Petra Keränen

Sadevesikourukoneen taajuusmuuttajan käyttöönotto

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

10.11.2021

Tiivistelmä

Tekijä:	Petra Keränen
Otsikko:	Sadevesikourukoneen taajuusmuuttajan käyttöönotto
Sivumäärä:	33 sivua
Aika:	10.11.2021
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Konetekniikka
Ammatillinen pääaine:	Koneautomaatio
Ohjaajat:	Lehtori Heikki Paavilainen Tuotantopäällikkö Jani Vedenpää

Tämän työn tavoitteena oli käyttöönottaa ja ohjelmoida Yaskawan taajuusmuuttaja sadevesikourukoneeseen. Työn piti korvata aiemmin ulkopuolisella ohjelmoidut taajuusmuuttajat sekä tehdä jatkotoimien toteuttamisesta helpompaa.

Työ toteutettiin Nesco Oy:n tiloissa asettaen manuaalisesti taajuusmuuttajan parametrien arvot. Taajuusmuuttajaan tehtiin myös testaukseen tarvittavat kytkennät. Kytkentöjen ja parametrien asettamisen jälkeen taajuusmuuttajan toimintaa testattiin kuormattomalla moottorilla.

Testauksen tuloksena syntyi onnistunut moottorin käynnistys, ajaminen ja sammutus. Ennen onnistunutta tulosta oli muutamia ongelmia käynnistyksen kanssa. Ongelmat kuitenkin saatiin selville ja jatkossa osataan välttää nämä vaiheet, jotta käyttöönotto sujuisi nopeammin.

Työ auttaa tulevaisuudessa nopeuttamaan taajuusmuuttajan käyttöönottoa ja parametrien asetusta, sillä tästä työstä saadaan esimerkkimalli, joka poistaa turhan kytkentöjen ja parametrien merkityksen etsimisen oppaista. Tästä on helppo lähteä lisäämään moottoriin kuormaa ja sen mukaan muuttaa tiedossa olevien parametrien arvoa.

Avainsanat: taajuusmuuttaja, parametrit, käyttöönotto

Abstract

Author:	Petra Keränen
Title:	Deployment of the Variable Frequency Drive for a Rain Gutter Machine
Number of Pages:	33 pages
Date:	10 November 2021
Degree:	Bachelor of Engineering
Degree Programme:	Machine Engineering
Professional Major:	Machine Automation
Supervisors:	Heikki Paavilainen, Senior Lecturer Jani Vedenpää, Production Manager

---

The objective of this Bachelor's thesis was to deploy and program a variable frequency drive (VFD) made by Yaskawa that operates a rain gutter machine. This VFD was intented to replace the previous VFDs that were programmed by a separate company.

The VFD was manually programmed by setting the parameters at Nesco Oy premises. Also the basic circuitry for testing was made between the VFD and the motor. After the circuitry was connected, the operation of the VFD was tested with a unloaded motor.

As a result of the testing, a successful engine start-up, driving and shut down were carried out. However, a few problems occurred at the start of the testing. The problems were eventually resolved and now they can be avoided in the future to ensure smooth deployment.

This thesis will help speed up the parameter setting and deployment process of the VFD as this thesis will provide an example model that will eliminate unnecessary searches of the parameter meanings and errors in the future. This will make it easy to increase the load of the motor and change the value of the parameter accordingly.

Keywords: variable frequency drive, parameter, deployment

Sisällys

Lyhenteet

1 Johdanto 1

1.1 Nesco Oy 1

2 Taajuusmuuttajat ja vaihdemoottorit 2

2.1 Taajuusmuuttajan edut ja haitat 3
2.2 Rakenne ja toiminta 3
2.3 Taajuusmuuttajan ohjaus 6
2.4 Vaihdemoottori 8
2.4.1 Sähkömoottori 8
2.4.2 Kierukkavaihde 10
2.5 Yaskawa J1000-taajuusmuuttaja 12
2.5.1 Yaskawa Electric Corporation 12
2.5.2 J1000 12

3 Taajuusmuuttajan kytkentä ja ohjelmointi sadevesikourukoneeseen 15

3.1 Sadevesikourukoneen esittely 15
3.2 Työn toteutus 22
3.2.1 Kytkennät 22
3.2.2 Parametrien asetus 26

4 Testaus 30

5 Yhteenveto ja pohdinta 31

Lähteet 32

Lyhenteet

CSI: *Current Source Inverter.* Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja.

DTC: *Direct Torque Control*. Suora vääntömomentin säätö.

GTO: *Gate Turn-Off*. Hilalta ohjattava komponentti.

IGBT: *Insulated Gate Bipolat Transistor.* Eristehilatransistori.

MOSFET: *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*. Metallioksidipuolijohdekanavatransistori.

PWM: *Pulse Width Modulation*. Pulssileveysmodulointi.

VSI: *Voltage Source Inverter*. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja.

1 Johdanto

Taajuusmuuttajat ovat olennainen osa nykypäivän teollisuutta. Ne tuovat sähkökäytöissä huomattavia energiasäästöjä hyvän hyötysuhteen ansiosta. Teollisuudessa, jossa energian tarve on suuri ja nopeuden säätö on tarpeellista, taajuusmuuttajat ovat helpottaneet koneiden käyttöä. Pienitehoiset taajuusmuuttajien sovellukset ovat yleisiä ja yleistyvät entisestään, jonka takia näiden markkinoilla on kova kilpailu.

Tämän insinöörityön tavoitteena oli luoda toimiva automaatio sadevesikourukoneeseen. Sadevesikourukone toimii vaihdemoottorin avulla, jota ohjataan Yaskawan J1000-taajuusmuuttajalla. Työn toimeksiantajana toimii Nesco Oy. Nesco Oy kasaa sadevesikourukoneita, mitkä asennetaan pakettiautoihin, jotka käyvät työmailla, joissa Vesivek Oy tekee remontteja tai asennustöitä.

Tämä insinöörityö keskittyy enimmäkseen kourukoneen taajuusmuuttajan kytkentöihin, ohjelmointiin sekä käyttöönottoon moottorin kanssa. Myös käydään läpi teoriaa olennaisista komponenteista, joita koneessa käytetään. Työssä kerrotaan koneen käyttötarkoituksesta, rakenteesta sekä toiminnasta.

1.1 Nesco Oy

Nesco Oy on kotimainen yritys, joka on erikoistunut sadevesi- ja kattoturvatuotteiden valmistamiseen. Vuonna 1981 perustettu yritys on näiden tuotteiden maan johtavimpia. Nesco Oy valmistaa tuotteita kaikille yrityksille niiden suuruudesta huolimatta. Laajan perustuotevalikoiman lisäksi Nesco Oy suunnittelee ja valmistaa erikoistuotteita vaativiinkin kohteisiin. Nesco Oy ja Vesivek Oy ovat sisaryhtiöitä Sentica yhtiön alla. Vesivek Oy on Suomen johtava ulkopuolisten kosteudenhallinta remonttien toteuttaja. Yhtiöllä on 17 toimipistettä ympäri maata, joiden avulla toteutetaan pien- ja rivitalojen kattoremontteja. Näiden lisäksi Vesivek Oy myy ja asentaa Nescon valmistamia sadevesijärjestelmiä ja kattoturvatuotteita yritysasiakkaiden asennettaviksi. Vuoden 2021 alusta lähtien yhtiö on palvellut asiakkaita myös salaojaremonteilla. [1;2.]

2 Taajuusmuuttajat ja vaihdemoottorit

Taajuusmuuttaja on tehoelektroniikkalaite, joka nimensä mukaan muuttaa syöttöjännitteen taajuutta. Taajuusmuuttajalla ohjataan portaattomasti oikosulkumoottoreita nopeutta säätämällä. Tehosyötön taajuuden ja jännitteen muuttamisen seurauksena on moottorin pyörimisnopeuden mukautuminen. Ilman taajuusmuuttajaa laite toimisi verkkovirran taajuudella. Tämän seurauksena moottori voisi toimia turhaan liian tehokkaasti ja energiaa hukattaisiin valtavasti. Perinteisesti sähkömoottoreiden nopeutta säädettiin erilaisten vaihteistojen tai jarrujen avulla sekä moottorin napaparilukua muuttamalla. Pelkästään vaihteiden ja jarrujen avulla säätäminen ei ole yhtä tehokasta ja tarkkaa kuin taajuusmuuttajalla säätäminen. Kuvassa 1 nähdään tyypillisen taajuusmuuttaja rakenne. [3.]

Kuva 1. Esimerkki taajuusmuuttajasta [3].

Erilaisia käyttökohteita on mm. pumput, puhaltimet, erilaiset kuljettimet sekä nosturit. Käyttökohteesta ja tehon tarpeesta riippuen valitaan joko yksi- tai kolmivaiheinen taajuusmuuttaja. [5.]

2.1 Taajuusmuuttajan edut ja haitat

Taajuusmuuttajan käytöstä on monia etuja teollisuuskäytössä. Käynnistysvirran parempi hallinta taajuusmuuttajalla pidentää moottorin käyttöikää. Moottorin käynnistämiseen käytetään pienempää käynnistysvirtaa. Ilman taajuusmuuttajaa käynnistäminen aiheuttaa jopa kahdeksankertaisen rasitteen moottorin kuormitusvirtaan, joka puolestaan aiheuttaa jännitealeneman. Tämä voi aiheuttaa häiriöitä sähköverkkoon ja siihen liitetyt jänniteherkät laitteet voivat häiriintyä tai jopa hajota. Taajuusmuuttaja poistaa tämän ongelman, sillä käynnistys alkaa nollasta ja jännite kasvaa tarvittavan määrän. Muita taajuusmuuttajan tuomia etuja ovat mm.:

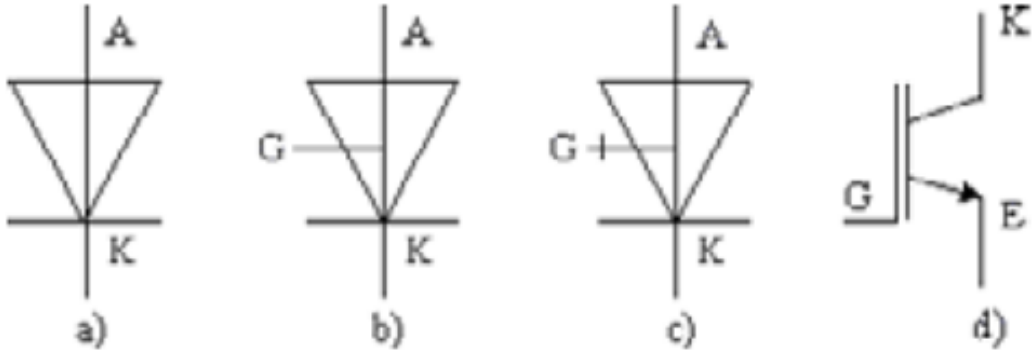
- kontrolloitu kiihdytys ja pysäytys
- pienempi tehontarve moottorin käynnistyksen yhteydessä
- säädettävä vääntömomenttiraja
- moottorin pyörimissuunnan vaihtaminen
- erilaiset moottoria suojaavat toiminnot.

Merkittäviä haittoja löytyy hyvin vähän taajuusmuuttajiin liittyen, kun ne on mitoitettu oikein ja valittu käyttötarkoitukseen sopiva malli. Ongelmana voidaan nähdä taajuusmuuttajan vaihtaminen uuteen, sillä sen konfigurointi voi olla työlästä jopa satojen asetettujen parametrien takia. Lämpö, mitä taajuusmuuttaja tuottaa, voi koitua ongelmaksi esimerkiksi tilanteessa, jossa nopeus on pieni, sillä tuuletin usein pyörii samalla nopeudella kuin moottori. [5;6;7.]

2.2 Rakenne ja toiminta

Taajuusmuuttajissa olevat päävirtapiirit koostuvat puolijohdekytkimistä. Niillä nimensä mukaisesti kytketään kuorma toistuvassa sekvenssissä tiettyyn jänniteta-

soon. Puolijohdekytkimien kytkentänopeudet ja tarkkuudet ovat mekaanisiin kytkimiin verrattuna huomattavasti parempia. Yleisimpiä tehopuolijohdekomponentteja, joita taajuusmuuttajissa käytetään, ovat mm.: diodi, tyristori, IGBT-transistori (engl. Insulated Gate Bipolar Transistor) ja GTO-tyristori (engl. Gate Turn-Off). Kuvassa 2 on esitetty eri johdekomponenttien piirrosmerkit. Ohjaamattomissa tasasuuntakytkennöissä käytetään diodeja, sillä se päästää virran kulkemaan vain yhteen suuntaan, anodilta (A) katodille (K). Tyristori on puolestaan eräänlainen ohjattava versio diodista. Tässä komponentissa virran pyrkiessä tyristorin läpi anodilta katodille, virtatie avautuu annettaessa positiivinen ohjausvirtapulssi hilan (G) kautta katodille. Nykyisin diodeja ja tyristoreja käytetään suoraan syöttöverkkoon liitetyissä tasasuuntauskytkennöissä, muutamia suuritehoisia sovellutuksia lukuun ottamatta. Näillä komponenteilla jännitteet voivat yltää jopa useisiin tuhansiin voltteihin, jonka vuoksi kytkettävät tehot voivat olla megawattien luokkaa. [4.]



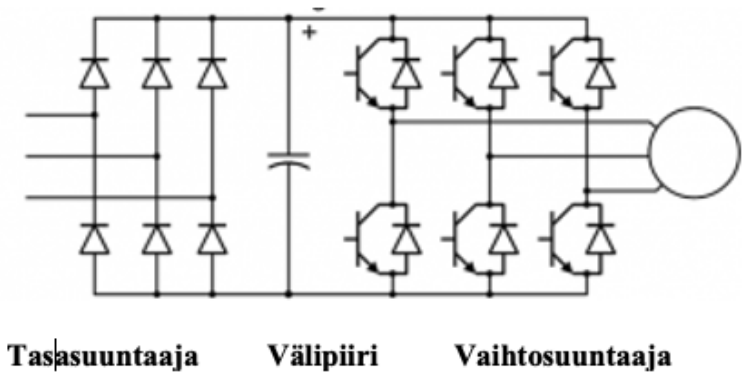
Kuva 2. Johdekomponenttien piirrosmerkit. a) diodi, b) tyristori, c) GTO-tyristori, d) IGBT-transistori [4].

IGBT-komponentti on kehitetty MOSFETin (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) ja bipolaaritransistorin parhaimmat ominaisuudet yhdistämällä. Seurauksena saatu ohjattava komponentti, jonka ohjaustehon tarve on pieni, kytkentänopeus suuri sekä soveltuu suuntaajalaitteisiin, jotka ovat toteutettu tehoelektroniikalla. IGBT-komponentissa virran kulku voidaan katkaista millä hetkellä tahansa muuttamalla ohjausjännite hilan (G) ja emitterin (E) välillä nollaksi

tai negatiiviseksi. GTO-tyristori on myös täysin ohjattu komponentti IGBT:n tavoin. Sen tarvitsema ohjausteho on kuitenkin huomattavasti suurempi sekä kytkentänopeus alhaisempi. GTO:n suurien kytkettävien tehojen ansiosta sitä käytetään yleisesti vaihtosuuntaajissa, joissa tarvitaan paljon tehoa. Puolijohdekomponenttien nopean toiminnan ansiosta jännitteen muotoa voidaan muutella tarkasti. [4.]

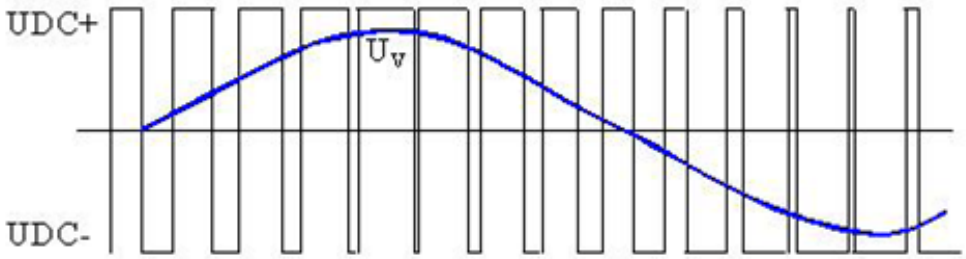
Yleisimmät oikosulkumoottoreita ohjaavat taajuusmuuttajat ovat jännitevälipiirillisiä eli VSI (engl. Voltage Source Inverter). Muita tyypillisiä taajuusmuuttajia ovat virtavälipiirilliset eli CSI (engl. Current Source Inverter) sekä syklokonvertterit. Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajan välipiiri muodostuu LC-alipäästösuodattimesta ja kondensaattorista, kun taas virtavälipiirillisen välipiiri suuresta tasoituskuristimesta. Näiden välipiirien tarkoituksena on tasoittaa jännitettä ja varastoida energiaa. [4.]

Normaalisti jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta osasta: dioditasasuuntaussillasta, välipiirin LC-alipäästösuodattimesta sekä IGBT-komponenteilla toteutetusta vaihtosuuntaussillasta. Dioditasa- ja vaihtosuuntaussillat ovat molemmat kolmivaiheisia. Vaihtosuuntaussillan diodit mahdollistavat induktiivisen virran kulkemisen eri tilanteissa. Ylimääräinen jarruvastus on lisätty välipiiriin, joka kuluttaa takaisin kulkeutuva jarrutusenergia. Kuvassa 3 näkyy havainnollistava kuva jännitevälipiirillisestä taajuusmuuttajasta. [4.]



Kuva 3. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan lohkokaavio.

Taajuusmuuttajan tasasuuntaajassa kolmivaiheinen vaihtojännite muuttuu tasajännitteeksi tyristoreita käyttämällä. Jännitevälipiirissä olevat kela ja kondensaattori suodattavat tasajännitteessä olevat epäpuhtaudet. Samalla välipiiri toimii myös energiavarastona sekä ohjaustekniikan tarvitsema käyttöjännite on mahdollista ottaa välipiiristä. Vaihtosuuntausosan eli sillan täytyy tuottaa halutun taajuinen vaihdejännite sekä samaan aikaan vaikuttaa jännitteen tehollisarvoon. Halutun taajuuden ja jännitteiden tuottamiseen käytetään pulssileveysmodulointitekniikkaa eli PWM-tekniikkaa. (engl. Pulse Width Modulation). Tässä tekniikassa on ideana saada tasajännite eri mittaisiksi jännitepulsseiksi. Moduloinnin lopputuloksena syntyy integraali, joka muodostaa siniaaltoisen vaihtojännitteen. PWM-tekniikkaa on havainnollistettu kuvassa 4.



Kuva 4. PWM-tekniikalla toteutettu vaihtojännite [4].

Tämä toteutetaan kytkemällä jokainen vaihdejännitelähtö IGBT-transistoreiden tai GTO-tyristoreiden avulla vuorotellen tasajännitevälipiirin positiiviseen ja negatiiviseen kiskoon. [4.]

2.3 Taajuusmuuttajan ohjaus

Taajuusmuuttajan tehtävä on siirtää mekaanista tehoa käyttökohteeseen sähkömoottorin kautta siten, että saavutetaan toivottu pyörimisnopeus tai vääntömomentti. Usein jännitevälipiirillisissä käytetään skalaariohjausta ja -säätöä, vektorisäätöä sekä suoravääntömomentinsäätöä eli DTC-säätöä. (engl. Direct Torque Control, lyh. DTC). [3;4.]

Taajuusmuuttajan ohjausjärjestelmän tulee huolehtia erilaisten komponenttien säädöistä, kuten verkkosillan tarvitsemasta säädöstä sekä ohjattavan prosessin eri säädöistä. Näiden säätöjen sekä vaativien suojausten toteutus tarvitsee monia reaaliaikaisia mittauksia. Näin monitoroidaan prosessia, suuntaajaa, moottoria ja syöttävää verkkoa. Nykyään myös taajuusmuuttajista löytyy moottoriparametrien indentifiointi sekä automaattinen viritysmahdollisuus. Ulkoisten kytkentöjen määrää voidaan vähentää konfiguroimalla moottorin dynaaminen malli säätöjärjestelmään. Tämän perusteella taajuusmuuttaja pystyy laskea prosessiin liittyviä suureita. [3;4.]

Taajuusmuuttajan käyttöä voidaan ohjata paikallisesti käyttöpaneelin kautta, analogisella signaalilla, I/O:n kautta eli digitaalisella jännitesignaalilla sekä kenttäväylän kautta. Yleisimpiä kenttäväyliä on esimerkiksi Profibus, Profinet ja Foundation Fieldbus. Ohjaus kenttäväylällä on yleisin käyttötapa automaatiossa, sillä sen kautta saadaan tarvittavat tiedot taajuusmuuttajasta ilman lisäosia. [3;4.]

Ohjaustavan selvittämisen jälkeen tulee ottaa selvää taajuusmuuttajan asetusten ohjelmoinnista eli parametroinnista. Tämä voidaan tehdä tietokoneella kenttäväylän kautta tai taajuusmuuttajan etupaneelin avulla. Yleensä taajuusmuuttajissa on jo valmiina joitain oletusparametreja. Taajuusmuuttaja on ensimmäiseksi saatava yhteensopivaksi moottorin kanssa. Tärkeimmät parametrit moottorille silloin ovat mm. moottorin nimellisvirta, jättämä, PWM-taajuus, napapariluku ja moottorijännite. Tärkeimpiä ohjausparametreja taajuusmuuttajalle taas ovat nopeusohje asetukset, minimi- ja maksimitaajuudet sekä rampit eli kiihdytys- ja jarrutusajat. [3;4.]

2.4 Vaihdemoottori

Vaihdemoottorin toimintaperiaatteen voi jakaa kahteen osaan. Ensin sähkömoottori tuottaa voiman, mikä puolestaan pyörittää vaihdetta. Vaihteen liikkuessa se samalla pyörittää päävaihdetta, joka tuottaa liikkeen ja väännön halutulle koneelle. Yleisesti vaihdemoottorit jaetaan kolmeen kategoriaan: planeettavaihde-, kulmavaihde- sekä lieriötappivaihdemoottorit. [8.]

2.4.1 Sähkömoottori

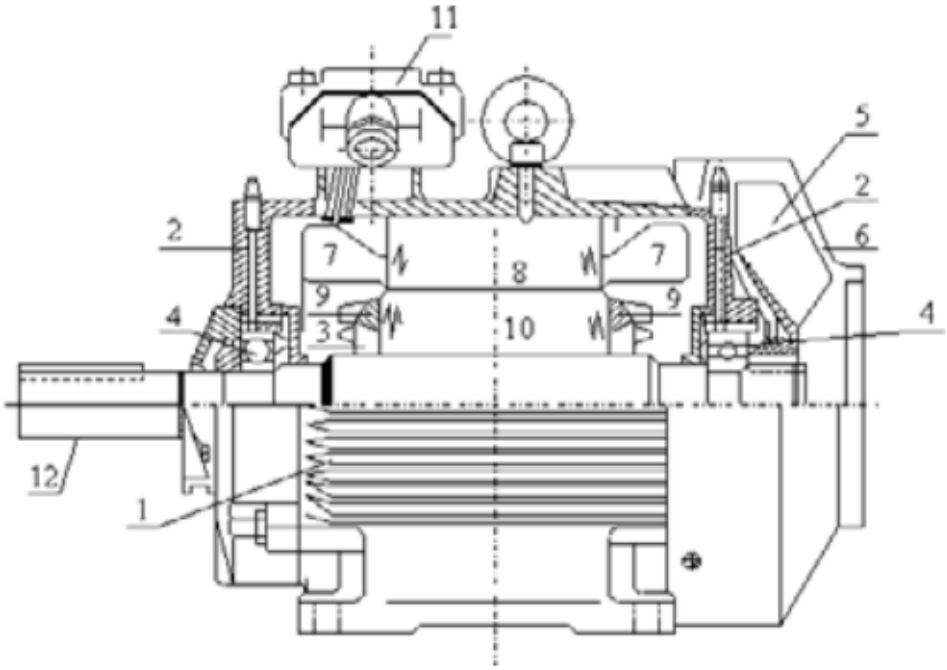
Sähkömoottori toimii muuttamalla sähköenergiaa liike-energiaksi sähköisillä magneeteilla, jotka voidaan kytkeä päälle ja pois. Moottori koostuu akselin mukana pyörivästä roottorista ja paikallaan pysyvästä staattorista. Magneettikenttä voidaan saada aikaan kummassa tahansa näistä ja vastaparina käytetään toista kesto- tai sähkömagneettia. Tärkein asia sähkömoottorin mitoituksessa on jatkuvan käytön nimellismomentti. [9.]

Yleisimpiä sähkömoottorityyppejä ovat esimerkiksi tasavirtamoottori, tahtimoottori ja oikosulkumoottori. Nimensä mukaan tasavirtamoottori toimii tasavirralla vaihtamalla magneettien napaisuutta kommutaattorin avulla roottorissa. Näitä moottoreita voi olla sekä harjattomia että harjallisia. Harjallisissa tasavirtamoottoreissa napaisuuden vaihto tehdään mekaanisesti kommutaattorin avulla, kun taas harjattomassa tämä tapahtuu sähköisesti kestomagnetoidun roottorin ansiosta. Tahtimoottori, tai toisella nimellä synkronimoottori, toimii taas vaihtovirralla sen taajuuden sekä koneen napaluvun asettamassa tahdissa. Näitä moottoreita kutsutaan myös vierasmagnetoiduiksi, koska roottori magnetoidaan johtamalla magnetointivirta erillisestä piiristä suoraan sen käämitykselle. [9.]

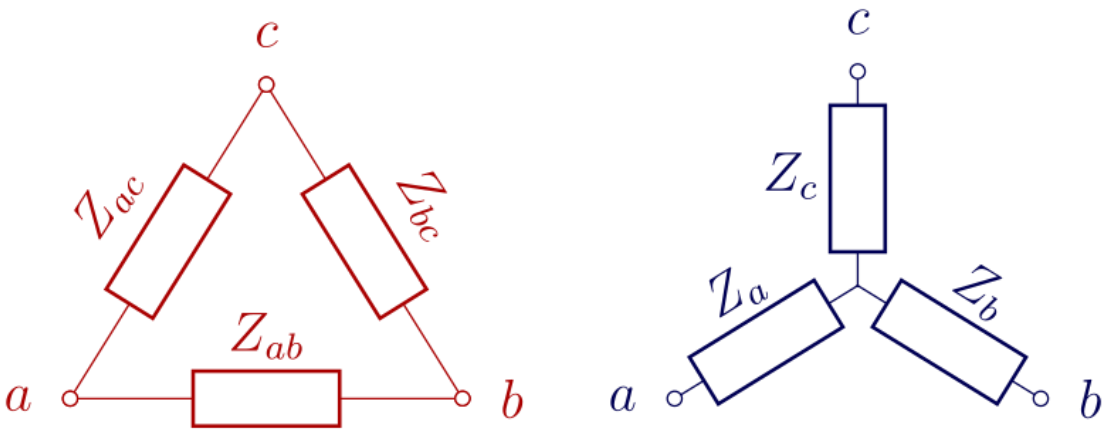
Oikosulkumoottori on erittäin suosittu yksinkertaisen rakenteensa vuoksi. Muihin yleisiin moottoreihin verrattuna oikosulkumoottoreissa ei ole erillisiä magnetointikäämityksiä, vaan suhteellisen yksinkertaiset staattori- ja roottorikäämitykset. Moottori muodostaa staattorissa pyörivän magneettikentän roottorin ympärille. Tämä kenttä luo induktiolla roottorin käämeihin virran, jonka seurauksena roottori

seuraa staattorin pyörivää magneettivuota ja tämä saa aikaan roottorin pyörimisliikkeen. Induktion myötä tätä moottoria kutsutaan myös induktiomoottoriksi. Roottorin käämitystä kutsutaan muotonsa vuoksi häkkikäämitykseksi, joka sijaitsee roottorin urissa ja se on suljettu oikosulkurenkaalla molemmista päistä. Kuvassa 5 on kuvattu tarkemmin oikosulkumoottorin rakennetta. Staattorikäämitys on taas sijoitettu staattorin uriin. Se on symmetrinen ja kytketty tähteen tai kolmioon. [9;10.]

Tähtikytkennässä komponenteilla on ns. yhteinen tähtipiste, jossa kaikki kolme komponenttia ovat kytketty. Kolmiokytkennässä taas on kolme liitoskohtaa, joista vain kaksi samantapaista komponenttia ovat kytketty. Molempien kytkentöjen kulmista lähtee kolme vaihejohdinta, joiden merkit ovat R, S ja T eli L1, L2 ja L3. Kuvassa 6 havainnollistetaan kolmio- sekä tähtikytkentää paremmin. [10.]



Kuva 5. Oikosulkumoottorin rakenne. 1. Staattorin runko, 2. laakerikilvet, 3. roottori, 4. laakerit, 5. tuuletin, 6. tuulettimen suojus, 7. staattorinkäämitys, 8. staattorin levypaketti, 11. liitäntäkotelo, 12. akseli [10].



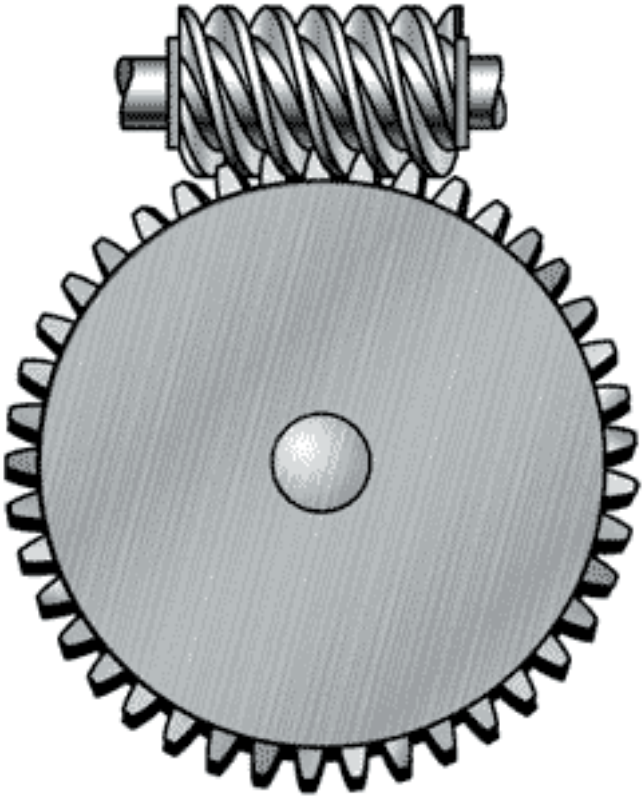
Kuva 6. Kolmio- ja tähtimuunnos [11].

Oikosulkumoottorin nimi muodostuu siitä, että roottorin navat ovat oikosuljettuja keskenään. Tätä moottoria kutsutaan myös epätahtimoottoriksi, sillä roottorin magnetointivirta tulee pyörimisliikkeestä ja se pyörii hieman jäljessä vaihtovirran aiheuttaman magneettikentän pyörimisnopeuteen verrattuna. Tämän vuoksi oikosulkumoottoreissa syntyy energiahäviöitä. Käytännössä moottorin ainoat kuluvat osat ovat laakerit. [10.]

2.4.2 Kierukkavaihde

Vaihde on keskeinen osa erilaisten moottoreiden toiminnassa, sillä sen avulla sähkömoottorin tuottamat vääntömomentti sekä nopeus muunnetaan koneen asettamille vaatimuksille. Yleisesti akselin suunta, tehon ja nopeuden tarve määrittävät, mikä vaihde tulee valita tiettyyn käyttöön. Välityssuhde kuvaa vaihteen ensiönopeuden ja toisionopeuden suhdetta. [8.]

Kierukkavaihde koostuu kierteellisestä akselista, joka ajaa hammaspyörää. Tässä hammaspyörässä hampaat ovat hieman asetettu kulmaan. Sähkömoottori pyörittää kierukka-akselia ja se taas puolestaan hammaspyörää. Tämän vaihteen rakennetta havainnollistetaan kuvassa 7. Sen suurimpia etuja on sen hiljainen toiminta verrattuna muihin. Hammaspyöräportaan ansiosta kierukkavaihdemoottorilla on korkea hyötysuhde. Etuna on myös tasainen käynti ja hyvä ylikuormittavuus. [11;14]



Kuva 7. Kierukkavaihteen rakennetta havainnollistava kuva [11].

Usein kierukkavaihdemoottoreissa on kestävä rakenne mikä takaa pitkän käyttöiän sekä helpon huollettavuuden. Kierukkavaihde poistaa muiden erilaisten vaihteen tarpeen käytössä sekä mahdollistaa suuren välityssuhteen yhdessä portaassa. Kierukkavaihteen yleisimpiä hammasprofiileja on viisi, jotka poikkeavat toisistaan hampaiden suunnilla ja kulmilla. Kierukkavaihteen kierukka osuus muistuttaa ruuvia muodoltaan. Voiman siirron tehokkuus tällä vaihteella on heikompi kuin esim. tyypillisellä hammasvaihteella. Hyvin tärkeää kierukkavaihteen ylläpidossa on voitelu. Akselin ja hammasvaihteen välinen liike on liukumista, mikä tarvitsee korkeaviskositeettista voiteluainetta. Yleisimpiä käyttökohteita kierukkavaihteille on esim. kuljettimet, ruuvikäytöt ja nostimet. [12;13;14.]

2.5 Yaskawa J1000-taajuusmuuttaja

2.5.1 Yaskawa Electric Corporation

Yaskawa on vuonna 1915 perustettu japanilainen yritys, joka on erikoistunut erilaisten sähkölaitteiden valmistamiseen. Yritys kuuluu maan johtavimpiin käyttölaitetekniikan, teollisuusautomaation ja robottitekniikan alan tuotteiden valmistajiin. Yaskawan tuotteet jakautuvat neljälle alueelle: liikkeen ohjaus, robotiikka, järjestelmäsuunnittelu sekä tietoliikenne. Liikkeenohjauksen tuotteisiin kuuluu mm. taajuusmuuttajat, servokäytöt, servomoottorit ja koneohjaimet. Yritys valmistaa robotteja erilaisille aloille kuten teollisuuteen sekä palvelualalle. Järjestelmäsuunnittelu koostuu mm. erilaisista keskijännitetaajuusmuuttajista sekä generaattoreista. Yaskawalta löytyy 60 toimipaikkaa eri puolilta maailmaa ja yritys työllistää noin 14 500 henkilöä. [15;16.]

2.5.2 J1000

Yaskawa J1000 on peruskäyttöihin suunniteltu yksinkertainen taajuusmuuttaja. Yleisiä käyttökohteita ovat hiomakoneet, nostimet, kuljettimet, puhaltimet ja pumput, jotka eivät vaadi suuria tehomääriä. J1000-taajuusmuuttaja, joka näkyy kuvassa 8, on helppo asentaa, käyttöönottaa, ohjata sekä käyttää. Sopivan yksinkertainen taajuusmuuttaja käyttökohteille, jotka eivät tarvitse enempää. J1000-taajuusmuuttajat ovat kestäviä tehoelektroniikkalaitteita joiden huoltovälit ovat vähintään 10 vuotta. [17.]

Kuva 8. Yaskawa J1000-taajuusmuuttaja [17].

J1000-sarjan taajuusmuuttajat sopivat automaatiojärjestelmille niissä kohteissa, joissa nopeuden käyttö on muuttuvaa sekä vähäinen energian kulutus on tärkeää. Ne ovat nimellisteholtaan joko 0,2 kW – 5,5 kW tai 0,4 kW – 5,5 kW riippuen onko taajuusmuuttaja yksi- vai kolmevaiheinen. Tämän taajuusmuuttajan ollessa yksinkertainen ja kompakti, se sisältää kuitenkin erilaisia tärkeitä toimintoja. Jumiutumisen esto takaa vakaan toiminnon kuormituksen tai virtalähteen vaihdellessa. Ryntäysjarrutus sekä sisäänrakennetut jarrutuskatkot mahdollistavat ulkoisten jarrujen pois jättämisen. Sammumisen ehkäisevien toimintojen ansiosta käyttökohde toimii luotettavasti kuorman tai syöttöjännitteen muuttuessa. Tätä taajuusmuuttajaa ohjataan v/f-ohjauksella eli jännite-taajuuskäyräohjauksella eli taajuusmuuttajan lähtöjännitettä ohjataan lähtötaajuuden funktiona. Korkea käynnistysmomentti ja tarkkanopeus varmistavat käytettävän koneen vakaan toiminnan kuormasta huolimatta. Muuttuva pulssimodulaatio antaa hiljaisen moottorikäytön, mikä on tänä päivänä oletettavaa pienissä ja yksinkertaisissa käytöissä. J1000-taajuusmuuttajaan saa lisättyä ylimääräisiä komponentteja kuten jarruyksiköitä tai -vastuksia sekä kauko-ohjaimia. [17.]

Työhön valittiin yksivaiheinen taajuusmuuttaja nimellisteholtaan 1,1 kW. Tämä tiedettiin jo aiemmin kasatuista sadevesikourukoneista mallia ottamalla. Uuteen taajuusmuuttajaan piti tehdä sähkökytkennät sekä tutkia kuinka tämän saa ohjelmoitua samoihin parametreihin kuin aikaisemmat taajuusmuuttajat käyttämällä vain sen LED-näyttöä ja näppäimiä, jotka näkyvät aikaisemmassa kuvassa.

3 Taajuusmuuttajan kytkentä ja ohjelmointi sadevesikourukoneeseen

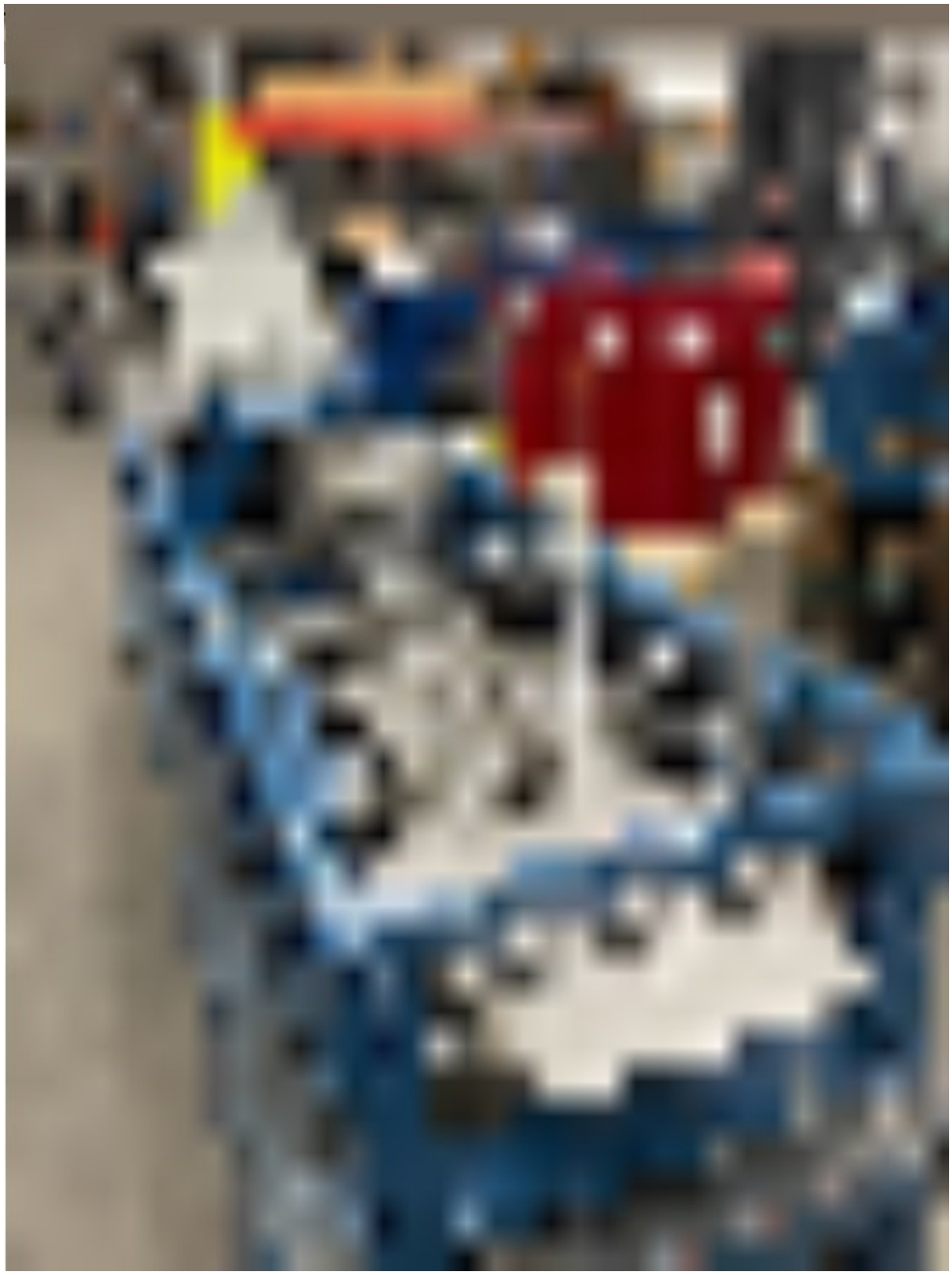
3.1 Sadevesikourukoneen esittely

Tämän insinöörityön kohteena oli sadevesikourukoneen automaation luominen. Nesco on kasannut aiemmin näitä kourukoneita tehtaan tiloissa, mutta taajuusmuuttaja on tullut valmiiksi ohjelmoituna ulkopuoliselta yritykseltä. Sadevesikourukoneiden tarkoitus on mennä Vesivekin asennusautoihin, jotka menevät remonttityömaille. Kone toimii ohjauskapulasta eteenpäin-nappia painamalla, jolloin moottori alkaa pyörittämään rullia ja ne vetävät peltirullasta materiaalia koneen läpi, jossa rullat muovaavat pellistä sadevesikouruisen muodon. Sadevesikourukoneen sekä tuotteen muodon näkee kuvasta 9 ja tätä saa ajettua koneesta juuri sen mittaiseksi kuin tarvitaan. [18.]

Taajuusmuuttajaa käytetään tässä sovelluksessa, sillä nopeutta täytyy pystyä säätämään hitaammaksi vikatilanteessa, jossa konetta ajetaan taaksepäin. Ilman taajuusmuuttajaa moottori pyörisi verkkovirran mukaisella nopeudella. Kourukoneessa on tällä hetkellä ns. liian tehokas moottori ja taajuusmuuttajalla saadaan säädettyä sitä sekä samalla säästettyä energiaa. Ennen taajuusmuuttaja on ohjelmoitu tietokoneella käyttäen kenttäväylää sekä ohjelmointiohjelmaa. Taajuusmuuttajan käyttökohteen toiminnot ovat kuitenkin aika yksinkertaisia, joten todettiin, että parametrien asettaminen manuaalisesti olisi parempi vaihtoehto toistaiseksi.

Kuva 9. Sadevesikourukone ilman suojakantta ja koneesta tuleva valmis lopputuote.

Tämä kone on toiminnaltaan siis rullamuovauskone ja rullapareja on yhteensä yhdeksän. Kourukone toimii vaihdemoottorin avulla, mitä puolestaan ohjataan taajuusmuuttajalla. Kuvasta 10 näkee koneen rakenteen ja koko luokan. Vaihdemoottoriin on kiinnitetty akseli, jonka päässä on hammaspyörä. Hammasrattaasta voima välittyy ketjulla rullille, jotka ovat yhdistetty keskenään ja liikkuvat kaikki samaan aikaan samalla nopeudella. Kuvassa 11 havainnollistetaan ketjulla välittyvä voimansiirto.



Kuva 10. Sadevesikourukone. Kuva sumennettu salassapidon takia.

Kuva 11. Sadevesikourukoneen voimansiirto. Kuva sumennettu salassapidon takia.

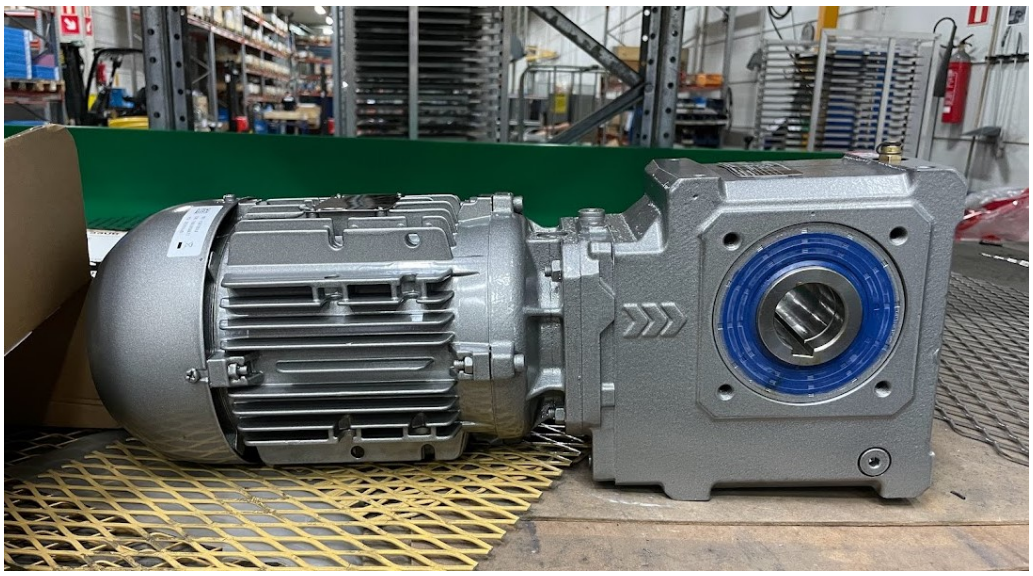
Koneessa on johdolla kiinni ohjauskapula, jossa ovat aiemmin mainitut eteen- ja taaksepäin nappulat, hätäseis sekä kytkin, mistä päätetään, käytetäänkö tätä kapulaa vai kauko-ohjattavaa kapulaa. Kuvassa 12 näkyy työssä käytettävä ohjauskapula.

Kuva 12. Johdollinen ohjauskapula.

Kauko-ohjattava kapula, joka näkyy kuvassa 13, on käytännöllisempi työmaalla, sillä näin asentajan ei tarvitse seisoa johdon pituisen matkan päässä koneesta vaan siellä mistä on paras työskennellä. Asennusautoissa ei ole koneen asennuksen jälkeen paljoa ylimääräistä tilaa, joten kauko-ohjattava kapula on parempi vaihtoehto. Tätä ohjaustapaa käyttäessä tulee asentaa koneeseen myös sen ohjauslaatikko, joka taas tulee yhdistää taajuusmuuttajaan. Tässä työssä jätetään kuitenkin kauko-ohjattava pois ja keskitytään johdollisen ohjauskapulan yhdistämiseen.

Kuva 13. Kauko-ohjattava kapula.

Koneen rullia pyörittää kierukkavaihdemoottori, josta on kerrottu aiemmassa kappaleessa. Tämä moottori näkyy kuvassa 14 irrallisena. Kappaleessa 3 on kerrottu kierukkavaihdemoottorin toiminnasta ja rakenteesta. Kolmivaihemoottori on kytketty kolmiokytkennällä taajuusmuuttajaan mutta yksi vaihe jätetty pois kytkennästä, sillä tätä ei tarvittu taajuusmuuttajan ollessa yksivaiheinen.



Kuva 14. Kierukkavaihdemoottori.

Valmis kourukone on pituudeltaan melkein kolme metriä ja leveydeltään noin 90 cm. Painoa koneella on niin paljon, että asennusautot, joihin koneet tulevat, ovat rekisteröity pakettiauton sijaan kuorma-autoiksi.

3.2 Työn toteutus

Työ toteutettiin Nescon tiloissa Orimattilassa. Työtä aloitettiin suunnittelemaan kesällä, kun huomattiin, että taajuusmuuttajan ohjelmointi voitaisiin tehdä itse. Ennen työn aloitusta tutkittiin aikaisemmin valmistettuja sekä testattuja koneita ja tutustuttiin niiden toimintaan.

Seuraavaksi vertailtiin eri taajuusmuuttajavalmistajia, mutta päädyttiin Yaskawaan, sillä näitä oltiin käytetty paljon Nescon muissakin koneissa. Taajuusmuuttajan tilaaminen myös hieman viivästyi komponenttipulan takia, sillä monilla valmistajilla toimitusajat olivat hyvin pitkiä. Lopuksi kuitenkin löytyi yksi Yaskawan taajuusmuuttaja, joka saapui kohtuullisella aikataululla. Ensimmäisenä tutustuttiin taajuusmuuttajan laiteoppaisiin ja käyttöohjeisiin.

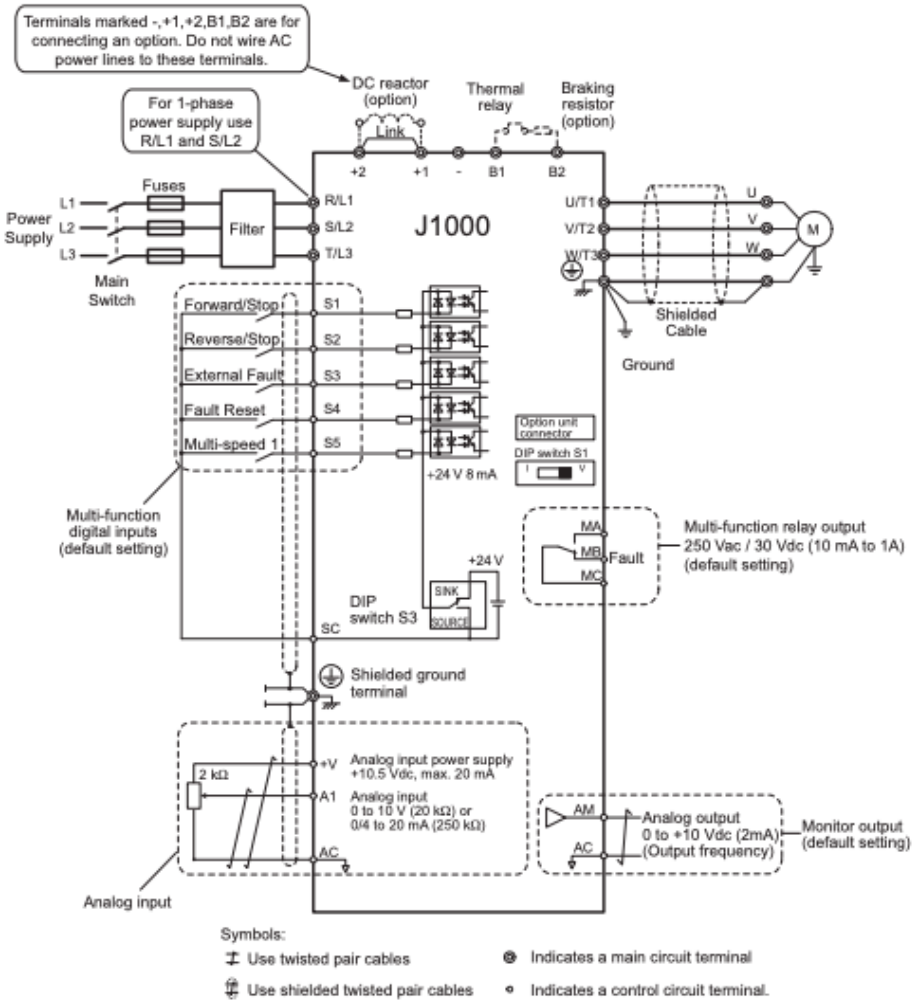
Nescolla ei työn toteutushetkellä ollut valitettavasti sadevesikourukonetta tekeillä, johon olisi pystytty suoraan asentaa uusi taajuusmuuttaja. Onneksi taajuusmuuttajan lisäksi oli ylimääräisenä samanlainen kierukkavaihdemoottori, mitä koneissa käytetään. Kytkennät ja ohjelmointi tehdään siis ilman kuormitusta. Parametreja voidaan helposti myöhemmin muokata sopiviksi kuorman mukaan, kun koneita taas kasataan tehtaassa.

3.2.1 Kytkennät

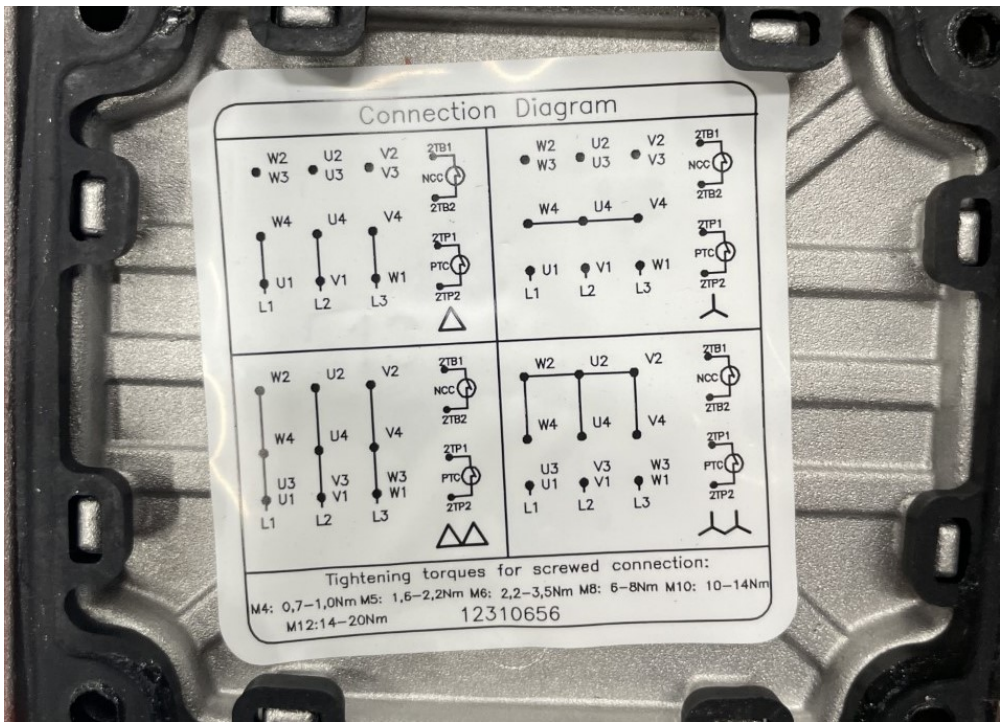
Taajuusmuuttajan saavuttua seuraavana tehtävänä oli luoda kytkennät virtalähteestä taajuusmuuttajaan ja siitä moottoriin. Ensin tutkittiin taajuusmuuttajan mukana tullutta oppaan kytkentäkaaviota, joka näkyy kuvassa 15. Moottorin kytkennät toteutettiin ottamalla mallia edellistä moottorista. Moottoriin tehtiin kolmiokytkentä, jonka hahmotuksen näkee kuvasta 16.

Kuvasta 15 nähdään taajuusmuuttajan virtalähteen kytkentä symboleina L1, L2 ja L3 sekä moottorille lähtevät kytkentäpaikat, joiden symbolit ovat U/T1, V/T2 ja W/T3. Aloitettiin ensin yhdistämällä virtalähdekaapelin johdot, jotka olivat merkattu myös numeroilla 1, 2 ja 3, vastaaviin paikkoihin taajuusmuuttajassa. Tämän

jälkeen taajuusmuuttajasta vedettiin virtakaapeli moottorille samalla tavoin johtojen numerot yhdistämällä moottorissa oleviin kytkentäpaikkoihin. Moottorissa oli kolme pientä laattaa, joiden avulla moottoriin vaihdettiin tähtikytkennän sijaan kolmiokytkentä muuttamalla laatat pystysuoraan, kuten kuvasta 16 nähdään.



Kuva 15. Taajuusmuuttajan kytkentäkaavio [19].



Kuva 16. Moottorin kytkentäkaavio. Vasemmalla ylhäällä kolmiokytkentäkaavio ja oikealla ylhäällä tähtikytkentäkaavio.

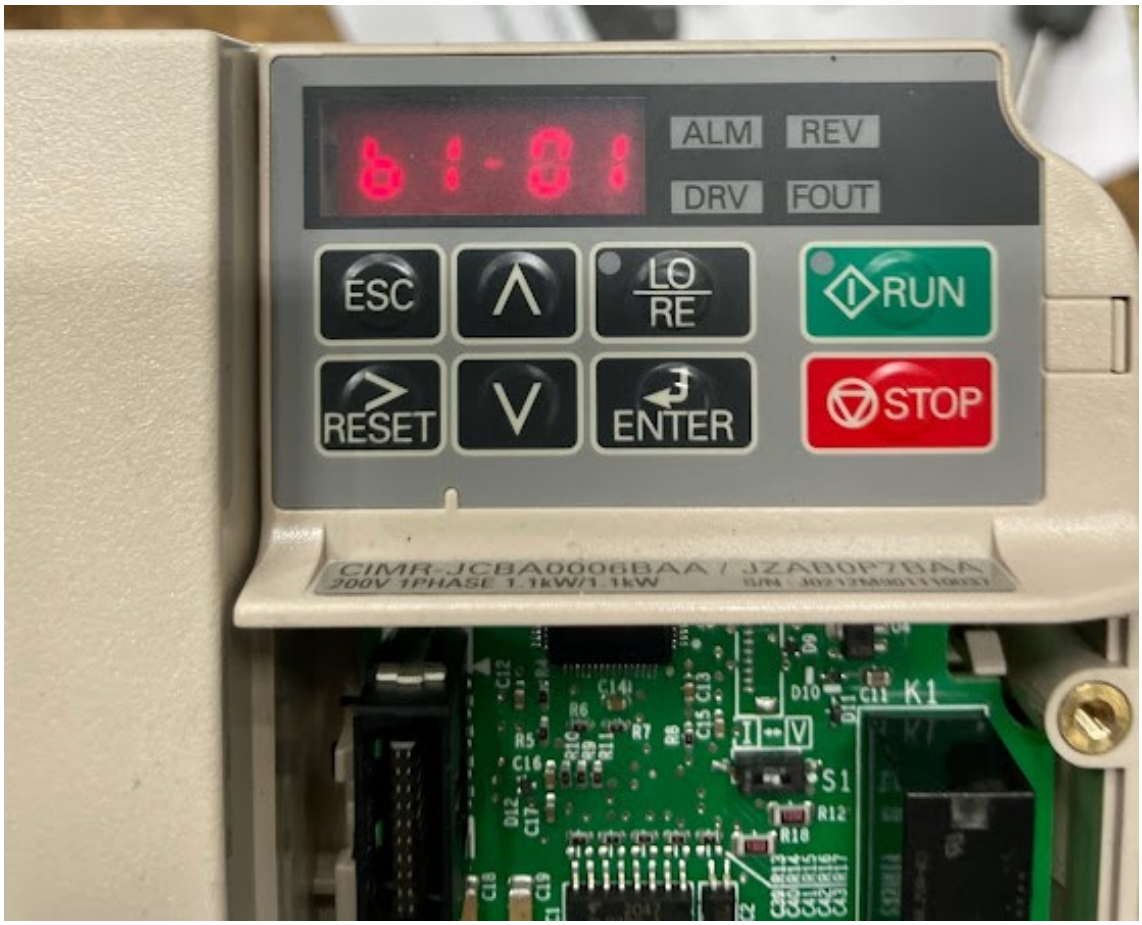
Ohjauskäskyä antamaan valittiin vapaana oleva johdollinen ohjauskapula, mikä on samanlainen, jota esiteltiin edellisessä kappaleessa. Tämä antaa käskyn eteen tai taakse eri nappia painamalla. Tämän kytkimen yhteen neljästä kytkentä paikasta yhdistettiin taajuusmuuttajasta johto SC-tulosta (multifunction input common). Tästä kytkimen samasta paikasta liitettiin johto viereiseen paikkaan. Kahdesta muusta paikasta kytkettiin johdot digitaalisiin tuloihin S1 ja S2, jotka ohjaavat eteen ja taakse käskyjä oletusasetuksena. Kuvassa 17 näkyy taajuus-muuttajan kytkennät.

Kuva 17. Taajuusmuuttajan ensimmäiset kytkennät.

Enempää kytkentöjä ei tällä hetkellä vielä tehty, sillä tarkoitus oli testata alkaako moottori pyörimään näillä kytkennöillä. Virtakaapeli kytkettiin virtalähteeseen ja todettiin kytkentä onnistuneeksi, sillä taajuusmuuttajaan syttyi virrat päälle. Seuraavaksi oli taajuusmuuttajan parametrien asetus.

3.2.2 Parametrien asetus

J1000-taajuusmuuttajan käyttöoppaassa löytyy parametritaulukko, josta saadaan selville niiden merkitykset. Nämä oltiin kuvattu taajuusmuuttajassa valikossa merkkijonoilla, jossa on järjestyksessä aina jokin kirjain, sen vieressä numero ja väliviivan jälkeen kaksi numeroa, kuten b1-01. Esimerkki tästä näkyy kuvassa 18.



Kuva 18. Parametrimerkkijono taajuusmuuttajan näytössä.

Parametreja lähdettiin asettamaan led-näytön näppäimiä käyttäen käyttöohjeen parametritaulukon mukaisesti. Parametritaulukon näkee kuvasta 17. Ensimmäisenä oli alustusparametrien valinta, jotka päätettiin jättää oletusarvojen mukaisiksi. Käyttötilan valinnassa asetettiin digitaalitulot käyttökomennoksi sekä valittiin mistä taajuusmuuttaja ottaa taajuusreferenssin. Monet parametrit, kuten jar-

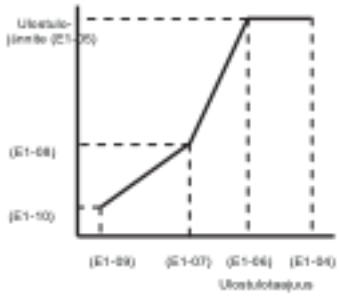
rutus, kiihdytys/hidastus- sekä kantoaaltotaajuus, jätettiin oletusarvojen mukaisiksi. Moottorin nimellisvirta, nimellisjättämä sekä tyhjäkäyntivirta parametriarvot näppäiltiin manuaalisesti taajuusmuuttajaan, jotta se osaa ohjata moottoria oikein. V/f-käyrä eli taajuusmuuttajan ohjaustapa jätettiin oletusarvojen mukaiseksi, jossa aina edellinen taajuus oli toista suurempi. V/f-käyrän ohje näkyy kuvassa 18, jossa on käyrän graafinen kuvaaja.

6 Parametritaulukko

Tässä parametritaulukossa esitetään taajuusmuuttajan tärkeimmät parametrit. Oletusasetukset on lihavoitu. Katso täydellinen parametriluettelo käyttöoppaasta.

Par.	Nimi	Selite
Alustusparametrit		
A1-01	Parametrointitason valinta	Valitsee, mitä parametreja voi käyttää digitaalinäytöstä. 0:Vain käyttö 2:Kaikki parametrit muutettavissa
A1-03	Alustusparametrit	Nollaa kaikki parametrit oletusarvoihin. (Palaa arvoon 0 alustuksen jälkeen) 0000: Ei alustusta 2220: 2-johdinalustus 3330: 3-johdinalustus
Käyttötilan valinta		
b1-01	Taajuusreferenssin valinta	0:Ohjain – arvot d1-.. 1:Analogiatulo A1 2:Lisävaruste sarjakomm. 3:Lisävarusteena toimitettava potentiometri
b1-02	Käyttökomentovalinta	0:Ohjain – KÄYTTÖ- ja PYSÄYTYS-näppäimet 1:Liittimet – digitaalitulot 2:Lisävaruste sarjakomm.
b1-03	Pysäytystavan valinta	Valitsee pysäytystavan, kun käyttökomento on poistettu. 0:Nousujännitteestä pysähtymiseen 1:Pysäytys vapaasti pyörien
b1-04	Taaksepäintoiminnan valinta	0:Taaksepäin-toiminta otettu käyttöön 1:Toiminta taaksepäin estetty
b1-14	Vaihejärjestyksen valinta	Vaihtaa lähdön vaihejärjestyksen 0:Standardi 1:Vaihda vaihejärjestystä
Tasavirtajarrutus		
b2-02	Tasavirtajarrutuksen virta	Asettaa tasavirtajarrutuksen virran prosentteina taajuusmuuttajan nimellisvirrasta.
b2-03	Tasavirtajarrutusaika/ tasaviritysaika käynnistyksessä	Asettaa tasavirtajarrutuksen ajan käynnistyksessä 0,01 sekunnin yksikköinä. Pois käytöstä, kun arvoksi asetetaan 0,00 sekuntia.
b2-04	Tasavirtajarrutusaika pysäytyksessä	Asettaa tasavirtajarrutusajan pysäytyksessä. Pois käytöstä, kun arvoksi asetetaan 0,00 sekuntia.
Kiihdytys/hidastus		
C1-01	Kiihdytysaika 1	Asettaa kiihdytysajan 1 nollasta enimmäislähtötaajuuteen.
C1-02	Hidastusaika 1	Asettaa hidastusajan 1 enimmäistaajuudesta nollaan.
C2-01	S-käyrä 1	S-käyrä kiihdytyksen alkaessa.
C2-02	S-käyrä 2	S-käyrä kiihdytyksen loppuessa.
C2-03	S-käyrä 3	S-käyrä jarrutuksen alkaessa.
C2-04	S-käyrä 4	S-käyrä jarrutuksen loppuessa.
Jättämän kompensointi		
C3-01	Jättämän kompensointivahvistus	• Nosta, jos nopeus on pienempi kuin taajuusreferenssi • Laske, jos nopeus on korkeampi kuin taajuusreferenssi.
C3-02	Jättämän kompensoinnin viiveaika	• Pienennä asetusta, jos jättämän kompensaatio on liian hidas. • Lisää asetusta, jos nopeus ei ole vakaa.
Kuormituskompensaatio		
C4-01	Kuormituskompensaation lisäys	• Lisää tätä asetusta, jos vääntövaste on hidas • Pienennä tätä asetusta, jos ilmenee nopeus/ vääntöoskillaatiota.
Toimintatila ja kantoaaltotaajuus		
C6-01	Normaali/ raskas käyttö - valinta	0: Raskas käyttö (HD) Vakiovääntösovellukset 1:Normaali käyttö (ND) Vaihtelevat vääntösovellukset

Kuva 19. Parametritaulukko Yaskawan pikaoppaasta [19].

V/f-käyrä		
E1-01	Tulo-jännitease-tus	Tulojännite
E1-04	Enimmäis-lähtötaajuus	Aseta lineaarisilla V/f-ominaisuuksilla samat arvot parametrille E1-07 ja E1-09. Tässä tapauksessa parametrin E1-08 asetus jätetään huomiotta. Varmista, että kaikki neljä taajuutta on asetettu näiden sääntöjen mukaan tai ilmenee OPE10-vika: E1-04 ≥ E1-06 ≥ E1-07 ≥ E1-09 
E1-05	Enimmäis-lähtöjännite	
E1-06	Peruslähtö-taajuus	
E1-07	Keskilähtö-taajuus	
E1-08	Keski- läh-töjännite	
E1-09	Min.lähtö-taajuus	
E1-10	Min.lähtö-jännite	
Moottoritiedot		
E2-01	Moottorin nimellis-virta	Moottorin nimellisvirta ampee-reina.
E2-02	Moottorin nimellisjät-tämä	Moottorin nimellisluisto hertseinä (Hz).

Kuva 20. V/f-käyrän kuvaaja Yaskawan pikaoppaasta [19].

Tärkeimmät arvot, jotka asetettiin taajuusmuuttajaan, olivat moottorin tiedot ja taajuusreferenssit, joiden perusteella moottorin nopeutta säädetään. Suurin osa parametreista jätettiin oletusarvojen mukaisiksi, sillä niitä ei tässä käytössä tarvitse tai ne olivat juuri oikeat tähän moottorikäyttöön.

4 Testaus

Ensimmäisten parametrien asetuksen jälkeen oli aika testata, toimiiko taajuusmuuttaja näillä parametreilla. Moottori ei kuitenkaan lähtenyt pyörimään, vaikka taajuusmuuttaja osoitti saavansa käskyn ohjausnapista antamalla valon RUN-näppäimelle. Huomattiin, että taajuusmuuttajan Switch DIP-kytkin oli väärässä asennossa. Tämä kytkin kertoo, käytetäänkö taajuusmuuttajassa digitaalisia vai analogisia tuloja. Tämä asetettiin oikeaan asentoon, jonka jälkeen kokeiltiin uudestaan moottorin testausta. Tämä ei kuitenkaan auttanut moottorin pyörimiseen.

Taajuusmuuttaja asetettiin uudestaan tehdasasetuksille, sillä parametreja muutettaessa ilmeni ongelmatilanne. Tehdasasetuksen jälkeen kaikki parametrit alettiin asettamaan uudelleen. Moottorin tiedot tarkistettiin uudelleen ja huomattiin joidenkin arvojen poikkeavan edellisestä testauskerrasta. Arvojen uudelleen asetuksen jälkeen moottorin käynnistystä kokeiltiin uudelleen ja tämä ei kuitenkaan lähtenyt käyntiin.

Vikaa yritettiin löytää jostain muualta kuin parametreista, sillä niiden muutos ei vaikuttanut moottorin toimintaan. Kytkentöjä tarkastaessa nähtiin, että moottorin kytkennät taajuusmuuttajasta olikin väärin. Kaapelit kytkettiin uudestaan ja tarkistettiin, että jokainen oli nyt oikein. Tämän jälkeen parametrit asetettiin takaisin alkuperäisiin arvoihin ja käynnistystä kokeiltiin uudelleen. Tällä kertaa moottori käynnistyi ja alkoi pyörittämään vaihdetta. Testaus todettiin näin onnistuneeksi.

5 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli saada taajuusmuuttajan kytkennät ja parametrit ohjelmoitua niin, että se ohjaisi moottoria samalla tavalla kuin aiemmissa toteutuksissa. Taajuusmuuttajaan piti saada itse asetettua parametrit ohjaamaan moottoria.

Tavoitteessa onnistuttiin osittain, vaikka komponenttien viivästyminen ja ongelmatilanteet veivät työstä jonkin verran aikaa. Taajuusmuuttajat, kytkennät sekä parametrit saatiin asetettua taajuusmuuttajaan. Testausvaiheessa moottori saatiin myös pyörimään ilman kuormaa. Kuorman testaus jäi myöhäisemmälle ajalle, sillä sadevesikourukoneita ei ollut työn hetkellä kasauksessa. Kuitenkin työ saatiin hyvin aluille, josta on helppo lähteä soveltamaan parametreja kuorman vaatimiin arvoihin.

Jatkotoimia työhön olisi seuraavaksi saada taajuusmuuttaja yhdistettyä kourukoneeseen ja testattua kuorman kanssa sen toimintaa. Lisäksi kaksi muuta digitaalituloa tulisi yhdistää taajuusmuuttajaan, jotka antavat käskyjä nopeuden muutoksista tilanteesta riippuen. Kauko-ohjattava kapula tulee myös yhdistää taajuusmuuttajaan yhteen digitaalituloista. Työpaikalle tulee myös tehdä ohje, jossa on vaiheet seuraavalle asentajalle. On myös esimiehien päätettävissä, halutaanko taajuusmuuttajat ohjelmoida jatkossa käsin vai tietokoneella ohjelmointiohjelmalla. Käsin manuaalisesti näppäily vie hieman enemmän aikaa mutta taas ohjelmalisenssit maksavat sekä tarvitaan tietokone ja taajuusmuuttajaan sopiva yhdistyskaapeli.

Lähteet

1 Nescon tarina. Verkkoaineisto. Nesco Oy. < https://nesco.fi/nescon-tarina/> Luettu 3.9.2021

2 Portfolio. Verkkoaineisto. Sentica Oy. < https://sentica.fi/portfolio/vesivek/>. Luettu 3.9.2021

3 Taajuusmuuttajat. 2017. Verkkodokumentti. SähköNet. < https://blogit.gradia.fi/sahkonet/sahko-ja-automaatioasennukset/oppimistehtavat/teollisuuden-sahkoasennukset/moottori-kaytot/taajuusmuuttajat/> Luettu 10.9.2021

4 Tuusa, Heikki. 2008. Sähkömoottorikäytöt. Verkkodokumentti. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/11sahkomoottorikaytot.pdf>. Luettu 11.9.2021.

5 Mikä on taajuusmuuttaja? Verkkodokumentti. Danfoss. < https://www.danfoss.com/fi-fi/about-danfoss/our-businesses/drives/what-is-a-variable-frequency-drive/>. Luettu 11.9.2021.

6 10 Benefits Adjustable-Speed AC Drives Provide to Industrial Users. 2017. Verkkodokumentti. Automation.com < https://www.automation.com/en-us/articles/2017/10-benefits-adjustable-speed-ac-drives-provide-to>. Luettu 16.9.2021.

7 Lim, Kris. 2015. Electir Motor Control: What are the drawbacks of a VFD (variable-frequency drive)? Verkkodokumentti. Quora. < https://www.quora.com/Electric-Motor-Control-What-are-the-drawbacks-of-a-VFD-variable-frequency-drive>. Luettu 22.9.2021.

8 Vaihdemoottorit. Verkkodokumentti. SEW-EURODRIVE. < https://www.sew-eurodrive.fi/products/gearmotors/gearmotors-2.html#was_ist_ein_getriebemotor>. Luettu 29.9.2021.

9 Sähkömoottorityypit. 2020. Verkkodokumentti. Motiva. < https://www.motiva.fi/ratkaisut/kestava_liikenne_ja_liikkuminen/nain_liikut_viisaasti/valitse_auto_viisaasti/ajoneuvotekniikka/moottoritekniikka/sahkoautot/sahkomoottorityypit>. Luettu 29.9.2021.

10 Korpinen, Leena. Sähkökoneet, osa 1. Verkkodokumentti. Sähkövoimatekniikkaopus. < http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf>. Luettu 30.9.2021.

11 Tähti-kolmiomuunnos. 2021. Verkkodokumentti. Wikipedia. < https://fi.wikipedia.org/wiki/T%C3%A4hti-kolmiomuunnos>. Luettu 12.10.2021.

12 Worm Geats Explained. Verkkodokumentti. Machinery Lubrication. < https://www.machinerylubrication.com/Read/1080/worm-gears>. Luettu 20.10.2021.

13 How Worm Gear Motors Work. 2017. Verkkodokumentti. Bauer GMC. <https://bauergmc.com/how-worm-gear-motors-work.html>. Luettu 20.10.2021.

14 J. Hayavadana. 2018. Verkkodokumentti. Textile Mechanics and Calculations. < https://books.google.fi/books?id=dEqoDwAAQBAJ&pg=PA80&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false>. Luettu 22.10.2021.

15 Paras automaatioratkaisu. Verkkodokumentti. Yaskawa Electric Corporation. < https://www.yaskawa.fi/tietoa-yaskawasta/Tietoa-meist%C3%A4/Yaskawa-Electric-Corporation>. Luettu 16.10.2021

16 Yaskawa Electric Corporation. 2021. Verkkodokumentti. Wikipedia. < https://en.wikipedia.org/wiki/Yaskawa_Electric_Corporation>. Luettu 16.10.2021.

17 J1000-Sarja. 2020. Verkkodokumentti. Yaskawa Europe GmbH. < https://www.yaskawa.fi/tuotteet/ac-taajuusmuuttajat/perinnetaajuusmuuttajat/seriesdetail/serie/j1000-sarja_516>. Luettu 16.10.2021.

18 Vedenpää, Jani. Tuotantopäällikkö, Nesco Oy, Orimattila. Keskustelu 22.10.2021.

19 J1000 Pikaohje. Verkkodokumentti. Vem Motors Finland. < http://www.vem.fi/wp-content/uploads/2018/04/J1000-pikaopas-VEM_motors_Finland1.pdf>. Luettu 17.10.2021