

Kalle Hyytiä

# **Laivan sähköverkon simulointi**

## **Sähkötekniikan korkeakoulu**

Diplomityö on jätetty tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa  
15.3.2012

### **Työn valvoja**

Professori Matti Lehtonen

### **Työn ohjaaja**

Diplomi-insinööri Mikko Kajava

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                |                   |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|
| <b>Tekijä:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | Kalle Hyytiä                                   |                   |
| <b>Työn nimi:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Laivan sähköverkon simulointi                  | <b>Sivumäärä:</b> |
| <b>Päivämäärä:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 15.3.2012                                      | 10 + 61           |
| <b>Tiedekunta:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Sähkötekniikan laitos                          |                   |
| <b>Professuuri:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | S-18 Suurjännitetekniikka ja sähköjärjestelmät |                   |
| <b>Työn valvoja:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Professori Matti Lehtonen                      |                   |
| <b>Työn ohjaaja:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | DI Mikko Kajava                                |                   |
| <p>Tässä työssä on tutkittu keulapotkurimoottorina toimivan oikosulkumoottorin käynnistystä ja sen aiheuttamaa jännitteenalenemaa laivan sähköverkossa. Simuloinnit on tehty The MathWorksin (Natick, Massachusetts, Yhdysvallat) Simulink ohjelmistolla.</p> <p>Työn alussa käsitellään laivan sähköverkkoon liittyviä komponentteja ja yleisesti sähköverkon toimintaedellytyksiä. Laivassa käytettävistä sähkökoneista käydään läpi tahtikoneen kaksiakselimalli ja oikosulkukoneen kaksihäkkimalli. Lisäksi käydään läpi sähkökoneiden käynnistys- ja ohjaustapoja. Työssä käsitellään myös sähkönjakelua, jännitemuuntajia, dieselmoottoreita ja taajuusmuuttajia.</p> <p>Työssä päädyttiin käyttämään Simulinkin mallikirjaston SimPowerSystemsin valmiita malleja. Näitä malleja tutkittiin ensin ja todettiin niiden pohjautuvan samoihin yhtälöihin kuin työssä on esitetty. Lisäksi niiden toimintaa tutkittiin simuloimalla. Valmiita malleja on helppo käyttää monipuolisesti. Simulinkin toimintaa on esitetty työssä lyhyesti ennen varsinaisia simulointeja.</p> <p>Simulointien pohjalta on esitetty tapa määrittää jännitteenalenema simulointituloksista. Määritettyä jännitteenalenemaa on sitten verrattu mallilaiva Celebrity Silhouettella mitattuun jännitteenalenemaan. Mallien toiminta vaikuttaa vastaavan käytännön tuloksia.</p> |                                                |                   |
| <b>Avainsanat:</b> oikosulkumoottorin käynnistys, simulointi, Simulink, jännitteenalenema                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |                                                |                   |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                 |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----------------|
| <b>Author:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | Kalle Hyytiä                                    |                |
| <b>Title:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Simulation of ship's electrical network         | Number of      |
| <b>Date:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 15.3.2012                                       | pages: 10 + 61 |
| <b>Faculty:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | Department of Electrical Engineering            |                |
| <b>Professorship:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | S-18 High Voltage Engineering and Power Systems |                |
| <b>Supervisor:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Professor Matti Lehtonen                        |                |
| <b>Instructor:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | M. Sc. (Tech.) Mikko Kajava                     |                |
| <p>This study examines the operation of the induction motor start-up as bow thrusters motor, and the voltage drop it causes to the ship's electrical network. The simulations have been made with The MathWorks (Natick, Massachusetts, the United States of America) Simulink software.</p> <p>Beginning of the thesis describes the ship's electrical network components, and operating conditions in general network. A synchronous machine's two axle model and induction machine two cage model are the electrical machinery models described in this thesis. Start-up and control methods for electric machinery are also described. Distribution of electricity, power transformers, diesel engines and frequency converters are also covered in this thesis.</p> <p>Already existing models from Simulink library were selected and these models were examined and found to be based on the same equations as the thesis. Models were also tested with simulations. Ready-made models are easy to operate in many ways. The thesis shortly shows Simulink basics in action, before the actual simulations.</p> <p>Based on the simulations, the voltage drop is defined from the simulation results. The defined voltage drop is then compared with the voltage drop measured from model ship Celebrity Silhouette. The function of simulation models seems to match with the results in practise.</p> |                                                 |                |
| <b>Keywords:</b> induction motor start-up, simulation, Simulink, voltage drop                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                                                 |                |

## **Esipuhe**

Tämä työ on tehty ABB Oy:n Marine ja Turboahditet-yksikössä Vuosaarella. Työn valvojana on toiminut professori Matti Lehtonen, jolle haluan kohdistaa kiitokset työn onnistumiseen johtaneesta mielenkiinnosta. Diplomi-insinööri Mikko Kajavaa haluan myös kiittää suuresti työni ohjaajana toimimisesta.

Haluan myös kiittää koko ABB Marine yksikön henkilöstöä tuesta ja avusta työn aikana sekä sitä edeltäneestä ajanjaksosta. Erityisesti haluan kiittää diplomi-insinööri Matti Lehteä sekä diplomi-insinööri Niko Raudasojaa, jotka ovat mahdollistaneet työn tekemisen ABB Marinelle sekä avittaneet asiantuntevilla neuvoilla työn valmistumista.

Lisäksi haluan kiittää nyt koulu-urani ollessa päättymässä vanhempiani Tiina ja Artoa saamastani avusta, tuesta ja innoituksesta. Haluan kiittää myös siskoani Heidiä häneltä saamastani tuestaan koulutukseni aikana. Erityiset kiitokset puolisolleni Tuijalle, joka on mahdollistanut tämän työn tekemisen omalla tuellaan.

Esossa 15.3.2012

Kalle Hyytiä

# Sisällysluettelo

|                                                             |           |
|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ESIPUHE</b> .....                                        | <b>4</b>  |
| <b>SISÄLLYSLUETTELO</b> .....                               | <b>5</b>  |
| <b>TERMIT JA LYHENTEET</b> .....                            | <b>7</b>  |
| <b>MUUTTUMAT</b> .....                                      | <b>9</b>  |
| <b>1 JOHDANTO</b> .....                                     | <b>11</b> |
| 1.2 YRITYSSOVELLUS.....                                     | 11        |
| 1.3 TUTKIMUSONGELMA .....                                   | 12        |
| 1.4 TUTKIMUKSEN TAVOITTEET.....                             | 13        |
| <b>2 LAIVAN SÄHKÖVERKKO JA SEN KOMPONENTIT</b> .....        | <b>14</b> |
| 2.1 DIESELMOOTTORI.....                                     | 16        |
| 2.2 SÄHKÖKONEET.....                                        | 16        |
| 2.2.1 Oikosulkukone.....                                    | 16        |
| 2.2.2 Tahtikone .....                                       | 21        |
| 2.2.2.1 Kaksiakselimalli .....                              | 23        |
| 2.2.3 Sähkökoneiden vektorisäätö.....                       | 29        |
| 2.2.4 Tahtigeneraattorin herätinmenetelmät .....            | 29        |
| 2.3 SÄHKÖNJAKELU .....                                      | 29        |
| 2.4 MUUNTAJA .....                                          | 30        |
| 2.5 POTKURIKONEISTOT .....                                  | 30        |
| 2.5.1 Mekaaninen potkurikoneisto .....                      | 30        |
| 2.5.2 Sähköinen potkurikoneisto .....                       | 31        |
| 2.6 TAAJUUSMUUTTAJA .....                                   | 32        |
| 2.6.1 Syklokonverterti.....                                 | 33        |
| 2.6.2 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja.....           | 34        |
| 2.7 SÄHKÖVERKKOON VAIKUTTAVIEN KOMPONENTTIEN SÄÄTÖ.....     | 35        |
| 2.7.1 Dieselmoottorin pyörimisnopeuden säätö.....           | 36        |
| 2.7.2 Generaattoreiden automaattinen jännitteen säätö ..... | 36        |
| 2.7.3 Pätötehon säätö.....                                  | 36        |
| 2.7.4 Propulsiosäätö .....                                  | 37        |
| 2.8 SÄHKÖN LAATU JA LUOKITUSLAITOSTEN MÄÄRÄYKSET .....      | 38        |
| <b>3 KOMPONENTTIEN DYNAAMINEN MALLINTAMINEN</b> .....       | <b>40</b> |
| 3.1 OIKOSULKUKONE .....                                     | 40        |
| 3.2 TAHTIKONE.....                                          | 41        |
| <b>4 SIMULOINTITYÖKALU</b> .....                            | <b>42</b> |
| 4.1 MATLAB / SIMULINK .....                                 | 42        |
| 4.2 SIMULOINNIN PERIAATE.....                               | 43        |
| <b>5 SIMULOINTIMALLIT JA NIIDEN PARAMETRIT</b> .....        | <b>45</b> |
| 5.1 SIMULOINTIEN KOMPONENTIT .....                          | 46        |
| 5.1.1 Tahtigeneraattori.....                                | 46        |

|          |                                                       |           |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 5.1.2    | <i>Oikosulkumoottori</i> .....                        | 48        |
| 5.1.3    | <i>Sähkökaapeli</i> .....                             | 52        |
| 5.1.4    | <i>Magnetointimalli</i> .....                         | 53        |
| 5.2      | JÄRJESTELMÄ .....                                     | 54        |
| 5.3      | SIMULOINTIEN YHTEENVETO .....                         | 55        |
| 5.3.1    | <i>Sähköverkko ilman magnetointimallia</i> .....      | 56        |
| 5.3.2    | <i>Sähköverkko magnetointimallin kanssa</i> .....     | 58        |
| 5.4      | SIMULOINNIN VERTAILU MITATTUIHIN ARVOIHIN .....       | 60        |
| <b>6</b> | <b>OIKOSULKUMOOTTORIMALLIN HERKKYYSANALYYSI</b> ..... | <b>66</b> |
| <b>7</b> | <b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....                           | <b>68</b> |
| <b>8</b> | <b>JATKOTOIMENPITEET</b> .....                        | <b>69</b> |
| <b>9</b> | <b>LAINATUT LÄHTEET</b> .....                         | <b>70</b> |

## Termit ja lyhenteet

|                             |                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Available power calculation | Propulsiosäädön yhteydessä käytettävä teholaskenta                                                                                                                                           |
| ABB                         | Asea Brown Boveri, monikansallinen sähkö- ja automaatiotekniikan yritys                                                                                                                      |
| AC                          | Air Conditioning, ilmastointi                                                                                                                                                                |
| ACS 600                     | ABB:n taajuusmuuttajatyyppejä                                                                                                                                                                |
| ACS 6000                    | ABB:n taajuusmuuttajatyyppejä                                                                                                                                                                |
| AVR                         | Automatic voltage regulator, automaattinen jännitteensäätäjä                                                                                                                                 |
| Azipod                      | Azimuthing Podded Drive, ABB:n sähköinen ruoripotkurilaitteisto                                                                                                                              |
| DNV                         | Det Norske Veritas, norjalainen luokituslaitos                                                                                                                                               |
| D.O.L- käynnistys           | Direct on line-käynnistys, moottorin suorakäynnistys                                                                                                                                         |
| DTC                         | Direct torque control, suora käämivuon ja vääntömomentin säätö                                                                                                                               |
| Microsoft Excel             | Microsoftin luoma taulukkolaskentaohjelma                                                                                                                                                    |
| GL                          | Germanischer Lloyd, saksalainen luokituslaitos                                                                                                                                               |
| IGCT                        | Integrated Gate Commutated Thyristor, ohjattava tyristori malli                                                                                                                              |
| IGBT                        | Insulated-Gate Bipolar Transistor, ohjattava transistori malli                                                                                                                               |
| LCI                         | Load Commutated Inverter, kuormakommutoiva virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja                                                                                                              |
| LRS                         | Lloyd's Register of Shipping, brittiläinen luokituslaitos                                                                                                                                    |
| PID-säätö                   | Proportional Integral Derivative Control on säätöperiaate, jossa lineaarisen staattisen vahvistuksen lisäksi on mukana integrointi ja derivointi, eli erosuure ja erosuureen muuttumisnopeus |

|               |                                                                             |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Matlab        | The MathWorks-yhtiön ylläpitämä numeerisen laskennanohjelmisto              |
| Propulsio     | Laivan potkurijärjestelmä, sähköinen tai mekaaninen                         |
| Päätaulu      | Laivan pääsähkönjakelukisko                                                 |
| RINA          | Registro Italiano Navale, italialainen luokituslaitos                       |
| Speed droop   | Pätötehostatiikka, dieselmoottorin tehon säätötapa                          |
| Simulink      | MathWorks-yhtiön kehittämä simulointi-, analysointi- ja mallinnyssympäristö |
| Takateho      | Tilanne, jossa moottori alkaa syöttää tehoa takaisin verkkoon päin          |
| THD           | Total Harmonic Distortion, Harmoninen kokonaissärö                          |
| UPS           | Uninterruptible Power Supply, katkeamaton sähkösyöttöjärjestelmä            |
| VA            | Voltti-ampeeri, muuntajan tehon yksikkö                                     |
| Voltage droop | Loistehostatiikka, generaattorin loistehon säätötapa                        |
| VSI           | Voltage Source Inverter, jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja             |

## Muuttujat

|          |                         |
|----------|-------------------------|
| $\psi$   | Käämivuo                |
| $\omega$ | Kulmanopeus             |
| $\Omega$ | Geometrinen kulmanopeus |
| $f$      | Taajuus                 |
| $i$      | Virta                   |
| $L$      | Induktanssi             |
| $n$      | kierrosnopeus           |
| $P$      | Pätöteho                |
| $p$      | Napapariluku            |
| $Q$      | Loisteho                |
| $R$      | Resistanssi             |
| $s$      | Epätahtikoneen jättämä  |
| $T$      | Vääntömomentti          |
| $U$      | Jännite                 |
| $X$      | Reaktanssi              |

### Ala -ja yläindeksit, ellei toisin ilmoitettu

|          |               |
|----------|---------------|
| '        | Muutos-       |
| "        | Alku-         |
| $\alpha$ | Reaaliosa     |
| $\beta$  | Imaginääriosa |
| $\sigma$ | Haja-         |
| d        | Pitkittäinen- |
| e        | Sähköinen-    |

|   |               |
|---|---------------|
| m | Mekaaninen-   |
| n | Nimellinen-   |
| q | Poikittainen- |
| r | Roottori-     |
| s | Staattori-    |

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen taustaa

Nykyaikaisten sähköpropulsiolla varustettujen laivojen sähköverkossa sovelletaan voimalaitosperiaatetta. Yhteisellä voimalaitoksella tuotetaan sekä kuluttajien tarvitsema että sähköisen propulsiion vaatima sähköteho. Generaattoreiden määrä vaihtelee muutamasta aina jopa kymmeneen generaattoriin. Generaattoreita kytketään verkkoon tarvittavan tehon mukaan. Suurimman kuorman laivan verkolle aiheuttaa yleensä sähköinen propulsio, joten sen kulloisessakin operointitilanteessa tarvitsema teho määrää siis monesti tuotettavan kokonaistehon suuruusluokan.

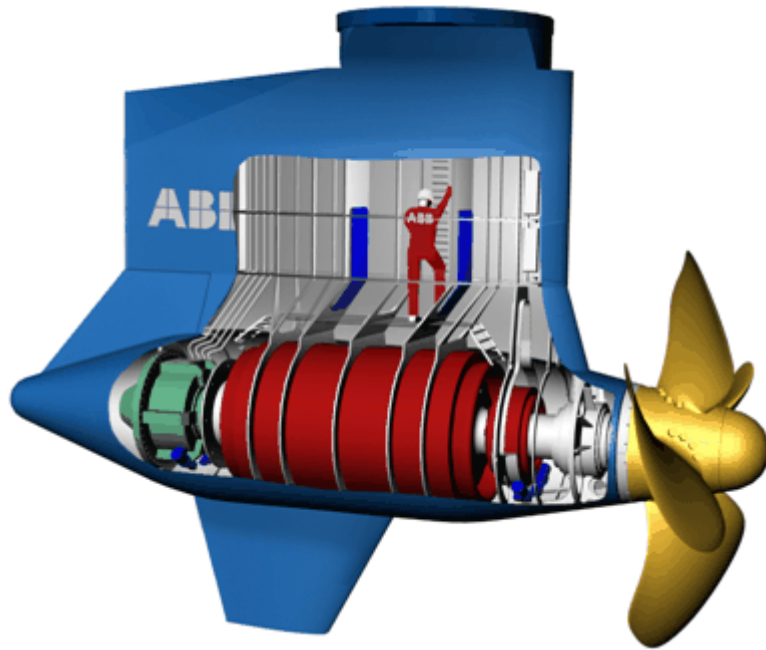
Laivan sähköverkossa tapahtuu usein tilanteita, joissa verkon muutokset ovat suuria. Kytkevät kuormat tai suojaustoimintojen takia irtikytkevät kuormat ovat suuria sähköverkkoon liitettyjen generaattoreiden tehoon nähden. Luokituslaitokset vaativat kuitenkin, että laivan sähkön laadun tulee pysyä standardien asettamissa rajoissa sekä normaalissa toiminnassa että vikatilanteissa.

Laivan sähköverkon jännite- ja taajuusrajoissa säilyminen pyritään varmentamaan mitoittamalla tarvittavat laitteet tarkoitukseen sopiviksi. Simuloimalla laivan sähköverkkoa tarkemmilla malleilla voidaan saada aikaan säästöjä kun laitteet voidaan mitoittaa vastaamaan paremmin tarpeita. Tutkimuksessa on keskitytty sähköpropulsiolla varustettujen laivojen sähköverkkoon. Mekaanisella akselipropulsiolla varustetut laivat on jätetty työssä vähemmälle huomiolle.

## 1.2 Yrityssovellus

Tämä opinnäyte työ on tehty Vuosaassa toimivassa ABB (Asea Brown Boveri, Zurich, Sveitsi) Marine-yksikössä. Marine-yksikkö kuuluu osaksi ABB:n laajempaa organisaatiota ja sen toimiala on meriteollisuus. ABB on automaatiotekniikkaan ja sähkötekniikkaan keskittynyt teollisuuskonserni, jonka tuotteita ovat muun muassa erilaiset sähkömoottorit, taajuusmuuttajat, muuntajat ja näiden erilaiset toimintakokonaisuudet.

ABB Marinen Suomen yksikkö keskittyy pääsääntöisesti matkustajalaivojen ja jäänmurttajien sähkövarusteluun. Päätuotteena on Azipod, joka on laivan rungon ulkopuolella oleva ruoripotkurikoneisto. Azipod pystyy pyörimään 360° akselinsa ympäri, mikä mahdollistaa monipuolisen käytön. Kuvassa 1 on esitetty ABB Marinen Azipod-yksikkö. Azipodista on olemassa myös pienempiin propulsiotehoihin tarkoitettu Azipod C malli.



*Kuva 1. ABB:n Azipod ruoripotkurilaitte. (1)*

Azipod ruoripotkurilaitteen lisäksi ABB Marine toimittaa laivoihin sähköjärjestelmiä, jotka voivat sisältää esimerkiksi muuntajat, taajuusmuuttajat, generaattorit, keulapotkurimoottorit ja automaatiojärjestelmän.

### **1.3 Tutkimusongelma**

Vuonna 2010 ABB Marine siirtyi käyttämään Matlab-pohjaista Simulink-ohjelmistoa sähköverkkojen simuloinnissa. Ohjelmaan luodut mallit olivat kuitenkin puutteellisia, tai ne puuttuivat kokonaan. Jo olemassa olevien ja luotavien mallien ja järjestelmien toimivuus pitää aina varmistaa vertaamalla tuloksia mitattuihin arvoihin.

Käynnistettäessä laivan keulaohjauspotkureita laivan sähköverkon jännite alenee potkurimoottoreiden ottaman suuren virran takia. Sähköverkon komponenttien mitoittaminen oikean suuruisina riittäviksi muutostilanteeseen on nykypäivän kilpailluilla markkinoilla tärkeää. Lisäksi verkon tila muutostilanteissa tulee pystyä varmistamaan simuloimalla, jottei jännitteenalenemaa ole liikaa.

Luokituslaitosten säädökset asettavat verkon toiminnalle rajat eri tilanteissa. Laivan sähköverkossa on aina erilaisia komponentteja kytkettynä, joten niiden parametrisointi ja mallien sovittaminen yhteen on ongelmallista ja erittäin tärkeää simuloinnin oikeellisuuden kannalta.

## 1.4 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli analysoida laivan sähköverkon vakautta ja siihen vaikuttavia tekijöitä sähköverkon komponenttien osalta. Tarkoitus oli luoda tarvittavat mallit ja kokonaisuudet sähköverkon vakauden analysointiin niiden puuttuessa ja muodostaa niiden tarvitsevat parametrit simuloitaviin tilanteisiin. Mallien tulisi olla myös tarpeeksi tarkkoja, eikä niiden käyttö saisi olla liian vaikeaa, jotta niitä pystyttäisiin soveltamaan eri tilanteisiin joustavasti.

Teknisenä käytännön sovelluksena oli tarkoitus tutkia keulapotkurina toimivan oikosulkumoottorin käynnistys riittävällä tarkkuudella, ja rakentaa muu verkko tämän moottorimallin ympärille. Tarkoitus oli määritellä mitä tietoja tilanteesta olisi hyvä olla mitattuna. Mitattua tietoa vertailtiin sitten simuloituihin tuloksiin ja näin simulointimallia pystyttiin säätämään toimivaksi ja toteamaan sen luotettavuus.

## 2 Laivan sähköverkko ja sen komponentit

Laivan sähköverkon toimivuus on välttämätöntä laivan toiminnalle. Laivan sähköverkkoa koskee erinäinen määrä määräyksiä, kuten propulsio ja peräsimen toimintojen varmistaminen. Näiden toiminta kaikissa tilanteissa pyritään varmistamaan UPS-laitteistoilla (engl. Uninterruptible Power Supply) sekä kahdentamalla tärkeimpiä komponentteja ja siirtoteitä.

Laivan sähköverkko muistuttaa monelta osin maasähköverkkoa: molempia käytetään esimerkiksi säteittäisesti. Niissä on paljon myös eroja, jotka vaikuttavat verkon toimintaan. Laivan sähköverkossa ei ole pitkiä johtoja ja lisäksi verkon hallinnointi ja seuranta on mahdollista integroida paremmin kuin maaverkossa (2). Laivan keskijänniteverkko on yleensä maadoitettu suuriohmisella vastuksella generaattorin nolapisteestä tai sitten käytetään maadoitusmuuntajaa, jonka toiminta perustuu muuntajan suureen impedanssiin; pienjänniteverkko on yleensä maadoittamaton. Laivan sähköverkon laatuvaatimukset jännitteen ja taajuuden vaihtelusta ovat maaverkkoa löysemmät, mutta rajat on silti asetettu luokituslaitosten toimesta.

Tässä työssä käsitellään pääasiallisesti sähköpropulsiolla varustettujen laivojen sähköverkkoa. Sähköverkon kulutus vaihtelee paljon ja suurin kuluttaja on propulsio, joka määrää useimmiten tarvittavan sähkötehon. Sähköpropulsiolaivoissa tuotetaan nykyisin samalla voimalaitoksella kaikki laivan tarvitsema teho. Tarvittavien dieselgeneraattoreiden määrä voimalaitoksessa perustuu tarvittavaan tehoon: tätä kutsutaan voimalaitosperiaatteeksi.

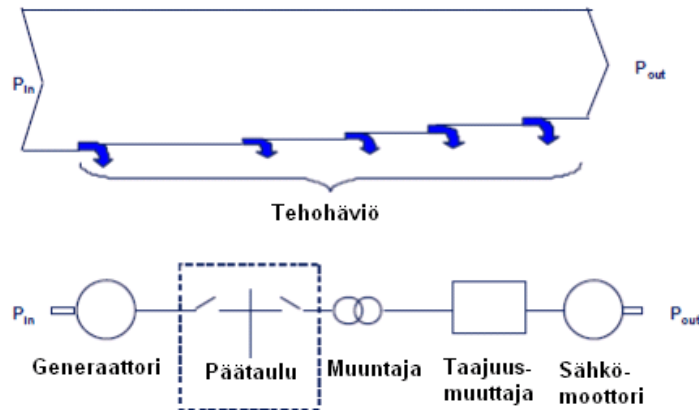
Laivan sähköverkon perustaajuus voi olla joko 50 Hz tai 60 Hz. Käytettäessä suurempaa perustaajuutta voidaan saavuttaa säästöä laitteistojen dimensioissa. Eri taajuustasoille on olemassa referenssijännitetasot, jotka on kuvattu taulukossa 1.

**Taulukko 1.** Laivan eri jännitetasot 50 ja 60 Hz taajuuksilla. (3)

|                    |       | Jännitetaso (V) |     |     |     |      |      |      |       |
|--------------------|-------|-----------------|-----|-----|-----|------|------|------|-------|
| Verkon-<br>taajuus | 50 Hz | X               | 230 | 400 | 690 | 1000 | 3000 | 6000 | 10500 |
|                    | 60 Hz | 110             | X   | 440 | 690 | 1100 | 3300 | 6600 | 11000 |

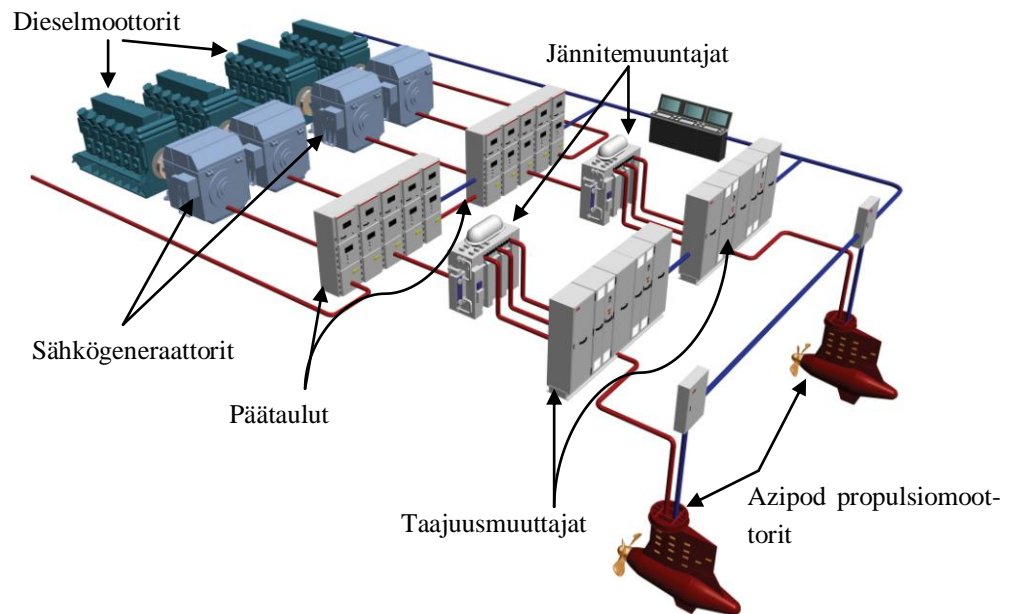
60 Hz taajuutta käytetään aluksissa, jotka matkaavat Pohjois-Amerikan vesillä sekä mannerten väliä, mutta myös muissa aluksissa voidaan päätyä käyttämään korkeampaa taajuutta (3). Taajuuden valinta vaikuttaa käytössä olevien vaihtovirtamoottoreiden ja -generaattoreiden sekä muuntajien mitoituksiin.

Sähköisen potkurikoneiston hyötysuhde on hyvä, täydellä teholla toimittaessa yleensä noin 90 % ja tämän muodostuminen on esitetty kuvassa 2. Kokonaishyötysuhde muodostuu siis verkon komponenttien hyötysuhteista; generaattori  $\eta=0,95-0,97$ , päätaulu  $\eta=0,999$ , muuntaja  $\eta=0,999-0,995$ , taajuusmuuttaja  $\eta=0,98-0,99$ , sähkömoottori  $\eta=0,95-0,97$ . (2)



**Kuva 2.** Laivan sähköverkossa tapahtuvien häviöiden muodostuminen. (2)

Kuvassa 3 on esitettyä laivan sähköverkon pääkomponentteja. Vasemmalta oikealle komponentit ovat dieselmoottorit, sähkögeneraattorit, päätaulut, muuntajat, taajuusmuuttajat ja viimeisenä ABB:n valmistamat Azipod propulsiomoottorit. Seuraavissa kappaleissa on käyty läpi laivan sähköverkossa olevia komponentteja, sekä niiden merkitystä sähköverkolle.



**Kuva 3.** Havainnollistava kuva laivan sähköverkosta. Siniset johdot kuvaavat tiedonsiirtoa ja punaiset tehonsiirtoa. (1)

## 2.1 Dieselmoottori

Laivan sähköverkko on täysin riippuvainen dieselmoottoreista, koska niiden avulla tuotetaan tarvittava mekaaninen teho. Laivoissa on yleisimmin 2-10 dieselmoottoria. Dieselmoottorit pyörittävät sähkögeneraattoreita, jotka puolestaan tuottavat laivan tarvitseman sähkötehon. Dieselmoottorit määräävät pyörimisnopeudellaan sähköverkon taajuuden. Dieselmoottoreiden käyttöä voidaan optimoida sähköisessä potkurikoneistotratkaisussa ja näin saavuttaa parempi hyötysuhde (4).

Dieselmoottorilla voi olla laivan potkurikoneiston rakenteen perusteella kaksi eri tehtävää: joko dieselmoottori tuottaa laivassa kaiken sähkötehon pyörittämällä sähkögeneraattoreita, tai lisäksi se voi pyörittää laivan potkuria mekaanisissa potkurikoneistotratkaisuissa. Dieselmoottoreita valmistetaan eri nopeuksilla pyöriviä, ja eri tilanteisiin soveltuvia (5).

## 2.2 Sähkökoneet

Sähkökoneiden tehtävä on muuttaa energiaa toiseen muotoon. Sähkömoottorit muuntavat sähkötehon mekaaniseksi tehoksi ja generaattorit päinvastoin. Koneet voidaan jakaa vaihto- sekä tasavirtakoneisiin. Vaihtovirtakoneet voidaan vielä jakaa toimintaperiaatteen mukaan eri tyyppeihin, mutta niiden kaikkien toiminta pohjautuu samaan periaatteeseen.

### 2.2.1 Oikosulkukone

Oikosulkukone on sähkömoottorin yleisin muoto. Oikosulkumoottori toimii monivaihekkäämyksen synnyttämän kiertokentän avulla (6). Oikosulkukonetta eli induktiokonetta käytetään monissa eri sovelluksissa laivassa, kuten pumpuissa ja tämän työn kannalta merkityksellisissä keulapotkurimoottoreissa. Oikosulkukone on rakenteeltaan yksinkertainen ja tehoelektronikan kehityksen myötä niitä on nykyisin voitu käyttää myös sähköisen potkurikäytön moottoreina.

Oikosulkumoottorin ollessa tyhjäkäynnillä pyörimisnopeus on hieman nimelliskohteesta matalampi ja tätä eroa kutsutaan jättämäksi. Jättämä kasvaa, kun moottoria kuormitetaan ja jättämä on noin 20 %, kun vääntömomentti on suurimmillaan. Oikosulkumoottorin nimellisjättämä on normaalisti noin 2-4 %. Oikosulkumoottoria käynnistettäessä se ottaa jopa 8-kertaisen virtasysäyksen. Suuren käynnistysvirran takia verkon jännite saattaa pudota liian alas. Tästä johtuen käytetäänkin usein muita käynnistysratkaisuja. Käynnistystavat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: taajuusmuuttajaohjattuihin ja jän-

nitteen alennusmenetelmiä käytäviin. Eräs ratkaisu on esimerkiksi tähti-kolmiokäynnistys, jossa käämit ovat ensin tähtikytkennässä. Tästä seuraa, että vaiheiden välinen jännite laskee, jonka ansiosta virta ja momentti ovat pienemmät kuin normaalissa käynnistyksessä. Moottorin pyörimisnopeuden noustua halutuksi vaihdetaan käämit takaisin kolmiokytkentään, joka on sen varsinainen käyttötapa. (5)

Suuria epätahtikoneita käynnistäessä voidaan käyttää käynnistysmuuntajaa. Tässä tavassa muuntajalla pudotetaan jännitettä käynnistyksen alussa ja nostetaan portaittaisesti pyörimisnopeuden noustessa. Käynnistysmuuntajaa käytettäessä käynnistysvirta pienenee samassa suhteessa jännitteen kanssa, ja momentti puolestaan pienenee kaavan 1 mukaisesti neliöön verrannollisena, kuten tähti-kolmio käynnistyksessäkin (7)

$$T = \left(\frac{U}{U_n}\right)^2 T_n \quad (1)$$

jossa

$U$  on jännite

$U_n$  on nimellisjännite

$T$  on vääntömomentti

$T_n$  on nimellisvääntömomentti.

Verkon taajuus  $f$ , johon epätahtikone on liitetty, määrää tahtinopeuden, sähkökulmanopeuden ja geometrisen kulmanopeuden. Sähkökulmanopeus ( $\omega$ ) voidaan laskea verkon taajuudesta

$$\omega = 2\pi f, \quad (2)$$

jossa

$\omega$  on sähköinen kulmanopeus

$f$  on taajuus

ja tämän avulla voidaan määrittää geometrinen kulmanopeus  $\Omega$ ,

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (3)$$

jossa

$\Omega$  on geometrinen kulmanopeus

$p$  on koneen napapariiluku.

Epätahtimoottorin tahtinopeus  $n_s$  voidaan nyt johtaa kaavoista 2 ja 3

$$n_s = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{f}{p} \quad (4)$$

jossa

$n_s$  on tahtinopeus.

Koneen jättämä  $s$  voidaan laskea tahtinopeuden ja roottorin todellisen nopeuden erotuksesta kaavalla 5.

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{\Omega_m - \Omega}{\Omega_m} = \frac{\omega_m - \omega}{\omega_m} \quad (5)$$

joissa

$s$  on jättämä

$n$  on todellinen tahtinopeus

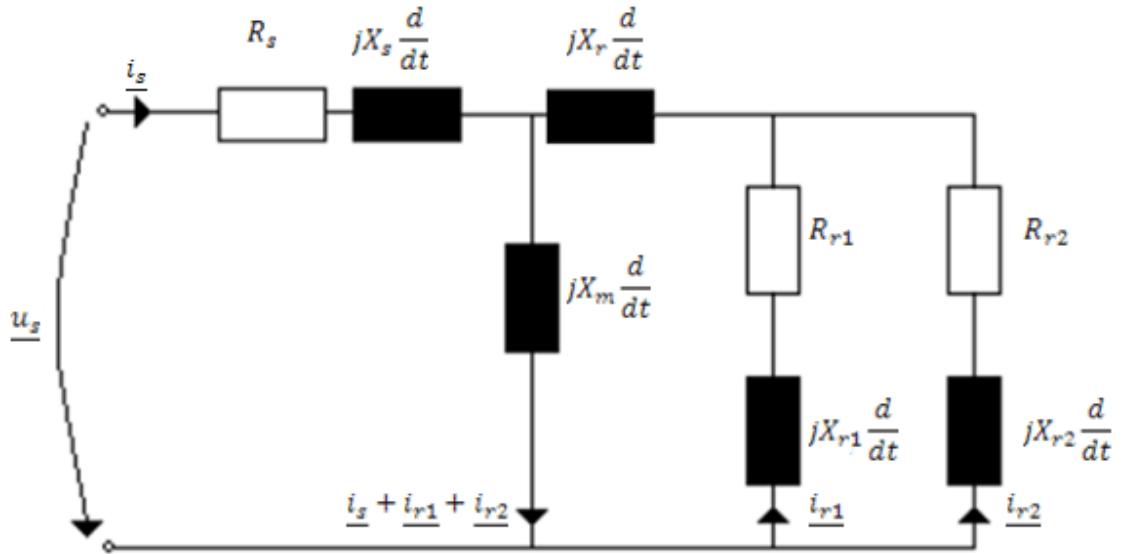
$\Omega_m$  on teoreettinen geometrinen kulmanopeus

$\omega_m$  on teoreettinen sähköinen kulmanopeus.

Oikosulkukone voi toimia myös generaattorina, jolloin sen jättämä on negatiivinen. Oikosulkukonetta käytetään kuitenkin harvoin generaattorina, tahtikoneiden hoitaessa sähkötehon tuotannon.

Oikosulkukoneen mallinnuksessa käytetään kaksihäkkimallia, jonka yhtälöt on esitetty Mäki-Onton ja Mikkolan tutkimuslähteessä (8). Kyseinen malli ottaa hyvin huomioon

virranahdon vaikutukset, mutta jättää kyllästyksen huomiotta (9). Kaksihäkkimallin jatkuvan tilan yksivaiheinen sijaiskytkentä on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Kaksihäkkimallin jatkuvan tilan sijaiskytkentä. (9)

Jännite- sekä vuoyhtälöt voidaan määrittää alla olevilla tavoilla, kun koordinaatisto on sidottu staattoriin. Molemmille häkeille pitää muodostaa kaksihäkkimallissa omat jännite- ja vuoyhtälönsä. (8)

$$\underline{u}_s = R_s \underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}_s}{dt} \quad (6)$$

$$0 = R_{r1} \underline{i}_{r1} + \frac{d\underline{\psi}_{r1}}{dt} - j\omega \underline{\psi}_{r1} \quad (7)$$

$$0 = R_{r2} \underline{i}_{r2} + \frac{d\underline{\psi}_{r2}}{dt} - j\omega \underline{\psi}_{r2} \quad (8)$$

$$\underline{u}_0 = R_0 \underline{i}_0 + \frac{d\underline{\psi}_0}{dt} \quad (9)$$

$$\underline{\psi}_s = L_s \underline{i}_s + L_m (\underline{i}_{r1} + \underline{i}_{r2}) \quad (10)$$

$$\underline{\psi}_{r1} = L_m \underline{i}_s + L_{r1} \underline{i}_{r1} + L_m \underline{i}_{r2} \quad (11)$$

$$\underline{\psi}_{r2} = L_m \underline{i}_s + L_{r2} \underline{i}_{r2} + L_m \underline{i}_{r1} \quad (12)$$

$$\underline{\psi}_0 = L_0 i_0 \quad (13)$$

joissa

$u_s$  on staattorijännite

$u_0$  on nollajännite

$i_s$  on staattorin osahäkkivirta

$i_{r1}$  on roottorivirta

$i_{r2}$  on roottorin osahäkkivirta

$i_0$  on nollavirta

$R_s$  on staattoriresistanssi

$R_{r1}$  on roottorin osahäkkiresistanssi

$R_{r2}$  on roottorin osahäkkiresistanssi

$R_0$  on nollaresistanssi

$\psi_s$  on staattorikäänivuo

$\psi_{r1}$  on roottorin osahäkkikäänivuo

$\psi_{r2}$  on roottorin osahäkkikäänivuo

$\psi_0$  on nollakäänivuo

$L_m$  on magnetointi-induktanssi

$L_{mr}$  on roottorin magnetointi-induktanssi

$L_s$  on staattorin itseisinduktanssi

$L_{r1}$  on roottorin osahäkki-induktanssi

$L_{r2}$  on roottorin osahäkki-induktanssi

$L_0$  on nollainduktanssi

$\omega$  on staattorikäänivuovektorin kulmanopeus.

Moottorin sähkömagneettinen vääntömomentti  $T_e$  voidaan ilmaista avaruusvektoreita käyttäen muodossa

$$T_e = \frac{3}{2} p \underline{\psi}_s \times \underline{i}_s \quad (14)$$

jossa

$p$  on koneen napapariiluku

$T_e$  on sähköinen vääntömomentti

ja liikeyhtälö on puolestaan

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_m \quad (15)$$

jossa

$J$  on hitausmomentti

$T_m$  on mekaaninen vääntömomentti

$\omega_m$  on mekaaninen kulmanopeus.

### 2.2.2 Tahtikone

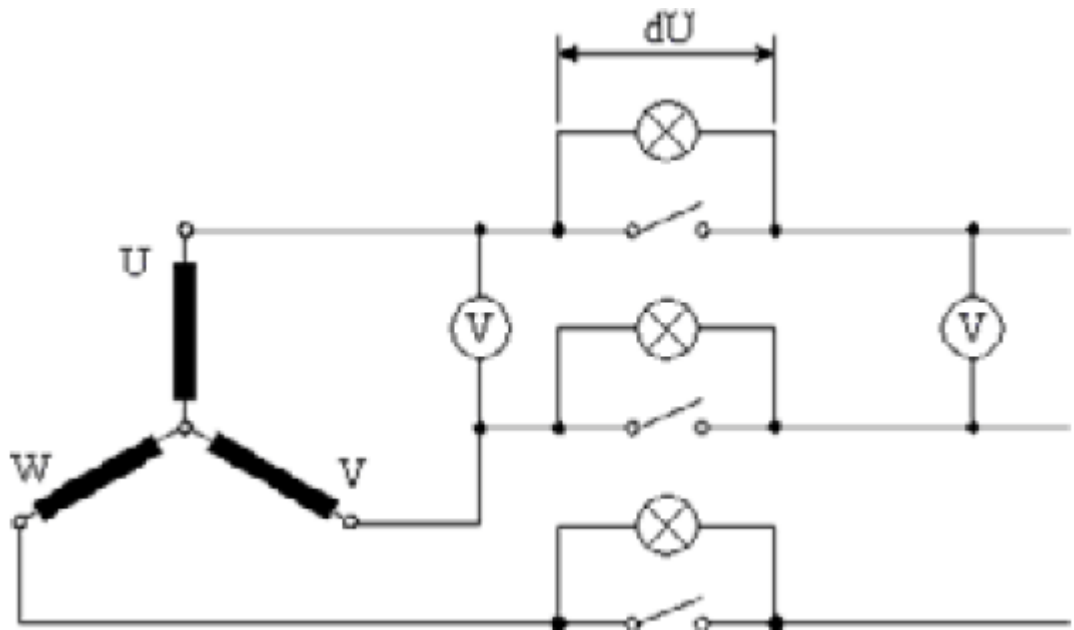
Tahtikoneen nimi tulee siitä, että koneen roottori pyörii täsmälleen samalla nopeudella sisäisen magneettikentän sekä ulkoisen verkon kanssa. Pyörimisnopeutta kutsutaan tahtinopeudeksi. Tahtikoneen nimellistaajuus voidaan määrittää kaavan 4 avulla.

Tahtikone voi pyöriä vain nimellisellä nopeudella ja muilla nopeuksilla pyöriessä se putoaa verkosta. (7)

Tahtikone on yleisin sähkökonetyyppi kun tuotetaan sähkötehoa, eli sähkögeneraattorit ovat pääsääntöisesti tahtikoneita. Generaattorit ovat yleensä tehoiltaan 3- 16 MVA (10). Nykyisin suurempitehoisten dieselmootoreiden myötä ovat käytettyjen generaattoreiden tehot nousseet yli 16 MVA:n. Tahtimoottorit soveltuvat paremmin suuriin tehoihin kuin oikosulkumoottorit. Tästä syystä niitä käytetäänkin Azipod:issa, jonka tehoalue on 5-25 MW.

Tahtikonetta kytkettäessä verkkoon tulee sen pyörimisnopeuden olla mahdollisimman lähellä verkon taajuutta. Generaattorikäytössä se voidaan kytkeä verkkoon, mikäli generaattorikatkaisijan yli oleva jännite on nolla. Lisäksi verkon ja generaattorin taajuuden ja vaihejärjestyksen on oltava identtiset. Tällöin vältetään generaattorin aiheuttamalta virtasysäykseltä verkkoon päin. Tahtimoottoria voidaan aluksi pyörittää apukoneen avulla. Tahtimoottori voidaan käynnistää myös ilman apukonetta häkkikäämityksen avulla, kuten oikosulkumoottorikin. (7)

Kuvassa 5 on esitetty kuinka tahtigeneraattori voidaan tahdistaa verkkoon niin sanotulla pimeäkytkennällä. Kytkenässä lampujen yli oleva jännite muodostuu generaattorin jännitteen ja verkon jännitteen erotuksesta. Lamput palavat mikäli jännitteet ja taajuudet ovat erisuuret ja ovat sammuksissa kun ne ovat yhtäsuuret. Generaattori voidaan kytkeä verkkoon lampujen ollessa sammuksissa. (11)



**Kuva 5.** Tahtigeneraattorin tahdistus pimeäkytkennällä. (7)

Tahtikoneen mallintaminen on laivan sähköverkon kannalta tärkeää, sillä yleisimmin generaattorit ovat tahtikoneita. Lisäksi päävoimalaitosperiaatteella toimivissa laivoissa monesti propulsiomootorina toimii tahtikone. Tahtikoneella tuotetaan siis sähköä laivan verkkoon ja samalla se toimii monesti myös suurimpana kuluttajana.

### 2.2.2.1 Kaksiakselimalli

Käsiteltäessä koneen pysyvän tilan toimintaa tulee olettaa, että virrat ja jännitteet ovat sinimuotoisia ja että roottori pyörii tahtinopeudella  $\omega$ . Dynaamisten ilmiöiden kuvaamiseen käytetään koneen yleisiä yhtälöitä, eli kaksiakselimallia. Yhtälöt on esitetty kuten lähde (9) ne esittävää. On muistettava ottaa huomioon magnetointikämmityksen ja vaimennuskäämityksen dynamiikka, mikäli koneessa näitä käytetään. (11)

Staattorikämmityksen jänniteyhtälöt jaetaan roottorikoordinaatistossa pitkittäisakseliseen reaaliosaan  $d$  ja poikittaisakseliseen imaginääriosaan  $q$ . Kaksiakselimalli on esitetty kuvassa 6 sivulla 25 ja siinä käytetyillä muuttujilla voidaan esittää alla olevat yhtälöt. Yhtälöiden muuttujat on redusoitu staattorin jännitetasoon. Nollakomponentti on jätetty huomiotta, sillä se vaikuttaa vain jos vaihevirtojen summa poikkeaa nolasta (11).

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega \psi_q \quad (16)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega \psi_d \quad (17)$$

$$u_f = R_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (18)$$

$$0 = R_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \quad (19)$$

$$0 = R_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \quad (20)$$

joissa

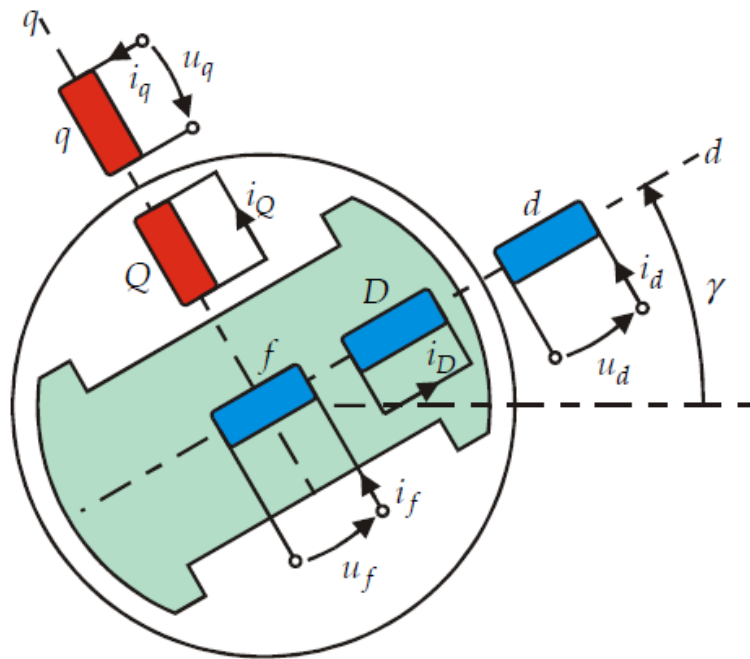
$u_d$  on staattorijännitteen pitkittäisakselin suuntainen komponentti

$u_q$  on staattorijännitteen poikittaisakselin suuntainen komponentti

$u_f$  on napakäämi jännite

|          |                                                                |
|----------|----------------------------------------------------------------|
| $i_d$    | on staattorivirran pitkittäisakselin suuntainen komponentti    |
| $i_q$    | on staattorivirran poikittaisakselin suuntainen komponentti    |
| $i_f$    | on napakäämi virta                                             |
| $i_D$    | on pitkittäisakselin suuntaisen vaimennuskäämin virta          |
| $i_Q$    | on poikittaisakselin suuntaisen vaimennuskäämin virta          |
| $R_s$    | on staattoriresistanssi                                        |
| $R_f$    | on napakäämin resistanssi                                      |
| $R_D$    | on pitkittäisakselin suuntaisen vaimennuskäämin resistanssi    |
| $R_Q$    | on poikittaisakselin suuntaisen vaimennuskäämin resistanssi    |
| $\psi_d$ | on staattorikäämivuon pitkittäisakselin suuntainen komponentti |
| $\psi_q$ | on staattorikäämivuon poikittaisakselin suuntainen komponentti |
| $\psi_f$ | on napakäämivuo                                                |
| $\psi_D$ | on pitkittäisakselin suuntaisen vaimennuskäämin käämivuo,      |
| $\psi_Q$ | on poikittaisakselin suuntaisen vaimennuskäämin käämivuo       |
| $\omega$ | on staattorikäämivuovektorin kulmanopeus.                      |

Magnetointikäämitys  $f$  pyörii roottorikoordinaatiston mukana kuten myös vaimennuskäämitykset  $D$  ja  $Q$ .



**Kuva 6.** Tahtikoneen kaksiakselimalli. (12)

Tahtimoottorille voidaan siis esittää kaksi dynaamisen tilan sijaiskytkentää roottori-koordinaatistossa: pitkittäissuuntainen ja poikittaissuuntainen. Sijaiskytkennät ovat esitettyinä kuvissa 7 ja 8. Jänniteyhtälöiden lisäksi koneelle voidaan esittää seuraavat käämivuokomponentit.

$$\psi_d = L_d i_d + L_{df} i_f + L_{dD} i_D \quad (21)$$

$$\psi_f = L_{df} i_d + L_f i_f + L_{fD} i_D \quad (22)$$

$$\psi_D = L_{dD} i_d + L_{fD} i_f + L_D i_D \quad (23)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{qQ} i_Q \quad (24)$$

$$\psi_Q = L_{qQ} i_q + L_Q i_Q \quad (25)$$

$$\psi_0 = L_0 i_0 \quad (26)$$

joissa

$L_d$  on pitkittäinen tahti-induktanssi

$L_q$  on poikittainen tahti-induktanssi

$L_f$  on käämin itseisinduktanssi

$L_Q$  on käämin itseisinduktanssi

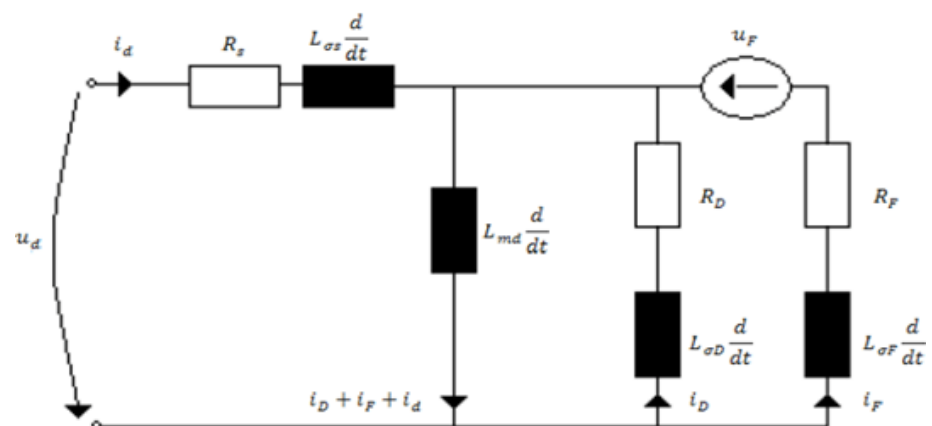
$L_D$  on käämin itseisinduktanssi

$L_{df}$  on vastaavien käämien keskinäisinduktanssi

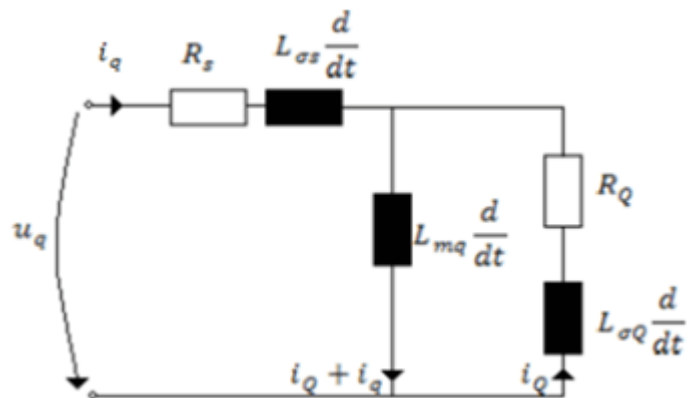
$L_{dD}$  on vastaavien käämien keskinäisinduktanssi

$L_{fD}$  on vastaavien käämien keskinäisinduktanssi

$L_{qQ}$  on vastaavien käämien keskinäisinduktanssi



**Kuva 7.** Pitkittäissuuntainen sijaiskytkentä. (12)



**Kuva 8.** Poikittäissuuntainen sijaiskytkentä. (12)

Kuvissa 7 ja 8 olevien induktanssien ja kaavojen 21–26 välillä on seuraavat yhteydet

$$L_d = L_{md} + L_{\sigma s} \quad (27)$$

$$L_f = L_{md} + L_{\sigma f} \quad (28)$$

$$L_D = L_{md} + L_{\sigma D} \quad (29)$$

$$L_q = L_{mq} + L_{\sigma s} \quad (30)$$

$$L_Q = L_{mq} + L_{\sigma Q} \quad (31)$$

$$L_{df} = L_{dD} = L_{fD} = L_{qQ} = L_{md} \quad (32)$$

jossa

$L_{\sigma s}$  on vastaavan käämin hajainduktanssi

$L_{\sigma f}$  on vastaavan käämin hajainduktanssi

$L_{\sigma s}$  on vastaavan käämin hajainduktanssi

$L_{\sigma Q}$  on vastaavan käämin hajainduktanssi.

Kun otetaan huomioon edellä olevien induktanssien väliset yhteydet voidaan käänivuo-yhtälöt johtaa seuraaviin muotoihin.

$$\psi_d = L_d i_d + L_{md}(i_f + i_D) \quad (33)$$

$$\psi_f = L_{md}(i_d + i_D) + L_f i_f \quad (34)$$

$$\psi_D = L_{md}(i_d + i_f) + L_D i_D \quad (35)$$

$$\psi_q = L_q i_q + L_{mq} i_Q \quad (36)$$

$$\psi_Q = L_{mq} i_q + L_Q i_Q \quad (37)$$

Yhtälöiden staattoriarvojen muunnossa käytetään niin sanottua Park-muunnosta. Park-muunnoksella voidaan redusoida jännite-, virta- ja vuoarvoja toiseen koordinaatistoon. Park-muunnoksen esimerkki on esitetty koneen virroille kaavoissa 38 ja 39. Näiden avulla koneen sisäiset parametrit  $d$  ja  $q$  voidaan muuntaa koneen ulkopuolisiksi kolmivaiheparametreiksi  $a$ ,  $b$  ja  $c$  tai päinvastoin. (13)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (39)$$

Vääntömomentti kolmivaihekoneelle voidaan laskea kaavan 40 mukaan

$$T_e = \frac{3}{2} p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (40)$$

jossa

$p$  on koneen napapariluku

$T_e$  on sähköinen vääntömomentti

ja liikeyhtälö on puolestaan kuten oikosulkukoneen tapauksessakin

$$J \frac{\omega}{dt} = T_e - T_m \quad (41)$$

jossa

$J$  on hitausmomentti

$T_m$  on mekaaninen vääntömomentti

$\omega_m$  on mekaaninen kulmanopeus.

### 2.2.3 Sähkökoneiden vektorisäätö

Vektorisäädössä koneen käämivuota ja vääntömomenttia säädetään erikseen. Yleensä käytetään roottorin tai staattorin käämivuohon kiinnitettyä koordinaatistoa ja säätö tapahtuu muuttamalla käämivuota ja sitä kohtisuorassa olevaa virtakomponenttia. (11)

Roottoriin kiinnitetyn koordinaatiston vektorisäätöä kutsutaan myös roottorivuo-orientaatioksi. Roottorivuo-orientaatiotarkasteluun tarvitaan koneen roottorivuo ja -jänniteyhtälöitä sekä vääntömomentin lausekkeita. Roottorivirtaa ei pystytä määrittämään yksinkertaisesti. Roottorivirta halutaan eliminoida, jotta saataisiin käyttökelpoiset yhtälöt. (11)

Vektorisäätö on mahdollista toteuttaa sekä oikosulku- että tahtikoneelle. Yhtälöt vain poikkeavat näiden osalta jonkin verran toisistaan.

### 2.2.4 Tahtigeneraattorin herätinmenetelmät

Roottorin napoihin pitää syöttää tasavirtaa niin kutsutulla herätinkoneella generaattorin roottorin magnetoimiseksi. Laivojen generaattorit ovat nykyään harjattomia ja herätinkoneena toimii vaihtovirtageneraattori. Tämän etuna on, että hiiliharjoja ei tarvita. (3)

Magnetointivirtoja säädetään AVR-järjestelmällä (engl. Automatic Voltage Regulator). Lisää AVR:n toiminnasta kappaleessa 2.7.1.

## 2.3 Sähkönjakelu

Laivan sähkönjakelun ytimenä toimii päätaulu, joka jakaa sähkötehoa eri kuluttajille. Päätaulussa on monesti useita tuloja generaattoreilta ja vastaavasti useita lähtöjä kuluttajille.

Päätauluna toimii, siirrettävästä tehosta riippuen, keskijännitekoneisto tai pienjännitekoneisto. Sähköisen propulsiion teho on monesti niin suuri, että käytetään keskijännitekoneistoa. Koneistoon kuuluu syöttöjä, lähtöjä, katkaisijoita, releitä, mittamuuntajia ja erottimia.

Taulun jännite on monesti korkeampi kuin loppukuluttajien tarvitsema käyttöjännite. Ennen kuin taulun jännitettä voidaan syöttää esimerkiksi hotellikuormalle, tulee sitä alentaa muuntajien avulla. Päätaulun jännitteinä voidaan käyttää esimerkiksi 3300 V, 6600 V tai 11000 V tarpeiden mukaan, taulukossa 1 sivulla 14 on kuvattuina eri jännite-tasoja.

Osa suurista käyttäjistä, kuten moottorit, pitää olla kytkettynä suoraan päätauluun. Tärkeimpien laitteiden syötöt pitää olla kahdennettu ja niiden johdotus täytyy vetää laivan eri alueiden läpi. Kriittisimmät laitteet varustetaan myös UPS-laitteistolla. Säästösten mukaan korkein sallittu jännite laivassa on usein 11 kV, mutta sähköisen propulsiotehon kasvaessa voidaan käyttää suurempaakin jännitettä. (3)

## **2.4 Muuntaja**

Laivassa on eri tarkoitukseen olevia muuntajia, kuten jakelumuuntajia ja propulsiomuuntajia. Laivan muuntajien teho vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan sadoista kVA:sta propulsiomuuntajien useisiin tuhansiin kVA:hin. Jakelumuuntajien tehtävä on tarjota laivan sähkölaitteille niiden edellyttämän jännitetason sähköä. Propulsiomuuntajan tehtävä on muuttaa jännitetaso taajuusmuuttajalle sopivaksi.

Luokituslaitosten määräysten mukaan laivoissa ei ole sallittua käyttää normaaleja öljytäytteisiä muuntajia niiden palovaarallisuuden takia. Tästä syystä suurin osa laivojen muuntajista on kuivamuuntajia, joissa tarpeen mukaan käytetään ilmajäähdytystä. Nestejäähdytteisiä muuntajia voidaan käyttää, mutta tällöin luokituslaitosten määräysten mukaan jäähdytysnesteen leimahduspisteen tulee olla vähintään 300 °C, kun se normaalisti muuntajaöljyillä on 150 °C. (3)

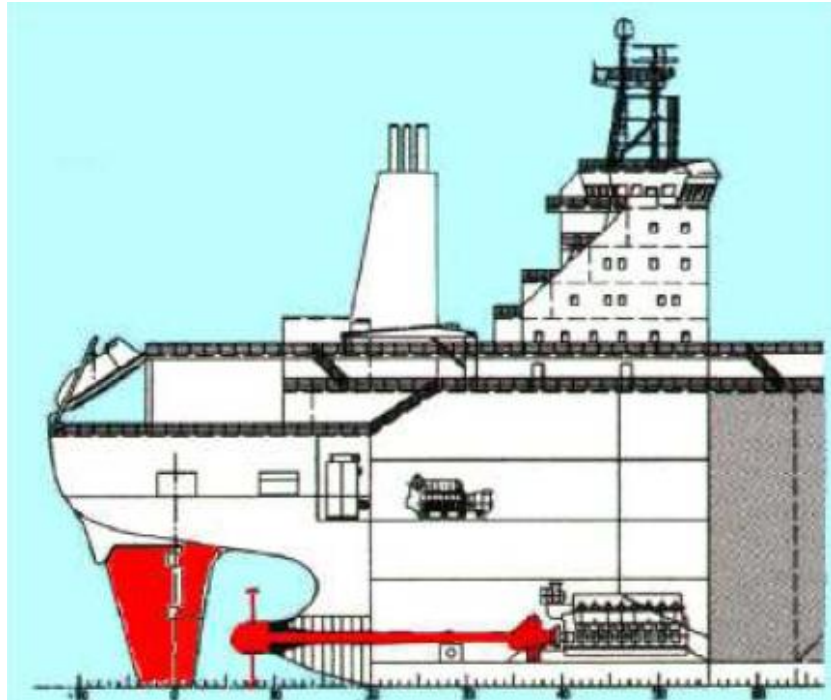
## **2.5 Potkurikoneistot**

Laivoissa käytetään kahta propulsioratkaisua: mekaanista tai sähköistä potkurikoneistoa. Mekaanisen potkurikoneistoratkaisun sähköjärjestelmää kutsutaan apuvoimalaitosperiaatteeksi ja sähköisen potkurikoneistolaivan sähköjärjestelmää puolestaan päävoimalaitosperiaatteeksi.

### **2.5.1 Mekaaninen potkurikoneisto**

Mekaaninen potkurikoneisto on niin sanotusti perinteinen propulsioratkaisu, jossa dieselmoottori pyörittää potkuria potkuriakselin ja vaihteiston välityksellä. Vaihteistoa ei tarvita, jos potkuria pyörittävä dieselmoottori on hidaskäyntinen. Ratkaisuna tämä vaatii laivan rakenteilta paljon enemmän kuin sähköinen ratkaisu. Mekaaninen ratkaisu pakottaa sijoittamaan dieselmoottorin ja potkurin samalle tasolle ja linjalle; näin ollen niitä ei voida sijoittaa tyhjiin tiloihin kuten kuva 9 havainnollistaa. Lisäksi laivassa pitää olla erillinen peräsin.

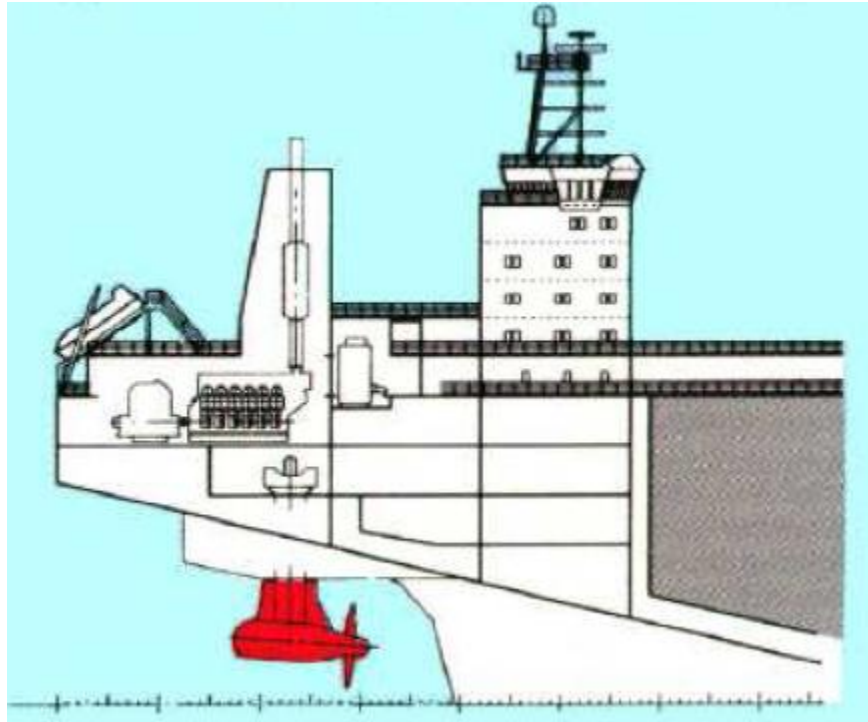
Mekaanisessa potkurikoneistosovelluksessa dieselmoottorit jaetaan pää- ja apukoneisiin. Pääkoneet vastaavat propulsiosta ja apukoneet hoitavat sähköntuotannon. Päämoottorit on säädetty käymään optimaalisesti kun laivaa ajetaan normaalilla avomerinopeudella, tällöin muulla nopeudella ajettaessa dieselmoottorin käynti ja hyötysuhde eivät ole optimaalisia (1).



*Kuva 9. Apuvoimalaitosperiaatteella toimivan laivan komponenttien sijoittelu esimerkiksi. (1)*

### **2.5.2 Sähköinen potkurikoneisto**

Sähköisessä ratkaisussa dieselmoottorit tuottavat sähkögeneraattoreiden kanssa sähköä, jonka avulla hoidetaan laivan propulsiio. Koska propulsiomootorin tarvitsema teho voidaan siirtää sähköjohtoja pitkin, ei dieselmoottoreita ja generaattoreita tarvitse sijoittaa samaan linjaan ja tasoon potkurilaitteiston kanssa. Kuvassa 10 on esimerkki komponenttien sijoittelusta päävoimalaitosratkaisussa. Dieselmoottorit ja sähkögeneraattorit voidaan sijoittaa paikkoihin, joita ei muuten voitaisi laivassa taloudellisesti hyödyntää.



**Kuva 10.** Esimerkki päävoimalaitosperiaatteella toimivan laivan komponenttien sijoittelusta. (1)

Sähkömoottorin säätöominaisuudet ovat paremmat kuin dieselmoottorin, joten laivan liikkessa eri nopeuksilla ovat sen aiheuttamat häviöt pienemmät. Sähköpropulsioon käyttö kuitenkin lisää tarvittavien komponenttien määrää laivassa.

ABB:n sähköinen potkurikoneisto eli Azipod sijaitsee kokonaisuudessaan laivan rungon ulkopuolella ja sitä pystytään kääntämään 360°. Sähköisessä potkurikoneistossa peräsimen tarvetta ei ole ja laivaa ohjataan kääntämällä Azipodia. Näin voidaan optimoida propulsioon suunta ohjauksessa ja laivan rungon aiheuttamat virtaukset mahdollisimman hyvin.

## 2.6 Taajuusmuuttaja

Sähkömoottorille sähkö saadaan muunnettua sopivaksi taajuusmuuttajan avulla: se muuntaa vakiotaajuisen ja jännitteisen sähkön halutunlaiseksi. Sähköisen propulsioon hyödyt saadaan esille taajuusmuuttajan avulla, jolloin sähkömoottoria voidaan ajaa halutulla tavalla kulloisenkin kuormitustilanteen mukaan. Taajuusmuuttajat jaetaan jännitevälipiirillisiin, virtavälipiirillisiin sekä suoriin taajuusmuuttajiin.

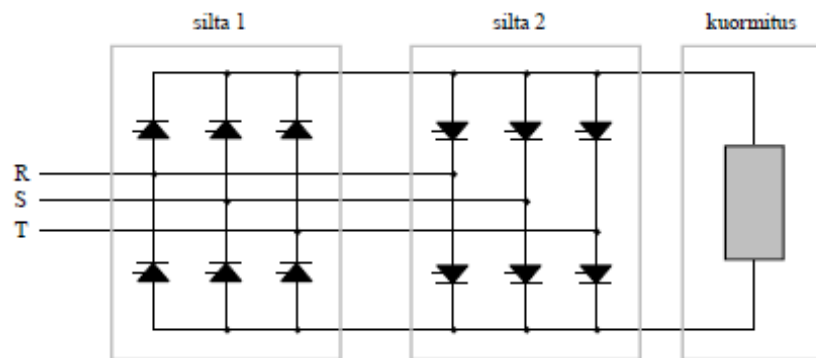
Taajuusmuuttajien hyötysuhde on jopa yli 98 %. Taajuusmuuttajien etuina onkin ohjattavuus, käyttäytyminen sekä hyötysuhde. Nykyisin ABB käyttää IGCT-tyristoreiden

(engl. Integrated Gate-Commutated Thyristor) kehityksen myötä pääsääntöisesti jännitevälipiirillistä ACS 6000 AD/SD taajuusmuuttajaa. Kuormakommutoidut taajuusmuuttajat ja syklokonvertterit ovat väistyneet jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien tieltä, vaikka kaikilla tyypeillä pystytään ohjaamaan nykyisin käytettäviä alle 30 MW:n moottoreita.

### 2.6.1 Syklokonvertteri

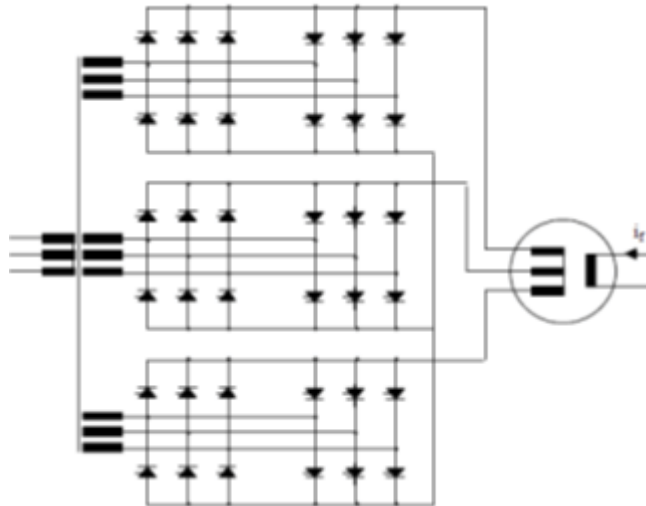
Syklokonvertteri muuttaa taajuutta ja jännitettä suoraan ilman välipiiriä. Syklokonvertteri soveltuu suurille tehoille, sillä sen avulla voidaan syöttää tahtimoottoreita, joiden teho on 1-30 MW:a (14).

Kuvassa 11 on esitetty syklokonvertterin yksi vaiheyksikkö, joka koostuu kahdesta vastakkain olevasta kuusipulssisillasta. Normaali toimintatapa on kuitenkin käyttää 12-pulssista ratkaisua, joka voidaan saavuttaa muuntajien avulla. (14)



**Kuva 11.** Syklokonvertterin vaiheyksikkö. (15)

Sähköisen potkurijärjestelmän syklokonvertterit ovat joko välijännitesyklokonverttereitä tai muuntajakytkentäisiä kuten kuvassa 12. Muuntajan avulla voidaan syklokonvertterin pulssilukua kasvattaa aina 24-pulssiseksi asti. (14)

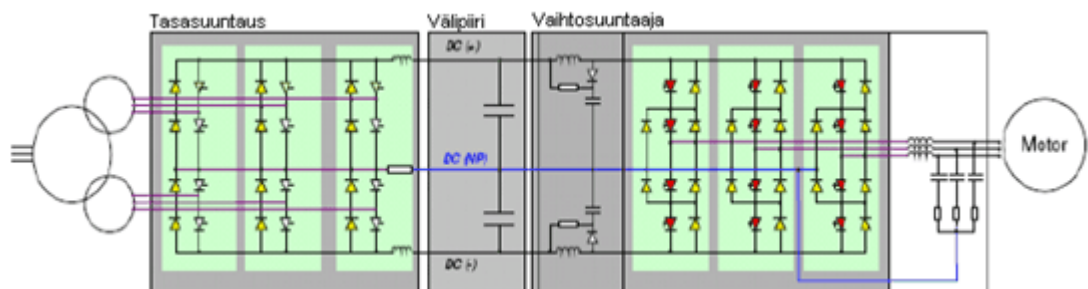


**Kuva 12.** Syklokonvertterin muuntajakytkentä. (15)

### 2.6.2 Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja

Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja on nykyisin yleisimmin käytetty ja sen etuna on tarkka ja suorituskykyinen säätö. ABB:n käyttämät ACS 6000 SD ja AD ovat jännitevälipiirillisiä taajuusmuuttajia. Jännitevälipiirillisen etuna on myös, että sillä pystytään ohjaamaan sekä tahtikonetta (SD) että epätahtikonetta (AD). Myös jännitevälipiirillistä taajuusmuuttajaa voidaan käyttää 6-, 12- tai 24-pulssisena.

Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu kolmesta osasta: tasasuuntaajasta, välipiiristä ja vaihtosuuntaajasta. Nämä osat voidaan huomata myös kuvassa 13. Välipiirissä oleva kondensaattorin tarkoitus on tasoittaa tasajännitteen vaihtelua. Jännitettä voidaan ohjata monilla tavoilla, mutta yleisin on vektoriohjauksen ja modulaattorin yhdistelmä.



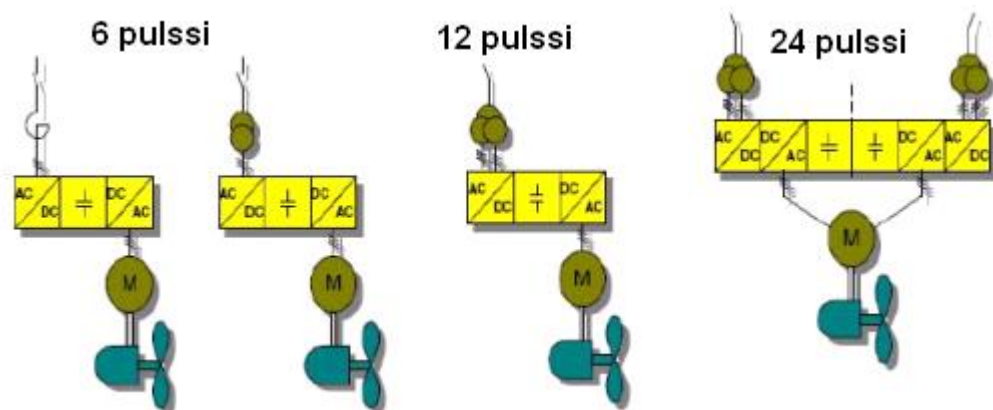
**Kuva 13.** Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan kokoonpano. (1)

Syklokonvertteri ja kuormakommutoitu taajuusmuuttaja toimivat suoraan kaikissa neljänneksissä. Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja pystyy toimimaan myös kaikissa neljänneksissä, mikäli sen tasasuuntaus on toteutettu aktiivisella tasasuuntauksella.

Laivasovelluksissa ei käytetä aktiivista tasasuuntausta, vaan mahdollinen syntyvä takateho kulutetaan jarruvastuksissa. (4)

Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan hyötysuhde on kaikilla nopeuksilla yli 95 % ja nimellisnopeudella jopa yli 98,5 % (1). Siinä käytetään suoraa käämivuon ja vääntömomentin säätöä, DTC:tä (engl. Direct Torque Control), jossa kaksipistesäädöllä ohjataan käämivuon ja vääntömomentin hetkellisarvoja. Jokainen kytkimen kääntö tutkitaan erikseen minkä ansiosta vääntömomentin vaste on aina mahdollisimman hyvä. (11)

Kuvassa 14 on erilaisia versioita jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan käyttömahdollisuuksista. Ensin vaihtovirta tasasuunnataan, jonka jälkeen on välipiiri ja lopuksi jännitevaihtosuunnataan halutunlaiseksi. Muuntajan kytkentöjen avulla voidaan nostaa pulssilukua korkeammaksi. Yleisimmin laivasovelluksissa käytetään 12- tai 24-pulssista ratkaisua. Harmoninen särö, THD (engl. Total Harmonic Distortion) saadaan hallintaan jo 12-pulssisella käytöllä, mutta 24-pulssista mallia voidaan myös käyttää tarvittaessa. Mikäli päädytään käyttämään 24-pulssista ratkaisua, käytössä on tällöin rinnakkain kaksi 12-pulssista ratkaisua. (2)



**Kuva 14.** Erilaisia jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan käyttömahdollisuuksia. (1)

## 2.7 Sähköverkkoon vaikuttavien komponenttien säätö

Laivan sähköverkossa on monesti käytössä rinnakkain useita generaattoreita ja niiden tulee pystyä toimimaan rinnan. Tämä tarkoittaa, että generaattoreita tulee kuormittaa tasaisesti. Myös generaattoreiden jännitteet ja niiden vaihekulmat sekä taajuudet tulee olla samat. Voimakoneet sekä generaattorit muodostavat kokonaisuuden, jonka tulee huolehtia verkon tehotasapainosta, eli säilyttää verkon taajuus ja jännite vaadittavissa rajoissa.

### **2.7.1 Dieselmoottorin pyörimisnopeuden säätö**

Dieselmoottorin säätö perustuu ruiskutetun polttoaineen määrän säätelyyn. Pyörimisnopeutta ohjataan säätimellä, joka toimilaitteen avulla säätelee polttoaineen syöttöä. Tämän seurauksena teho ja kierrosnopeus muuttuvat. Säätimenä toimii PID-säädin (engl. Proportional–Integral–Derivative). (5)

### **2.7.2 Generaattoreiden automaattinen jännitteen säätö**

Generaattoreiden magnetointivirtaa säädetään automaattisen jänniteensäädön, AVR:n avulla. Magnetointivirtaa muuttamalla voidaan vaikuttaa generaattorin tuottamaan loistehoon ja näin ollen verkon jännitteeseen. AVR seuraa generaattorin napajännitettä ja muuttaa tarvittaessa käämien virtaa (3).

Automaattista jännitesäätöä kutsutaan myös nimellä loistehostatiikka ja sen eräs vaihtoehto on voltage droop. Loistehostatiikan arvo on yleensä 2-3 % ja se toimii vastaavalla tavalla kuin pätötehostatiikka (3). Pätötehostatiikasta on kerrottu enemmän kappaleessa 2.7.3.

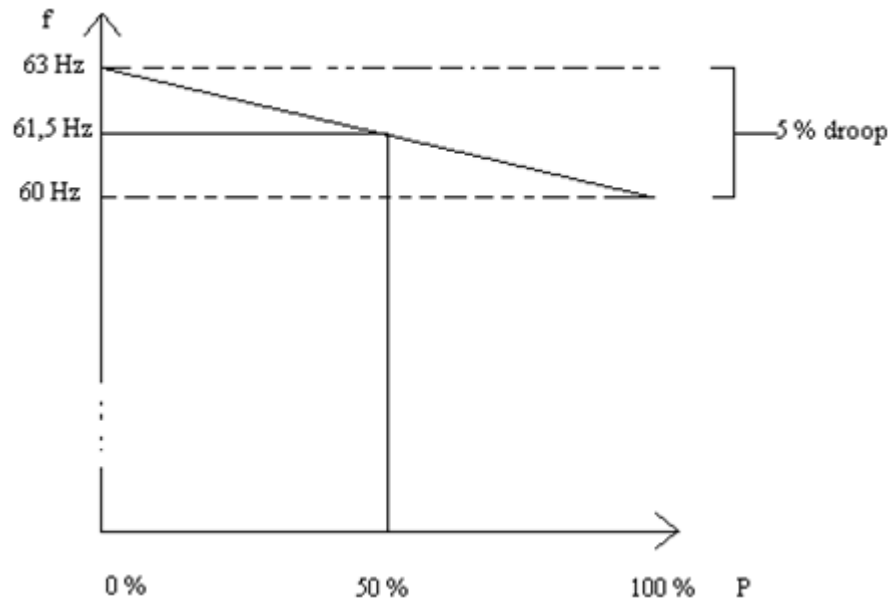
Generaattorin napajännite muuttuu kun siihen liitetty kuorma vaihtelee. Sivulla 39 taulukossa 2 on listattu neljän luokituslaitoksen sallitut rajat generaattorin napajännitteen muutokselle. AVR:n tehtävä on pitää generaattorin jännite 2,5 % rajoissa kaikissa kuormitustilanteissa.

### **2.7.3 Pätötehon säätö**

Pätötehon jako voidaan hoitaa kahdella eri tavalla: pätötehostatiikalla tai isokroonisella säädöllä. Pätötehostatiikasta käytetään usein sen englanninkielistä nimitystä speed droop ja siinä säädetään taajuutta tai nopeutta suhteessa kuormaan. Isokroonisessa säädössä puolestaan koneiden pyörimisnopeus on vakio.

Pätötehostatiikassa ohjataan voimakoneen, eli yleensä dieselmoottorin, pyörimisnopeutta sen mukaan minkälainen kuorma generaattoriin on liitetty. Kun kuorma lisääntyy, niin moottorin pyörimisnopeus ja verkon taajuus laskevat. Laskettavaa pudotusta eli statiikkaa, kuvataan prosentuaalisena pudotuksena, joka tapahtuu kun generaattorin kuorma nousee 0 %:sta maksimaaliseen 100 %:iin. (16)

Kuvassa 15 on esimerkki pätötehostatiikasta. Kuvaajasta voidaan määrittää voimakoneen nopeusohje eri tehotilanteisiin. Esimerkiksi 50 % teholla voimakoneen ohjeellinen nopeus olisi 61,5 Hz. Eri statiikan arvolla päädytään erilaisiin nopeusohjeisiin.



**Kuva 15.** Voimakoneen nopeuden määrittäminen 5% statiikalla.

Isokroonisessa säädössä voimakoneen pyörimisnopeutta ei muuteta, vaan se pidetään vakiona kaikissa kuormitustapauksissa. Kuormantasaus voimakoneiden kesken hoidetaan erillisellä säädöllä. Jokaiseen generaattoriin on lisätty oma säätöpiiri huolehtimaan tehotasapainosta. Järjestelmät on yhdistetty toisiinsa ja ne havaitsevat epätasapainon yksiköiden välisissä tehoissa. Epätasapainotilanteessa säätöpiirit huolehtivat siitä, että jokainen yksikkö tuottaa oman osuutensa tehosta säilyttääkseen tehotasapainon. Mikäli yksiköt ovat erikokoisia, on jokaiselle yksikölle ennalta määritetty tietty teho, joka sen tulee tuottaa. (16)

#### 2.7.4 Propulsiosäätö

Propulsiosäätö käsittää kaiken mitä laivassa tapahtuu, kun ohjaukseen käännetään haluttaessa muuttaa laivan liikettä. Lisäksi ennen kahvan kääntöä tapahtuvat suojaustoiminnot sekä käynnistyslogiikat ovat osa propulsiosäätöä. Kahvan aseman muutos saa laivan järjestelmissä aikaiseksi tapahtumasarjan, jossa käynnistyy moottoreita, tehdään suojaustoimintoja ja säädetään itse tehoa tai nopeutta. Laivan propulsiotehoa ja suuntaa voidaan normaalisti ohjata eri paikoista, kuten komentosillalta tai konevalvomosta eli ECR:stä (engl. Engine Control Room). Laivan normaali ohjauspaikka on komentosilta.

ABB Marinen automaatiojärjestelmä käyttää ”Available power calculationia”, jolla varmistetaan, että verkon tehotasapaino säilyy. Laskennalla varmistetaan, että verkosta ei yritetä ottaa liikaa tehoa. Käytettävissä oleva teho saadaan laskemalla yhteen verkkoon liitettyjen generaattoreiden teho, josta vähennetään muun liitetyn kuorman teho ja lopuksi erotus jaetaan kytkettyjen taajuusmuuttajien lukumäärällä.

## 2.8 Sähkön laatu ja luokituslaitosten määräykset

Luokituslaitosten määräykset laivojen suojauksen, särötasojen ja säädön osalta pohjautuvat standardeihin, mutta niissä on joitakin pieniä eroja. Laivan tilaaja määrittelee minkä luokituslaitoksen mukaan laivan tulee toimia.

Laivan sähkön laadun pitää vastata sille asetettuja säädöksiä sekä taajuuden että jännitteen taholta. Lisäksi varsinkin tehoelektronikasta syntyvää jännitteen säröytymistä on säädelty. Tämä THD kuvaa puhtaaseen siniaaltoiseen virtaan syntyviä yliaaltoja, jotka aiheuttavat sähköverkon komponenteissa häviöitä ja lisäksi sähkökoneissa värähtelyjä ja melutason nousua.

THD voidaan laskea kaavan 42 avulla. Siinä verrataan jännitteen perusaallon monikerrojen synnyttämää harmonista jännitettä perusjännitteeseen. THD:tä voidaan pienentää generaattoreiden oikosulkuiimpedanssia pienentämällä, käyttämällä korkeampipulssista taajuusmuuttajaa sekä erilaisten suodattimien avulla (3). Taulukosta 2 voidaan huomata, että Loyd's Register ja Det Norske Veritas sallivat 8 % THD:n.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} U_h^2}}{U_1} * 100 \quad (42)$$

jossa

$U_h$  on harmoninen jännite

$U_1$  on perusjännite.

Sallittuja sähkön laatuvaatimuksia eri luokituslaitoksilta on listattu taulukossa 2. Luokituslaitos asettaa myös rajat ja toimintatavat erilaisiin vikatilanteisiin. Esimerkiksi oikosulkuvirroille ja ylikuormitustilanteille on tietyt toimintavaatimukset.

Laivassa tapahtuvien isojen sähkömoottoreiden käynnistykset ovat teholtaan suuria verrattuna verkossa olevaan generaattoritehoon nähden. Tämän takia monesti jännitteenalenemaa pitää tarkkailla kun käynnistetään moottoreita, kuten keulapotkureita. Luokituslaitoksesta riippuen jännitteenalenema saa olla vikatilanteessa joko 15 % tai 20 % ja normaalissa tilanteessa jännite saa pudota 10 %.

Jännitteenalenema,  $\Delta U$ , voidaan laskea suhteellisena jännitteen putoamisena eli kaavan 43 mukaan

$$\Delta U = \frac{U_1 - U_2}{U_1} * 100\% \quad (43)$$

jossa

$\Delta U$  on jännitteenalenema (%)

$U_1$  on jännitteen normaalitaso

$U_2$  on pudonneen jännitteen alin taso.

**Taulukko 2.** Luokituslaitosten vaatimuksia sähköverkon toiminnalle (otettu luokituslaitosten luokitusmääräyksistä).

|                                 | GL (Germanischer Lloyd)              | LR (The Lloyd's Register)            | RINA (Registro Italiano Navale)      | DNV (Det Norske Veritas) |
|---------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| Jännitemuutos kuluttajalla (ac) |                                      |                                      |                                      |                          |
| jatkuva                         | 6 % / -10 %                          | 6 % / -10 %                          | 6 % / -10 %                          | 10 % / -10 %             |
| transientti                     | 20 % / -20 %<br>toipumisaika<br>1,5s | 20 % / -20 %<br>toipumisaika<br>1,5s | 20 % / -20 %<br>toipumisaika<br>1,5s | 20 % / -15 %             |
| Generaattorin jännitemuutos     |                                      |                                      |                                      |                          |
| jatkuva                         | 2,5 % / -2,5 %                       | 2,5 % / -2,5 %                       | 2,5 % / -2,5 %                       | 2,5 % / -2,5 %           |
| transientti                     | 20 % / -15 %                         | 20 % / -20 %                         | 20 % / -15 %                         | 20 % / -15 %             |
| Taajuusmuutos                   |                                      |                                      |                                      |                          |
| jatkuva                         | 5 % / -5 %                           | 5 % / -5 %                           | 5 % / -5 %                           | 5 % / -5 %               |
| transientti                     | 10 % / -10 %<br>toipumisaika 5s      | 10 % / -10 %<br>toipumisaika 5s      | 10 % / -10 %<br>toipumisaika 5s      | 10 % / -10 %             |
| THD-rajat                       | < 5                                  | < 8                                  | < 5                                  | < 8                      |

### 3 Komponenttien dynaaminen mallintaminen

#### 3.1 Oikosulkukone

Oikosulkumoottorin kaksihäkkimallin yhtälöt kuvataan yleensä  $\alpha\beta$ -koordinaatistossa. Tämä tarkoittaa, että virta- ja jännitekomponentit on jaettu reaali- ja imaginääriosiinsa.

$$\underline{\dot{i}}_s = i_\alpha + j i_\beta \quad (44)$$

$$\underline{u}_s = u_\alpha + j u_\beta \quad (45)$$

Oikosulkumoottorin tilaesitysmuoto ei muutu komponenttijakoon siirryttäessä (8).

$$\frac{d}{dt} \underline{i} = \underline{L}^{-1} \underline{u} - \underline{L}^{-1} \underline{B} j \quad (46)$$

jossa matriisit  $\underline{L}$  ja  $\underline{B}$  sekä vektorit  $\underline{u}$  ja  $\underline{i}$  voidaan esittää seuraavissa muodoissa (8).

$$\underline{L} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_{r1} & 0 & L_{mr} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{r1} & 0 & L_{mr} \\ L_m & 0 & L_{mr} & 0 & L_{r2} & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_{mr} & 0 & L_{r2} \end{bmatrix} \quad (47)$$

$$\underline{B} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \omega L_m & R_{r1} & \omega L_{r1} & 0 & \omega L_{mr} \\ -\omega L_m & 0 & -\omega L_{r1} & R_{r1} & -\omega L_{mr} & 0 \\ 0 & \omega L_m & 0 & \omega L_{mr} & R_{r2} & \omega L_{r2} \\ -\omega L_m & 0 & -\omega L_{mr} & 0 & -\omega L_{r2} & R_{r2} \end{bmatrix} \quad (48)$$

$$\underline{u} = \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

$$\underline{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_{A1} \\ i_{A2} \\ i_{B1} \\ i_{B2} \end{bmatrix} \quad (50)$$

$\alpha\beta$ -komponenttien mukainen momentti- ja liikeyhtälöt ovat seuraavanlaiset:

$$T_e = \frac{3}{2}p(\psi_\alpha i_\beta - \psi_\beta i_\alpha) \quad (51)$$

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_e - T_w. \quad (52)$$

### 3.2 Tahtikone

Tahtimoottoreille on yleisesti saatavilla reaktanssiarvoista muutos-, tahti- ja alkureaktanssiarvot, sekä erinäinen määrä aikavakioita. Näiden avulla ja seuraavien yhtälöiden välisillä yhteyksillä voidaan määrittää koneelle tarvittavat käämien induktanssit, resistanssit ja keskinäisinduktanssit (17).

$$X_d'' = X_{\sigma s} + \left( \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}} \right) \quad (53)$$

$$X_d' = X_{\sigma s} + \left( \frac{1}{\frac{1}{X_{md}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}} \right) \quad (54)$$

$$X_d = X_{\sigma s} + X_{md} \quad (55)$$

$$X_q'' = X_{\sigma s} + \left( \frac{1}{\frac{1}{X_m} + \frac{1}{X_f} + \frac{1}{X_k}} \right) \quad (56)$$

$$X_q = X_{\sigma s} + X_{mq} \quad (57)$$

## 4 Simulointityökalu

Simuloinnissa pyritään todentamaan käytäntöä vastaava tilanne mahdollisimman tarkasti. Laivan sähköverkossa on paljon suuria kuluttajia, jotka vaikuttavat merkittävästi laivan sähköverkon toimintaan. Esimerkiksi sähköisen potkurijärjestelmän irtoaminen verkosta tai liittäminen verkkoon muuttaa paljon verkon olosuhteita. On tärkeää, että näitä tapahtumia voidaan simuloida ja varmistaa, että verkon jännite ja taajuus pysyvät sallituissa rajoissa.

ABB Marinessa on kehitetty erilaisia simulointimalleja jo pitkään ja aiemmin käytettiin Saber-ohjelmistoa, johon mallit ohjelmoitiin MAST-ohjelmointikielellä. Tässä työssä tutkittavat simulointimallit on luotu Simulink ohjelmistopohjalle.

Simulink on MathWorksin kehittämä simulointiympäristö. MathWorks on yksityinen yritys, joka kehittää matemaattisia laskentaohjelmia. MathWorksin on kehittänyt muun muassa Matlab-ohjelmiston, jolla voidaan ratkaista erilaisia matemaattisia laskutoimituksia. (18)

Simulink on tarkoitettu dynaamisten systeemien mallintamiseen, simulointiin ja analysointiin. Simulink on tehty Matlabin pohjalle, mikä mahdollistaa kaikkien Matlabin ominaisuuksien, kuten erilaisten yhtälöiden ratkaisemisen tai tutkimisen Simulinkissä.

### 4.1 Matlab / Simulink

Simulink-ohjelmistossa on erilaisia kirjastoja, joissa on mallinnettu komponentteja valmiiksi. Myös omien komponenttien ja kirjastojen perustaminen on mahdollista. Systeemit voivat olla Simulinkissä lineaarisia, epälineaaraisia, diskreettejä tai jatkuvia (19).

Simulinkissä luodaan järjestelmä lohkokaavioina ja niitä yhdistävinä signaaliviivoina. Lohkot voivat kuvata esimerkiksi mallinnettavan järjestelmän matemaattisia operaatioita, sisääntuloja tai uloslähtöjä.

Simulinkillä luotava järjestelmä on hierarkkinen eli malli voidaan luoda niin sanotusti kummasta suunnasta tahansa. Tämä tarkoittaa, että mallia voidaan rakentaa tapauskohtaisesti joko tulosuureista eteenpäin tai lähtösuureiden pohjalta. Lisäksi malliin on mahdollista luoda alamalleja. Alamallien käyttäminen yksinkertaistaa luodun mallin ylempiä kerroksia, mikä helpottaa päätason mallin ymmärtämistä. Alamalleja voidaan käyttää tällöin monipuolisesti monissa eri simulointitilanteissa.

Simuloitavaksi tehtyä mallia käytettäessä voidaan työn eri vaiheita seurata ohjelmiston scope-ikkunoilla. Tämän ansiosta voidaan seurata myös lohkojen välissä kulkevien tietojen oikeellisuutta sen sijaan että tutkittaisiin vain lopputulosta. Pyrkimyksenä on parantaa mallin parametreja ja toimintaa niin, että lopputulos vastaa haluttua. Simulinkissä voidaan määritellä haluttu simulointiaika ja tuloksia tutkittaessa pystytään tarkentamaan haluttuun aikaväliin zoomaus-työkalun avulla. Näin simuloinnin kannalta mielenkiintoista ajanjaksoa voidaan tarkastella lähemmin.

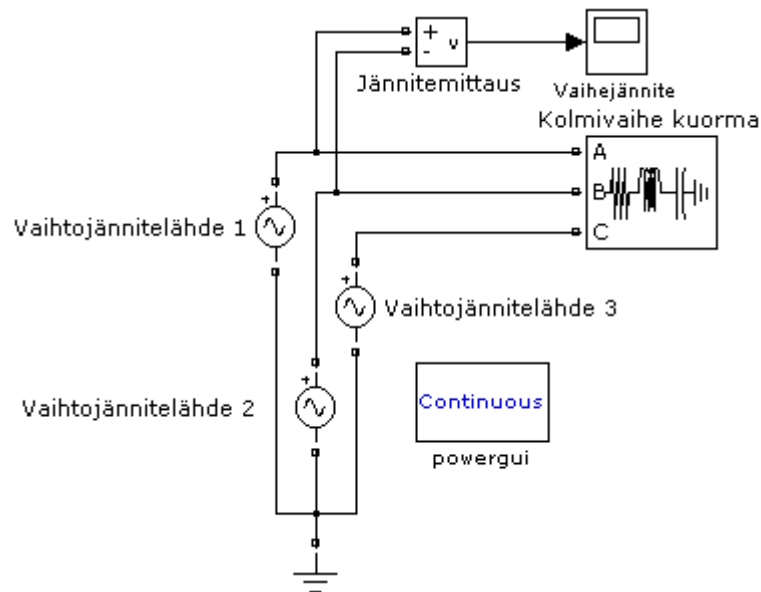
## 4.2 Simuloinnin periaate

Simulink-ohjelmistoa laajentava mallikirjasto SimPowerSystems sisältää erilaisia valmiita malleja sähköntuotantoon, -siirtoon ja -kulutukseen. Eräs malleista on oikosulkukoneen malli, josta voidaan valita erilaisia variaatioita, kuten kaksihäkkimalli. Kaksihäkkimallia käytetään sen takia, että sen tarkkuus ja toimivuus on hyvä (8).

Simulointia varten pitää tietää moottorin parametreja, jotka voidaan sijoittaa koneen tietoihin. Parametrit vaikuttavat koneen toimintaan ja näitä parametreja ovat esimerkiksi teho, vääntömomentti, jännite, taajuus sekä erilaiset staattori- ja roottoriresistanssit sekä -induktanssit. Näitä varten on otettu esimerkiksi ABB:n valmistaman AMI 630L10L B sähkömoottorin tiedot. Kyseinen moottori on käytössä mallilaivan keulapotkurimoottorina. Moottori on niin sanottu D.O.L-kone (engl. Direct On Line), eli moottorin käynnistystä ei avusteta millään lisälaitteilla, kuten taajuusmuuttajilla.

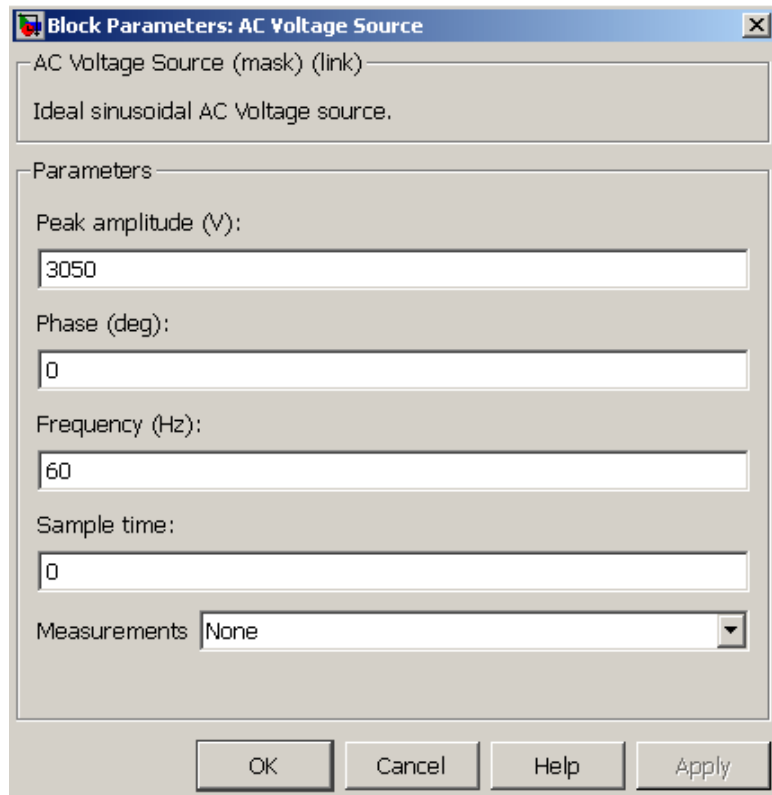
Valmista oikosulkukoneen mallia on tarkoitus testata, jotta sen toiminta voidaan todeta olevan sopiva laivakäyttöön. Moottorin toiminnan tutkimisen jälkeen simuloidaan mallilaivan sähköverkkoa tilanteessa, jossa keulapotkurimoottori käynnistetään. Laivan sähköverkkoa syöttää kaksi generaattoria ja verkkoon on liitettynä keulapotkurin lisäksi AC-kompressori (engl. Air Condition), joka mallinnetaan perinteisenä kuormana.

Kuvassa 16 on esimerkki mahdollisesta simuloitavasta tilanteesta. Ohuet mustat viivat kuvaavat yhteyttä komponenttien välillä. Jännitelähteillä syötetään epätahtikonetta, jolle lisäksi syötetään sen kuormamomentti. Koneesta puolestaan saadaan lista erilaisia tietoja ulos. Haluttu ulostulo voidaan valita linjavalitsimella, minkä jälkeen kyseinen suure piirtyy simuloitaessa scope-näyttöön, kuten kuvassa 16 on tehty. Simulinkissä on mahdollista tarkastella simuloinnin suureita monista eri kohdista, sillä signaalin tiedot voidaan ottaa scope-näytölle mistä kohtaa mallia tahansa.



**Kuva 16.** Esimerkki Simulink:llä simuloitavasta tilanteesta.

Simulink-mallin osat tarvitsevat erilaisia lähtötietoja, kuten esimerkiksi käyttöjännitteen sekä –taajuuden. Lisäksi tarvitaan erinäisiä yksityiskohtaisempia tietoja, kuten vastusarvoja ja nimellistehoja. Kuvassa 17 on esimerkki jännitelähteen vaatimista tiedoista.

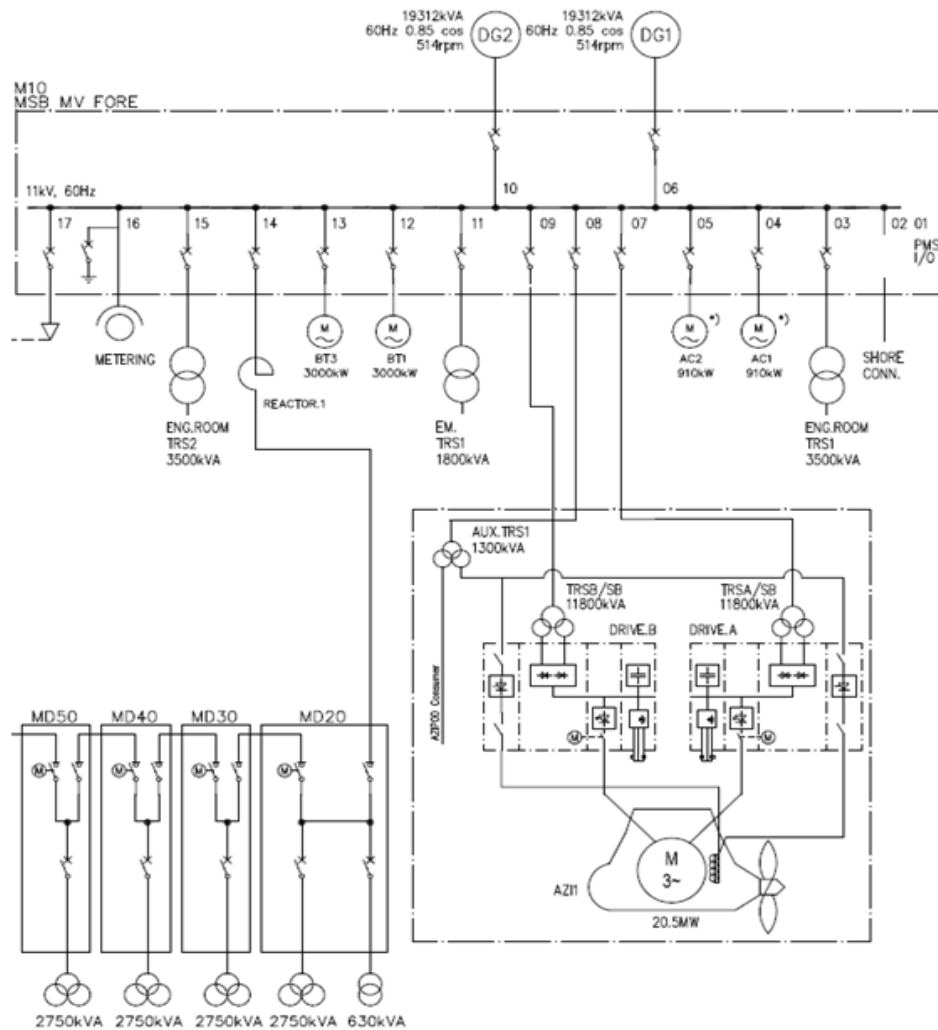


**Kuva 17.** Esimerkki Simulinkin vaatimista parametreista.

## 5 Simulointimallit ja niiden parametrit

Työssä sovelletaan valmiita simulink-malleja ja pyritään saamaan näistä koostuva järjestelmä vastaamaan referenssijärjestelmää. Simuloinnin tuloksia verrataan aiemmin mallilaiva Celebrity Sihuettelta mitattuun jännitekäyrään. Valmiiden mallien parametrisoinnin tarkkuus ja oikeellisuus on pyritty asettamaan mahdollisimman hyvin.

Kuvassa 18 on esitetty puolet esimerkkilaivan sähköverkosta. Verkon molemmat puolet ovat käytännössä identtisiä, ja ne voidaan erottaa tarpeen vaatiessa toisistaan. Näin saavutetaan redundanttisuus vikatilanteiden varalle. Kuvassa 18 näkyy laivan komponentteja ja mitatun jännitekäyrän aikana verkossa kytkettynä olleet 2 dieselmoottoria ja generaattorit sekä yksi keulapotkurimoottori ja peruskuormana mallinnettava AC-kompressorori.



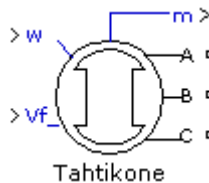
**Kuva 18.** Puolet Celebrity Sihuettien sähköverkosta (Celebrity Silhouettien yksiviivakaaviosta)

Järjestelmästä tehtiin kaksi erilaista simulointia. Ensimmäisessä ei otettu huomioon tahtigeneraattorin magnetointia ja jälkimmäisessä puolestaan käytettiin valmista magnetointimallia.

## 5.1 Simulointien komponentit

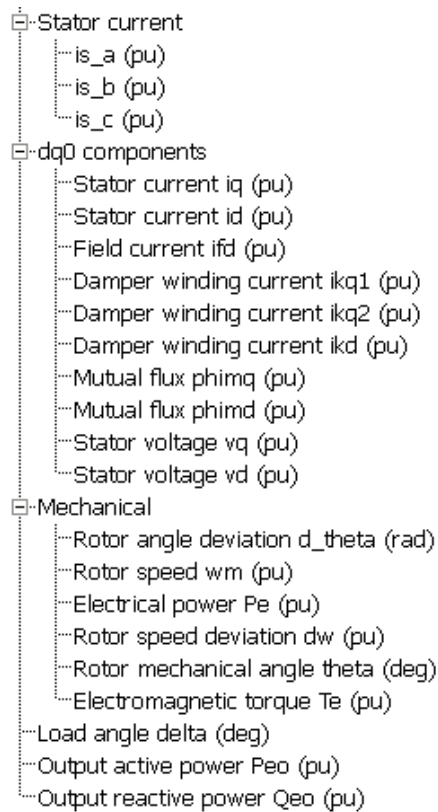
### 5.1.1 Tahtigeneraattori

Työssä käytetty tahtigeneraattorimalli on SimPowerSystems-kirjaston valmis malli, jonka toiminta perustuu aiemmin esitettyihin tahtikoneen yleisiin yhtälöihin. Kuvassa 19 on konemallin ylimmän tason kuvake Simulinkissä. Kuvasta 19 voidaan huomata, että malli saa sisääntulona kaksi tietoa;  $w$  sekä  $V_f$ . Nämä edustavat koneen pyörimisnopeutta ( $w$ ) sekä magnetointijännitettä ( $V_f$ ). Normaalisti molemmat näistä arvoista vaihtuvat muuttuvan kuorman tilanteessa. Pyörimisnopeus tulee suoraan dieselmoottoreiden pyörimisnopeudesta, joka on tässä työssä oletettu olevan vakio. Magnetointijännitettä ohjataan AVR-jännitesäätäjillä, joista on kerrottu enemmän luvussa 2.7.2.



**Kuva 19.** Tahtikonemallin ylimmän tason kuvake Simulinkissä.

Sisääntulojen lisäksi mallissa on neljä ulostuloa; A, B, C ja m. A, B ja C edustavat koneen normaaleja ulostuoja, joista kone on kytketty eteenpäin verkossa esimerkiksi syöttämään keulapotkurimoottoria. Simuloinnin kannalta mielenkiintoinen uloslähtö m tarjoaa erilaisia tietoja koneen tiloista kuten jännitteistä, virroista ja tehoista. Tarkempi kuvaus m-lähdön sisältämistä tiedoista on kuvassa 20.



**Kuva 20.** Tahtikoneen  $m$  uloslähdön sisältämät tiedot

Koneeseen tulevien sisääntulojen ja ulostulojen lisäksi kone tarvitsee erinäisen määrän sisäisiä parametreja. Näistä parametreista on esimerkkinä kuva 21, jossa määritellään koneen jännitetaso, taajuus, teho sekä erinäinen määrä konekohtaisia muuttujia.

|                                                                            |              |
|----------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Nominal power, line-to-line voltage, frequency [ Pn(VA) Vn(Vrms) fn(Hz) ]: |              |
| [ 19312E3 11000 60 ]                                                       |              |
| Reactances [ Xd Xd' Xd'' Xq Xq'' Xl ] (pu):                                |              |
| [ 1.419, 0.31, 0.176, 0.788, 0.197, 0.154 ]                                |              |
| d axis time constants:                                                     | Open-circuit |
| q axis time constants:                                                     | Open-circuit |
| Time constants [ Tdo' Tdo'' Tqo'' ] (s):                                   |              |
| [ 6.33 0.04162 0.1521 ]                                                    |              |
| Stator resistance Rs (pu):                                                 |              |
| 0.003                                                                      |              |
| Pole pairs p (∅):                                                          |              |
| 7                                                                          |              |

**Kuva 21.** Tahtikoneen tarvitsemia parametreja.

Mallilaivassa on käytetty ABB:n valmistamaa AMG 1600SS14 LSE tahtigeneraattoria, jonka tietoja on listattu seuraavissa taulukoissa 3, 4 ja 5. Näiden avulla pystytään syöttämään koneen parametrit Simulink-mallin tietoihin oikein ja parantamaan sen toimintaa.

**Taulukko 3.** AMG 1600SS14 LSE tahtigeneraattorin perustietoja.

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| Teho                         | 19 312 kW |
| Jännite                      | 11 000 V  |
| Taajuus                      | 60 Hz     |
| Nopeus                       | 514 rpm   |
| Tehokerroin / $\cos \varphi$ | 0,85      |

**Taulukko 4.** AMG 1600SS14 LSE tahtigeneraattorin sijaiskytkentäarvoja.

|                                           |        |
|-------------------------------------------|--------|
| Pitkittäinen tahtireaktanssi $X_d$ (pu)   | 1,419  |
| Pitkittäinen muutosreaktanssi $X'_d$ (pu) | 0,310  |
| Pitkittäinen alkureaktanssi $X''_d$ (pu)  | 0,176  |
| Poikittainen tahtireaktanssi $X_q$ (pu)   | 0,788  |
| Poikittainen alkureaktanssi $X''_q$ (pu)  | 0,197  |
| Staattoriresistanssi ( $\Omega$ )         | 0,0156 |

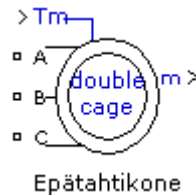
**Taulukko 5.** AMG 1600SS14 LSE tahtigeneraattorin aikavakiot.

|            |             |
|------------|-------------|
| $T_A$      | 0,180 (s)   |
| $T'_{d0}$  | 6,33 (s)    |
| $T''_{d0}$ | 0,04162 (s) |
| $T'_d$     | 1,521 (s)   |
| $T''_d$    | 0,02417 (s) |
| $T''_q$    | 0,1521 (s)  |
| $T''_{q0}$ | 0,0419 (s)  |

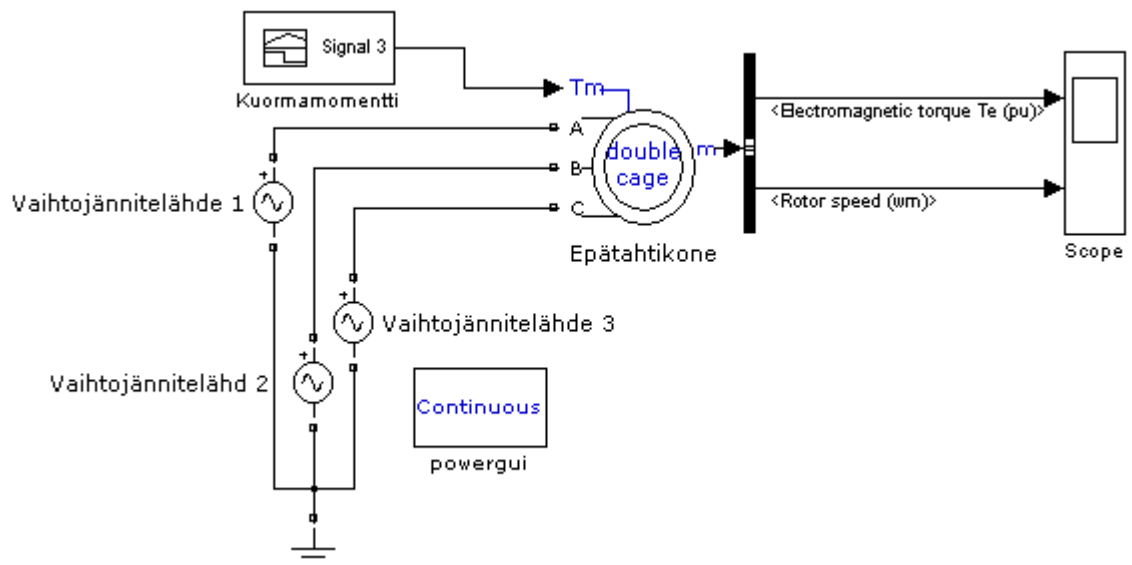
### 5.1.2 Oikosulkumoottori

Oikosulkumoottorin mallina toimi SimPowerSystemin valmis kaksihäkkimoottorimalli, joka pohjautuu luvussa 2.2.1 esitettyihin kaavoihin. Koneen parametrit määriteltiin Simulinkissä löytyvän ”power\_AsynchronousMachineParams”-laskentaohjelman avulla. Kuvassa 22 on esitetty oikosulkumoottorimallin ylimmän tason kuvake. Valmiin mallin testaamiseen päädyttiin, kun huomattiin Simulinkin päivityksen myötä, että SimPowerSystems mallikirjastoon oli lisätty oikosulkukoneen kaksihäkkimalli.

Valmiin mallin toimivuus oli vaikea varmistaa simuloimalla, sillä todellista mittaustietoa ei kyseisistä koneista ole. Koneen toimivuus todettiin tutkimalla yhtälöitä, joihin se pohjautuu sekä simuloimalla sen toimintaa osana suurempaa verkkoa. Lisäksi mallin toimintaan ja käyttötapaan tutustuttiin simuloimalla sitä yksinkertaisessa verkossa, jota havainnollistaa kuva 23.

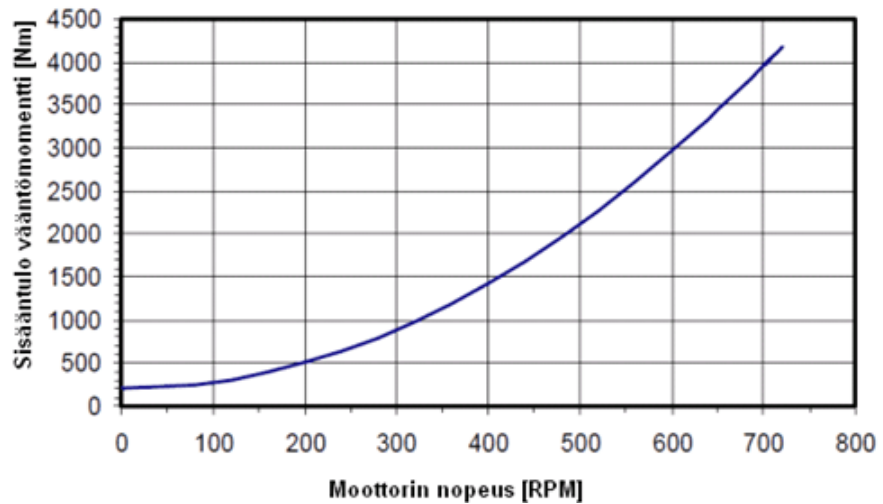


**Kuva 22.** Oikosulkukonemallin ylimmän tason Simulink-kuvake.



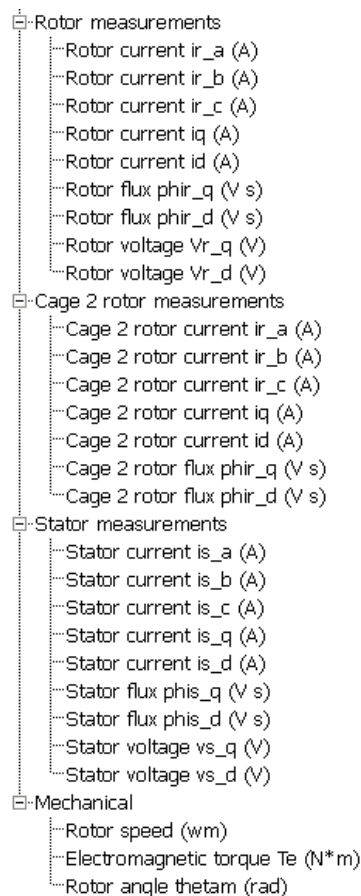
**Kuva 23.** Oikosulkumoottorimallin testauskytkentä.

Malliin tulee neljä sisääntuloa;  $T_m$ , A, B ja C sekä yksi ulostulo  $m$ . Malliin syötetään kolmivaihejärjestelmän sisääntulot A, B ja C ja näiden lisäksi kuormakäyrä  $T_m$ . Tämä kuvaa vastustusta koneen käynnistymiselle, joka johtuu suurista massoista. Jokaisen koneen kuormakäyrä on konekohtainen ja simuloitavassa tilanteessa käytössä olevalle ABB:n valmistamalle AMI 630L10L B koneelle se on kuvan 24 mukainen. Käynnistysen hetkellä kuormaa on 200 Nm ja täydellä nopeudella pyöriessä 4058 Nm (21). Käyrä on hahmoteltu mallille vastaavaksi.



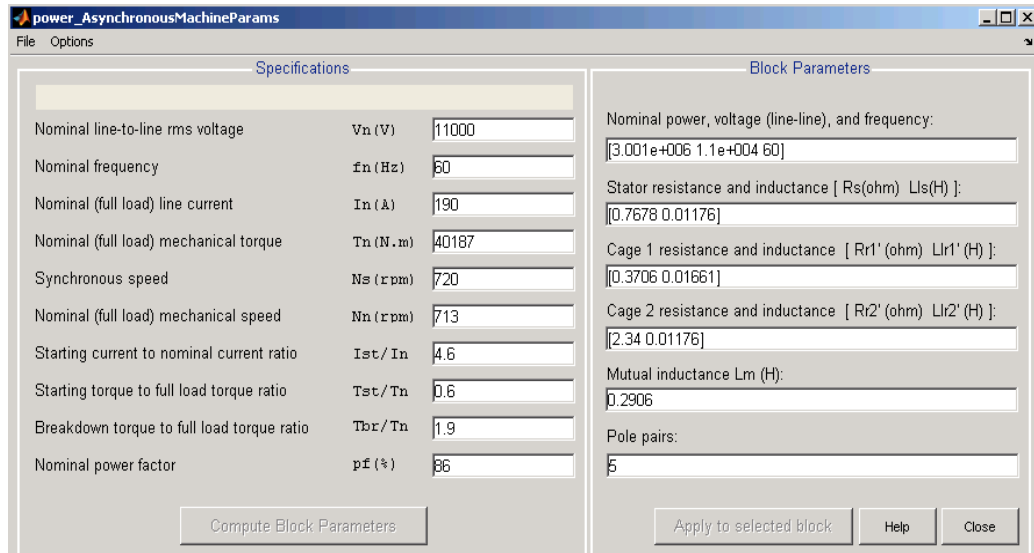
**Kuva 24.** AMI 630L10L B moottorin kuormakäyrä. (20)

Oikosulkukoneen ainoa ulostulo moottoritilassa on  $m$ , jossa on vastaavia suureita koneen tiloista kuin on tahtikoneellakin. Kuvassa 25 on esitetty vaihtoehtoiset tarkastelutiedot koneen toiminnasta, jotka saadaan ulostulosta  $m$ . Näiden avulla voidaan tarkastella esimerkiksi koneen käynnistymisen kestoa ja sähköistä vääntömomenttia.



**Kuva 25.** Oikosulkukoneen  $m$  ulostulon sisältämät tiedot.

Epätahtikone tarvitsee erinäisen määrän parametreja, joita sen määrittäisiin tulee syöttää. Taulukon 6 avulla pystytään määrittämään kaksihäkkikoneen parametrit valmiilla ”power\_AsynchronousMachineParams”-laskentaohjelmalla (kuva 26). Tämä kaksihäkkikoneen parametrien laskuun käytettävä laskentaohjelma on uusimman Matlab/Simulink-päivityksen (versio R2011b) mukana tullut apuväline.



**Kuva 26.** Simulink:stä löytyvä kaksihäkkikoneen parametrien muodostustyökalu.

Kaksihäkkikoneen parametrien muodostamiseen käytettävät tiedot löytyvät koneen yleisistä parametreista taulukosta 6. Muodostetut kaksihäkkimallin parametrit voidaan tämän jälkeen siirtää koneen parametreiksi.

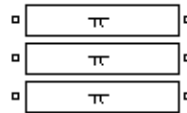
**Taulukko 6.** Celebrity Silhouette keulapotkurimotoorin AMI 630L10L B tietoja.

|                                               |           |
|-----------------------------------------------|-----------|
| Teho                                          | 3 000 kW  |
| Jännite                                       | 11 000 V  |
| Taajuus                                       | 60 Hz     |
| Momentti                                      | 40 187 Nm |
| Tehokerroin / $\cos \varphi$                  | 0,86      |
| Virta                                         | 190 A     |
| Nimellinnopeus                                | 720 rpm   |
| Todellinen nopeus                             | 713 rpm   |
| Suhteellinen käynnistysvirta ( $I_s/I_n$ )    | 4.6       |
| Suhteellinen käynnistysmomentti ( $T_s/T_n$ ) | 0.6       |
| Suhteellinen maksimimomentti ( $T_{br}/T_n$ ) | 1.9       |

### 5.1.3 Sähkökaapeli

Sähkögeneraattoreiden tuottama teho pitää siirtää sähköjohtoja pitkin muun muassa keulapotkurimoottoreille. Keulapotkurimoottorit sijaitsevat laivan keulassa, kun sähkögeneraattorit ovat puolestaan yleensä perässä. Tästä johtuen laivan sisäiset sähköjohdot voivat olla jopa 200 metriä pitkiä.

Tässä työssä käytettiin valmista Simulinkin sähköjohdinmallia (kuva 27), johon syötettiin käytettyä sähkökaapelia vastaavan kaapelin parametrit, jotka ilmenevät kuvasta 28. Kaapelin parametrit on otettu Draka Holding N.V.:n (Amsterdam, Hollanti) valmistamasta AXLJ-RMF 3x95/16 F1 7/12kV kaapelista (22). Molemmille generaattoreille lisättiin omat kaapelit ja oletettiin, että generaattoreiden etäisyydet keulapotkurimoottorista ovat 100 ja 200 metriä.



*Kuva 27. Sähköjohdinmallin kuvake.*

The screenshot shows a dialog box titled "Block Parameters: Pi Section Line4". The dialog contains the following fields and options:

- PI Section Line (mask) (link)
- PI section transmission line. RLC elements are computed using hyperbolic corrections at specified frequency.
- Parameters section with the following fields:
  - Frequency used for rlc specification (Hz): 60
  - Resistance per unit length (Ohms/km) [ r ]: 0.32
  - Inductance per unit length (H/km) [ l ]: 0.31e-3
  - Capacitance per unit length (F/km) [ c ]: 0.30e-6
  - Line length (km): 0.2
  - Number of pi sections: 1
  - Measurements: None (dropdown menu)
- Buttons: OK, Cancel, Help, Apply

*Kuva 28. Käytetyn sähkökaapelin parametrit.*

### 5.1.4 Magnetointimalli

Simuloitaessa magnetointimallin kanssa käytettiin SimPowerSystems-mallikirjaston valmista magnetointimallia, joka on esitetty kuvassa 29.



**Kuva 29.** Magnetointisäätäjän malli.

Magnetointimalleihin syötetään sisälle generaattoreiden staattorijännitteet  $V_d$  ja  $V_q$ . Lisäksi magnetointimalliin syötetään vertailujännite  $V_{ref}$ , joka on haluttu jännite. Maa-doitusjännite  $V_{stab}$  on lisätty magnetointimalliin stabiloimaan järjestelmää. Mallin ulostulojännite  $V_f$  liitettiin vastaavaan generaattorin magnetointijännitteen sisääntuloon  $V_f$ . Magnetointimallin parametrit piti hakea kokeilemalla, sillä niiden tarkkoja arvoja ei ollut tiedossa. Kuvassa 30 on esitetty parametrit, joilla magnetoinnin toiminta vastasi riittävällä tarkkuudella käytännön mittaustuloksia.

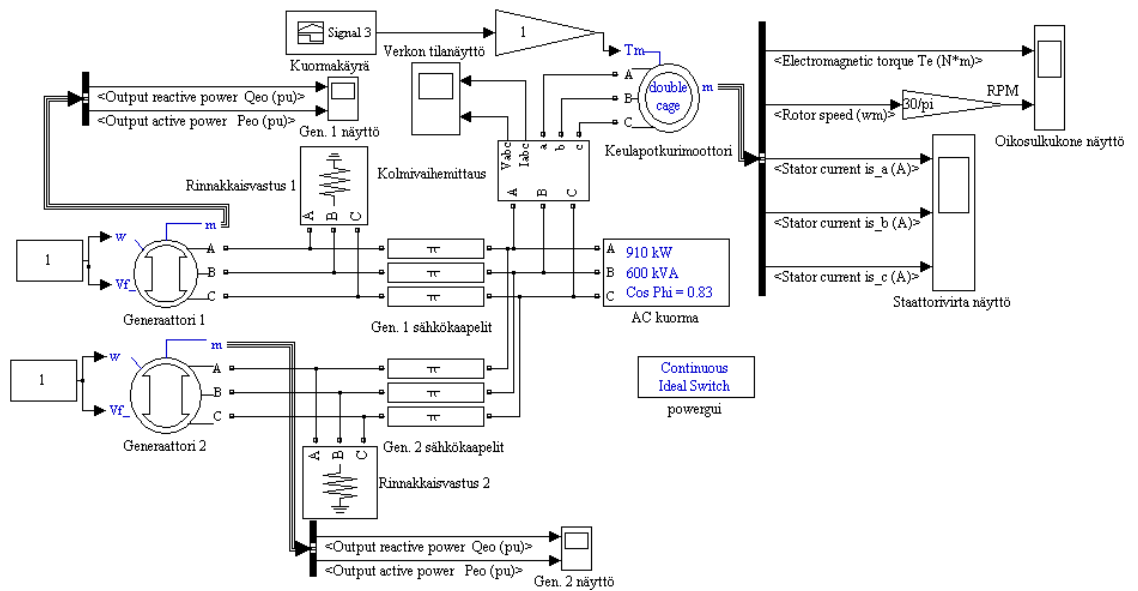
|                                                                                    |                                                 |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Low-pass filter time constant $T_r(s)$ :                                           | <input type="text" value="20e-4"/>              |
| Regulator gain and time constant [ $K_a()$ $T_a(s)$ ]:                             | <input type="text" value="[ 40, 0.001 ]"/>      |
| Exciter [ $K_e()$ $T_e(s)$ ]:                                                      | <input type="text" value="[ 0.90, 0 ]"/>        |
| Transient gain reduction [ $T_b(s)$ $T_c(s)$ ]:                                    | <input type="text" value="[ 0, 0 ]"/>           |
| Damping filter gain and time constant [ $K_f()$ $T_f(s)$ ]:                        | <input type="text" value="[ 0.001, 0.1 ]"/>     |
| Regulator output limits and gain [ $E_{fmin}$ , $E_{fmax}$ (pu), $K_p()$ ]:        | <input type="text" value="[ -11.5, 11.5, 0 ]"/> |
| Initial values of terminal voltage and field voltage [ $V_t0$ (pu) $V_f0$ (pu) ] : | <input type="text" value="[ 1.0 1 ]"/>          |

**Kuva 30.** Magnetointimallin parametrit.

## 5.2 Järjestelmä

Järjestelmää simuloitiin kahdella eri tavalla. Ensin simuloitiin ilman magnetoinnin vaikutusta eli asettamalla generaattoreiden magnetointijännite vakioksi arvotaan yksi. Toisessa simuloinnissa yritettiin saada magneointi vastaamaan todellista tilannetta ja pyrittiin asettamaan sinne AVR:n tavoin toimiva kokonaisuus.

Magnetoinnin mallintamisen vaikutus jännitteenalenukseen on suuri, joten mitattua jännitteenalenukseen oli järkevää vertailla vain tilanteeseen, jossa magneointia oli mallinnettu. Kuvasta 31 käy ilmi simuloitava järjestelmä ilman erityistä magnetoinnin mallinnusta.



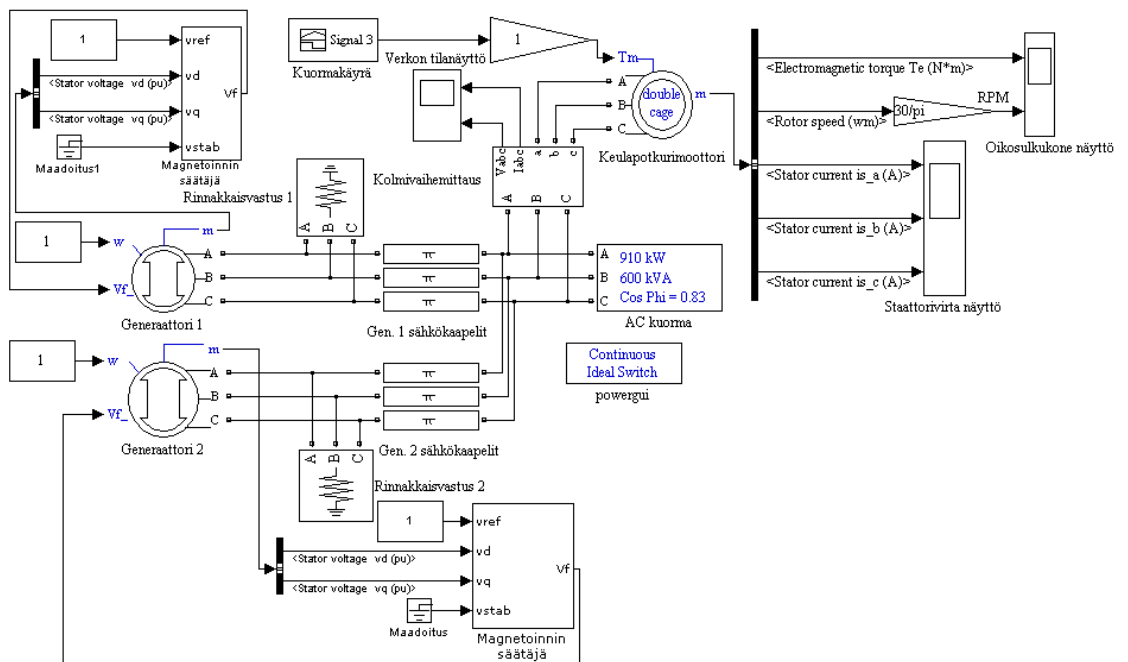
**Kuva 31.** Simuloitava järjestelmä, kun generaattoreiden magneointia ei huomioida erikseen.

Generaattoreiden rinnalla on esitetty vastuskuormat, joiden tehtävänä on estää numeerisen värähtelyn esiintyminen systeemissä. Tarvittavien vastusten kokoon vaikuttaa systeemin näytteenottotaajuus sekä generaattorin teho. Mitä suurempi on näytteenottotaajuus tai generaattorin teho sitä suurempi on tarvittava kuorma. Perussääntönä voidaan pitää, että 25  $\mu$ s askeleella 60 Hz järjestelmässä vähimmäiskuorma on 2,5 % koneen nimellistehosta. (23)

Järkeväksi ja toimivaksi rinnakkaisvastusarvoksi simuloinnissa todettiin 500 k $\Omega$ . Tällä arvolla simulointiin kuluva aika on mielekäs eikä vastuksen vaikutus systeemiin ole liiallinen. Laskennallisesti mikäli simuloinnin aika-askel olisi 25  $\mu$ s ja generaattorin

nimellisteho 19,312 MVA saadaan tästä tarvittavaksi kuormaksi noin 480 kΩ. Näin ollen kokeilemalla hyväksi todettu 500 kΩ kuorma on myös laskennallisesti järkevä.

Tilanteessa, jossa magnetointi otettiin huomioon, on järjestelmä kuvan 32 mukainen. Molemmissa simuloinneissa tahtigeneraattorin pyörimisnopeuden oletettiin pysyvän vakiona.



**Kuva 32.** Simulointimalli kun magnetointia on mallinnettu.

### 5.3 Simulointien yhteenveto

Simulointi tehtiin kahdelle eri järjestelmämallille. Ensimmäisessä järjestelmässä generaattorin magnetointia ei mallinnettu erikseen, vaan se asetettiin vakioksi. Toisessa simuloinnissa magnetointiin liitettiin SimPowerSystems-mallikirjaston oma magnetointimalli. Simuloinnin sopivaksi kestoksi todettiin kolme sekuntia, minkä aikana oikosulkumoottori ehtii käynnistyä ja tarvittavat muutosilmiöt ovat nähtävissä.

Molemmista tilanteista on esitetty simulointitulokset sähköverkon muuttuvalle jännitteelle. Keulapotkurimoottorina toimivan oikosulkumoottorin käyttäytymisestä on kuvattu pyörimisnopeus, sähköinen vääntömomentti ja moottorin ottama virta. Moottorin pyörimisnopeus on kerrottu tekijällä  $30/\pi$ , jotta signaalin tieto olisi rpm (Revolutions Per Minute)-arvona.

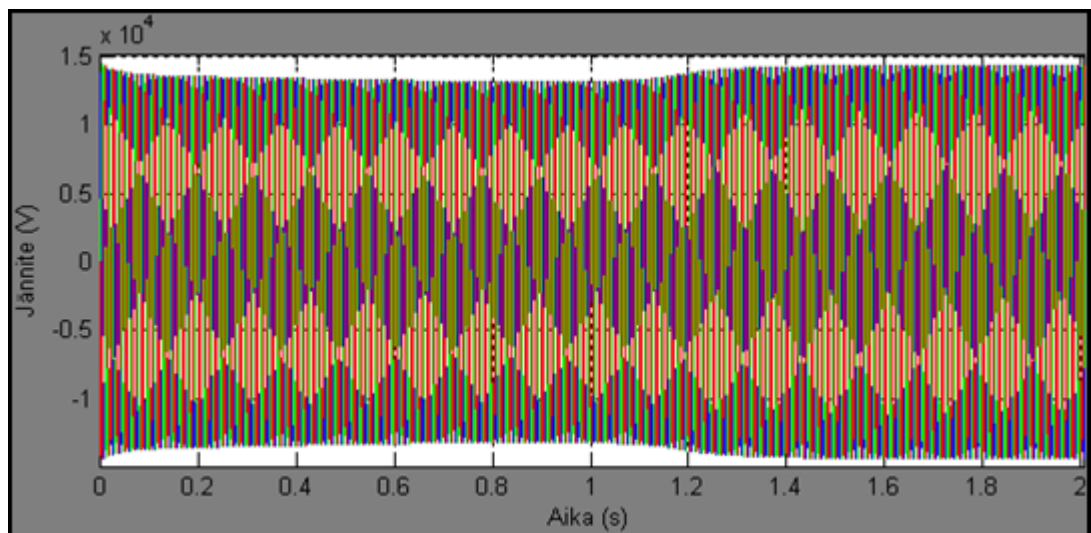
Jännitteen perustaso, joka kuvaa jännitteenaleneman kaavassa 43 muuttujaa  $U_1$  on riippuvainen jännitetasosta, jolla laitteita syötetään. Keulapotkuri liittyy suoraan 11 kV

jännitetasoon ja simulointien  $U_1$  eli jännitteen huippuarvo saadaan kertomalla jännitteen tehollisarvo (11 000 V) neliöjuuri kahdella. Tällöin huippuarvoksi saadaan 15 556 V.

Ilman tahtigeneraattorin magnetoinnin mallinnusta toimivassa simuloinnissa generaattori ei palauta verkon jännitettä normaalille jännitetasolle, vaan se putoaa pysyvästi alemmalle tasolle järjestelmään liittyneen kuorman takia. Tästä johtuen tämän tilanteen simulointituloksia ei ollut mielekäästä vertailla muiden tulosten kanssa.

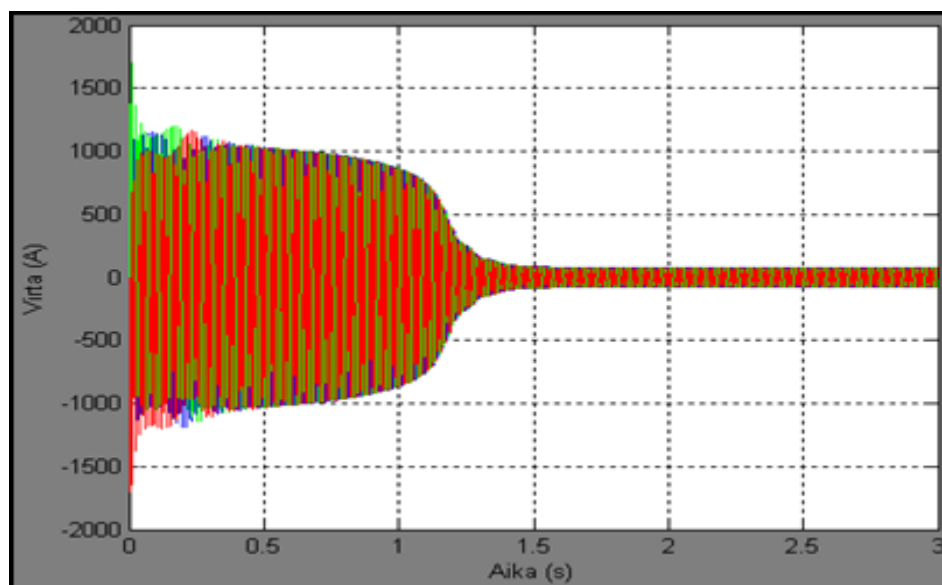
### 5.3.1 Sähköverkko ilman magnetointimallia

Ilman erityistä magnetointimallia toimivassa simuloinnissa generaattorin magnetointijännitteeksi syötettiin vakiojännite. Simuloitava tilanne on kuvassa 31 sivulla 54. Kuvassa 33 on jännitteen käyrämuoto oikosulkumoottorin käynnistyksessä. Kuvasta voidaan huomata, ettei jännite palaudu normaalille tasolle, vaan jää alemmas kuin todellisessa tilanteessa.

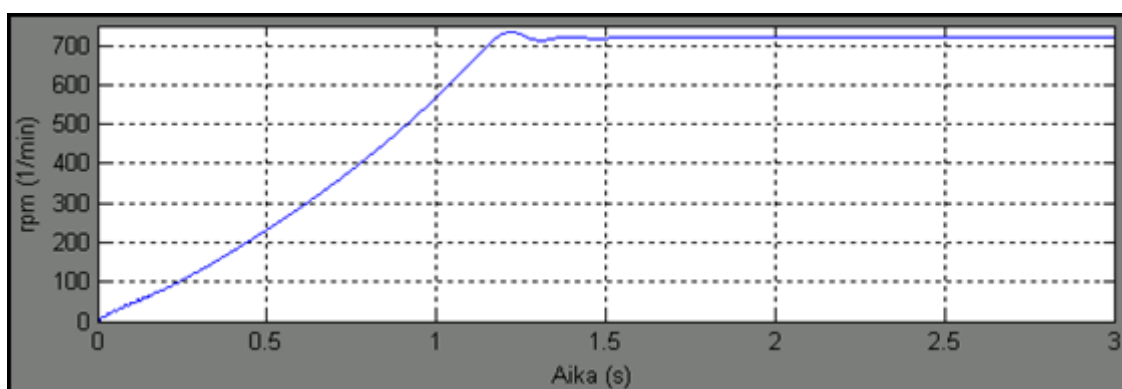


**Kuva 33.** Jännitteen käyrämuoto oikosulkumoottorin käynnistyksessä (magnetointia ei mallinnettu).

Kuvassa 34 on oikosulkumoottorin ottama virta. Kuvissa 35 ja 36 on puolestaan oikosulkumoottorin käynnistykseen liittyviä tietoja kuten pyörimisnopeus ja tuotettu sähköinen vääntömomentti. Kuvasta 35 voidaan huomata, että moottori pyörii täydellä nopeudella noin 1,2 sekunnin kuluttua sen käynnistämisestä.

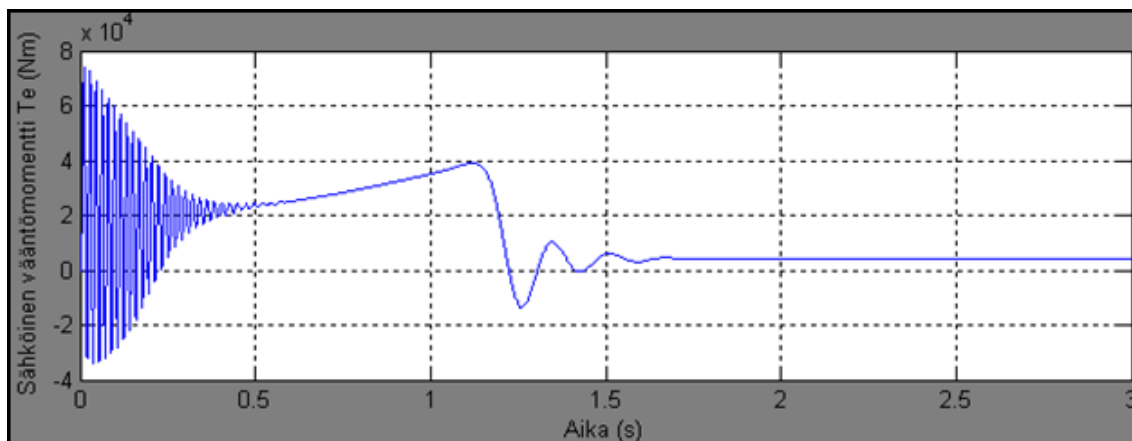


**Kuva 34.** Oikosulkumoottorin ottama virta (magnetointia ei mallinnettu).



**Kuva 35.** Oikosulkumoottorin pyörimisnopeuden muutos käynnistyksessä (magnetointia ei mallinnettu).

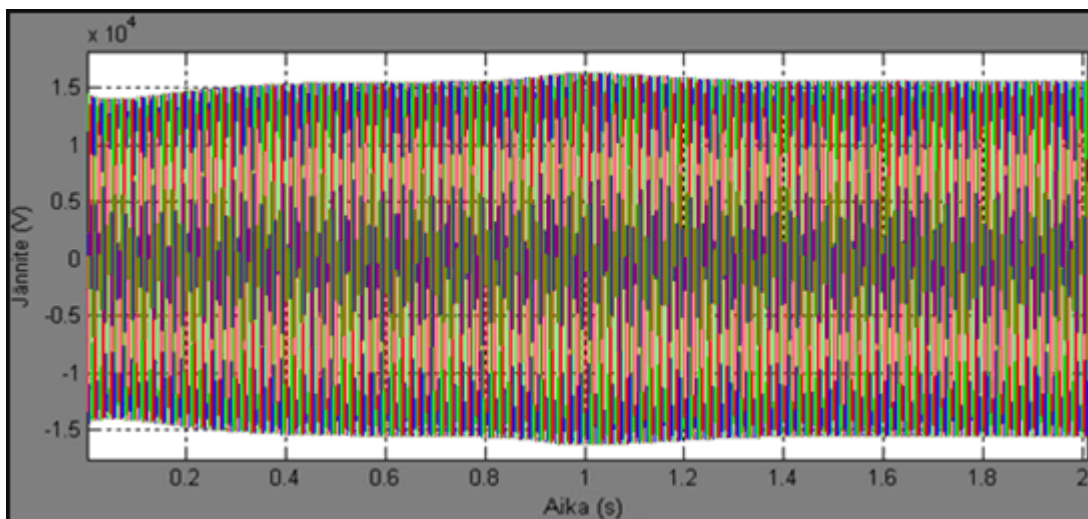
Kuvasta 36 on nähtävissä tyypillinen oikosulkumoottorin tuottama momenttikäyrä. Alussa vääntömomentti värähtelee suuresti, mutta tasaantuu ennen täyttä pyörimisnopeutta. Täyden nopeuden jälkeen momentti puolestaan asettuu tietylle perustasolle.



**Kuva 36.** Oikosulkukoneen tuottama sähkömekaaninen vääntömomentti käynnistyksessä (magnetointia ei mallinnettu).

### 5.3.2 Sähköverkko magnetointimallin kanssa

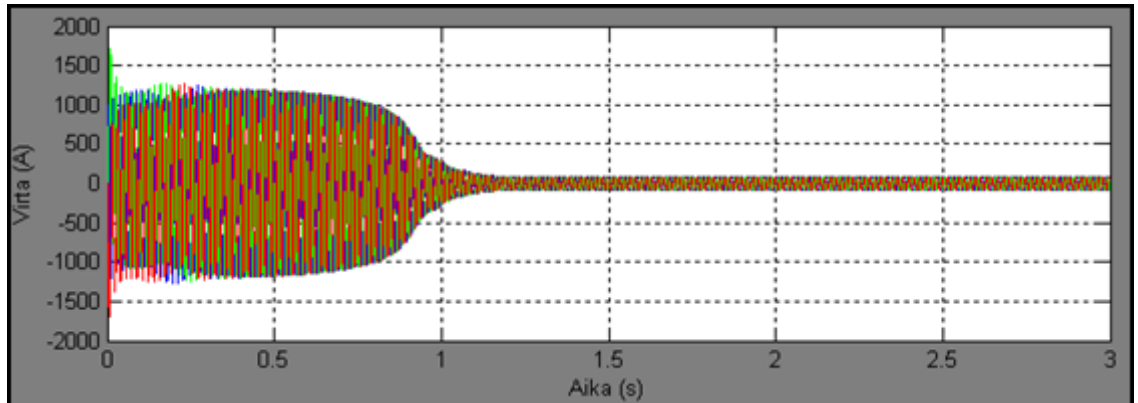
Simulointimalli, jossa tahtigeneraattoreissa on käytetty magnetoinnin mallinnusta, on esitetty sivulla 55 olevassa kuvassa 32. Kuvassa 37 on jännitteen käyttäytyminen oikosulkumoottorikäynnistyksen yhteydessä. Magnetoinnin mallinnuksen ansiosta verkon jännitetaso pyrkii palautumaan normaalille tasolle. Kuvasta 37 voidaan huomata, kuinka jännite putoaa alussa ja magnetointi lähtee korjaamaan tapahtunutta alennusta. Oikosulkumoottorin käynnistyttyä noin 0,9 sekunnin kohdalla nousee jännite yli normaalitason, magnetoinnin reagoidessa pienellä viiveellä tapahtuviin muutoksiin.



**Kuva 37.** Jännitteen käyrämuoto oikosulkumoottorikäynnistyksessä (magnetoitu malli).

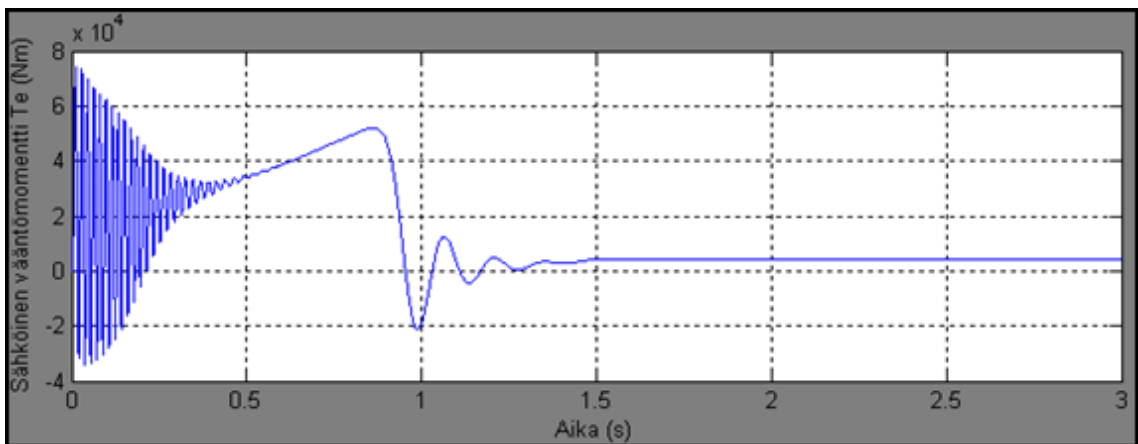
Kuvassa 38 on oikosulkumoottorin ottaman virran käyrä, josta voidaan huomata, että käynnistyksessä moottori ottaa verkosta suuren virran. Kuvassa 39 on kuvattu

sähköinen vääntömomentti moottorin käynnistyksen yhteydessä ja kuvassa 40 on vastaavassa tilanteessa oikosulkumoottorin pyörimisnopeus.

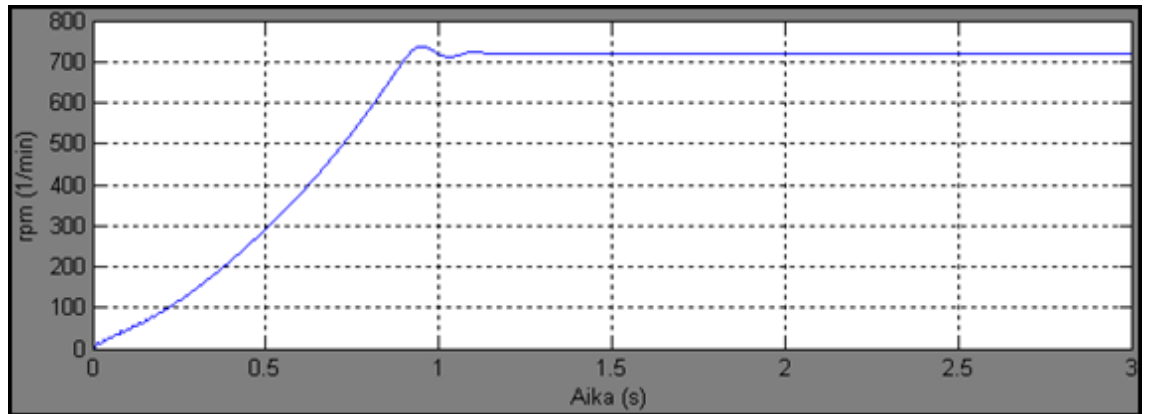


**Kuva 38.** Oikosulkumoottorin ottama virta (magnetoitu malli).

Kuvista 39 ja 40 voidaan huomata millainen vaikutus tahtigeneraattorin magnetoinnin mallintamisella on oikosulkumoottorin toimintaan. Moottori käynnistyy nopeasti: magnetoimattoman mallin 1,2 sekunnin sijaan tässä tapauksessa moottori saavuttaa täyden pyörimisnopeuden jo 0,9 sekunnin kuluttua käynnistyksen aloituksesta.



**Kuva 39.** Oikosulkumoottorin sähköinen vääntömomentti käynnistyksessä (magnetoitu malli).

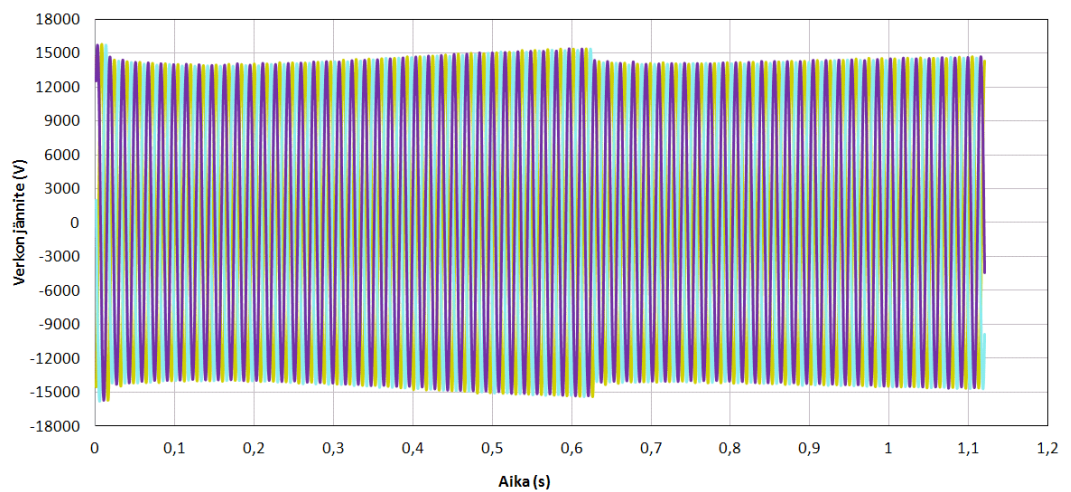


*Kuva 40. Oikosulkumoottorin pyörimisnopeus käynnistyksessä (magnetoitu malli).*

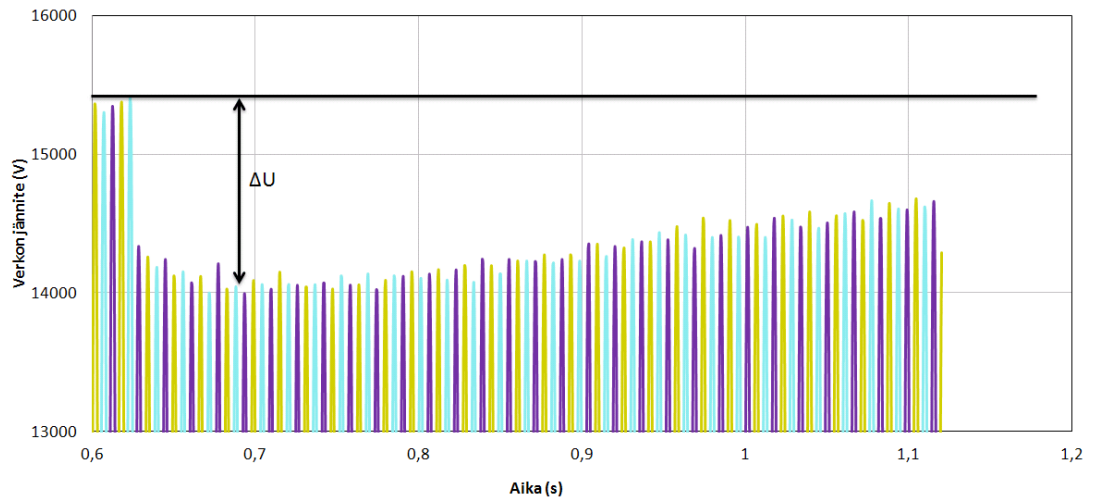
## 5.4 Simuloinnin vertailu mitattuihin arvoihin

Mallilaivalta olevat mittatulokset on mitattu päätaulun mittamuuntajan takaa, joten mittauksen suuret on siirretty vastaamaan simuloinnin jännitetasoa (11 kV). Jännitteenalenema on ainoa asia, jota voidaan käyttää tässä työssä simulointien oikeellisuuden vertailuun. Työssä ei ole esitetty jokaista jännitteenaleneman määrittystä erikseen, sillä ne muodostuvat täysin samalla tavalla kuin mallina esitetty. Lisäksi määrityksen määrä (yhteensä 126 kpl) on liian suuri esitettäväksi tämän työn laajuudessa.

Laivalta mitatun jännitteen käyrä näkyy kuvasta 41. Tästä nähdään miten verkon jännite putoaa, kun moottori liittyy verkkoon ja ottaa virtaa. Mittauksessa on suoritettu eri keulapotkurien käynnistyksiä peräkkäin, josta johtuu kuvassa 41 toistuva käynnistyskäyrämuoto. Kuvasta 41 on otettu tarkennus jännitteenaleneman määrittyskohdasta ja tämä on esitetty kuvassa 42.



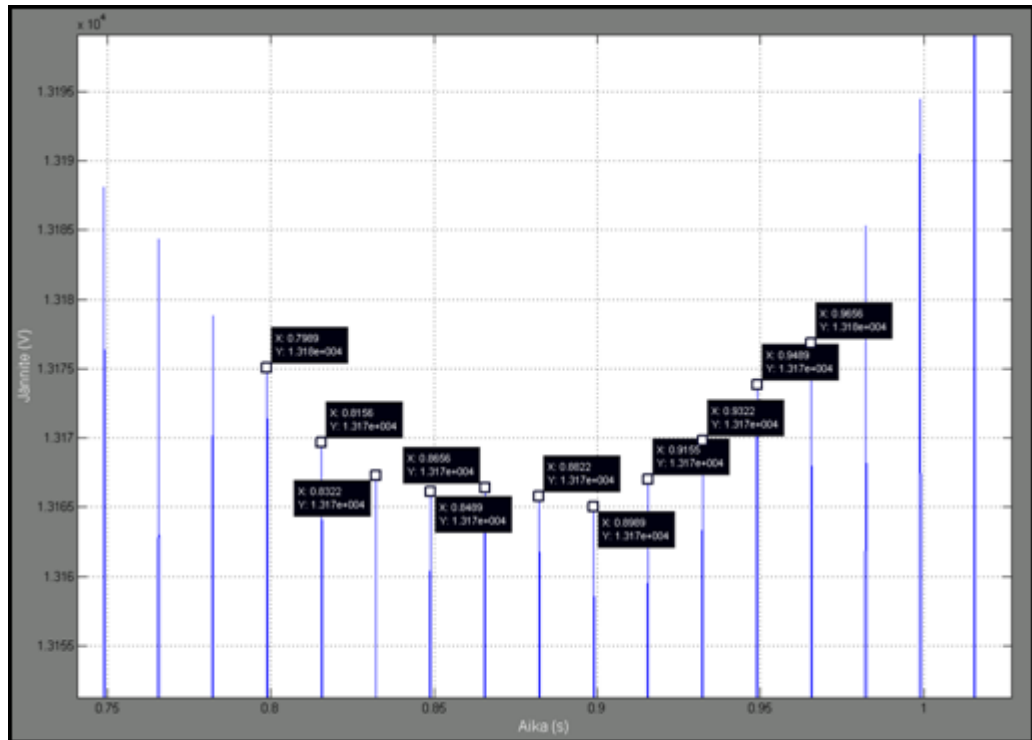
*Kuva 41. Mallilaivasta mitattu jännite keulapotkurikäynnistyksessä.*



**Kuva 42.** Tarkennettu kuva kuvasta 41, mihin on lisätty periaate jännitteenaleneman laskemisesta  $\Delta U$ .

Kuvista 41 ja 42 voidaan määrittää jännitteenalenema. Muut mahdollisesti tulkittavat tapahtumat, kuten käynnistyksen kesto, ovat epävarmoja eikä niitä voi vertailla simuloinnista saatuihin tuloksiin. Jännitteenalenema on määritelty sovittamalla paraabeli jännitteen verhoikäyrälle. Paraabeli ei matemaattisesti täysin vastaa verhoikäyrän muotoa, mutta se tarjoaa tällä määrittelyalueella yksinkertaisen, mutta silti riittävän tarkan menetelmän minimin löytämiseen.

Alimman jännitetason kohta arvioitiin silmämääräisesti simuloinnista. Tämän jälkeen kyseisestä kohdasta otettiin muutamia näytepisteitä, joihin sovitettiin paraabelin yhtälö Microsoft Excel – taulukkolaskentaohjelman (Redmond, Washington, Yhdysvallat) avulla. Matlabin piirtotyökalujen avulla pystytään helposti määrittelemään haluttujen pisteiden sijainti kuvassa. Esimerkkitapa on esitetty kuvassa 43, jossa on silmämääräisesti katsottu yhden vaiheen jännitekäyrän alin kohta ja valittu sen ympäriltä pisteitä. Pisteet on listattu taulukkoon 7.

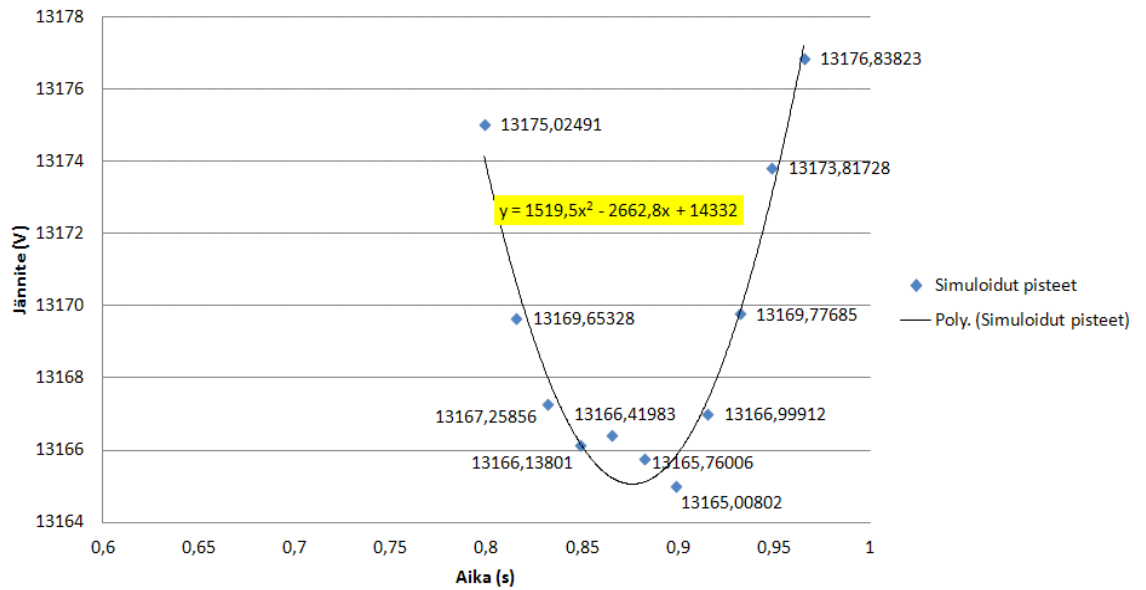


**Kuva 43.** Kuva silmämääräisesti valitusta jännitteen alimmasta kohdasta. Kuvaan on lisätty valitut pisteet, joiden avulla määritetään laskennallisesti alin jännite.

**Taulukko 7.** Valitut pisteet jännitteen alimman kohdan ympäriltä.

| Aika (s) | Jännite (V) |
|----------|-------------|
| 0,798854 | 13 175,02   |
| 0,815554 | 13 169,65   |
| 0,832154 | 13 167,26   |
| 0,848854 | 13 166,14   |
| 0,865554 | 13 166,42   |
| 0,882193 | 13 165,76   |
| 0,898893 | 13 165,01   |
| 0,915493 | 13 167,00   |
| 0,932193 | 13 169,78   |
| 0,948893 | 13 173,82   |
| 0,965593 | 13 176,84   |

Excelissä voidaan sovittaa toisen asteen yhtälö määritettyihin pisteisiin ja samalla ohjelma tulostaa kyseisen yhtälön, kuten kuvassa 44. Derivoimalla saatu yhtälö ja ratkaisemalla derivaatan nollakohta, saadaan aika jolloin jännite on määritelmän mukaan alimpana. Tällä ajalla voidaan määrittää puolestaan jännitteen alin piste. Yhden pisteen määrittäminen on esitetty yhtälöissä 58–60.



**Kuva 44.** Ilman magnetointia simuloidun tilanteen yhden vaiheen alimman jännite tason määrittäminen paraabelilla.

$$y(x) = 1\,519,5x^2 - 2\,662,8x + 14\,332 \quad (58)$$

$$Dy(x) = 3\,039x - 2\,662,8 = 0 \Rightarrow x = 0,8762 \quad (59)$$

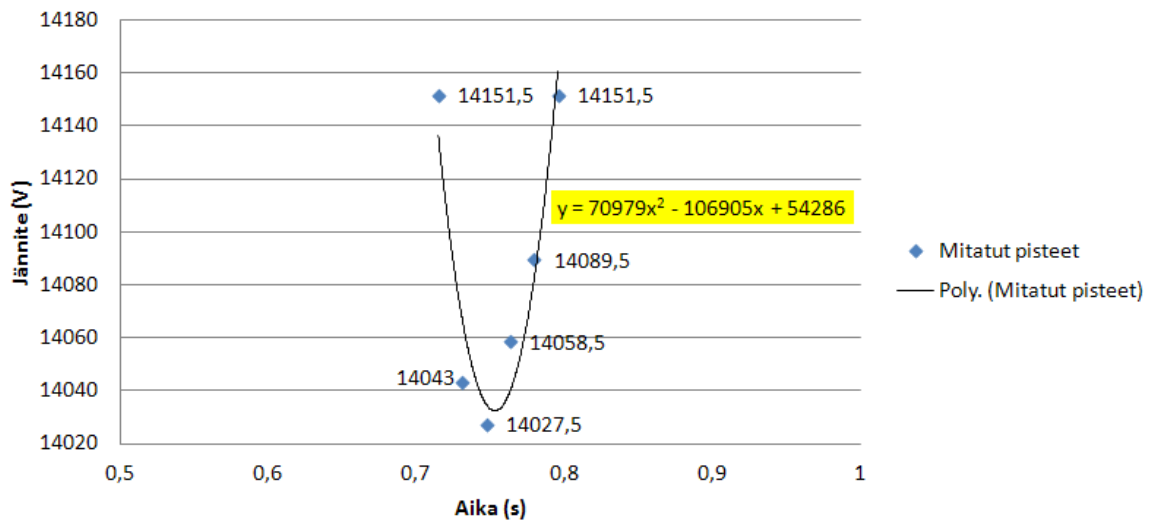
$$y(0,8762) = 1\,519,5 * 0,8762^2 - 1,519,5 * 0,8762 + 14\,332 \approx 13\,165. \quad (60)$$

Vastaavalla tavalla edellä olevat toimenpiteet suoritettiin jokaiselle vaiheelle: sekä positiiviselle, että negatiiviselle jännitteelle. Näistä määritetyistä alimmista jännitteenalenemapististä laskettiin keskiarvo, jonka avulla voidaan laskea jännitteenalenema kaavalla 43. Taulukossa 8 on listattu määritetyt jännitepisteet molemmille työssä tehdyille simulointitilanteille sekä näistä lasketut keskiarvot, joiden avulla voidaan laskea itse jännitteenalenema.

**Taulukko 7.** Simulointien alimmat jännitepisteet ja niiden keskiarvot.

| Vaihe                  | Alimman jännitepisteen itseisarvo (V) |            |
|------------------------|---------------------------------------|------------|
|                        | Magnetoimaton malli                   | Magnetoitu |
| $U_{A, \text{pos}}$    | 13 165                                | 13 984     |
| $U_{A, \text{neg}}$    | 13 164                                | 14 012     |
| $U_{B, \text{pos}}$    | 13 164                                | 14 003     |
| $U_{B, \text{neg}}$    | 13 164                                | 13 995     |
| $U_{C, \text{pos}}$    | 13 164                                | 14 008     |
| $U_{C, \text{neg}}$    | 13 164                                | 13 987     |
| $U_{\text{Keskiarvo}}$ | 13 164                                | 13 998     |

Mallilaivan mitatuille jännitteille tehtiin vastaava analyysi kuin simuloituille jännitteille: esimerkki yhden vaiheen jännitteenaleneman määrittelystä on kuvassa 45. Mallilailta mitatun jännitekäyrän näytteenottotaajuus oli paraabelin tarkkaan sovittamiseen liian pieni, mutta paraabeli on sovitettu mahdollisimman hyvin mittapisteisiin.



**Kuva 45.** B vaiheen positiivisen jännitteen alimman tason määrittely mallilailvan mitatusta tilanteesta.

**Taulukko 9.** Mallilaivalta mitatun jännitteen alimmat pisteet ja niiden keskiarvo.

| Vaihe           | Alimman jännitteen (V) itseisarvo |
|-----------------|-----------------------------------|
| $U_{Apos}$      | 13 989                            |
| $U_{Aneg}$      | 13 986                            |
| $U_{Bpos}$      | 14 032                            |
| $U_{Bneg}$      | 14 039                            |
| $U_{Cpos}$      | 14 029                            |
| $U_{Cneg}$      | 14 023                            |
| $U_{Keskiarvo}$ | 14 016                            |

Taulukossa 9 olevien jännitteiden avulla lasketun keskiarvon  $U_{Keskiarvo}$  avulla voidaan laskea mitattu jännitteenalenema laivan sähköverkossa. Jännitteenalenemaksi saatiin noin 9,90 %, joka jää luokituslaitosten asettamien rajojen sisäpuolelle ja on näin ollen sallituissa rajoissa.

Verrattaessa jännitteenalenemia, jotka on kaikki laskettu kaavalla 43 ja koottu taulukoon 10, voidaan huomata kuinka mallilaivalta mitattu arvo on matalampi kuin simuloineista saadut jännitteenalenemat. Tämä on järkevää, sillä näin laivaan mitoitettavat komponentit ovat riittäviä takaamaan turvallisen toiminnan.

Magnetointimallinnetun verkon jännitteenalenemaksi saatiin 10,02 % kun taas magnetoimattoman järjestelmän vastaava luku oli 15,38 %. Ilman magnetointia simuloitun ja magnetoidun simulointien vertailussa voidaan huomata kuinka merkittävä rooli magnetoinnilla on jännitteenalenemaan.

**Taulukko 10.** Lasketut jännitteenalenemat.

| Tilanne / Verkko             | Jännitteenalenema (%) |
|------------------------------|-----------------------|
| Mallilaiva mitattu           | 9,90                  |
| Simuloitu ilman magnetointia | 15,38                 |
| Simuloitu magnetoinnilla     | 10,02                 |

## 6 Oikosulkumoottorimallin herkkyysanalyysi

Työssä käytetyn oikosulkukonemallin herkkyyttä parametrien muutokselle testattiin muuttamalla jokaista koneen parametria erikseen  $\pm 5\%$ . Tämän jälkeen verrattiin paljonko jännitteenalenema muuttui. Jos muutos oli selvästi nähtävissä, voitiin sanoa, että kyseinen parametri on merkittävä mallille jännitteenaleneman osalta.

Järjestelmäksi valittiin simulointijärjestelmä, jossa tahtigeneraattorin magnetointi on mallinnettu, sillä kyseinen tilanne on lähempänä todellisuutta. Joka simulointitilanteesta määritettiin jännitteen alin piste, kuten aiemmin työssä on määritetty luvussa 5.4 sivuilla 61–63. Jännitteen perustasoksi oletettiin aiemmin simulointitilanteessa käytetty 15556 V.

Taulukoissa 11 ja 12 on listattu aiheutuneet jännitteenalenemamuutokset muutettujen oikosulkukoneen parametrien pohjalta. Taulukoihin on laskettu myös ero muutetun parametrin ja normaalin parametrin jännitteenalenemille ( $\nabla U_m - \nabla U_n$ ). Analyysiä tehtäessä sovittiin parametrin, joka muuttaa jännitteenalenemaa yli 20 prosenttiyksikköä olevan merkittävä.

Tehdyn herkkyysanalyysin pohjalta voidaan todeta, että oikosulkukoneen malli on herkkä tässä työssä käytetyn rajan pohjalta ainoastaan staattori-induktanssin määrittelylle, joka vaihteli noin  $\pm 0,25$ -prosenttiyksikköä suuntaansa. Muiden parametrien vaikutus jännitteenaleneman muutokseen oli vähäistä. Tarkemmat tiedot aiheutuneista muutoksista on listattu alla oleviin taulukoihin 11 ja 12.

**Taulukko 11.** Herkkyysanalyysin tulokset 5%:a korotetuilla arvoilla.

| Parametri                     | Alkuperäinen             | +5%                      | $U_{\min}$ (V) | $\nabla U_m$ (%) | $\nabla U_m - \nabla U_n$ (%) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|
| Kuormamomentti $T_m$          | Käyrämuoto               | *1,05                    | 13 996,8       | 10,023           | 0,0079                        |
| Staattori-resistanssi $R_s$   | 0,76780 ( $\Omega$ )     | 0,80619 ( $\Omega$ )     | 14 003,3       | 9,981            | -0,0339                       |
| Staattori-induktanssi $L_s$   | 0,011760 (H)             | 0,012348 (H)             | 14 036,8       | 9,766            | -0,2492                       |
| 1. Häkkiresistanssi $R_{r1}$  | 0,37060 ( $\Omega$ )     | 0,38913 ( $\Omega$ )     | 13 997,2       | 10,021           | 0,0058                        |
| 1. Häkki-induktanssi $L_{r1}$ | 0,016610 (H)             | 0,0174405 (H)            | 14 010,2       | 9,937            | -0,0778                       |
| 2. Häkkiresistanssi $R_{r2}$  | 2,340 ( $\Omega$ )       | 2,457 ( $\Omega$ )       | 14 006,3       | 9,962            | -0,0531                       |
| 2. Häkki-induktanssi $L_{r2}$ | 0,011760 (H)             | 0,012348 (H)             | 14 005,7       | 9,966            | -0,0489                       |
| Magn.-induktanssi $L_m$       | 0,29060 (H)              | 0,30513 (H)              | 13 998,7       | 10,011           | -0,0039                       |
| Hitausmomentti $J$            | 398,0 ( $\text{kgm}^2$ ) | 417,9 ( $\text{kgm}^2$ ) | 13 997,7       | 10,018           | 0,0026                        |

**Taulukko 12.** Herkkyysanalyysin tulokset 5%:a alennetuilla arvoilla.

| Parametri                     | Alkuperäinen             | -5 %                     | $U_{\min}$ (V) | $\nabla U_m$ (%) | $\nabla U_m - \nabla U_n$ (%) |
|-------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------|------------------|-------------------------------|
| Kuormamomentti $T_m$          | Käyrämuoto               | *0,95                    | 13 998,5       | 10,012           | -0,0028                       |
| Staattoriresistanssi $R_s$    | 0,76780 ( $\Omega$ )     | 0,72941 ( $\Omega$ )     | 13 996,5       | 10,025           | 0,0101                        |
| Staattori-induktanssi $L_s$   | 0,011760 (H)             | 0,011172 (H)             | 13 959,3       | 10,264           | 0,2490                        |
| 1. Häkkiresistanssi $R_{r1}$  | 0,37060 ( $\Omega$ )     | 0,35207 ( $\Omega$ )     | 14 001,5       | 9,993            | -0,0221                       |
| 1. Häkki-induktanssi $L_{r1}$ | 0,016610 (H)             | 0,0157795 (H)            | 13 987,7       | 10,082           | 0,0669                        |
| 2. Häkkiresistanssi $R_{r2}$  | 2,340 ( $\Omega$ )       | 2,223 ( $\Omega$ )       | 13 993,5       | 10,044           | 0,0294                        |
| 2. Häkki-induktanssi $L_{r2}$ | 0,011760 (H)             | 0,011172 (H)             | 13 989,0       | 10,073           | 0,0583                        |
| Magn.-induktanssi $L_m$       | 0,29060 (H)              | 0,27607 (H)              | 13 995,7       | 10,030           | 0,0154                        |
| Hitausmomentti $J$            | 398,0 ( $\text{kgm}^2$ ) | 378,1 ( $\text{kgm}^2$ ) | 14 000,3       | 10,000           | -0,0146                       |

## 7 Johtopäätökset

Työn tarkoituksena oli saada ABB Marinen käyttöön simulointimalleja, joilla voidaan simuloida sähköverkon toimintaa erilaisissa muutostilanteissa. Varsinaiseksi aiheeksi rajattiin oikosulkumoottorimallin testaaminen ja sen käynnistyksen simulointi. Malliverkko onnistuttiin rakentamaan oikosulkumoottorin ympärille ja näin simuloimaan kyseistä tilannetta. Simulointimallien ja mitatun tiedon vertailu olisi vielä järkevämpää, mikäli mittauksia olisi enemmän kuin yksi. Kuitenkin tämän työn tiedoilla malliverkko saatiin toimimaan hyvin ja sen tulokset vastasivat mitattua.

Tässä työssä käytettyjen mallien soveltuvuus laivaolosuhteisiin saatiin varmennettua kohtuullisella varmuudella. Simulointitilanteena oikosulkumoottorin käynnistys on vaativa tapahtuma, sillä se aiheuttaa paljon erilaisia muutoksia verkon toiminnassa. Oikosulkumoottorin käynnistyksen vertailu mitattuun tietoon on hankalaa, sillä esimerkiksi pyörimisnopeuden vertailua ei yleensä voida tehdä normaaleissa käyttöolosuhteissa. Tämä johtuu siitä, että pyörimisnopeuden mittaaminen vaatisi koneen akselille nopeusmittauksen, jota ei normaalisti ole koska sitä ei tarvita peruskäytössä.

Käytetyn kaksihäkkimallin parametrien oikeellisuudesta ei ole täyttä varmuutta, sillä todellisuudessa kyseinen moottori ei ole kaksihäkkinen. Mallinnuksen kannalta sen on kuitenkin todettu olevan toimiva ratkaisu. Ainoa mahdollisuus oli siis luottaa Simulinkin ”power\_AsynchronousMachineParams” -laskentaohjelmaan, jolla tutkielman parametrit on laskettu. Oikosulkumoottorimallin parametrien herkkyyshanalyysi oli hyvä lisä työhön ja kyseisen mallin parametreista voitiin näin löytää ne epätarkkuudet, jotka vaikuttavat kokonaisuuteen eniten. Analyysissä huomattiin, ettei malli ole erityisen herkkä muille parametreille kuin staattori-induktanssin muutokselle.

Työssä jännitteenalenema määritettiin sovittamalla paraabeli alimpiin simuloituihin ja mitattuihin pisteisiin ja näin määrittämällä paraabelin alin piste. Valittu tapa vastaa todellisuutta tietyllä varmuudella, mutta paraabeliin valittavien määrittämisspisteiden lukumäärä saattoi aiheuttaa helposti selvää muutosta alimpiin jännitepisteisiin. Lisäksi simuloinnissa käytettävät tapahtumien alitusajankohdat vaikuttavat eri vaiheista laskettuihin jännitepisteisiin, joihin paraabeli sovitetaan ja näin vaiheiden välillä jännitteenalenema saattoi vaihdella useita kymmeniä voltteja.

Magnetointimallin käyttö tekee ymmärrettävästi järjestelmän toiminnasta realistisemmän käyttäytymiseltään, mikä näkyi myös simulointituloksissa. Magnetointimallin puuttuminen johtaa siihen, että generaattorin napajännite putoaa kuorman kasvaessa, eikä se palaudu normaalille tasolle missään vaiheessa. Käytetty magnetointimalli paransi siis järjestelmän toimintaa huomattavasti ja vaikka mallin parametrisoinnissa onkin epävarmuutta, on sen käyttäminen tarpeen.

## 8 Jatkotoimenpiteet

Mallien toiminta vaikutti vastaavan käytäntöä, mutta tällä hetkellä niitä on vertailtu vain yhteen käytännön mittaustulokseen. Tarkempien analyysien teko vaatisikin laajempaa vertailua. Toisessa mallilaivassa tehtävät mittaukset olisivat hyvin tärkeitä tukemaan tässä tutkielmassa tehtyjä simuloineja. Näin ollen käytettyjen mallien toiminta voitaisiin vielä paremmin varmistaa.

Mallilaivalta mitatun tiedon laatuun ja määrään tulisi kiinnittää enemmän huomiota, mikäli mittausten tuloksia on tarkoitus käyttää simulointitulosten oikeellisuuden tarkasteluun. Varsinkin työssä pohjana olleen mallilaivan jännitekäyrän näytteenottotaajuus olisi saanut olla laajempi. Näin olisi saatu tarkemmat arviot mittauksen tuloksista. Lisäksi, jos tilanteesta olisi saatavilla muita mittaustuloksia liittyen oikosulkumoottorin tai tahtigeneraattoreiden toimintaan, helpotettaisiin tulosten oikeellisuuden arviointia.

Jatkossa tulisi kehittää tässä työssä käytettyjen mallien parametrisointia tarkemmiksi. Varsinkin tahtigeneraattorin magnetoinnin mallinnus olisi tärkeää saada toimimaan, sillä tahtikoneen malliin kuuluisi liittää magnetoinnin mallinnus generaattorikäytössä. Mikäli useampien käytännön tulosten perusteella Simulinkin valmis magnetointimalli ei sovellu tarkoitukseen, tulisi kehittää sopiva ja toimivampi oma malli. Käytettäessä valmista magnetointimallia tai oimatekoista mallia, tulisi sen parametrien tarkentamiseen keskittyä, sillä magnetoinnin vaikutus koko järjestelmän toiminnalle on merkittävä. Magnetoinnin tarkempaa vaikutusta simulointiin kannattaisi myös tutkia enemmän.

## 9 Lainatut lähteet

1. **ABB Oy Marine & Turbocharging.** *Marine Academy training material HV10.*
2. **ABB AS Marine: Ådnanes, Alf Kåre.** *Marine Electrical Installations And Diesel Electric Propulsion.* Oslo, 2003. 86 s.
3. **Häkkinen, Pentti.** *Laivan sähköverkko. TKK Laivalaboratorion julkaisu M-279.* 2003. ISBN 951-22-6394-7.
4. **Oksanen, Aki.** *Sähköisen propulsiokäytön suunnanvaihdon simulointiympäristön kehitys. Diplomityö.* Espoo, 2009. 105 s.
5. **Häkkinen, Pentti.** *Laivan koneistot. TKK Laivalaboratorion julkaisu M-179.* 2008. ISBN 951-22-1780-5.
6. **Nyyssönen, Tommi.** *Taajuusmuuttujan perustuvan akseligeneraattorijärjestelmä laivan sähköverkossa. Diplomityö.* Espoo, 2003. 80 s.
7. **Korppinen, Leena;ym.** *Sähkövoimatekniikanopus.* 1998. Saatavissa: <http://www.leenakorppinen.fi/node/158>. [Lainattu 16.9.2011].
8. **Mäki-Ontto, Petri ja Mikkola, Mika.** *Oikosulkumoottorin dynaamiset kierto-osoitinmallit. Sähkömekaniikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu.* Espoo, 1997. 32 s.
9. **Mikkola, Mika.** *Laivan sähköverkon muutostilojen simulointi. Diplomityö.* Espoo, 1997. 65 s.
10. **Laaksonen, Lauri.** *Muuntajien kytkentäilmiöt laivaverkossa ja jännitteenaleneman laskenta ja hallinta. Diplomityö.* Espoo, 2003. 74 s.
11. **Luomi, Jorma;Niiranen, Jouko ja Niemenmaa, Asko.** *Sähkömekaniikka ja sähkökäytöt. Kurssin S-17.2020 luentomoniste.* Espoo, 2007.
12. **Arkio, Antero.** *S-17.3020 Transient Phenomena in Electrical Machines. Luentomateriaali.* 2011. [Lainattu 25.10.2011].
13. **Pekarek, Steven ja Skvarenin, Timothy.** *ACSL/Graphic Modeller Component Models for Electric Power Education.* 1998. [URL] <http://www.ewh.ieee.org/soc/es/Nov1998/08/BEGIN.HTM#INDEX>. [Lainattu 29.10.2011].

14. **Heino, Toni.** *Laivan sähköisen potkurijärjestelmän mitoituksen tuotteistaminen.* Espoo, 2001. 100 s.
15. **Kyyrä, Jorma.** *Suuntaajatekniikka. Teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, Sähkökäytön ja tehoelektroniikan laboratorio. Luentomateriaali.* 2011. [Lainattu 14.11.2011].
16. **O'Halloran, William J. ja Ramsay, Kenneth W.** *Woodward Power Management. Woodward Governor Company Manual 01740B.* 1991.
17. **Machowski, Jan;Bialek, Janusz W ja Bumby, James R.** *Power System Dynamics, Stability and Control.* 2008. ISBN 978-0-470-72558-0.
18. *The Mathworks Inc. Internetsivut. Saatavilla:*<http://www.mathworks.se/index.html>. [Lainattu 29.12.2011].
19. *The MathWorks Training services. ABB Advanced Simulink Training.*
20. *Starting torque for Tunnel Thruster - Type FU115LTC3000. Brunvoll AS. Technical Data Sheet.* 2011.
21. *Draka. Keskijännitekaapelit. AHXCMK-WTC 6/10 kV esite. Saatavilla:* [http://www.draka.fi/draka/Countries/Draka\\_Finland/Languages/suomi/navigaatio/Tuotteet/Kiinteistoverkot/Voimakaapelit/Keskijannitekaapelit/AHXCMK-WTC\\_10kV\\_JT\\_D1112.pdf](http://www.draka.fi/draka/Countries/Draka_Finland/Languages/suomi/navigaatio/Tuotteet/Kiinteistoverkot/Voimakaapelit/Keskijannitekaapelit/AHXCMK-WTC_10kV_JT_D1112.pdf). [Lainattu 28.1.2012].
22. *The MathWorks. SimPowerSystems help. Saatavissa:* <http://www.mathworks.se/help/toolbox/phymod/powersys/ref/f2-16412.html>. [Lainattu 1.2.2012].