli- ja alijännitettä, ja järjestää suojaus mielellään sulakkein ja ylivirtasuojin. Ylivirtasuojat kannattaa olla varustettu suotimella, joka mittaa vinokuormaa. Vinokuorman osalta, valmistajalta olisi hyvä tiedustella, miten kuormittaminen heidän generaattorin osaltaan voidaan suorittaa. Paras tilanne olisi mitata kaikista vaiheista yli- ja alijännitettä, mutta mielellään ainakin kahdesta vaiheesta. Hyvä olisi myös mitata generaattorin käämityksen lämpötilaa taajuusmuuttajalle.

Etäohjaus on myös asia, johon on opinnäytetyötä tehdessä saanut perehtyä hieman syvällisemmin ja varmasti myös omalla tavallaan haastavin ja opettavaisin alueena itse opinnäytetyössä. Etäohjauksen toteutus on aika tapauskohtaista, ja että päästään mahdollisimman hyvään lopputulokseen, on suunnittelu hyvinkin asiakaslähtöistä. Edestäkainen johdottaminen saattaa hyvinkin tehdä piirin melko epäselväksi, joten ehkä logiikalla ohjaus tässä tapauksessa on paras ratkaisu.

LÄHTEET

Kauppa- ja teollisuusministeriö päätös sähkölaitteistojen käyttöönotosta ja käytöstä 14.6.1996/517.

Virtanen, K. 2014. Epätahtikoneet. Luento. Sähkökoneet – kurssi. Tampereen ammatti-korkeakoulu. TAMK.

Pyrhönen, J. 2008. Pyörivän koneen päämitat. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Luettu 4.2.2016.

https://noppa.lut.fi/noppa/opintojakso/bl30a0400/.../luku6_paamitat.pdf

Hietalahti, L. 2013. Teollisuuden sähkökäytöt. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Vacon. 2014. Vacon NXP ja NXC – taajuusmuuttajat. Luettu 1.3.2016.

http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id_2936/cf_2/Vacon-NXP-Vacon-NXC-Brochure-DPD01320A-FI.PDF

Vacon. 2013. Vacon NXP/C Käyttöohje. Luettu 1.3.2016.

http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id_2812/cf_2/Vacon-NXC-User-Manual-DPD01267B-FI.PDF

Aura, L. & Tonteri, A.J. 1998. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 1. painos. Helsinki: Wiener Söderström Osakeyhtiö.

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Gridlab-D. 2013. Spec:SubsecondInverter. Luettu 17.3.2016.

<http://gridlab-d.sourceforge.net/wiki/index.php/Spec:SubsecondInverter>

Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry. 2013. D1-2012 Käsikirja rakennusten sähkö-asennuksista. Sähköinfo Oy.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2012. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43. Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojat. 3.painos. SESKO ry.

Suomen Standardisoimisliitto SFS. 2012. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52. Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät. 4.painos. SESKO ry.

Reka. 2015. MCMK F4B. Luettu 9.3.2016.

<http://www.reka.fi/voimakaapelit/kuparivoimakaapelit/mcmk-f4b>

Mörsky, J. 1993. Relesuojatekniikka. 2. korjattu painos. Hämeenlinna: Karisto Oy.

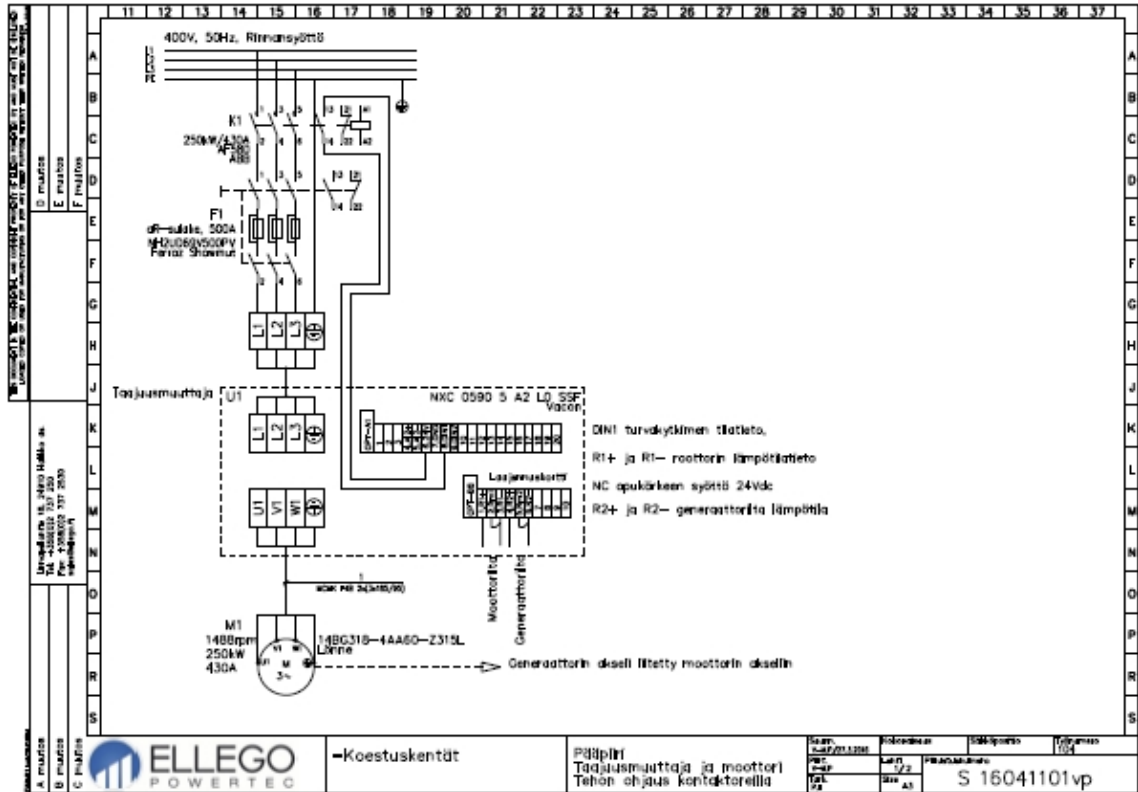
ABB. 2006. Sähkömiehen taskukirja. Vaasa: Waasa Graphics Oy.

Vacon. 2014. Laajennuskortit käyttöohje. Luettu 5.4.2016.

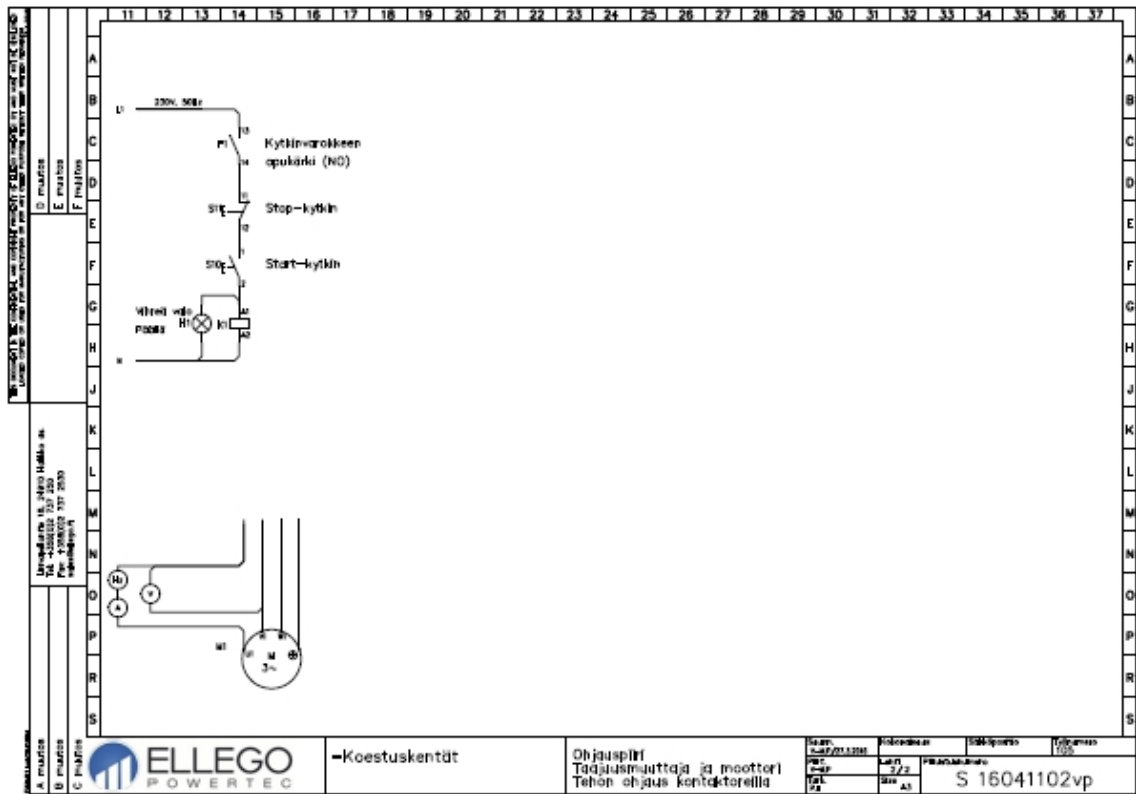
http://www.vacon.com/ImageVaultFiles/id_3034/cf_2/Vacon-NX-IO-Boards-User-Manual-DPD01518A-FI.PDF

LIITTEET

Liite 1. Moottorin pääpiiri



Liite 2. Moottoriin kontaktorin ohjauspiiri



Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.

A. Päävirta B. Päävirta C. Päävirta D. Päävirta E. Päävirta F. Päävirta

Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa. Ohjauspiiri on tarkoitettu ohjaamaan moottoria ja sen toimintaa.



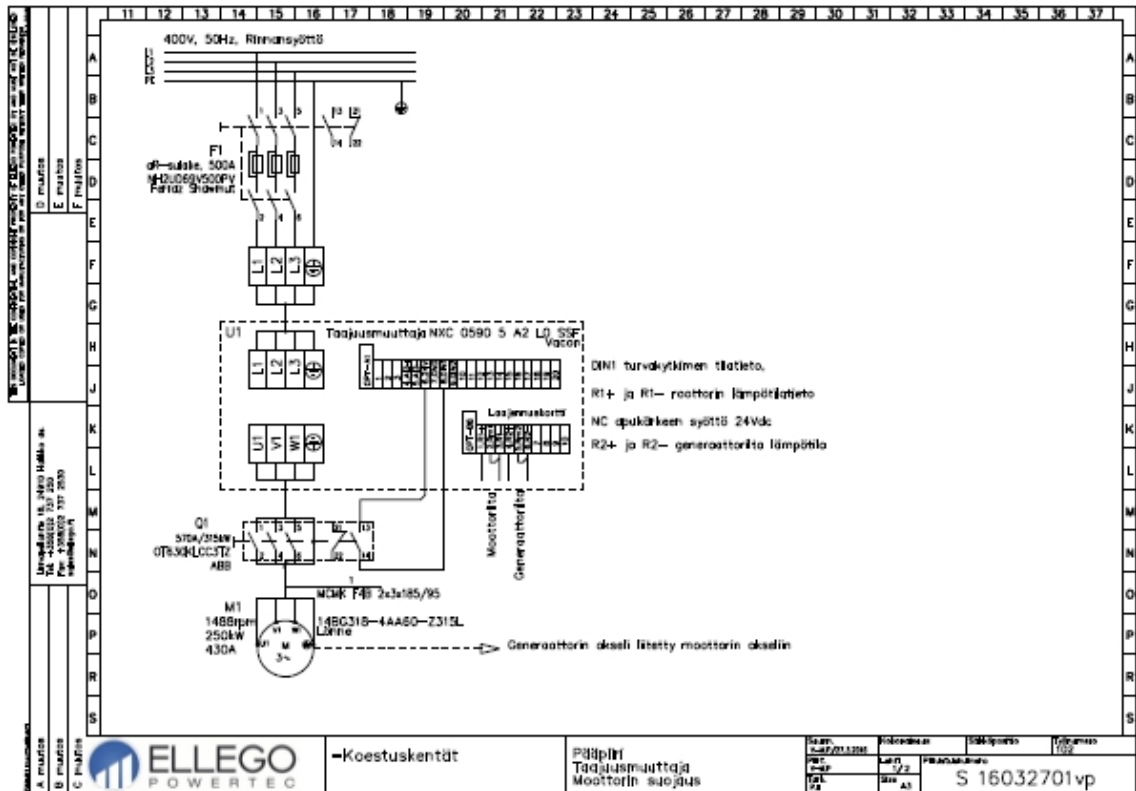
-Koestuskentät

Ohjauspiiri
Tajajasmuuttaja ja moottori
Tehon ohjaus kontaktorilla

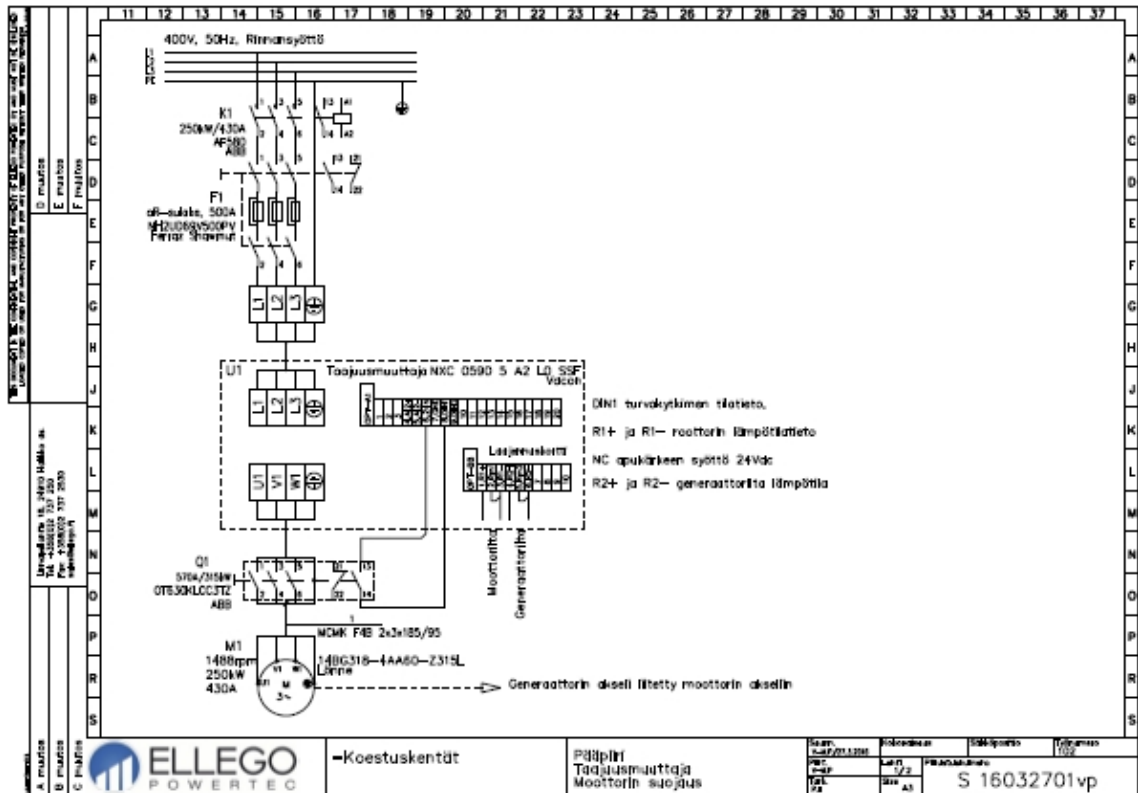
Ohje	Ohje	Ohje	Ohje
Ohje	Ohje	Ohje	Ohje
Ohje	Ohje	Ohje	Ohje
Ohje	Ohje	Ohje	Ohje

S 16041102vp

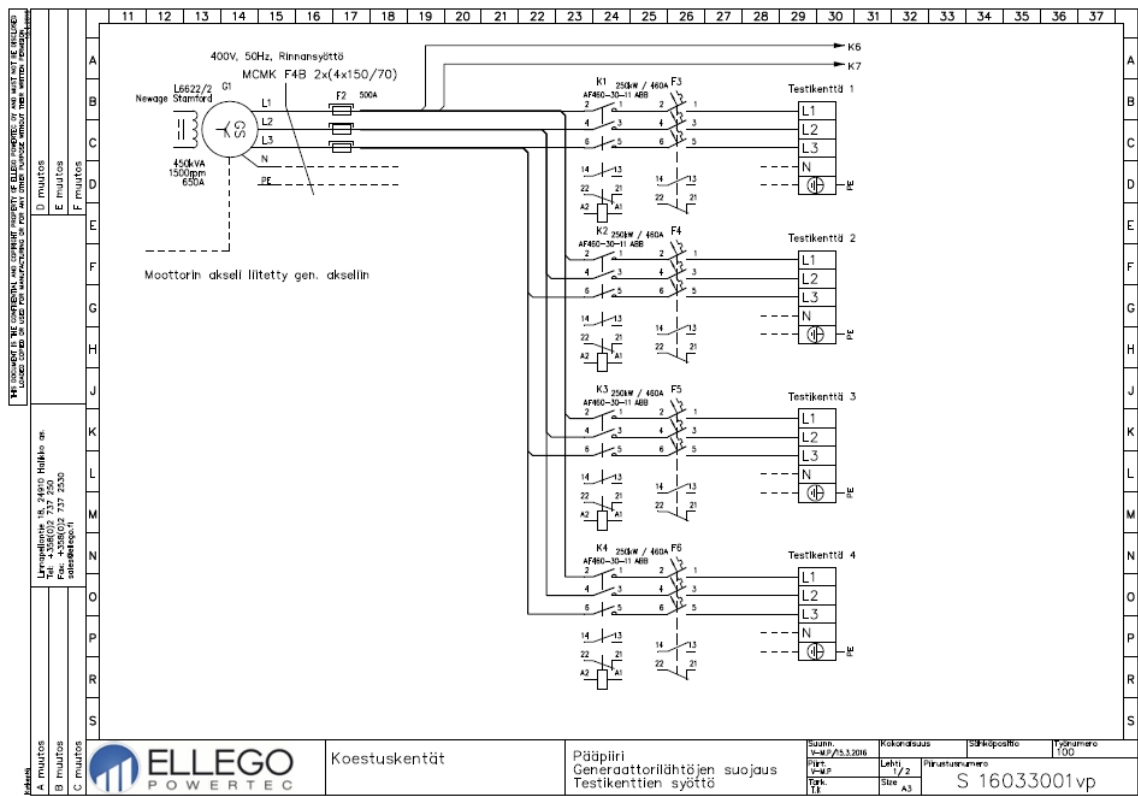
Liite 3. Moottoripiiri turvakytkimelle



Liite 4. Moottori pääpiiri



Liite 5. Generaattorin pääpiiri



Liite 7. Ohjausliittimien signaalit

