

**HAKUN PIENJÄNNITEMONIMOOTTORIKÄYTÖN JA SITÄ SYÖTTÄVÄN
TEOLLISUUSSÄHKÖVERKON MATEMAATTINEN MALLINNUS**



Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö Sähkö- ja automaatiotekniikka, insinööri (AMK)

Muuntokoulutus INSAM22Y7

Kevät 2023

Tatu Mäkelä

Sähkö- ja automaatiotekniikka

Tekijä Tatu Mäkelä

Työn nimi Hakun pienjännitemonimoottorikäytön ja sitä syöttävän teollisuussähköverkon matemaattinen mallinnus

Ohjaaja Juhani Henttonen

Tiivistelmä

Vuosi 2023

Massiivisten koneiden käynnistäminen ja niiden sähkömoottorien käytönaikainen ylikuormittaminen haastavat syöttävää sähköverkkoa. Tämä ilmiö näkyy myös tämän opinnäytetyön toimeksiantajan, ANDRITZ Oy:n, valmistamissa teollisen mittakaavan hakuissa. Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia mainittuja haasteita mallintamalla hakku, sen monimoottorikäyttö ja syöttävän sähköverkon komponentit matemaattisesti. Tavoitteena oli myös luoda ANDRITZ Oy:lle simulointimalleja, jotka mahdollistavat verkon komponenttien arvioinnin vaihtelevissa käyttötilanteissa.

Matemaattinen mallinnus ja simulointimallit laadittiin käyttäen kaupallista Matlab/Simulink -ohjelmistoa ja erityisesti sen lisäosia Simscape ja Simscape Electrical. Simscapen lohkokirjastojen valmiita malleja hyödyntämällä monimutkainen mallinnus yksinkertaistui ja malleista saatiin helposti muunneltavia. Haasteellisimmaksi mallinnettavaksi arvioidulle sähkömoottorilohkolle ohjelmoitiin erillinen testisimulaatio, jonka antamia tuloksia verrattiin todellisen moottorin suoritusarvoihin. Näin löydettyä parhaiten toimivaa nk. kaksihäkkimallia käytettiin varsinaisissa kokonaisjärjestelmän simuloinneissa.

Opinnäytetyön laajuus oli rajattu yhteen hakkumalliin ja verkkorakenteeseen, mutta kehitetty malli on helposti muokattavissa erilaisille kokoonpanoille. Mallia hyödyntämällä voidaan mm. mitoittaa hakun moottoreita syöttävän jakelumuuntajan koko optimaaliseksi suhteessa syöttävän teollisuussähköverkon oikosulkutehoon. Tutkitun kokonaisuuden simulointitulosten perusteella näyttäisi siltä, että muuntajakokoon merkitys korostuu erityisesti heikkoon verkkoon liityttäessä.

Avainsanat mallintaminen, simulointi, hakut, sähkökäytöt, muuntajat

Sivut 53 sivua, ei liitteitä

Electrical and Automation Engineering

Abstract

Author Tatu Mäkelä

Year 2023

Subject Mathematical modelling of the chipper's low voltage multimotor drive and the supplying industrial network.

Supervisors Juhani Henttonen

Starting up high-inertia machines and overloading their electric motors during operation pose challenges to the supplying power grid. This issue also applies to the industrial size chippers manufactured by ANDRITZ Oy, the commissioner of this thesis. The aim of the thesis was to investigate the challenges mentioned by modelling the chipper, its multimotor drive and the supplying industrial network. The goal was also to create simulation models for ANDRITZ Oy that enable evaluation of network components in varying operational situations.

Mathematical modelling and simulation models were created using commercial Matlab/Simulink software and especially its add-ons Simscape and Simscape Electrical. With the ready-made models of Simscape's block libraries, complex modeling was simplified and the created models became easier to modify. A separate test simulation was programmed for the electric motor block, which was estimated to be the most challenging to model. The simulation results were compared with the performance data of the real electrical motor. It was found that the so-called double-cage model corresponded best with the data and was therefore used in the actual simulations of the overall system.

The scope of the thesis was limited to one chipper model and network structure, but the developed model is easy to modify for other configurations. The model can be utilized, for example, to optimize the size of the distribution transformer feeding chipper motors according to the short-circuit level of the supply network. Based on the simulation results of the investigated entity, it seems that the importance of the transformer size is emphasized, especially when connecting to a weak network.

Keywords modelling, simulation, chipper, electrical drives, transformers

Pages 53 pages, no appendices

Sisällys

1	Johdanto	1
1.1	Työn tausta ja tutkimusongelma	1
1.2	Työn tavoitteet ja rajaukset	2
2	Mallinnettava laitekokonaisuus.....	2
2.1	Hakku.....	2
2.2	Hakun monimoottorikäyttö.....	5
2.3	Moottorikäyttöä syöttävän sähköverkon komponentit	5
2.3.1	Keskijänniteverkko.....	6
2.3.2	Jakelumuuntaja	7
2.3.3	Pienjänniteverkko.....	8
3	Matemaattinen mallinnus	10
3.1	Differentiaaliyhtälömallit ja niiden numeeriset ratkaisumenetelmät.....	10
3.2	Mekaanisen laitteen fysikaalinen mallinnus	15
3.3	Moottorin ja sähköverkon komponenttien mallinnus.....	17
4	Mallinnus- ja simulointityökalu	19
4.1	Matlab/Simulink -ohjelmisto.....	19
4.2	Mallinnuksen ja simuloinnin periaate.....	21
5	Matemaattiset mallit ja niiden parametrit.....	22
5.1	Mallinnuksen komponentit	22
5.1.1	Teollisuussähköverkko.....	23
5.1.2	Monimoottorikäyttö.....	29
5.1.3	Hakku	34
5.2	Kokonaisjärjestelmä.....	36
5.3	Simulointien tulokset	37
5.3.1	Tavanomainen verkko.....	38
5.3.2	Heikko verkko	42
5.3.3	Suuritehoinen verkko.....	45
6	Johtopäätökset	49
7	Pohdinta	50
	Lähteet	51

Kuvat ja taulukot

Kuva 1. ANDRITZ HHQ -hakku (ANDRITZ, n.d.).....	3
Kuva 2. Materiaalin virtaus hakun ja haketaskun läpi (Rimaila, 2020, s. 43).....	4
Kuva 3. Esimerkki teollisuusverkon keskijänniteosasta (Huotari & Partanen, 1998, Liite 1).7	
Kuva 4. Esimerkki hakkujen kytkeytymisestä teollisuussähköverkkoon.	9
Kuva 5. Matlabin tarjoamia differentiaaliyhtälön ratkaisijoita (Mathworks, n.d.-b).	14
Kuva 6. Oikosulkumoottorin sijaiskytkennät: (a) yksihäkkimalli (b) kaksihäkkimalli (Monjo ym., 2015, s. 2).....	18
Kuva 7. Yksi- ja kaksihäkkimallien simuloitua momentti- ja virtakäyriä sekä mitatut arvot (Monjo ym., 2015, s. 2).	19
Kuva 8. Hakkukäytön ja sitä syöttävän teollisuussähköverkon matemaattisen mallin ylin taso.	22
Kuva 9. Teollisuussähköverkon malli.	23
Kuva 10. Keskijänniteverkkolohkon (10 kV industrial network) parametointi.	24
Kuva 11. 10 kV Bus -lohkon parametointi.....	24
Kuva 12. Jakelumuuntajalohkon parametointi.	25
Kuva 13. Resisttiivisen kuormalohkon parametointi.	26
Kuva 14. Pienjännitekaapelia kuvaavan Pi section -lohkon parametointi.....	27
Kuva 15. Moottorikontaktorin parametointi.	28

Kuva 16. Jännitteenmittauslohkon rakenne.	28
Kuva 17. Jännitteenaleneman laskenta.	29
Kuva 18. Hakun monimoottorikäytön malli.	30
Kuva 19. Asynchronous Machine -lohkon parametointi-ikkunat.	31
Kuva 20. Moottorin parametrien estimointi kaksihäkki-mallilla.....	31
Kuva 21. Moottorin momenttikäyrän simuloinnin konfiguraatio.	32
Kuva 22. Yksi- ja kaksihäkkimallien simuloitut momenttikäyrät.	33
Kuva 23. Todellisen moottorin momentti- ja virtakäyrät suhteellisina arvoina (ABB, julkaisematon datalehti, 2008).....	33
Kuva 24. Hakun mallinnus.	34
Kuva 25. Puhallinefektin mallinnus Fan load – Aero Drag -lohkolla.....	35
Kuva 26. Square law -lohko.	35
Kuva 27. Simuloinnin tulos 300 MVA:n verkolla ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajilla ...	38
Kuva 28. Keskijänniteverkon ja 1-moottorin jännitteiden alenemat [%] sekä tehollisarvot [V] simuloitaessa 300 MVA:n verkkoa ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajia.....	40
Kuva 29. Simuloinnin tulos 300 MVA:n verkolla ja 2 x 1000 kVA:n jakelumuuntajilla ...	41
Kuva 30. Simuloinnin tulos 300 MVA:n verkolla ja 2 x 4000 kVA:n jakelumuuntajilla ...	42
Kuva 31. Simuloinnin tulos 100 MVA:n verkolla ja 2 x 1000 kVA:n jakelumuuntajilla ...	43
Kuva 32. Simuloinnin tulos 100 MVA:n verkolla ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajilla ...	44

Kuva 33. Simuloinnin tulos 100 MVA:n verkolla ja 2 x 4000 kVA:n jakelumuuntajilla... 45

Kuva 34. Simuloinnin tulos 1000 MVA:n verkolla ja 2 x 1000 kVA:n jakelumuuntajilla .46

Kuva 35. Simuloinnin tulos 1000 MVA:n verkolla ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajilla. 47

Kuva 36. Simuloinnin tulos 1000 MVA:n verkolla ja 2 x 1600 kVA:n jakelumuuntajilla. 48

1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä sovelletaan sähkövoimatekniikan matematiikkaa työelämälähtöiseen ongelmanratkaisuun. Kirjoittajan pitkä käytännön kokemus mallinnettavan laitteen parissa yhdistyy Hämeen ammattikorkeakoulun sähköpätevyysopintojen yhteydessä hankittuun teoreettiseen sähkötekniikan osaamiseen. Kiinnostus aiheeseen syntyi tarpeesta soveltaa opittua käytäntöön sekä toisaalta työelämässä havaittuun tarpeeseen.

Opinnäytetyön toimeksiantajana on kirjoittajan pitkäaikainen työnantaja ANDRITZ Oy:n Lahdessa toimiva puunkäsittelyn osaamiskeskus. ANDRITZ Oy on yksi maailman johtavista sellu- ja paperiteollisuuden laite-, järjestelmä- ja palveluntuottajista. Se kuuluu kansainväliseen ANDRITZ-konserniin, jonka emoyhtiön kotipaikka on Itävalta.

1.1 Työn tausta ja tutkimusongelma

Selluteollisuuden hakkeen valmistukseen käytettävässä ANDRITZ HHQ -hakussa käytetään yleisimmin neljästä suuritehoisesta pienjännitemoottorista koostuvaa käyttöyksikköä. Moottorit kytketään käynnistettäessä suoraan syöttävään teollisuussähköverkkoon (nk. DOL, eli Direct On Line -starting). Syöttävän verkon ja erityisesti jakelumuuntajien mitoituksen helpottamiseksi olisi tärkeä tuntea nykyistä paremmin sähkökäytön verkkovaikutus.

Hakun massiivisuuden takia sillä on suuri hitausmomentti, mikä tekee käynnistystilanteesta raskaan ja pitkäkestoisen. Toinen mitoittava tilanne syntyy maksimikapasiteetilla suurihalkaisijaisia ja pitkiä puita hakettaessa, jolloin mottoreiden kierrosnopeus voi hetkellisesti pudota maksimimomentin (ns. kippimomentti) alapuolelle.

ANDRITZ HHQ -hakku on ollut markkinoilla jo yli 20 vuotta, ja sen vaatimukset itse käyttökoneistolle ja moottoreille tunnetaan hyvinkin tarkkaan. Sen sijaan moottoreiden käynnistyksen ja hetkellisen ylikuormituksen verkkovaikutusta ei ole ANDRITZilla juurikaan tutkittu, eikä laitteen, sähkökäytön ja sähköverkon kokonaisuutta ole mallinnettu. Syy tähän on saattanut olla toimitusrajapinnassa; tyypillisesti ANDRITZin toimituslaajuuteen kuuluu itse laite ja sen käyttökoneisto sähkömoottoreineen, mutta syöttävä verkko on ollut loppuasiakkaan toteutusta. Tämä on saattanut johtaa loppuasiakkaan verkon

komponenttien ylimitoitukseen. Ylimitoitus ei välttämättä tule koskaan ilmi, koska se ei aiheuta loppukäyttäjälle näkyvää ongelmaa. Kilpailukykyä parantaakseen ja asiakkaita paremmin palvellakseen ANDRITZ Oy näki asian tutkimisen arvoiseksi.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Opinnäytetyön tavoitteena oli mallintaa hakun sähkökäyttö matemaattisesti sekä luoda simulointimalleja erilaisten käyttötilanteiden varalle. Simulointimallien tuli olla riittävän helppokäyttöisiä, jotta niitä voidaan soveltaa joustavasti eri hakkumalleilla ja käyttötilanteissa. Mallinnus rajattiin tässä työssä yhteen yleisesti käytettyyn hakkumalliin, yhteen moottorikokoon ja yhdelle puulajille. Tällaiselle hakulle kehitettyä mallia simuloitiin työssä varioiden syöttävän sähköverkon oikosulkutehoa ja jakelumuuntajan näennäistehoa.

Työ koostuu teoreettisesta osasta ja käytännön mallinnuksesta. Teoreettisessa osassa pyrittiin kirjallisuustutkimuksen ja internethakujen avulla selvittämään matemaattinen pohja mekaanisen laitteen, käyttömoottorien ja moottoria syöttävän verkon komponenttien mallinnukseen. Käytännön mallinnuksessa mallinnettiin Matlab/Simulink -ohjelmiston avulla em. sähkömekaaninen laitekokonaisuus riittävällä tarkkuudella. Riittävä tarkkuus tarkoittaa tässä yhteydessä simulointitulosten riittävää oikeanmukaisuutta tekniskaupallisten päätösten tekemiseen. Esimerkkinä tästä on jakelumuuntajan näennäistehon valinta standardikokojen mukaan.

2 Mallinnettava laitekokonaisuus

Opinnäytetyössä esitellään aluksi mallinnettavaa laitekokonaisuutta: itse puunkäsittelylaitetta (hakkua), sen käyttökoneistona toimivaa neljästä sähkömoottorista ja vaihdelaatikosta koostuvaa monimoottorikäyttöä sekä moottoria syöttävän sähköverkon komponentteja.

2.1 Hakku

Hakku on laite, jolla kuoritut puupöllit haketetaan puuhakkeeksi. Puuhakkeen ensisijainen käyttö sellu- ja paperiteollisuudessa on massan valmistus, mutta haketta voidaan käyttää

myös esimerkiksi tuotekaasun valmistukseen haluttaessa korvata fossiilisia polttoaineita massanvalmistuksen muissa prosesseissa. Tuotteen muita käyttökohteita löytyy mm. kuitulevyteollisuudesta ja biojalostamoilta. Hakun pääosat ovat massiivinen teräkiekko, akseli laakerointineen sekä vaihdelaatikosta ja sähkömoottoreista koostuva käyttökoneisto. Kuvassa 1 näkyy ANDRITZ HHQ -hakku sijoitettuna prosessiin. Avatusta terähuoltoluukusta (2) näkyy osa teräkiekosta.

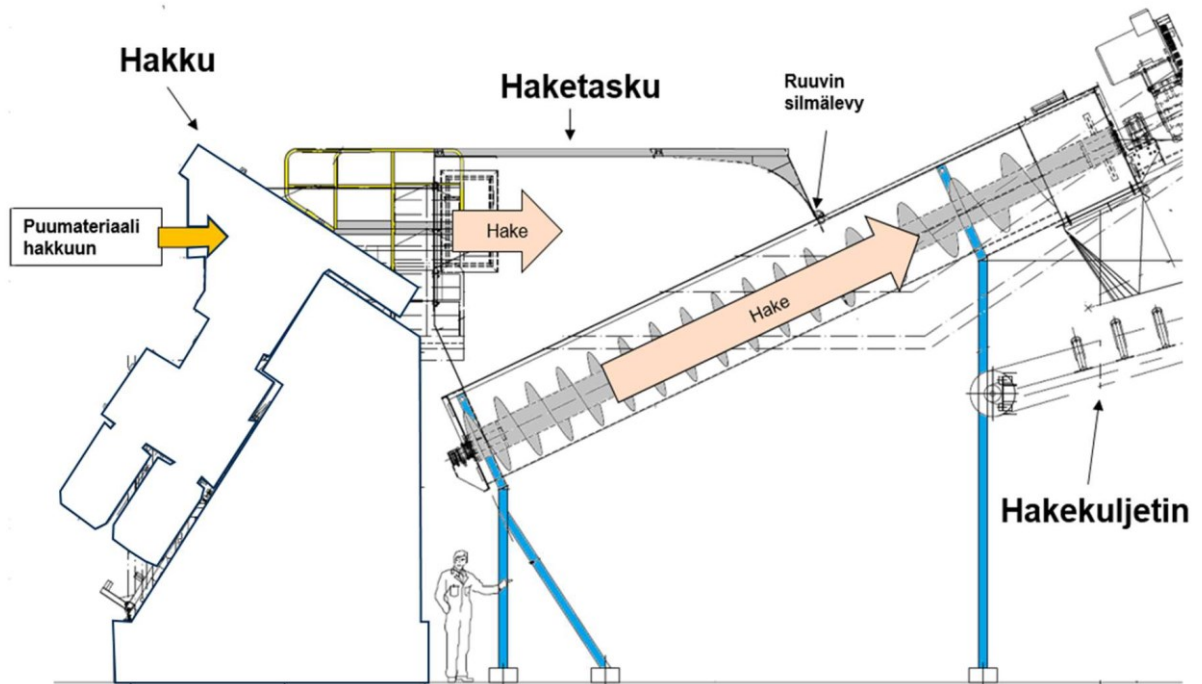
Kuva 1. ANDRITZ HHQ -hakku (ANDRITZ, n.d.).



Hakun suuri-inertiainen kiekko ja sen käyttöakseli on kytketty suoraan vaihdelaatikon toisioakseliin ilman nestekytkintä, mikä aiheuttaa sähkömoottoreille käynnistystilanteessa suuren vastamomentin heti käyntiinlähdön yhteydessä. Kierrosluvun noustessa moniteräinen hakun kiekko lastuaukkoineen alkaa toimia myös hieman puhaltimen tapaan, mistä aiheutuu pyörimisnopeuden neliöön suoraan verrannollinen vastamomentin komponentti. Tämä komponentti ei liene kovin merkittävä käynnistystilanteessa kiekon hitausmomentin dominoidessa, mutta se jää määrääväksi alkukiihdytyksen loputtua. Käynnistyksen aikana ei, laakeroinnin ja vaihdelaatikon kitkaa lukuun ottamatta, esiinny muita vastamomentin komponentteja.

Puhallinefektin aiheuttama vastamomentin suuruus riippuu hakun kierrosluvun lisäksi myös siitä, pääseekö ilma virtaamaan vapaasti hakun jälkeisen ns. haketaskun kautta ympäristöön. Haketasku ja materiaalin (hakkeen ja/tai ilman) virtausta hakun ja haketaskun muodostaman kokonaisuuden läpi on havainnollistettu kuvassa 2.

Kuva 2. Materiaalin virtaus hakun ja haketaskun läpi (Rimaila, 2020, s. 43).



Mikäli haketaskun ruuvikuljetin on pysäytetty heti haketuksen loputtua, toimii taskuun jäänyt hake tulppana estäen läpivirtauksen. Jos taas tasku on niin tyhjä, että virtaus taskuruuvin silmälevyn läpi on mahdollista, vastaa tilanne jossain määrin suuri-inertiaisen puhaltimen käynnistystä avoimeen virtauskanavaan. Tällaisia tapauksia on Henk de Swardt vertaillut julkaisussaan ResearchGate yhteisöpalvelussa (de Swardt, 2007). Eniten kuormittava tilanne on avoimeen kanavaan käynnistys, eli hakun tapauksessa käynnistys haketaskun ollessa täysin tyhjä. Käynnistystilannetta tutkitaan tässä opinnäytetyössä tämän vaikeimman tilanteen kannalta.

ANDRITZ HHQ -hakusta on markkinoilla useita eri kokoluokkia. Tähän opinnäytetyöhön valittiin tutkittavaksi EXL-18 -hakku, joka on varustettu 4x315 kW:n nelinapisilla (1500 rpm) moottoreilla.

2.2 Hakun monimoottorikäyttö

Yleisin ANDRITZ HHQ -hakun käyttökoneisto koostuu neljästä samankokoisesta ja -tehoisesta pienjänniteoikosulkumoottorista. Kaikki neljä moottoria ovat laippa-asenteisia ja kytketty yhteiseen vaihdelaatikkoon joustavilla kytkimillä.

Kuormittamattoman hakun käynnistys tapahtuu yleensä kahdella moottorilla. Näin pyritään pienentämään suoran käynnistuksen aiheuttamaa verkkovaikutusta ja pitämään käynnistysenaikainen jännitteenalenema hyväksyttävällä tasolla. Käynnistysaika riippuu edellisessä luvussa selostetun hitausmomentin ja puhallinefektin aiheuttaman vastamomentin lisäksi syöttävän verkon kapasiteetista sekä moottoreiden kyvystä tuottaa momenttia. Käynnistysaika ei saisi venyä liian pitkäksi, koska suorassa käynnistyksessä jatkuvan tilan käynnistysvirta voi nousta yli seitsenkertaiseksi nimellisvirtaan nähden nimellisjännitteellä. Tämä puolestaan aiheuttaa moottorin voimakasta lämpenemistä, erityisesti roottorisauvoissa, roottorin oikosulkurenkaissa ja staattorikämmityksessä (de Swardt, 2007).

Hakun käynnistuksen jälkeen voidaan aloittaa puiden syöttö haketukseen. Puiden syöttö hakkuun ei ole koskaan moottoreiden kuormituksen suhteen tasaista. Vaihtelua aiheuttaa puuraaka-aineen dimensiovaihtelut ja edeltävän puunkäsittelyprosessin, kuorinnan ja epäpuhtauksien erottelun, hetkelliskapasiteetin vaihtelu. Sähkömoottoreille on määritelty ns. normaalikäyttötavat (engl. Duty type), joilla pyritään kuvaamaan erilaisia kuormitustilanteita. Käyttötapoja on yhdeksän ja ne on nimetty S1-S9, jossa esim. S1 tarkoittaa jatkuvaa käyttöä, S2 lyhytaikaista käyttöä jne. (Hietalahti, 2013, s. 20). Määriteltäessä hakkumoottorin normaalikäyttötapaa päädytään tapaan S9, eli ”käyttö vaihtelevalla kuormalla ja nopeudella”. Vaihteleva nopeus ei tarkoita tässä yhteydessä taajuusmuuttajalla tapahtuvaa nopeuden muutosta vaan moottoreiden nopeuden laskua puuta hakettaessa syntyvän suuren vastamomentin vuoksi.

2.3 Moottorikäyttöä syöttävän sähköverkon komponentit

Suurissa teollisuusverkoissa on tyypillisesti oman sähköntuotannon generaattoreita, paljon pyörivää moottorikuormaa sekä liityntä yleisen sähköverkkoon. Jännitetasoja on useita ja

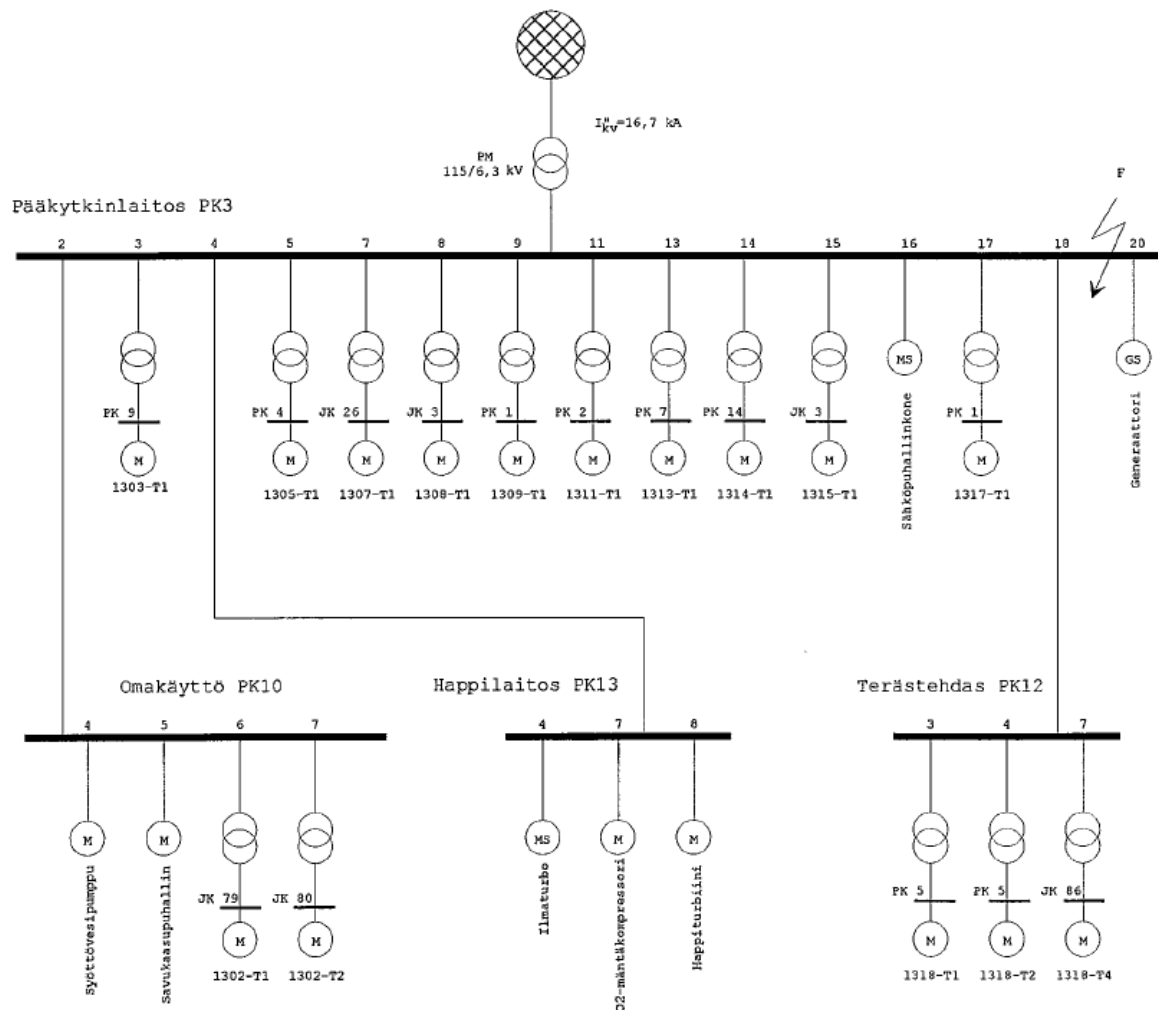
näiden välillä eri tehoisia muuntajia. Yleiseen sähköverkkoon liityntä on Suomessa tyypillisesti 110 kV:n suurjännitteellä. Tehtaan sisäisinä jakeluverkkoina toimivat keski- ja pienjänniteverkot, joissa molemmissa voi edelleen olla käytössä useita eri jännitetasoja. Erityisesti vanhemmilla tehtailla voi pitkän kehityshistoriansa vuoksi olla esimerkiksi sekä 20kV:n, 10kV:n että 6kV keskijänniteverkkoja ja pienjännitejakelussakin useita jännitetasoja, kuten 690 V, 500 V ja 400 V.

Eri verkon osilla oikosulkuvirrat (ja -tehot) voivat vaihdella suurestikin. Oikosulkuvirtojen rajoittamiseksi teollisuusverkot pyritään rakentamaan säteittäisiksi, mutta käyttövarmuuden takaamiseksi myös silmukoituja rakenteita ja kaksoiskiskostoilla varusteltuja keskuksia on yleisesti käytössä. Teollisuusverkkojen ominaispiirteisiin kuuluu tehon keskittyminen pienelle alueelle ja lyhyet jakeluetäisyydet verrattuna yleiseen sähköverkkoon (Hietalahti, 2013, s. 6).

2.3.1 Keskijänniteverkko

Keskijännitteeksi kutsutaan jännitettä, jonka nimellinen tehollisarvo on yli 1 kV ja alle 36 kV (Tieteen termipankki, 2023). Paikallinen teollisuuden keskijänniteverkko koostuu kojeistosta ja siihen liittyvistä kaapeleista. Kojesto on rakennekokonaisuus, joka koostuu kytkentä-, suojaus-, ohjaus ja valvontalaitteista (Elovaara & Haarla, 2011, s. 117). Kuvassa 3 on esimerkki teollisuusverkon 6 kV:n keskijänniteosasta ja liityntä 110 kV yleiseen sähköverkkoon.

Kuva 3. Esimerkki teollisuusverkon keskijänniteosasta (Huotari & Partanen, 1998, Liite 1).



Tässä opinnäytetyössä keskitytään pienjännitemoottorikäyttöön, mutta keskijänniteverkkoa käsitellään riittävässä laajuudessa tutkimustavoitteen saavuttamiseksi. Ida Anttila on käsitellyt opinnäytetyössään Stora Enson Oulun paperitehtaan sähköverkon mallintamista Neplan-ohjelmistolla. Työssään hän on mallintanut yhden 10 kV kojeiston ja laskenut siinä esiintyvät vikavirrat. (Anttila, 2017) Anttilan työssä esitetyjä tuloksia hyödynnetään tässä opinnäytetyössä käyttämällä niitä referenssinä tyyppisestä sellu- tai paperitehtaan keskijänniteverkosta.

2.3.2 Jakelumuuntaja

Jakelumuuntajan tehtävä on muuntaa teollisuussähköverkon keskijännite (Suomessa yleensä 3–20 kV, ulkomailla jopa 35 kV) moottoreilla yleisesti käytettäväksi pienjännitteeksi (tyypillisesti 400–690 V). Muuntajien mitoituksessa on tärkeää tietää mm. syötettävän

kohteen asennettu teho, kuormitus käytön aikana sekä mahdolliset lyhytaikaiset kuormitushuiput, joita voi aiheutua esim. suurten moottorien käynnistyksistä.

Muuntajien mitoituksessa noudatetaan yleisesti standardien IEC 60076 (öljyjäähdytteiset muuntajat) ja IEC 60726 (kuivamuuntajat) ohjeita. Ylimitoituksesta ei yleensä ole havaittavaa teknistä haittaa, mutta liian suuret muuntajat aiheuttavat investointikustannusten nousua sekä tilantarpeen lisääntymistä. Alimitoitettun muuntajan vaikutus sen sijaan näkyy teknisinä ongelmina, kuten ylikuumentumisena ja kuormitettavuuden alenemisena.

2.3.3 Pienjänniteverkko

Teollisuussähköverkon sitä osaa, jossa vaihejännitteen tehollisarvo on alle 1 kV kutsutaan pienjänniteverkoksi. Se koostuu jakelumuuntajan jälkeisestä osista eli moottorikeskuksesta (engl. MCC, Motor Control Center) ja kaapeloinnista tai kiskosillasta muuntajan ja MCC:n välillä sekä toisaalta kaapeloinnista MCC:n ja moottoreiden välillä.

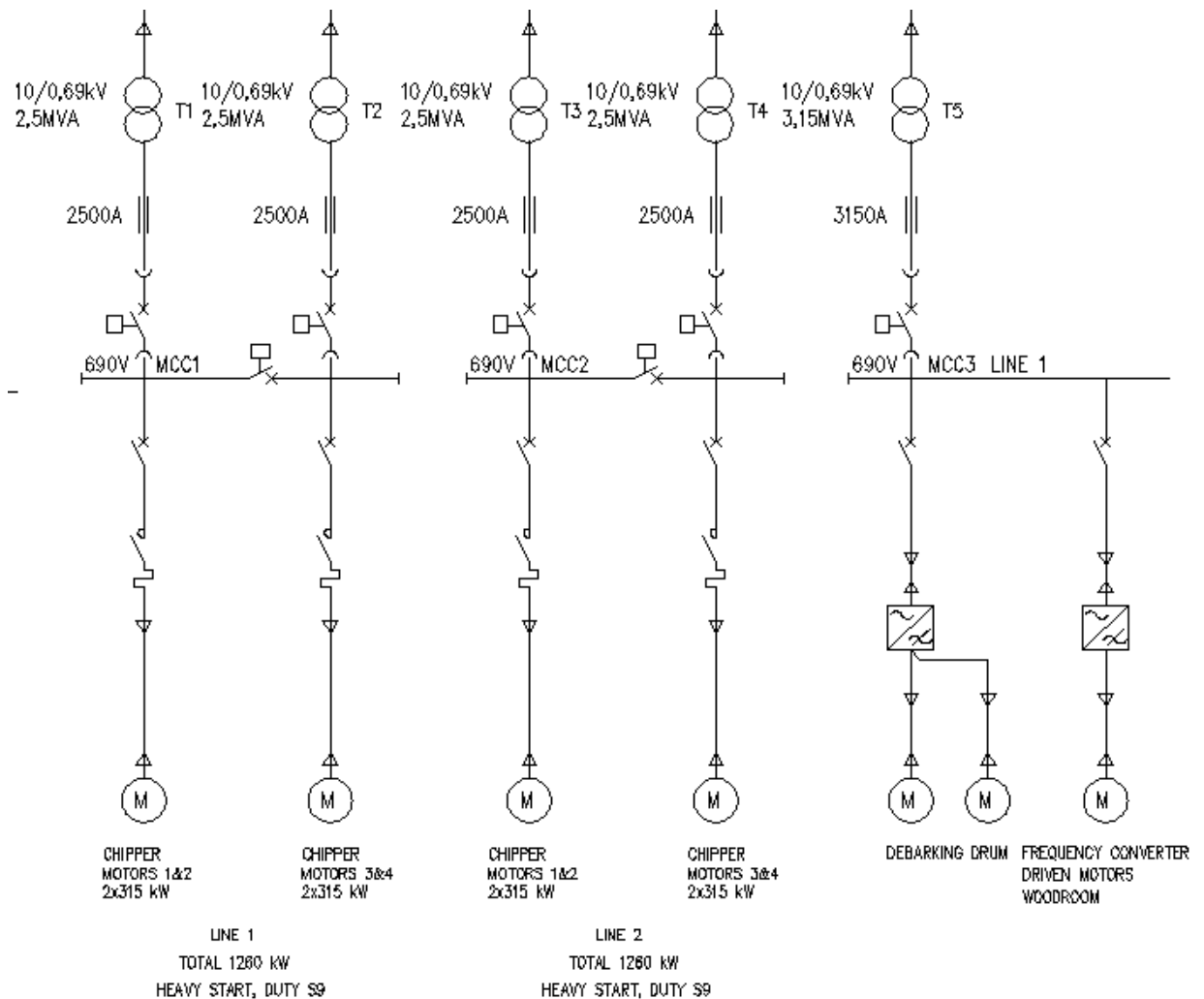
Moottorikeskuksessa muuntajan syöttämä jännite kytketään tulokojeen (yleensä ilmakatkaisija) välityksellä pääkiskostoon, josta jännite haaroitetaan moottorikohtaisille lähtöyksiköille. Lähtöyksikön pääpiiri koostuu yleensä oikosulkusuojasta (kytkinvaroke tai katkaisija), ohjattavasta kytkevästä komponentista (kontaktori) sekä ylikuormitussuojasta (lämpörele tai em. katkaisijaan integroitu ylikuormasuojaja).

Moottorikeskusta syöttävä kaapelointi tai vaihtoehtoisesti virtakiskosto mitoitetaan syöttävän muuntajan nimellisvirran mukaan. Häviöiden minimoimiseksi se pyritään pitämään mahdollisimman lyhyenä sijoittamalla jakelumuuntaja ja moottorikeskus mahdollisimman lähelle toisiaan. Parhaimmillaan päästään alle 10 m etäisyyksiin. Moottoria syöttävä kaapelointi mitoitetaan vastaavasti moottorin nimellisvirran perusteella. Hakkumoottorien kaapelointi ylimitoitetaan yleensä yhtä moottorikokoluokkaa isommaksi, millä pyritään pienentämään toisaalta pitkän ja raskaan käynnistyksen sekä lyhytaikaisten kuormitushuippujen aiheuttamaa jännitteenalenemaa. Hakkukäyttöä syöttävien kaapelien pituus muodostuu teollisuusolosuhteissa väistämättä useiden kymmenien metrien pituiseksi. Tämän opinnäytetyön matemaattisessa mallinnuksessa huomioidaan ainoastaan moottorikaapelien aiheuttama jännitteenalenema. Kaapelointimatkana käytetään tyypillistä arvoa 100 m.

Hakun monimoottorikäytön syöttö teollisuussähköverkosta voidaan suunnitella eri tavoilla. Kaikki yhden hakun moottorit voidaan syöttää joko yhdellä jakelumuuntajalla tai moottorit voidaan jakaa esimerkiksi kahden muuntajan kesken. Jälkimmäisessä tapauksessa on suositeltavaa kytkeä ensimmäisenä käynnistyvät moottorit eri muuntajaan käynnistyksen aiheuttaman jännitteenaleneman pienentämiseksi.

Kuvassa 4 on esitetty eräs toteutus puunkäsittelylaitoksen hakkujen moottoreiden sähkösyötölle. Kuvassa on esitetty kahden hakun, eli yhteensä kahdeksan hakkumoottorin kytkentä, käyttäen neljää vain hakuille varattua jakelumuuntajaa.

Kuva 4. Esimerkki hakkujen kytkemisestä teollisuussähköverkkoon.



3 Matemaattinen mallinnus

Monimutkaisten ja vaikeiden tutkimusongelmien ratkaisemista voi helpottaa mallintamalla ongelmaa matemaattisilla kaavoilla. Tavoitteena on yksinkertaistaa tutkittavaa asiaa ja saattaa se sellaiseen muotoon, joka on ratkaistavissa. Mallin rakentaminen vaatii matematiikan ohella tarvittavien muiden tieteenalojen (esim. fysiikan ja teoreettisen sähkötekniikan) asiantuntemusta, tiedon keräämistä ja käsittelyä, testausta ja joskus myös sivistynyttä arvaamista. (Pohjolainen, 2010, s. 11) Koska malli on aina yksinkertaistus todellisuudesta ei se voi koskaan olla täydellisen tarkka. Mallia voi kutsua hyväksi silloin, kun se on riittävän tarkka tutkittavan ongelman ratkaisuun.

Tietotekniikan ja sitä kautta laskentateknologian valtava kehitys on avannut ja avaa yhä moninaisempia mahdollisuuksia matemaattisen mallinnuksen ja simuloinnin toteuttamiseen. Mallinnukseen ja mallien simulointiin soveltuvia ohjelmistoja on tarjolla paljon sekä kaupallisina että avoimeen lähdekoodiin perustuvina ratkaisuin. Yksi tunnetuimmista teknisen mallinnuksen ja simuloinnin kaupallisia ohjelmia on Mathworks-yhtiön Matlab ja sen graafinen ympäristö Simulink. Simulinkin laajennusosan Simscapen tapaan epäkausaaliseen mallinnukseen perustuva Modelica on The Modelica Association -järjestön kehittämä ja ylläpitämä ilmainen ohjelmointikieli. Muista avoimen lähdekoodin ohjelmistoista mainittakoon myös Kasselin yliopiston kehittämä Pandapower, joka on Python-ohjelmointikielellä toteutettu sähkövoimajärjestelmien analysointiin ja optimointiin tarkoitettu ohjelmisto.

Mallinnus voi pohjautua erilaisiin menetelmiin kuten esimerkiksi kokonaislukumalleihin tai datapohjaisiin malleihin (Silvennoinen, 2010, s. 52; Merikoski ym., 2010, s. 77). Fysikaalisten ilmiöiden mallinnukseen soveltuvat parhaiten ehkä differentiaaliyhtälöt ja niistä johdetut mallit.

3.1 Differentiaaliyhtälömallit ja niiden numeeriset ratkaisumenetelmät

Differentiaaliyhtälömalleja kutsutaan kirjallisuudessa joskus myös dynaamisiksi järjestelmiksi (engl. dynamic system), mikä viittaa siihen että niiden kuvaamat ilmiöt muuttuvat ajan funktiona (Tuomela, 2010, s. 158). Matematiikassa ilmiön muutosnopeutta kuvataan

aikaderivaatalla. Luonnonilmiöitä onkin usein helpompi hahmottaa niiden tekijöiden kautta, jotka vaikuttavat tutkittavan ilmiön muutokseen tai muutosnopeuteen.

Yksinkertainen esimerkki differentiaaliyhtälöstä on:

$$\frac{dy}{dt} = yt,$$

missä y kuvaa tutkittavaa ilmiötä, t aikaa ja d -etuliite tarkoittaa differentiaalia eli muuttujan tai funktion niin äärimmäisen pientä muutosta, että muutos voidaan olettaa lineaariseksi.

Ilmaisua $\frac{dy}{dt}$ voidaan kutsua myös funktion $y = y(t)$:n aikaderivaataksi. Tavallinen differentiaaliyhtälö (engl. ODE, Ordinary Differential Equation) sisältää tuntemattoman yhden muuttujan funktion ja sen derivaatan tai derivaattoja. Derivaatasta päästään haluttuun yhtälöön integroimalla se riippumattoman muuttujan t suhteen.

Differentiaaliyhtälön ratkaisut ovat funktioita, eli tehtävänä on etsiä kaikki funktiot $y(t)$ jotka toteuttavat alkuperäisen yhtälön. Monia tekniikan- ja luonnonilmiöitä voidaan kuvata eksponentti- ja logaritmfunktioilla sekä trigonometrisillä sini- ja kosinifunktioilla. (Jyväskylän Yliopisto, n.d.) Yllä esitetyn yksinkertaisen differentiaaliyhtälön ratkaisuksi löytyy eksponenttifunktio:

$$y(t) = c_1 e^{\frac{t^2}{2}},$$

joka pätee millä tahansa vakion c_1 arvolla. Mikäli funktion alkuarvo $y(0)$ tiedetään, puhutaan alkuarvotehtävästä. Jos voidaan olettaa funktion olevan ainakin kerran jatkuvasti derivoituva, tämä takaa että ratkaisu on olemassa ja ainakin pienellä aikavälillä yksikäsitteinen (Tuomela, 2010, s. 166).

Laajojen fysikaalisten järjestelmien matemaattisessa mallinnuksessa tarvitaan yleensä useita yhtälöitä ja päädytään yhtälöryhmiin. Kuten yhtälöryhmien ratkaisussa yleisesti, myös differentiaaliyhtälöryhmien ratkaisussa on luontevaa käyttää matriisilaskennan menetelmiä. Jos tällaisten yhtälöryhmien kaikki yhtälöt eivät sisällä derivaattoja puhutaan differentiaalisalgebraalisista yhtälöryhmistä (engl. DAE, Differential-Algebraic Equations) (Ascher & Petzold, 1998, s. 12).

Alkuarvotehtävässä tunnetaan sekä järjestelmän tilan muutosta (ajan suhteen) kuvaavat yhtälöt että mallinnettavan järjestelmän tila alkuhetkellä, ja tehtävänä on selvittää järjestelmän tila myöhemmällä ajan hetkellä. Tällaiselle alkuarvotehtävälle ei välttämättä ole helppo löytää analyttistä ratkaisua, vaan on turvauduttava numeeriseen ratkaisuun. Matemaattisten ongelmien ja siten myös differentiaaliyhtälömallien ratkaiseminen tehdään nykypäivän insinööriyössä käytännössä aina tietokoneilla aivan yksinkertaisimpia tapauksia lukuun ottamatta. Käytännön teknisten ongelmien ratkaisu ei toisaalta useinkaan vaadi yhtälöiden täydellistä analyttistä ratkaisua, vaan tullaan toimeen riittävän tarkkoilla likiarvoilla. Tietokoneiden käyttämät numeeriset menetelmät, kuten iteraatio ja diskretointi, nopeuttavat lopputulokseen pääsemistä ja auttavat saamaan riittävän tarkan likiarvon. Jos alkuarvotehtävä ratkaistaan numeerisesti, otetaan lähtökohdaksi tunnettu alkuarvo esim. y_0 ja aikaväli $t_0 - t_f$, jolta ratkaisu halutaan. Em. aikaväli diskretoidaan, eli jaetaan äärelliseksi määräksi aika-askeleita, ja ratkaisu haetaan iteratiivisesti: Jokaisella aika-askeleella sovelletaan tiettyä algoritmia edellisen askeleen tulokseen (ensimmäisessä vaiheessa alkuarvoa). Lopputuloksena saadaan aikavektori $t=[t_0, t_1, t_2, \dots, t_f]$ ja vastaavasti ratkaisuvektori jokaiselle aika-askeleelle $y=[y_0, y_1, y_2, \dots, y_f]$ (Mathworks, n.d. -a).

Yksinkertaisin algoritmi em. numeeriselle integroinnille on nk. Eulerin menetelmä, jossa oletetaan funktion muutosnopeus (derivaatta) vakioksi koko aika-askeleen aikana (Butcher, 2003, s. 45). Menetelmän virhe riippuu luonnollisesti valitun aika-askeleen pituudesta. Kehittyneempiä numeerisia ratkaisumenetelmiä on kehitetty vuosikymmenten ajan ja käytännön työssä turvaudutaan lähes aina valmiiksi koodattujen algoritmien käyttöön. Tässä opinnäytetyössä käytettävä Matlab-ohjelmisto tarjoaa tavallisten differentiaaliyhtälöiden ratkaisuun useita erilaisia ratkaisijoita, jotka soveltuvat erityyppisten yhtälömallien ratkaisemiseen. Matlabin ratkaisijat voidaan jakaa kolmeen päätyyppiin: nonstiff, stiff ja fully implicit, joiden suomenkieliset vastineet ovat: ei-jäykkä, jäykkä ja täysin implisiittinen. Matemaattisen alan kirjallisuudessa esiintyy stiff-sanalle myös käännös ”kankea” (Piché, 2020, s. 216). Jäykkiin differentiaaliyhtälöihin tai -yhtälöryhmiin ajaudutaan hyvin yleisesti teknillisissä mallinnustehtävissä. Jäykällä tarkoitetaan tässä yhteydessä sitä, että yhtälön ratkaisujen komponenttien aikaskaaloissa ja siten derivaatoissa on suuria eroja (Mäkelä, n.d., s. 221). Tällöin numeerisessa ratkaisussa joudutaan valitsemaan hyvin lyhyt askelpituus numeerisen stabiilisuuden vuoksi, mikä puolestaan kasvattaa laskenta-aikaa ja voi äärimmillään jopa estää laskentaohjelman toiminnan. Jäykälle differentiaaliyhtälöryhmälle

on tyypillistä, että ratkaisun eri komponenttien vaimenemisnopeudet poikkeavat toisistaan voimakkaasti (Haataja ym. 2002, ss. 219–221).

Kuvassa 5 on esitetty taulukkomuodossa Matlab-ohjelmiston differentiaaliyhtälön ratkaisijoita sekä niiden ominaisuuksia. Simulink, joka on Matlabin graafisiin lohkokaavioihin perustuva ohjelmointiympäristö, sisältää automaattisen ratkaisijan valitsijan. Käyttäjän ei yksinkertaisimmissa tapauksissa tarvitse edes kiinnittää asiaan huomiota, mutta monimutkaisempien mallien kanssa voi tulla tilanne, jolloin oikean ratkaisijan valinta jää käyttäjän vastuulle. Tällöinkin ohjelmisto antaa vinkkejä sekä itse ratkaisijan valintaan että mahdollisten muiden parametrien (esim. virhetoleranssien) valitsemiseksi. Asian haasteellisuutta kuvaa se, ettei yksiselitteistä ohjetta voida antaa, vaan käyttäjän panosta edellytetään. Yleensä yrityksen ja erehdyksen kautta löydetään paras kompromissi laskenta-ajan ja tarkkuuden optimoimiseksi.

Kuva 5. Matlabin tarjoamia differentiaaliyhtälön ratkaisijoita (Mathworks, n.d.-b).

Solver	Problem Type	Accuracy	When to Use
ode45	Nonstiff	Medium	Most of the time. ode45 should be the first solver you try.
ode23		Low	ode23 can be more efficient than ode45 at problems with crude tolerances, or in the presence of moderate stiffness.
ode113		Low to High	ode113 can be more efficient than ode45 at problems with stringent error tolerances, or when the ODE function is expensive to evaluate.
ode78		High	ode78 can be more efficient than ode45 at problems with smooth solutions that have high accuracy requirements.
ode89		High	ode89 can be more efficient than ode78 on very smooth problems, when integrating over long time intervals, or when tolerances are especially tight.
ode15s	Stiff	Low to Medium	Try ode15s when ode45 fails or is inefficient and you suspect that the problem is stiff. Also use ode15s when solving differential algebraic equations (DAEs).
ode23s		Low	ode23s can be more efficient than ode15s at problems with crude error tolerances. It can solve some stiff problems for which ode15s is not effective. ode23s computes the Jacobian in each step, so it is beneficial to provide the Jacobian via <code>odeset</code> to maximize efficiency and accuracy. If there is a mass matrix, it must be constant.
ode23t		Low	Use ode23t if the problem is only moderately stiff and you need a solution without numerical damping. ode23t can solve differential algebraic equations (DAEs).
ode23tb		Low	Like ode23s, the ode23tb solver might be more efficient than ode15s at problems with crude error tolerances.
ode15i	Fully implicit	Low	Use ode15i for fully implicit problems $f(t,y,y') = 0$ and for differential algebraic equations (DAEs) of index 1.

Taulukon ratkaisijoiden lisäksi Simulink ohjelmistoympäristöön optiona saatava Simscape-laajennusosa, joka on erikoistunut fysikaaliseen mallinukseen, sisältää erityisen daessc-ratkaisijan. Se on erityisesti differentiaalisalgebrallisille yhtälöryhmille suunniteltu muuttuvalla askelpituudella operoiva ratkaisija (Mathworks, n.d.-c) .

3.2 Mekaanisen laitteen fysikaalinen mallinnus

Mekaanista laitetta mallinnettaessa on tunnistettava sen fysikaaliset ominaisuudet. Yleensä nämä ovat erilaisia laitteeseen vaikuttavia voimia ja energian varastoitumiseen liittyviä ominaisuuksia. Mekaaniseen laitteeseen vaikuttavien voimien aikaansaama liike voi olla lineaarista tai pyörivää ja näiden liikemekaniikkojen eroavaisuus on ymmärrettävä mallinnuksessa. Koska fysikaalisia ominaisuuksia voi periaatteessa löytyä rajaton määrä, on tärkeää tunnistaa niistä tutkimusongelman kannalta oleellimmat. Tässä työssä mallinnettavan laitteen, pyörivän hakun, tapauksessa päädyttiin fysikaalisista ominaisuuksista huomioimaan: sähkömoottorien aikaansaama vääntömomentti, hakun kiekon ja akselin hitausmomentti, laakerien ja voimansiirron kitka sekä haketustapahtuman ja puhallinefektien aiheuttamat kuormitusmomentit.

Tutkimuskohteeksi valitun ANDRITZ EXL-18 -hakkumallin teräkiekon ja akselin massojen sekä halkaisijoiden perusteella laskettu ja vaihdelaatikon välityksien avulla moottoreille redusoitu hitausmomentti (J) on 900 kgm^2 . Laskenta on suoritettu ANDRITZin sisäiseen käyttöön tarkoitettulla ohjelmistolla, jota ei tässä yhteydessä esitellä. Puhallinefektiin vaikuttavan ilmavirtauksen määräksi kyseisellä hakkutyypillä on arvioitu n. $2,0 \text{ m}^3/\text{s}$. Arvio perustuu Joono Rimailan diplomityössään tekemään ilmamäärän arviointiin pienemmän kokoluokan hakulle (Rimaila, 2020. s. 46). Samassa diplomityössä mitattiin myös hakun puhalluksesta aiheutuva ilmanpaineen nousu, joka oli korkeimmillaan 1130 Pa (Rimaila, 2020, s. 98). Näistä arvoista voidaan moottoreilta vaadittava teho P_w nimelliskierrosluvulla laskea käyttäen kaavaa:

$$P_w = \frac{1}{\eta} \cdot Q \cdot p \text{ (Hietalahti, 2013, s. 103)}$$

Kaavassa Q on ilman tilavuusvirtaus, p paineen nousu ja η puhaltimen hyötysuhde.

Hyötysuhteen arvo puhaltimilla on Hietalahden mukaan yleensä $0,3 \dots 0,65$. Hakkua ei ole suunniteltu eikä optimoitu puhaltimeksi, joten voidaan olettaa sen hyötysuhde matalaksi.

Tässä työssä käytetään sille arvoa $\eta = 0,3$. Vaadittavaksi tehoksi saadaan siten

$$P_w = \frac{1}{0,3} \cdot \frac{2,0 \text{ m}^3}{\text{s}} \cdot 1130 \text{ Pa} = 7,533 \text{ kW}$$

Perusmekaniikan säännöistä tiedetään tehon ja momentin keskinäisriippuvuuden noudattavan kaavaa:

$$P = T\omega$$

jossa P on teho, T on momentti ja ω kulmanopeus. Toisaalta tiedämme puhallinefektin aiheuttavan kulmanopeuden neliöön verrannollisen momentin, joten voidaan kirjoittaa kaava:

$$T = k \cdot \omega^2$$

jossa k on tuntematon kerroin, jolla kulmanopeuden neliöstä saadaan momentin arvo. Edelliset kaavat yhdistämällä saadaan k:n arvoksi:

$$\frac{P}{\omega} = k \cdot \omega^2 \rightarrow k = \frac{P}{\omega^3}$$

Teho laskettiin edellä ja nimelliskierrosluku (n_{rpm}) tässä opinnäytetyössä käytettävillä moottoreilla on 1488 rpm (ABB, julkaisematon datalehti, 2008), joka kulmanopeudeksi muutettuna on:

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n_{rpm}}{60} = 155,82 \text{ rad/s}$$

Näin ollen voidaan k ratkaista ja sille saadaan arvoksi:

$$k = \frac{P}{\omega^3} = \frac{7533 \text{ W}}{(155,82 \text{ rad/s})^3} = 1,99 \cdot 10^{-3} \text{ Nms}^2$$

Edellä mainittuja hitausmomentin J ja puhallinefektin momenttikertoimen k arvoja käytetään luvussa 5 kuvatun hakun matemaattisen mallin määrittämisessä. Pyörimisliikettä vastustavan kitkan vaikutus arvioitiin kokemukseräisesti häviävän pieneksi.

Haketustapahtuman aiheuttama kuormitus moottoreille riippuu syötettävästä puumäärästä, puiden dimensioista (halkaisija ja pituus) sekä puuraaka-aineen tiheydestä.

Hakkumoottoreiden mitoituksessa täytyy huomioida sekä haketuskapasiteetti (m^3/h) että suurimman mahdollisen puun halkaisija. Kapasiteettiin vaikuttaa hakun pyörimisnopeus,

valittu hakkeen pituus, puiden keskimääräinen halkaisija sekä suunniteltu syöttökidan täytösaste. Tapauskohtaisesti jokin edellä mainituista asioista nousee merkittävimmäksi ja määrää moottoreiden minimitehon. ANDRITZilla on yritykseen sisäiseen käyttöön tarkoitettu ohjelmisto, jolla moottoreiden mitoitus suoritetaan. Sen suhteen todetaan ainoastaan, että tämän opinnäytetyön kaikissa simuloinneissa käytetään samaa vastamomentin arvoa 33 000 Nm.

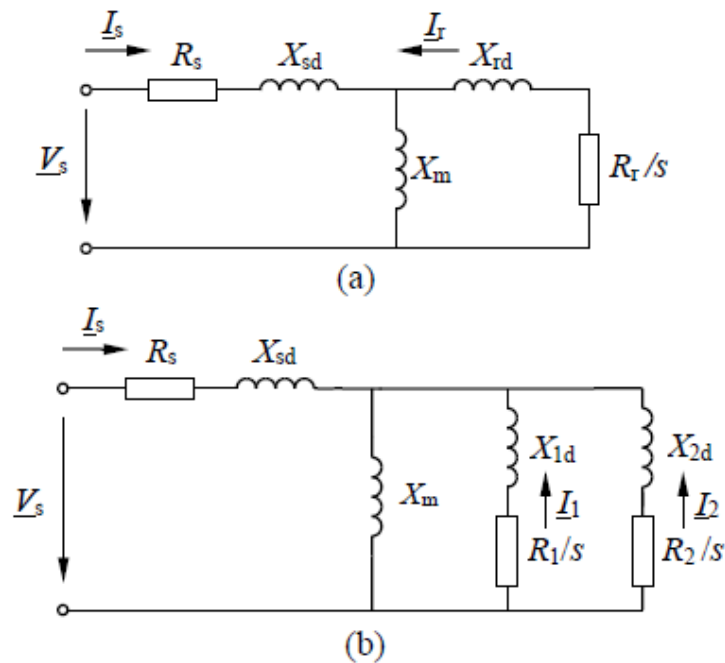
3.3 Moottorin ja sähköverkon komponenttien mallinnus

Hakussa käytettävät pienjännitemoottorit ovat kolmivaiheisia oikosulku- eli induktiomootoreita. Tällaisessa sähkökoneessa sähköteho siirretään koneen kiinteän osan käämityksen, staattorin, kautta pyörivän osan, roottorin, käämitykselle sähkömagneettisen induktion kautta. Käynnistystilanteessa, kun roottori ei vielä pyöri, tilanne muistuttaa siis muuntajaa. Roottorivirran ja staattorikentän välille syntyvä voimavaikutus saa aikaa sähkömagneettisen vääntömomentin, mikä pyrkii pyörittämään roottoria. Mikäli momentti riittää voittamaan laakeroinnista ym. johtuvan lepokitkan ja mahdollisen kuormitusmomentin roottori alkaa pyöriä kiihtyvällä nopeudella. Sähkömagneettinen momentti muuttuu epälineaarisesti kierrosluvun muuttuessa ja saavuttaa huippunsa hieman ennen nk. synkroninopeutta. Synkroninopeus määräytyy syöttävän verkon taajuudesta ja staattorikäämityksen rakenteesta (napaparien lukumäärästä) ja on esim. 50 Hz verkkoon kytketyllä nelinapaisella (kaksi napaparia) koneella 1500 rpm. Roottorin nopeuden ylitettyä maksimimomenttia vastaavan kierrosluvun putoaa sähkömagneettinen momentti jyrkästi. eikä roottori koskaan edes täysin kuormittamattomana saavuta synkroninopeutta. Tämän vuoksi oikosulkumoottoria kutsutaan myös epätahtimoottoriksi. (Hietalahti, 2013, ss. 34–35)

Oikosulkumoottorin mallinnus perustuu sen sähköistä toimintaa vastaavan yksivaiheisen sijaiskytkennän käyttöön. Sijaiskytkennällä ei pyritäkään kuvaamaan moottorin todellista rakennetta vaan mahdollistamaan matemaattinen tarkastelu. Kolmivaiheisen vaihtovirtajärjestelmän muuntaminen yksivaiheiseksi tasavirtajärjestelmäksi onnistuu käyttämällä nk. dqz-muunnosta. Se on sovellus Parkin muunnoksesta, jossa kolmivaihejärjestelmän aikatazon komponentit muunnetaan valitun referenssin mukaan pyörivään dqz-koordinaatistoon. Referenssiksi voidaan oikosulkumoottorin tapauksessa valita joko roottorin tai staattorin pyörimisnopeus tai synkroninopeus (verkon taajuus).

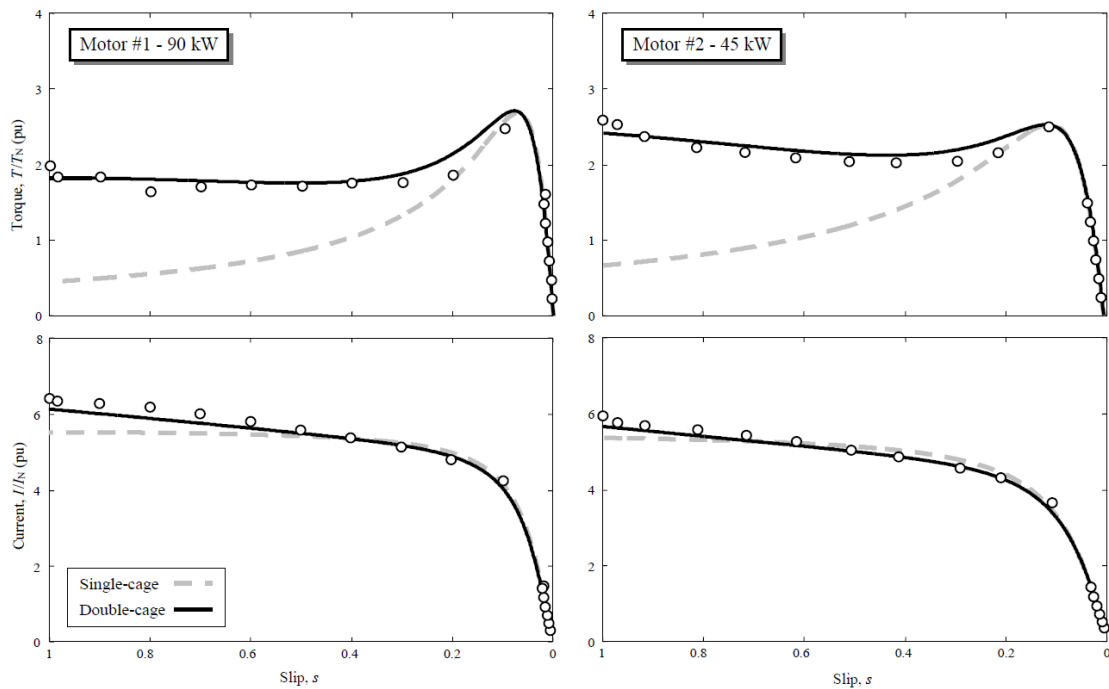
Symmetrisen kuormituksen tapauksessa z-suuntaisten komponenttien arvo on nolla, jolloin puhutaan dq-koordinaatistosta (Mathworks, n.d.-d). Kirjallisuudesta löytyy sekä yksi- että kaksihäkkimoottorin sijaiskytkentöjä. Kuvassa 6 on IEEE:n (Institute of Electrical and Electronics Engineers) julkaisussa esitetyt sijaiskytkennät. IEEE:n tutkimusryhmän esittämän ja mittauksilla todennetun teorian mukaan kaksihäkkimoottorin (engl. double-cage motor) malli toimii luotettavammin koko taajuusalueella (0–150 Hz) verrattuna yksikämmimoottorin malliin. Saman teorian mukaan yksihäkkimoottorikin tulisi mallintaa kaksihäkkisenä. (Monjo ym., 2015, s. 2)

Kuva 6. Oikosulkumoottorin sijaiskytkennät: (a) yksihäkkimalli (b) kaksihäkkimalli (Monjo ym., 2015, s. 2).



Kuvassa 7 on esitetty IEEE:n tutkimusryhmän simuloimat suhteelliset vääntömomentti- ja staattorivirtakäyrät jättämän funktiona kahdelle eri tehoiselle moottorille. Moottorien mallinnuksessa on käytetty kuvan 6 sijaiskytkentöjä ja niistä johdettuja yhtälöitä, jotka on ratkaistu lausekielistä Matlabia käyttäen. Lisäksi kuvan diagrammeissa on ympyröillä esitetty moottorivalmistajan (ABB) tekemät mittaukset.

Kuva 7. Yksi- ja kaksihäkkipmallien simuloitunut momentti- ja virtakäyrät sekä mitatut arvot (Monjo ym., 2015, s. 2).



4 Mallinnus- ja simulointityökalu

Tässä opinnäytetyössä edellä määritelty sähkömekaaninen kokonaisuus mallinnetaan matemaattisesti käyttäen Matlab/Simulink -ohjelmistoa. Ohjelmiston valintaan vaikutti sen maailmanlaajuinen tunnettuus ja pitkä kehityshistoria, joiden ansiosta ohjelmistolle löytyy huomattavan paljon julkisesti saatavilla olevia sovellusesimerkkejä. Myös laaja internetin kautta saatava kollegiaalinen tuki, sekä kysymys-vastaus -sivustojen että YouTube-videoiden muodossa, katsottiin eduksi. Toimeksiantajayrityksellä ANDRITZ Oy:llä oli Matlab/Simulink -ohjelmisto käytössään jo entuudestaan. Optiona myytävät fysikaalisen järjestelmien mallinnuksen Simscape- sekä elektroniikan, mekatroniikan ja sähkövoimatekniikan mallinnuksen Simscape Electrical -laajennusosat hankittiin tätä työtä ja mahdollista myöhempää jatkokehitystä varten.

4.1 Matlab/Simulink -ohjelmisto

Matlab-ohjelmisto on Mathworks-yhtiön kehittämä numeeriseen laskentaan tarkoitettu ohjelmisto, jonka juuret ovat amerikkalaisessa yliopistomaailmassa. Sen ensimmäiset

Fortran-ohjelmointikielellä tehdyt epäkaupalliset versiot oli tarkoitettu numeerisen lineaarialgebran ja matriisilaskennan opetuskäyttöön sen aikaisilla suurtietokoneilla. (Moler, n.d.) Vuonna 1984 perustettu Mathworks yhtiö kaupallisti ohjelmiston ohjelmoimalla sen C-kielellä ja sovittamalla tuolloin yleistyviin IBM:n henkilökohtaisiin tietokoneisiin ja niiden DOS-käyttöjärjestelmään (Chonacky & Winch, 2005, ss. 9–10). Nykyinen Matlab versio toimii viimeisimmillä Windows, MacOS ja Linux käyttöjärjestelmillä (Mathworks, n.d.-e)

Simulink on Matlabin graafinen käyttöliittymä. Se perustuu lohkokaavioihin ja soveltuu erityisesti dynaamisten järjestelmien mallinnukseen, analysointiin ja simulointiin. Lohkot kuvaavat yksinkertaisimmillaan peruslaskutoimituksia ja loogisia operaattoreita, mutta ohjelman sisältämät lohkokirjastot tarjoavat myös hyvin pitkälle kehitettyjä lohkoja mm. differentiaaliyhtälöiden ratkaisuun. Lohkot yhdistetään signaaliviivoilla lohkokaavioiksi ja tuloksia voi analysoida erilaisten näyttö- ja piirturilohkojen avulla. Simulinkissä mallinnus tapahtuu kausaalisesti, eli syy-seuraussuhteiden kautta. Lohkokaaviot on laadittava ikään kuin aikajärjestykseen siten, että tulevaisuus ei voi vaikuttaa nykyhetkeen mutta nykyhetki määrittää täysin tulevaisuuden (Tuomela, 2010, s. 161). Dynaamisten järjestelmien takaisinkytkentöjen tekemisessä on käytettävä viivelohkoja tai siirtofunktioita.

Simscape-tuoteperhe sisältää optiona myytäviä Matlab/Simulink -ohjelmiston laajennusosia, joiden avulla mallinnustyötä voidaan nopeuttaa huomattavasti. Eri Simscape optiot sisältävät valmiita mallilohkoja mm. sähkömoottoreille, muuntajille ja vaihdelaatikoille. Lisäksi on tarjolla erityisesti fyysikaaliseen mallinnukseen soveltuvia lohkoja kuten inertia- ja kitkalohkoja sekä erilaisia anturilohkoja. Simscapen fyysikaalinen mallinnus on Simulinkistä poiketen epäkausaalista. Tämä vaatii mallinnuksessa melkoista ajattelutavan muutosta, kun perinteinen sisäänmeno-funktio-ulostulo -logiikka ei enää sovellu ajatusmalliksi. Simscape lohkojen välisiä kytkentäviivoja ei voi suoraan yhdistää Simulinkin lohkoihin, koska ne kuvaavat ennemminkin fyysikaalisten komponenttien välisiä vuorovaikutuksia kuin signaaleja (Lähteenmäki, 2006, s. 3). Tästä ominaisuudesta on kuitenkin joitain poikkeuksia, kuten anturilohkojen ulostulot. Ne kuvaavat anturin mittaaman suuren signaalia, joka voidaan erityisen PS-Simulink -muunninlohkon avulla muuttaa Simulink-signaaliksi. Vastaavasti Simulinkin signaalit voidaan Simulink-PS -lohkolla ottaa sisääntuloksi joihinkin Simscape-lohkoihin. Kausaalisen ja epäkausaalisen mallinnuksen erojen takia vaatii tällainen

signaalinvaihto erityistä huolellisuutta, jotta vältetään nk. algebrallisten silmukoiden syntyminen.

4.2 Mallinnuksen ja simuloinnin periaate

Tässä opinnäytetyössä mallinnus toteutetaan hyödyntäen mahdollisimman paljon Simscape Electrical -lohkokirjaston valmiita mallilohkoja muodostamalla niistä haluttua järjestelmää riittäväällä tarkkuudella jäljittelevä kokonaisuus. Kokonaisuuden laadinnassa hyödynnetään myös Simulink-lohkoja mm. jännitteenaleneman maksimiarvon laskennassa. Simscapen valmislohkojen käytön edellytyksenä on niiden parametointi vastaamaan mallinnettavaa komponenttia. Parametointia käsitellään yksityiskohtaisemmin luvussa 5 eri simulointikomponenttien käsittelyn yhteydessä.

Joidenkin komponenttien parametroinnissa on mahdollisuus valita SI- tai Per Unit - yksiköiden (lyh. pu) välillä. Per Unit -yksikkö on yleisesti sähkövoimatekniikassa käytetty, tiettyyn perus- tai nimellisarvoon normeerattu yksikkö. Sen etuna on joissain tapauksissa esityksen selkeys, kun esim. jännitteenalenema nähdään suoraan tuloksesta. (Jos jännite ilmoitetaan arvona 0,95 pu, tarkoittaa se jännitteen arvoa, joka on 95 % nimellisestä). Mallinnuksessa pu-yksikön hyödyllisyys tulee esiin erityisesti silloin, jos ei tunneta tarkasti kaikkia vaadittavia parametreja SI-yksikköinä. Esimerkkinä käytetyn muuntajan tapauksessa tiedetään yleisesti, että impedanssien suhteelliset arvot, siis arvot pu-yksikköinä, ovat suurin piirtein vakioita jännitteestä ja tehosta riippumatta (Mathworks, n.d.-f).

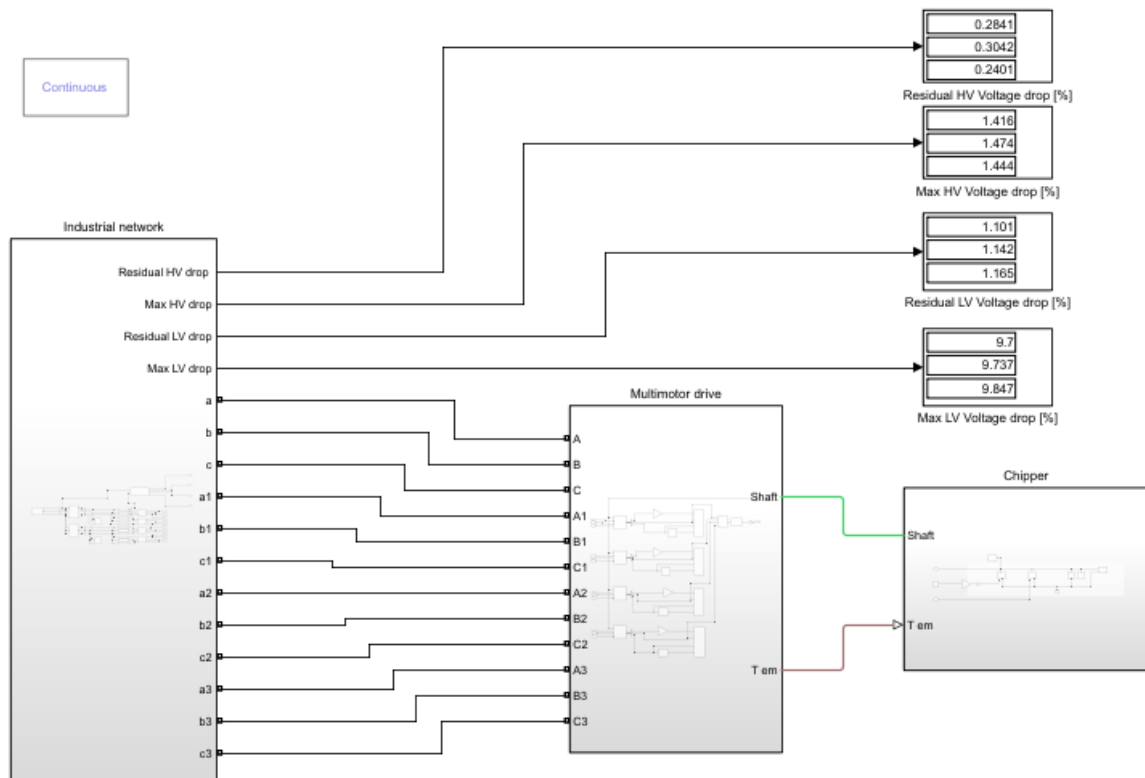
Järjestelmän simuloinnissa valitaan tutkittavat signaalit ja tulostetaan ne piirturi- tai näyttölohkoilla tarkasteltavaksi. Lisäksi täytyy arvioida ja asettaa tarvittava simuloinnin kesto aika sekä valita käytettävä ratkaisija. Valitulle ratkaisijalle ohjelmisto tarjoaa oletusparametrit, joita käyttäjä voi tarvittaessa muuttaa. Tyypillisimmät muutettavat parametrit liittyvät ratkaisijan virhetoleransseihin. Simuloinnin käynnistyksen jälkeen ohjelmisto diagnosoi konfiguroidun järjestelmän, ilmoittaa löytämänsä virheet tai puutteet ja ehdottaa tarvittavia korjauksia tai parametrimuutoksia. Ratkaisijan parametreihin vaikuttava ikkuna avautuu ohjelman nykyversiossa käyttöliittymän oikeasta alalaidasta.

5 Matemaattiset mallit ja niiden parametrit

5.1 Mallinnuksen komponentit

Kokonaisjärjestelmä mallinnetaan ja simuloidaan käytettävän ohjelmiston tarjoaminen mahdollisuuksien ja sen asettamien rajoitusten puitteissa komponenteittain. Järjestelmän laajuuden vuoksi muodostetaan ylätasolle musta laatikko -tyylisiä alijärjestelmiä, joilla mallinnetaan monimutkaiset osakokonaisuudet. Mallin ylimmällä tasolla, joka on esitetty kuvassa 8, näytetään alijärjestelminä teollisuussähköverkko (Industrial network), monimoottorikäyttö (Multimotor drive), hakku (Chipper) sekä niiden väliset kytkennät. Lisäksi ylimmällä tasolla on nähtävissä tulokset jännitteen mittauksesta sekä ns. powergui-lohko, joka näkyy kuvassa Continuous-nimellä. Alijärjestelmien mallinnuksessa on edelleen käytetty paikallisia alijärjestelmiä, mutta varsinainen mallinnus suoritetaan aina Simulinkin ja Simscapein valmiilla lohkoilla. Lausekielistä ohjelmointia pyrittiin välttämään visuaalisuuden säilyttämiseksi, joskin mahdollisuus siihen olisi ollut erityisellä Matlab function -lohkolla.

Kuva 8. Hakkukäytön ja sitä syöttävän teollisuussähköverkon matemaattisen mallin ylin taso.



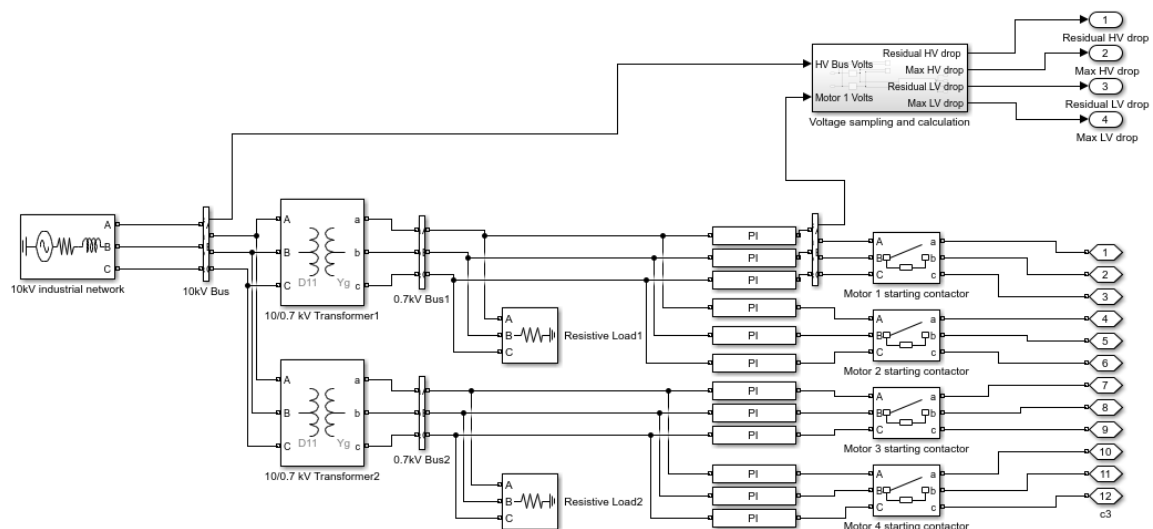
Tutkimusongelman määrittelyssä tunnistettiin kaksi erilaista tilannetta: hakun käynnistys ja maksimikuormitus. Malli pyrittiin rakentamaan niin, että molemmat tilanteet saadaan mahtumaan mahdollisimman lyhyeen simulointiaikaan ja siten esittämään tulokset yhdessä käyrästäössä.

Powergui-lohko on Simscape Electrical -laajennusosan edellyttämä lohko, jossa määritellään mm. piirien ratkaisuun käytettävä menetelmä: Continuous, Discrete, Phasor tai Discrete phasor. Näistä Continuous-menetelmä käyttää muuttuvan aika-askeleen menetelmää, joka soveltuu parhaiten tämän opinnäytetyön tutkimusongelman ratkaisemiseen.

5.1.1 Teollisuussähköverkko

Teollisuussähköverkko koostuu keskijänniteosasta, jakelumuuntajista sekä pienjännitteen jakelusta. Verkon mallinnus on esitetty kuvassa 9.

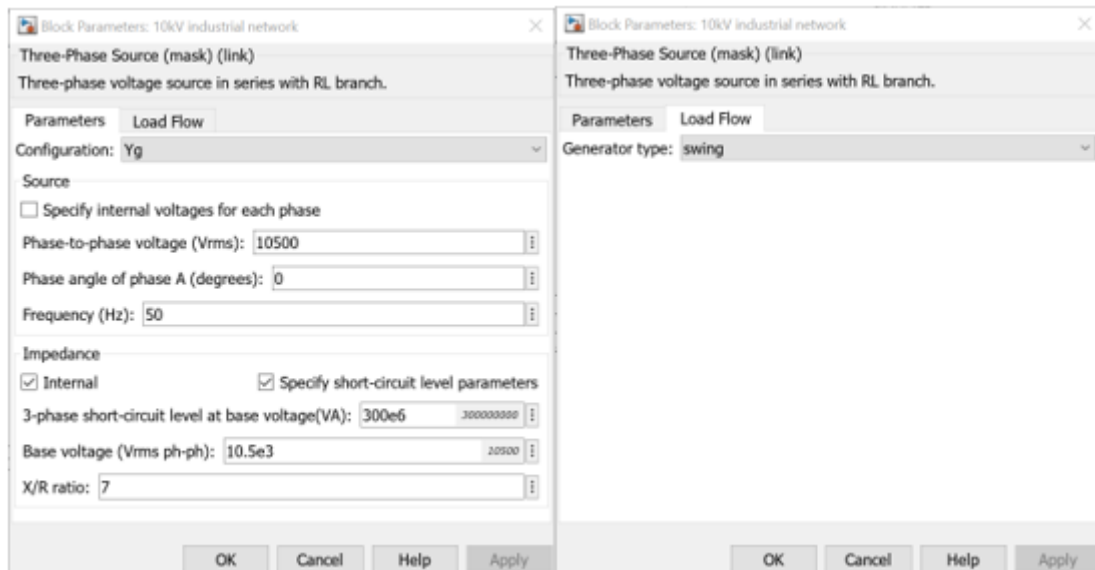
Kuva 9. Teollisuussähköverkon malli.



Keskijänniteosa mallinnetaan käytännössä yhdellä graafisella loholla, jonka nimi Simscapen kirjastossa on Three-Phase Source. Kuvassa se näkyy nimellä "10 kV industrial network". Tällä loholla voidaan parametroida tutkittavan verkon jännite, taajuus, oikosulkuteho sekä X/R-suhde. Viimeksi mainittu tarkoittaa piirin reaktanssin ja resistanssin suhdetta, mikä vaikuttaa suurimman mahdollisen oikosulkuvirran hetkellisarvon suuruuteen (Huotari & Partanen, 1998, ss. 23–24). Keskijänniteverkon parametointi on esitetty kuvassa 10.

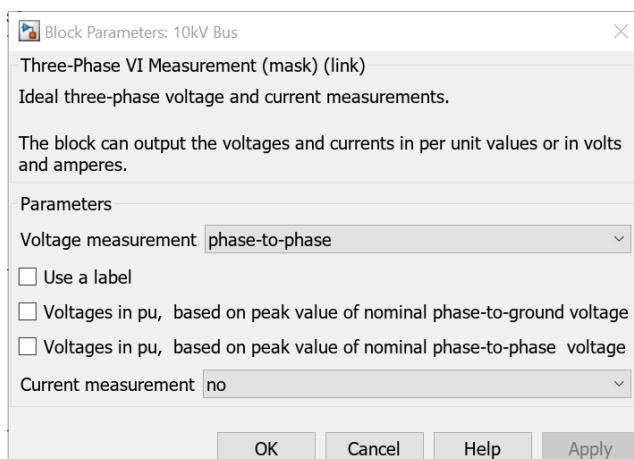
Parametroinnissa on käytetty pohjana Stora-Enson Oulun paperitehtaan verkon osaa, ja sille laskettuja arvoja (Anttila, 2017, liite 4/1). Keskijänniteverkon oikosulkutehoksi ensimmäiseen simulointiin valittiin 300MVA. Tätä tehoa varioitiin seuraavissa simuloinneissa tarkoituksena selvittää sen vaikutusta hakun käynnistysaikaan ja kuormitettavuuteen sekä verkon jännitteenalenemiin.

Kuva 10. Keskijänniteverkkolohkon (10 kV industrial network) parametointi.



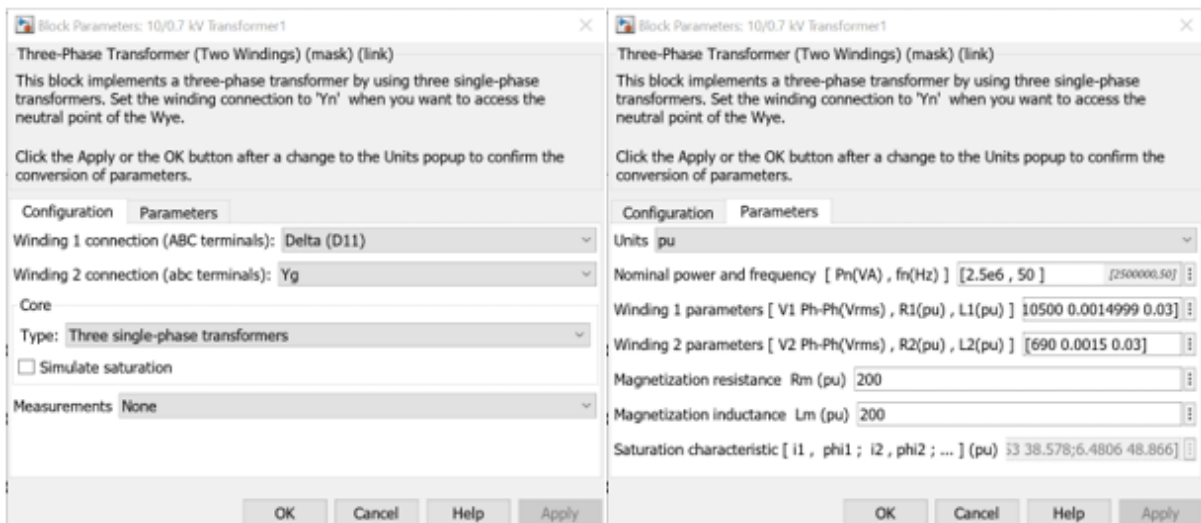
Välittömästi keskijänniteverkkolohkon oikealla puolella on 10 kV Bus -lohko, jota käytetään jännitteen mittaukseen ja selventämään mallin rakennetta. Sen melko yksinkertainen parametointi on esitetty kuvassa 11.

Kuva 11. 10 kV Bus -lohkon parametointi.



Hakkua syöttävän pienjänniteverkon rakenne mallinnetaan luvussa 2.3.3 esimerkkinä esitellyn rakenteen mukaisesti: Käytetään kahta identtistä jakelumuuntajaa, joilla keskijännite muunnetaan kahdeksi 690 V pienjänniteverkoksi. Muuntajien parametroidussa hyödynnetään luvussa 4.2 esitettyä pu-yksikköjärjestelmää. Sen ansiosta käyttäjän parametroitavaksi jää ainoastaan muuntajien kytkentäryhmä, näennäisteho sekä ensiö- ja toisiojännitteet. Kuvasta 12 selviää ensimmäisessä simuloinnissa käytettyjen muuntajien parametrit: Kytkentäryhmänä Dyn11, näennäisteho 2,5 MVA, ensiöjännite 10 500 V ja toisiojännite 690 V. Näistä muut arvot pidetään muuttumattomina myöhemmissä simuloinneissa, mutta muuntajien näennäistehoa varioidaan yleisesti markkinoilla saatavissa olevien kokoluokkien mukaan. Tavoitteena on löytää optimaaliset muuntajakoot eri tehoisille keskijänniteverkoille.

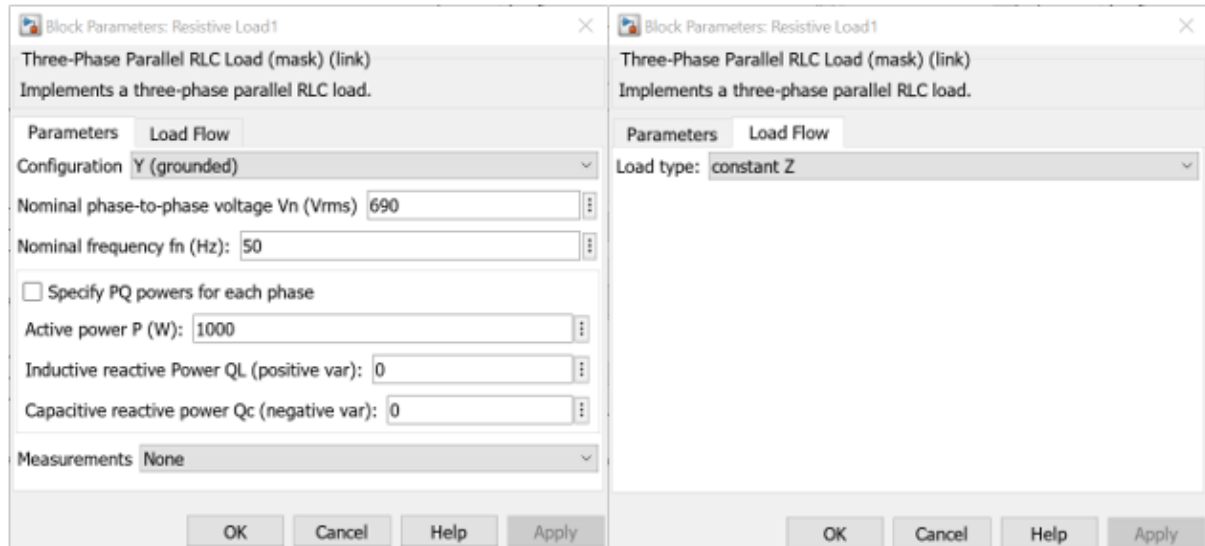
Kuva 12. Jakelumuuntajalohkon parametointi.



Muuntajien jälkeiset 0,7 kV Bus -lohkot eivät varsinaisesti tee mitään; ne ovat mukana vain helpottamassa verkkorakenteen hahmottamista. Lohkojen parametointi on kuvan 12 kaltainen, mutta ilman jännitteenmittausta. Pienjännitteeseen on mallissa kytketty pienet resistiiviset kuormat (1 kW) ohjelman toimivuuden vaatimuksesta. Muuntajalohkon kytkeminen myöhemmin käytettävään induktiiviseen moottorilohkoon ilman rinnalle

kytkettyä parasiittistä resistanssia aiheuttaa simulointivaiheessa järjestelmään numeerista värähtelyä (Mathworks, n.d.-g). Resistanssilohkoilla ei sinänsä pyritä simuloimaan mitään. Niiden parametointi on esitetty kuvassa 13.

Kuva 13. Resistiivisen kuormalohkon parametointi.



Edelleen mallissa oikealle siirryttäessä nähdään pienjännitekaapelointia mallintavat Pi section -lohkot. Todellisuudessaan kaapelit kytketään moottorikontaktorien jälkeen, mutta ohjelman toimivuuden kannalta lohkot on täytynyt sijoittaa tähän kohtaan.

Jännitteenaleneman laskennan kannalta kaapelin sijoituksella malliin ei ole merkitystä, kunhan jännitteenmittaukset sijoitetaan oikein. Kaapelin parametroinnilla määritellään sen pituus sekä resistanssi, -induktanssi ja -kapasitanssiarvot kilometriä kohti. Tässä opinnäytetyössä on käytetty moottorikaapelointiin 3½-johtimista MCMK 3x185/95 -kuparivoimakaapelia. Jokaiselle moottorille tarvitaan kaksi tällaista kaapelia rinnankytkettynä. Kaapelin kilometrikohtaiset arvot saatiin valmistajan datalehdestä (Prysmian Group, 2018) ja niiden perusteella laskettiin rinnankytkettyjen kaapelien yhteisarvot. Datalehden arvot on ilmoitettu vaihejohdinta kohti ja myös mallissa jokainen vaihe esitetään omana Pi section -lohkoon. Kuvassa 14 on nämä arvot ja kaapelin pituus parametroituna Pi section -lohkoon.

Kahden rinnankytketyn johtimen resistanssi kilometriä kohti:

$$R_{1||2} = \frac{R1 \cdot R2}{R1+R2} = \frac{0,12 \cdot 0,12}{0,12 + 0,12} = 0,06 \text{ } \Omega/\text{km}$$

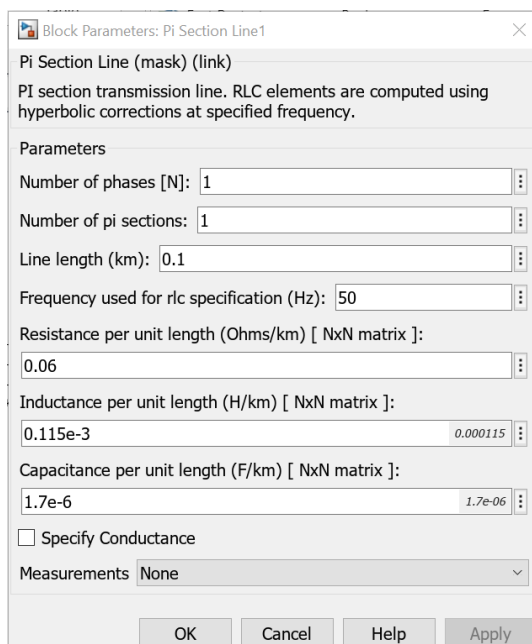
Kahden rinnankytketyn johtimen induktanssi kilometriä kohti:

$$L_{11|2} = \frac{L1 \cdot L2}{L1+L2} = \frac{0,23 \cdot 0,23}{0,23 + 0,23} = 0,115 \text{ mH/km}$$

Kahden rinnankytketyn johtimen kapasitanssi kilometriä kohti:

$$C_{11|2} = C1 + C2 = 0,85 + 0,85 = 1,7 \text{ } \mu\text{F/km}$$

Kuva 14. Pienjännitekaapelia kuvaavan Pi section -lohkon parametointi.

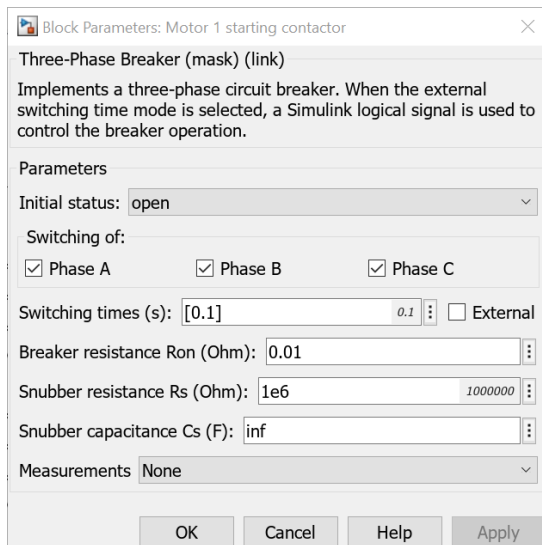


Viimeisinä komponentteina teollisuussähköverkkoa kuvaavan alijärjestelmän ylätasolla ovat moottorikontaktorit. Niihin on parametroidu käynnistyssekvenssi siten, että moottorit M1 ja M4 käynnistyvät ensin kiihdyttäen nimelliskierrosnopeuteen. Arvioidun käynnistysajan jälkeen moottorit M2 ja M3 kytketään mukaan.

Kuvassa 15 on esitetty moottorin M1 kontaktorin parametointi-ikkuna. Tämän mallinnuksen tavoitteiden saavuttamiseksi oli tarpeen parametroida ainoastaan kytkennän ajankohta ja kytkentätilan alkuarvo. Muut arvot voitiin jättää oletusarvoihinsa.

Kytkentäajankohdaksi valittiin moottoreille M1 ja M4 0,1 s simuloinnin aloituksesta. Mikäli moottorit syötettäisiin samasta muuntajasta, olisi suositeltavaa kytkeä ne 100 ms välein, jolloin ensimmäisen kytkennän aiheuttama sysäysoikosulkuvirta olisi ehtinyt jo vaimentua.

Kuva 15. Moottorikontaktorin parametointi.

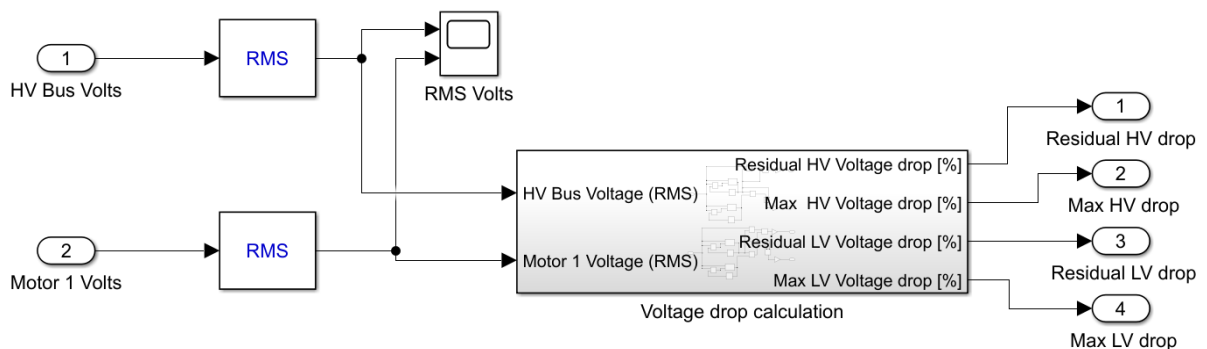


Pienjännitteen mittaus tehdään moottorista M1. Mittauskohta on mallissa kaapeliosuuden jälkeen, jotta saadaan kaapeloinnin aiheuttama jännitteenalenema mukaan tarkasteluun.

Toisaalta mittaus on mallissa ennen kontaktoria, jolloin jännitteen alkuarvo saadaan käynnistystä edeltävästä kuormittamattomasta tilanteesta. Näin jännitteenalenemat saadaan laskettua oikein.

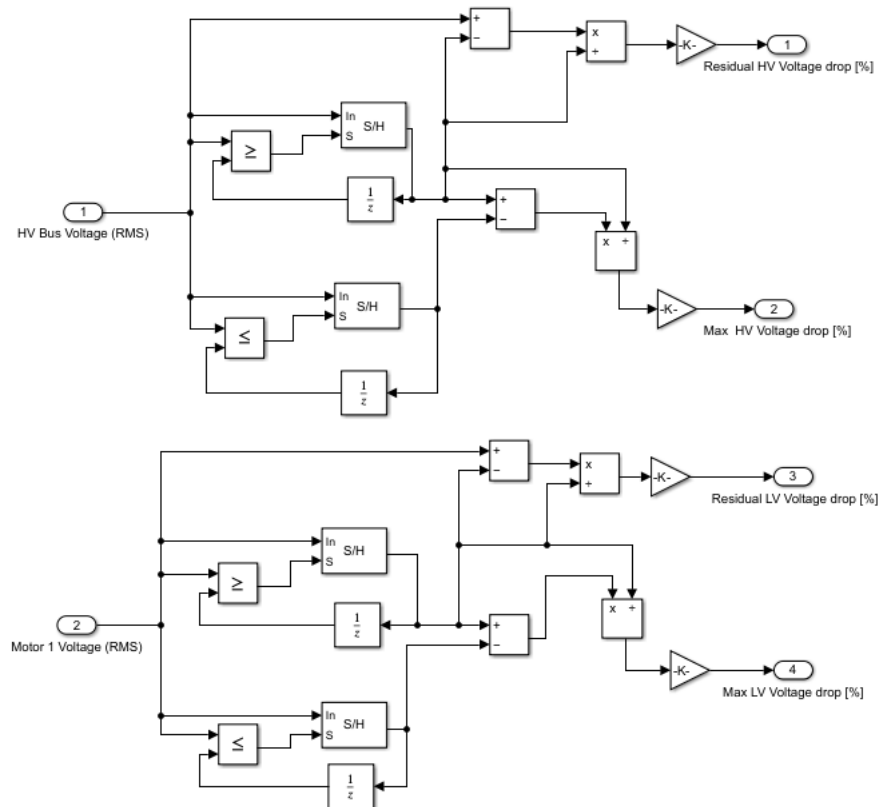
Jännitteen mittauksia sekä tehollisarvojen ja jännitteenalenemien laskemista varten on oma alijärjestelmänsä teollisuussähköverkkoa kuvaavan alijärjestelmän oikeassa ylälaidassa. Kuvassa 16 on esitetty sen sisäinen rakenne. RMS-lohkoilla lasketaan jännitteiden tehollisarvot. Niiden parametointiin riittää verkon taajuuden (50 Hz) ja jännitteen tehollisarvojen alkuarvojen (keskijännitteellä 10 500 V ja pienjännitteellä 690 V) asettaminen oikeaksi.

Kuva 16. Jännitteenmittauslohkon rakenne.



Jännitteenalenemien prosentuaalisten arvojen laskenta on toteutettu omassa lohkossaan. Laskenta on ohjelmoitu Simulinkin peruslohkoilla, joiden perusparametointiin ei tarvita käyttäjän muutoksia. Ohjelmointi on esitetty kuvassa 17.

Kuva 17. Jännitteenaleneman laskenta.

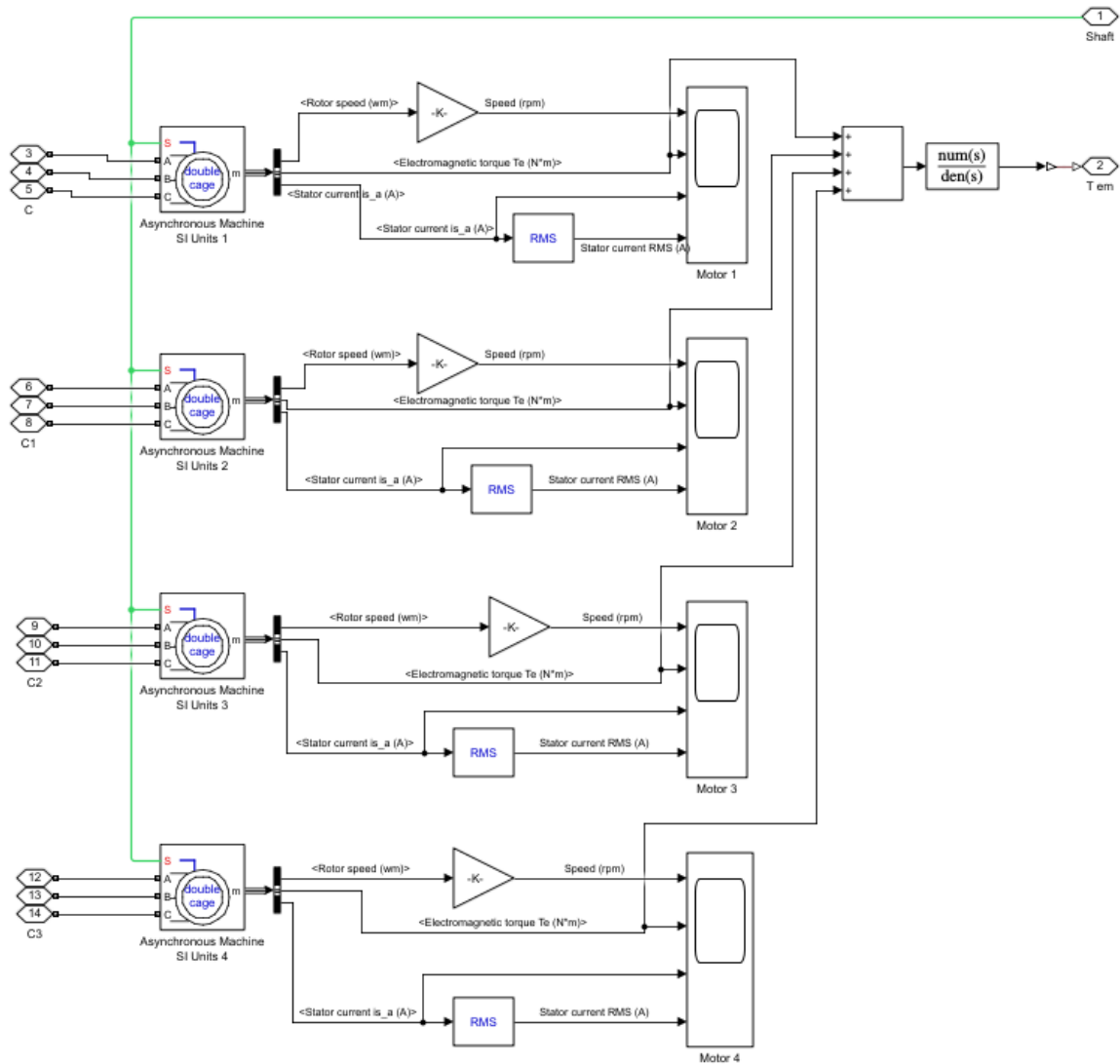


5.1.2 Monimoottorikäyttö

Hakun pienjännitemonimoottorikäyttö on toteutettu omana alijärjestelmänään. Sen tärkeimpänä komponenttina on Simscape Electrical -toolboxin moottorilohko "Asynchronous Machine". Siihen kytketään sisäänmenoiksi jakelumuuntajan tuottama pienjännite sekä mekaanista vaikutusta kuvaava signaali. Jälkimmäinen voisi olla joko pyörimisnopeus, vastamomentti tai Simscapen fysikaalinen kytkentä, jonka englannin kielinen nimitys on "mechanical rotational port". Tässä mallissa käytetään viimeksi mainittua kytkentää. Lohkon ulostulona on vektorimuotoinen signaali, josta tämän opinnäytetyön varsinaisessa mallinnuksessa käytetään kolmea signaalialkiota: roottorin pyörimisnopeus, sähkömagneettinen vääntömomentti, sekä yhden vaiheen staattorivirta. Yhden vaiheen

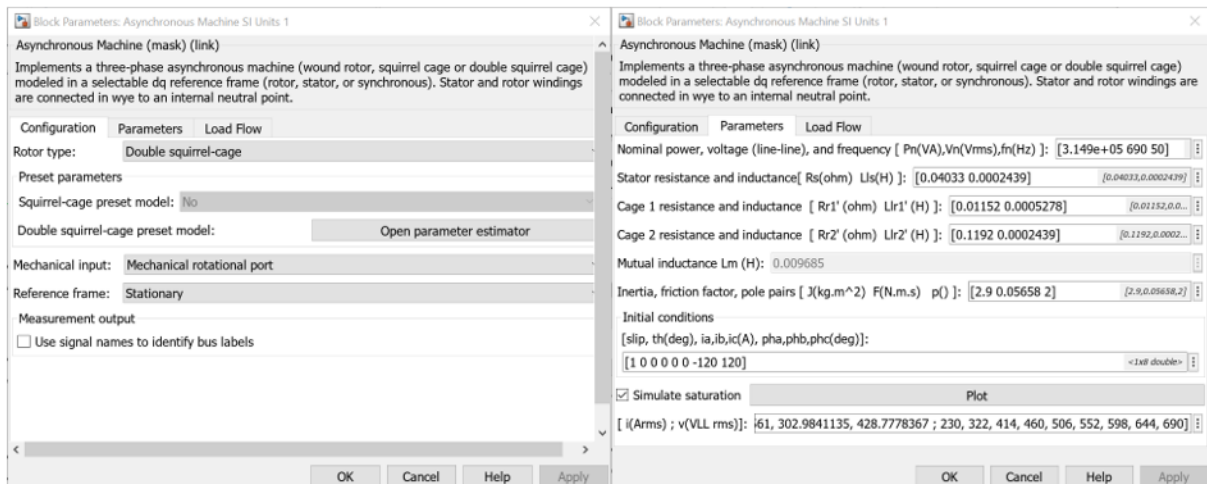
virtatarkastelu riittää, koska kuormitus oletetaan symmetriseksi. Kuvassa 18 esitetään neljästä moottorista koostuva monimoottorikäytön mallin lohkokaavio.

Kuva 18. Hakun monimoottorikäytön malli.



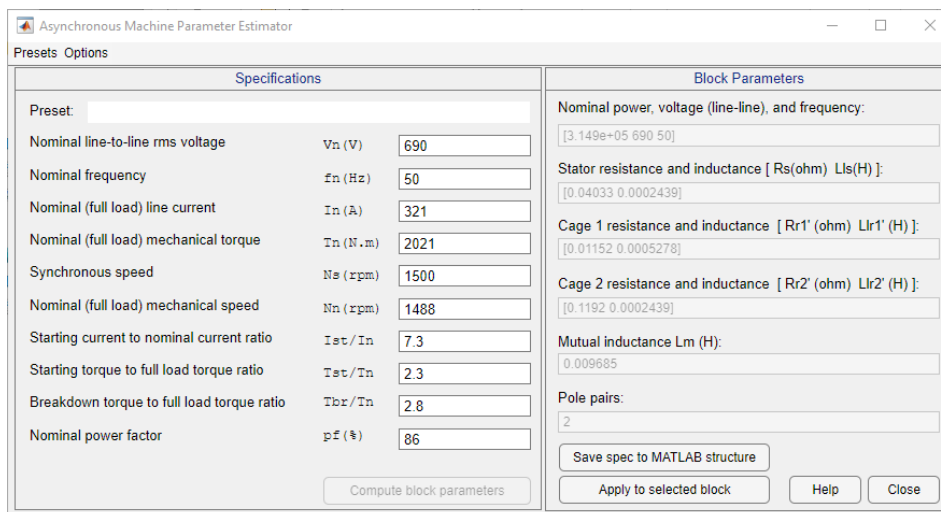
Jokaiselle moottorilohkolle on oma piirturilohkonsa, jolla simuloinnin tulokset visualisoidaan. Staattorivirrasta lasketaan myös tehollisarvo Simulinkin RMS-lohkolla. Kaikkien moottorilohkojen tuottamat sähkömagneettisen momentin signaalit lasketaan yhteen ja siirretään siirtofunktion kautta alijärjestelmän ulostuloksi. Tätä signaalia käytetään hakkua mallintavan alijärjestelmän sisääntulona. Hyvin lyhyen aikavakion siirtofunktiolla saadaan aikaan simuloinnin toimiakseen vaatima dynamiikka, ja eliminoidaan ns. algebrallinen silmukka, joka syntyisi hakkulohkosta saatavasta takaisinkytkennästä ilman siirtofunktiota. Moottorilohkon parametointi on esitetty kuvassa 19.

Kuva 19. Asynchronous Machine -lohkon parametointi-ikkunat.



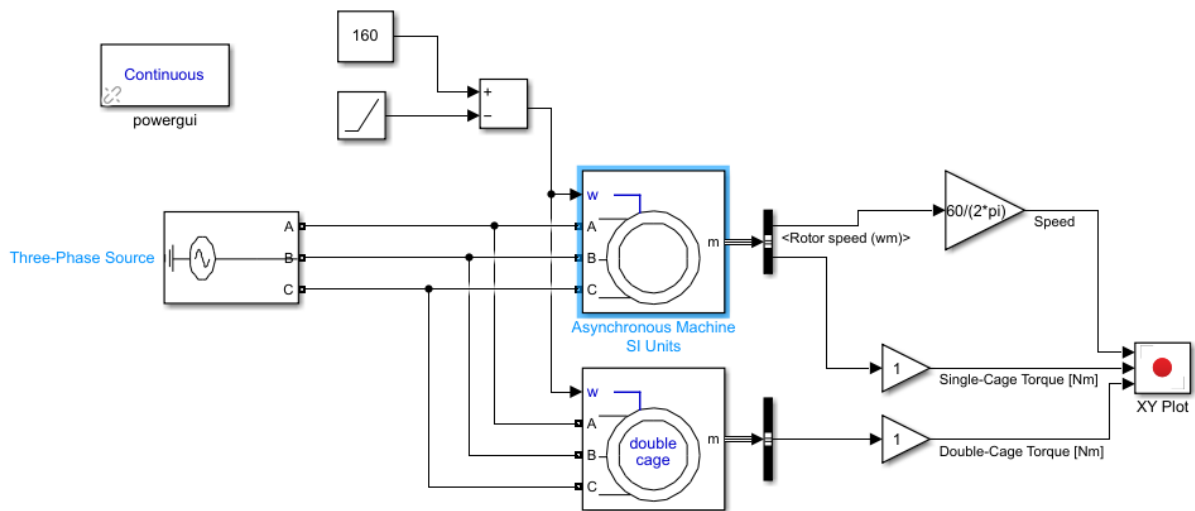
Configuration-ikkunassa valitaan mekaaniseksi sisääntuloksi edellä selitetty ”Mechanical rotational port” ja dq-koordinaatiston referenssiksi staattori. Parameters-ikkunan lukuisat ominaisuudet on helppointa parametroida kaksihäkkinä parametrien estimointityökalulla. Se ei kuitenkaan ota kantaa alkuarvoihin (Initial conditions), jotka pitää parametroida kuvan esittämällä tavalla. Erityismaininnan ansaitsee alkuarvovektorin ensimmäisenä alkiona oleva jättämä (slip). Tälle täytyy antaa arvo 1, mikäli halutaan simuloinnin käynnistyvän täysin pysähtyneestä moottorista. Kuvasta 20 nähdään tässä opinnäytetyössä käytetyn moottorin parametrien estimointi valmistajan datalehdien arvoilla (ABB, julkaisematon datalehti, 2008).

Kuva 20. Moottorin parametrien estimointi kaksihäkkinä-mallilla.



Asynchronous Machine -lohkossa voi moottorin matemaattisen mallin valita joko yksihäkki-, kaksihäkki- tai liukurengasmoottorimallina, joista tässä työssä päädyttiin soveltamaan kaksihäkkimoottorin mallia. Päätöksentekoon vaikutti tämän työn luvussa 3 esitellyn IEEE:n tutkimuksen tulos, mutta asia haluttiin vielä varmistaa nimenomaisesti Simscapen moottorilohkon osalta. Tätä varten konfiguroitiin kuvan 21 mukainen testisimulaatio, jonka avulla oli mahdollisuus tarkastella eri moottorimallien laskemaa vääntömomenttia nopeuden funktiona. (Liukurengasmallia ei simuloitu, koska sen ei katsottu tulevan kysymykseen missään tapauksessa).

Kuva 21. Moottorin momenttikäyrän simuloinnin konfiguraatio.

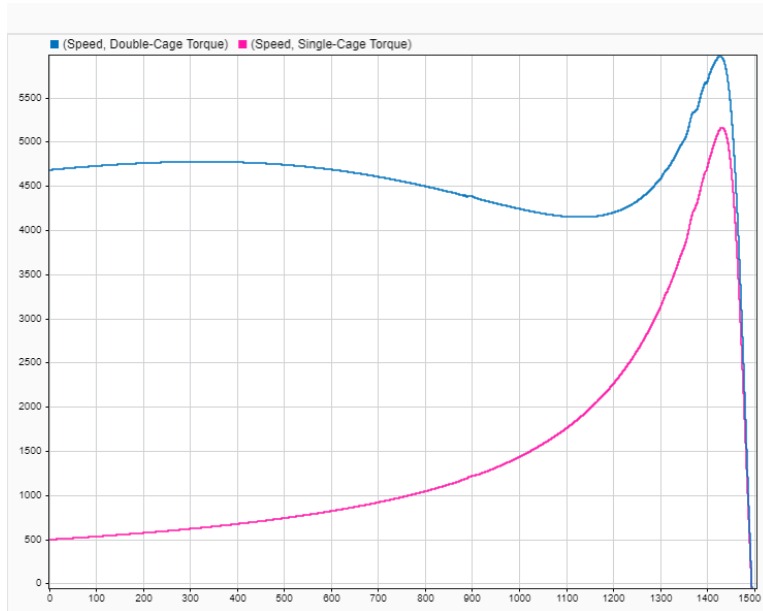


Momenttikäyrän simuloinnin konfigurointiin käytettiin ideaalista kolmivaihelähdettä (Three-Phase Source), jolla syötettiin moottorilohkoja. Moottorilohkojen mekaaniseksi sisäänmenoksi valittiin kulmanopeus (ω , [rad/s]), joka tuotettiin Simulinkin ramppigeneraattori-lohkolla. Käynnistysvaiheen transientin eliminoimiseksi ramppi ajettiin "takaperin", eli nimellisuudesta nolnaan. Moottorimallin ulostulosta valittiin roottorin pyörimisnopeus ja sähkömagneettiset momentit, jotka tulostettiin XY Plot -lohkon avulla.

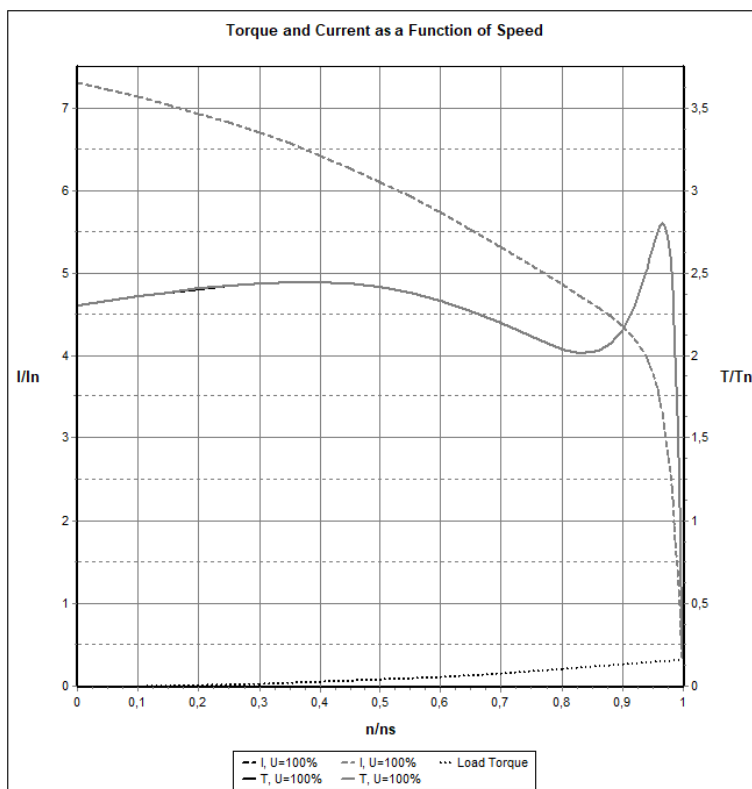
Kuvassa 22 on esitetty yksi- ja kaksihäkkimallien simuloinnin tulos. Referenssiksi moottorivalmistajalta ABB Oy:ltä saatu todellisen moottorin momenttikäyrä, joka on esitetty kuvassa 23, vastaa hyvin kaksihäkkimallin simuloinnin tulosta. Vertailun vuoksi suoritettuna yksihäkkimallin momenttikäyrä osoittautui, täysin IEEE:n tutkimuksen mukaisesti, vastaavan todellisen moottorin momenttikäyrää ainoastaan lähellä nimellisuutta. Pienemmällä

nopeuksilla yksihäkkimalli antaa vääntömomentille liian pieniä arvoja, mikä käynnistystilannetta simuloitaessa johtaisi todellista pidempään käynnistysaikaan.

Kuva 22. Yksi- ja kaksihäkkimallien simuloidut momenttikäyrät.



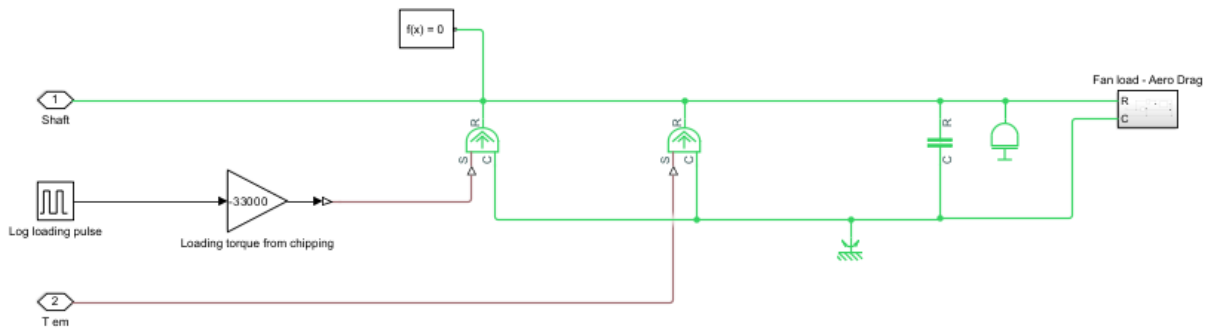
Kuva 23. Todellisen moottorin momentti- ja virtakäyrät suhteellisina arvoina (ABB, julkaisematon datalehti, 2008).



5.1.3 Hakku

Chipper-alijärjestelmällä, eli hakkulohkolla, mallinnetaan hakun dynamiikka. Esitys mallista on kuvassa 24.

Kuva 24. Hakun mallinnus.



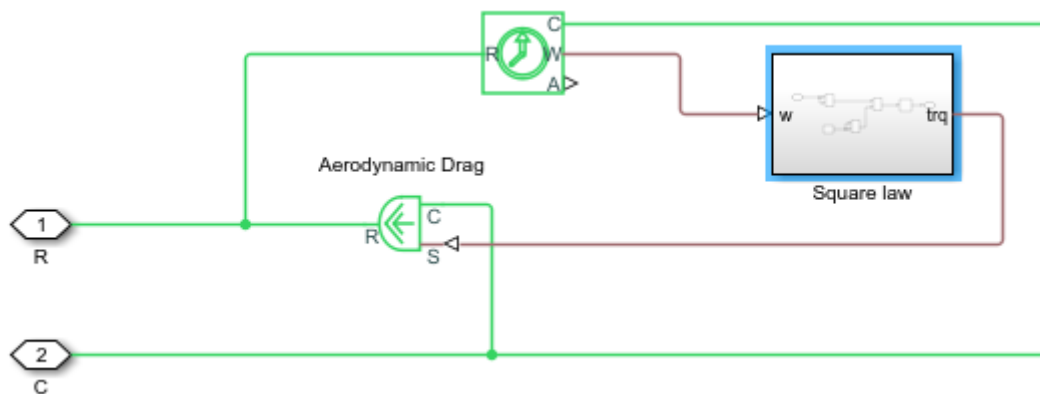
Tässä alijärjestelmässä käytetään Simscapen erityisominaisuutta: epäkausaalista fysikaalista mallintamista. Hakkulohkon ylin vaakasuora viiva kuvaa hakun akselia alennusvaihteen ensiöpuolelta, siis moottorien puolelta. Sen pyörimisliikkeeseen vaikuttaa kaksi momenttia: moottoreiden kiihdyttävä sähkömagneettinen momentti ja haketuksesta aiheutuva jarruttava kuormamomentti. Moottorien yhteismomentti saadaan lohkon sisääntulona ja se näkyy kuvassa liityntäpisteinä 2. Haketuksen kuormitusmomentti muodostetaan pulssigeneraattorilohkolla, jonka yksikkösignaali kerrotaan vahvistinlohkossa momentin huippuarvolla. Signaalit muutetaan Simscapen fysikaaliseksi kytkennöiksi ideaalista momentin lähdeä vastaavilla ”ideal torque source” -lohkoilla. Nämä lohkot esiintyvät mallissa kuvan keskikohdan vasemmalla puolella olevilla symboleina, joissa on kytkentäpisteet S, R ja C. Näitä lohkoja ei tarvitse eikä voi parametroida.

Edellä mainittujen momenttien lisäksi akseliin vaikuttaa (mitättömän pieni) laakeroinnin, voimansiirron yms. kitka, massiivisen hakun hitausmomentti sekä hakkukiekon lastuaukkojen aikaansaama puhallintyyppinen kuormamomentti. Kitkaa edustaa mallissa kondensaattorin piirrosmerkkiä muistuttava lohko. Sen parametroinnissa käytettiin oletusarvona tulevia hyvin pieniä arvoja. Hakun pyörimisnopeuden dynamiikkaan eniten vaikuttavan hitausmomentin eli inertian suhteen on syytä mainita, että hakun pyörimisnopeus on alle 300 rpm ja moottoreiden pyörimisnopeus vastaavasti hieman alle 1500 rpm. Alennusvaihdetta ei ole

tässä työssä mallinnettu, vaan hakun inertia on redusoitu alennusvaihteen muuntosuhteen avulla vastaamaan moottorien ”näkemää” inerttia. Inertialohkon symboli on jalallisen puolipyörän näköinen. Lohkon parametrintointiin riittää yksi arvo, tässä tapauksessa luvussa 3.2 esitetty 900 kgm^2 .

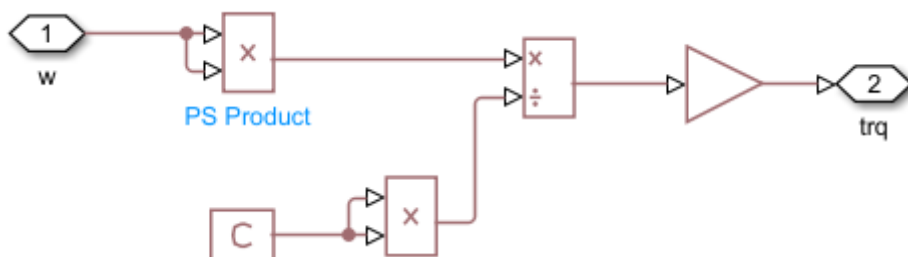
Puhallinkuorma on mallinnettu omana alijärjestelmänään ja nimetty ”Fan load - Aero Drag”. Sen rakenne selviää kuvasta 25.

Kuva 25. Puhallinefektin mallinnus Fan load – Aero Drag -lohkolla.



Liitin 1 edustaa mallin ylemmän tason hakun vaihteen ensiöpuolen akselia. Ylimpänä näkyvä osoittimellisen mittarin näköinen symboli kuvastaa anturia, jolla mitataan em. akselin kulmanopeus. Kulmanopeussignaali kytketään edelleen Square law -nimisen alijärjestelmän sisäänmenoksi. Tämä lohko on esitetty kuvassa 26.

Kuva 26. Square law -lohko.



Lohkossa sisään tuleva akselin kulmanopeus neliöidään, eli kerrotaan itsellään.

Kulmanopeuden neliö kerrotaan kolmion muotoisessa vahvistinlohkossa puhallinefektin momenttikertoimella k , jolle laskettiin luvussa 3.2 arvoksi $k = 1,99 \cdot 10^{-3} \text{ Nm s}^2$. Koska

fysikaalisen mallinnuksen anturisignaalit sisältävät mitatun suureen yksikön, täytyy muilla kuvassa näkyvillä lohkoilla muokata uloslähtevän vääntömomenttisygnalin yksiköksi Nm. Tämä signaali muutetaan Fan load – Aero Drag -lohkossa momenttilähdelohkolla jarruttavaksi vääntömomentiksi, joka kytkeytyy takaisin mallin akseliin. Tämä on tyypillinen fysikaalisen mallinnuksen epäkausallinen rakenne, jossa sisäänmenon ja ulostulon välinen dynamiikka näyttää puuttuvan. Simscape kykenee tällaisen tilanteen ratkaisemaan, koska se käsittelee kaikkia tiloja samanaikaisesti eikä sisäänmenojen ja ulostulojen välillä ole kausaalista riippuvuutta.

Kaikki edellä mainitut akselin pyörimisnopeuteen vaikuttavat lohkot on sidottava johonkin referenssipisteeseen. Tätä varten mallissa on sähköistä maadoitusta ulkonäöltään muistuttava lohko, jolla vaadittava referenssipiste luodaan.

$f(x)=0$ niminen lohko on Simscape ohjelman vaatima epäkausallisen fysikaalisen mallinnuksen vaatima nk. solver-lohko. Sen avulla määritellään graafisen esityksen taustalla olevien differentiaaliyhtälöiden ja differentiaalisalgebraallisten yhtälöryhmien numeerisen ratkaisun parametreja. Sen oletusarvot soveltuvat yksinkertaisimpiin mallinnuksiin sellaisenaan; näin myös tämän opinnäytetyön mallinnuksen yhteydessä.

5.2 Kokonaisjärjestelmä

Tässä opinnäytetyössä mallinnetusta kokonaisjärjestelmästä tuli niin suuri, että se vaatii toimiakseen kaupallisen Matlab/Simulink -lisenssin. Edullisessa opiskelijalisenssissä, joka on tarkoitettu tutkintoon tähtävien yliopistojen ja korkeakoulujen kurssien suorittamiseen, on käytettävien lohkojen määrä rajoitettu tuhanteen. Opiskelijalisenssillä oli kuitenkin mahdollista mallintaa osakokonaisuuksia ja harjoitella mallinnusta ennen kaupallisen lisenssin käyttöönottoa.

Matemaattista mallia käytettiin simuloimaan erilaisia käyttötilanteita. Lähtökohdaksi otettiin 30 sekunnin mittainen jakso, jossa tapahtuisi sekä hakun käynnistys että yhden suurihalkaisijaisen puun haketus. Mallin laajuus tuli ilmi myös laskenta-ajassa: puolen minuutin mittaisen käyttötilanteen simulointiin kului aikaa lähes puoli tuntia käytettäessä

tavanomaista kannettavaa tietokonetta, jonka oleelliset järjestelmäominaisuudet vastasivat ohjelmiston valmistajan suosituksia:

- x86-64-pohjainen ja neliytiminen (4 core) Intel-prosessori AVX2 käskykannalla
- asennettua RAM keskusmuistia 16,0 GB
- 64-bittinen käyttöjärjestelmä Windows 10, versio 21H2
- 512 GB SSD-kovalevy

Simulink tarjoaa useita eri mahdollisuuksia mallin analysointiin ja optimointiin. Debug-valikosta löytyy Performance Advisor -alivalikosta työkalu nimeltä Simulink Profiler. Sen avulla selvitettiin, mitkä ohjelman osat veivät eniten laskenta-aikaa: Lähes 50 % ajasta kului monimoottorilohkossa ja n. 30 % teollisuusverkkoa mallintavassa lohkoissa. Näissä lohkoissa sijaitsevat kaikki mallin piirturilohkot, ja ne oli ohjelmoitu avautumaan käyttöliittymään simuloinnin alkaessa. Laskenta-ajan lyhentämiseksi mallia muokattiin siten, että piirturilohkoista poistettiin kaikki virran ja jännitteen käyrämuotoa kuvaavat piirrot jättäen ainoastaan tehollisarvot käyttöön sekä estettiin piirturilohkojen automaattinen avautuminen. Lisäksi lyhennettiin simulointiaika 25 sekuntiin, koska ensimmäisen simuloinnin perusteella tutkittavat ilmiöt ehtivät tapahtua tässä ajassa. Näillä optimointitoimenpiteillä saatiin laskenta-aika lyhennettyä 15 minuuttiin.

5.3 Simulointien tulokset

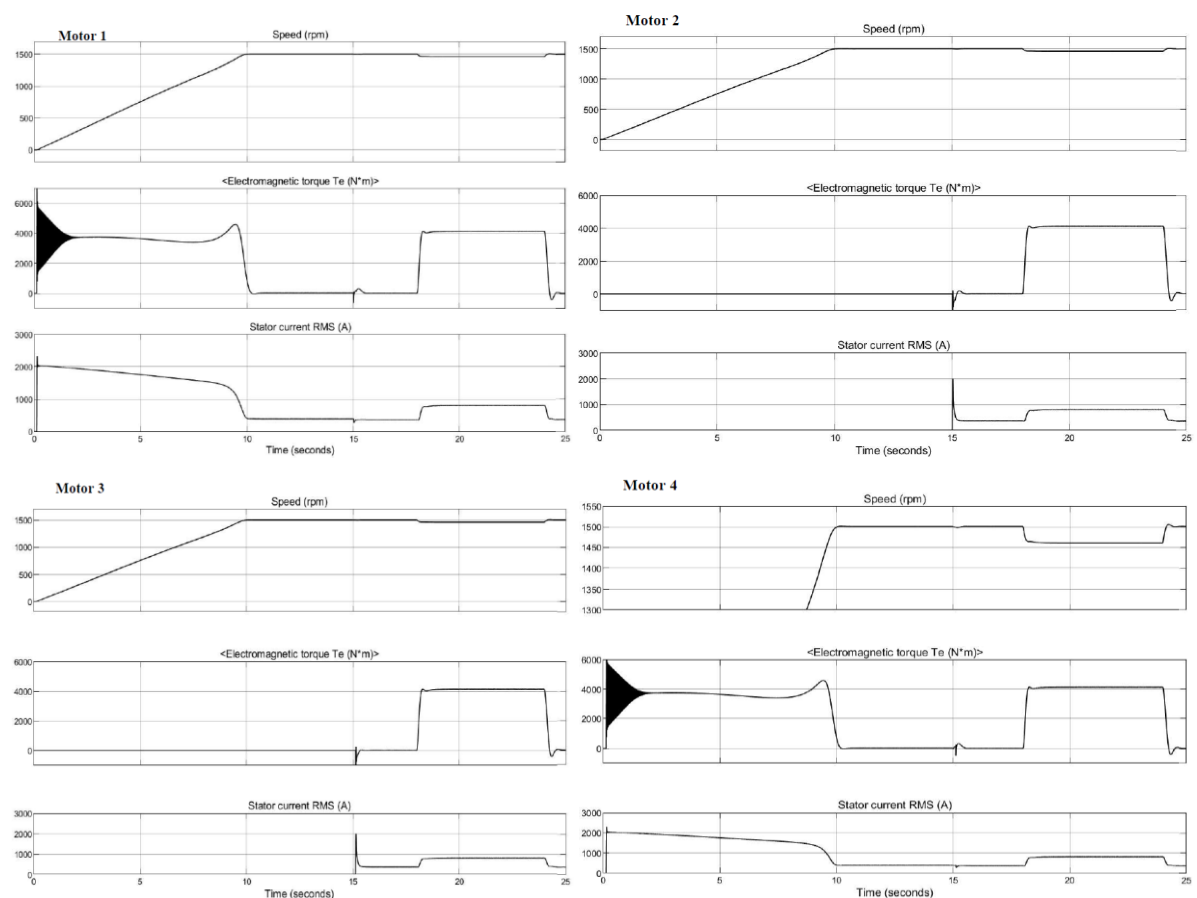
Simulointi suoritettiin edellä kuvatun mukaisella mallilla yhdeksälle erilaiselle käyttötilanteelle. Keskijänniteverkon oikosulkutehoa varioitiin kolmella eri arvolla, joita kaikkia simuloitiin kolmella eri jakelumuuntajakooilla. Simuloitaviksi oikosulkutehoksi valittiin arvot 100 MVA, 300 MVA ja 1000 MVA. Näistä keskimäinen arvo vastaa tavanomaista sellu- ja paperitehtaan verkkoa (Anttila, 2017, liite 4/1) ja ääripäät vastaavasti joko hyvin heikkoa tai suuritehoista sähköverkkoa. Muuntajako'oiksi pyrittiin löytämään vastaavan kriteerin mukaan kolme muuntajaa erään valmistajan standardisarjasta (ABB, 2000, ss. 317–319) ja päädyttiin kokoihin 1000 kVA, 2500 kVA ja 4000 kVA. Ensimmäinen simulointi tehtiin tavanomaista teollisuussähköverkkoa ja jakelumuuntajaa jäljitellen 300 MVA:n verkolla ja 2500 kVA:n muuntajilla. Tämän simuloinnin tulokset esitellään tässä luvussa kokonaisuudessaan. Muista esitetään ainoastaan jännitteen tehollisarvojen muutosta

kuvaavat käyrät sekä ensimmäisinä käynnistyvien moottorien simuloitua mittaus tulokset (kierrosnopeus, sähkömagneettien momentti ja staattorivirran tehollisarvo).

5.3.1 Tavanomainen verkko

Kuvassa 27 on esitetty 300 MVA:n keskijänniteverkolla ja kahdella 2500 kVA:n muuntajalla toteutetun pienjännitejakelun syöttämän ANDRITZ EXL -18 hakun neljän moottorin simuloitua tulokset. Motor 1 -nimisen moottorin piirturikäyrästä ylin on kierrosnopeus, ja siitä nähdään moottorin kiihdyttävän nollosnopeudesta nimelliskohteensa (n.1500 rpm) n. kymmenessä sekunnissa. Toinen piirturikäyrä kuvaa moottorin tuottamaa sähkömagneettista momenttia. Tässä signaalissa näkyy ensimmäisten sekuntien aikana jännitteen kytkeytymisestä johtuvan transientti-ilmiön ja virran vaimenevan tasavirtakomponentin aiheuttama voimakas värähtely (Hietalahti, 2013, s. 49).

Kuva 27. Simuloinnin tulos 300 MVA:n verkolla ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajilla.



Moottorin ja erityisesti sen kuormana olevan hakun suuren hitausmomentin ansiosta tämä värähtely ei näy moottorin akselin värähtelynä. Kolmas piirturikäyrä on moottorin ensimmäisen käämin staattorivirran tehollisarvo. Virta nousee heti jännitteen kytkemisen jälkeen n. 2300 A:n, mikä on hieman alle datalehdessä ilmoitetun 7,3-kertaisen nimellisvirran ($7,3 \times 321 = 2343 \text{ A}$). Tämän kytkentäsäyksen jälkeen virta putoaa nopeasti n. 2000 A:n ja laskee edelleen huomattavasti hitaammin käynnistyksen edetessä. Oleellisesti virta alkaa laskea vasta käynnistyksen loppuvaiheessa n. 9 sekunnin kuluttua jännitteen kytkemisestä. Tämä tapahtuu samanaikaisesti momentin alkaessa nousta kohti huippuaan. Moottorin saavuttaessa nimellinopeutensa putoaa momentti lähelle nollaa ja staattorivirta n. 100 A:n. Moottori on tällöin lähes tyhjäkäynnillä työskennellen vain puhallinefektin ja vierintäkitkan aiheuttamaa momenttia vastaan.

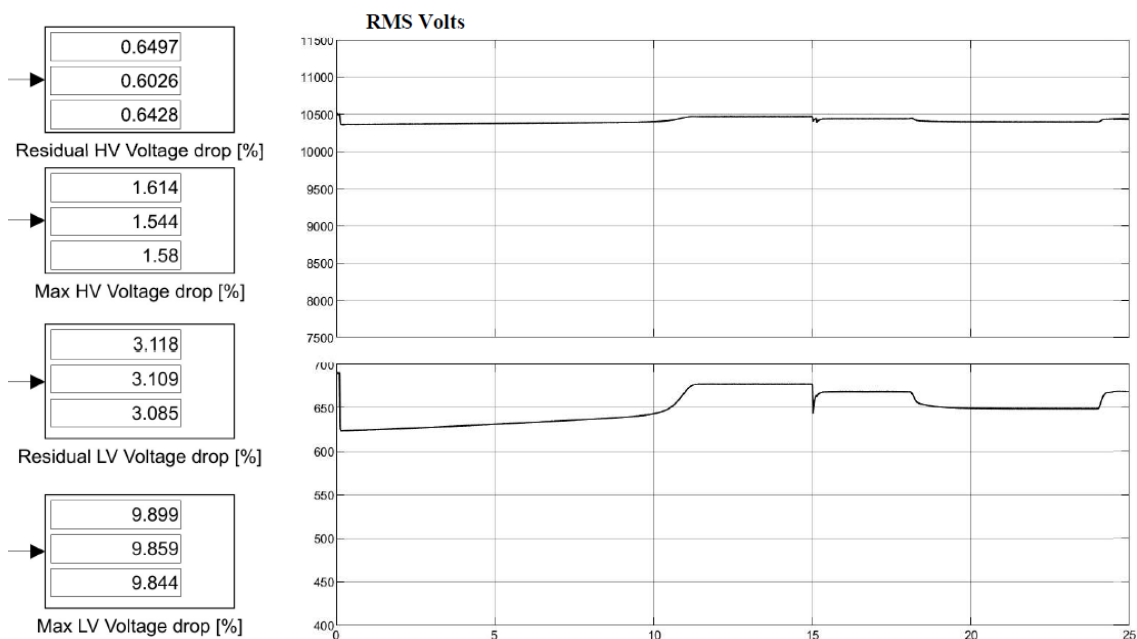
4-moottorin piirturikäyrät ovat hyvin samankaltaiset 1-moottorin kanssa lukuun ottamatta kierroslukukäyrän skaalausta, josta nähdään tarkemmin kierrosluvun vaihtelu lähellä nimellinopeutta. 2- ja 3-moottorien käyristä nähdään niiden virta- ja momenttiarvojen pysyvän nollassa 15 sekunnin ajankohtaan asti, jolloin niihin kytketään jännite. Niiden kierrosnopeus seuraa kuitenkin täysin 1- ja 4-moottoreiden nopeutta, koska ne on kytketty mekaanisesti samaan akseliin.

2- ja 3-moottorien kytkeminen aiheuttaa lyhyen transientin momenttikäyrissä sekä kytkentävirtasäyksen staattorikäämeissä, mutta ilmiöt vaimenevat nopeasti ja tilanne stabiloituu kaikkien moottorien osalta. Seuraava merkittävä tapahtuma alkaa 18 sekunnin kohdalla, jossa simuloidaan isokokoisen puun haketusta. Kaikkien moottorien kierrosluvut laskevat n. 1460 rpm:n, momentit nousevat nopeasti maksimiarvoihinsa ja staattorivirrat n. 800 A:n. Virta jatkaa nousuaan haketuksen jatkuessa päätyen 900 A:n tasolle. Tällainen virta tarkoittaa n. 280 % kuormitusta, joka aiheuttaisi pitempään jatkuessaan käämien ylikuormenemisen. Tässä simuloinnissa ylikuormitus kestää 6 sekuntia, mikä vastaa yhden kuusi metriä pitkän suurihalkaisijaisen puun haketusta 1 m/s nopeudella. Haketuksen jälkeen simuloinnissa oletetaan hakun palaavan tyhjäkäynnille ja käämien lämpeneminen loppuu. Tällainen tilanne on hyvin tavallinen maksimikokoisia puita hakettaessa.

Kuvassa 28 esitetään jännitemittausten tulokset edellä kuvatusta simuloinnista. Kuvan vasemmassa laidassa näkyy sekä keskijänniteverkon että 1-moottorin navoista mitatun

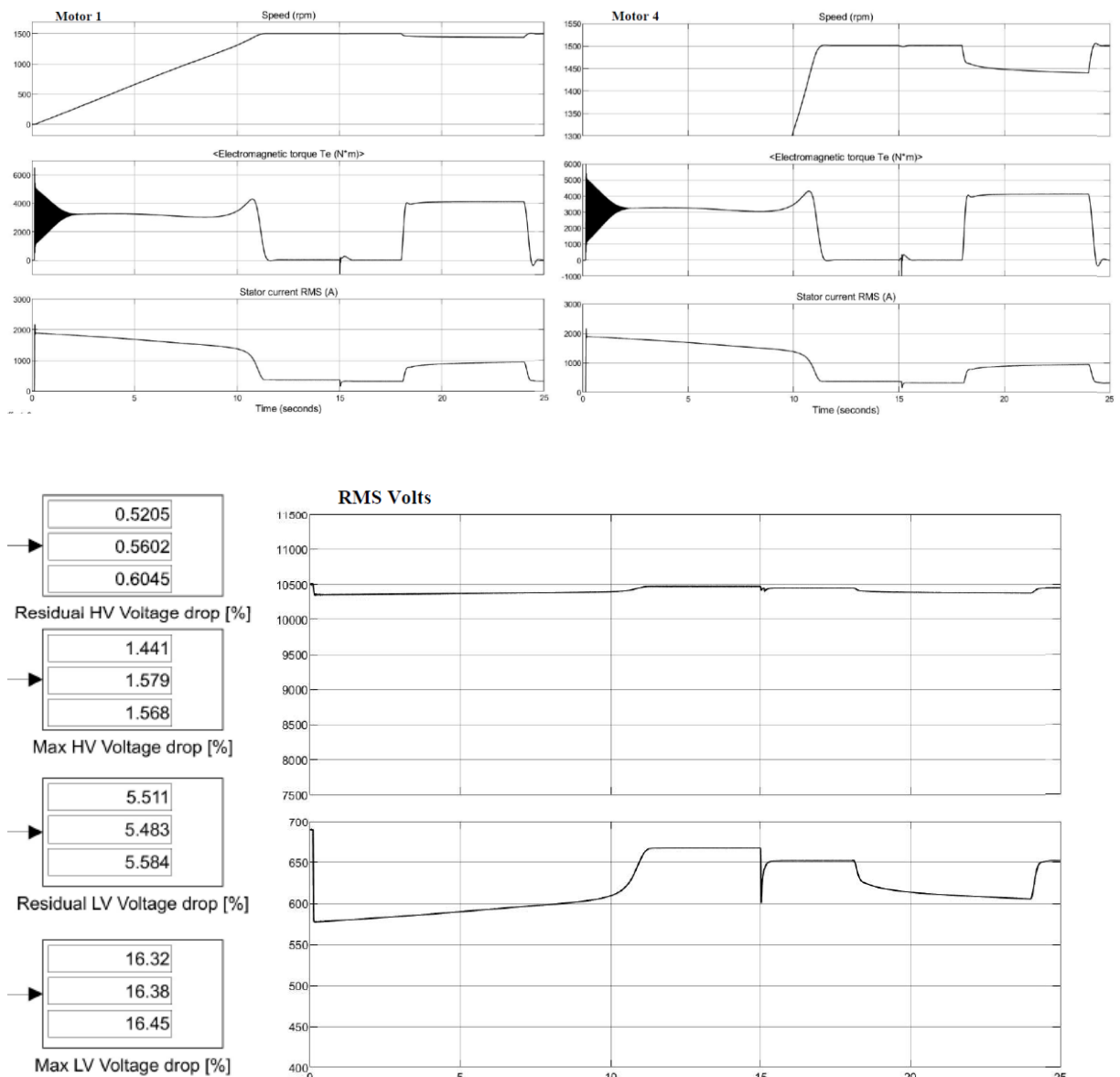
pienjännitteen alenemat prosentteina nimellisarvoistaan. Molemmista on laskettu sekä suurin alenema että simuloinnin loppuhetken, hakun tyhjäkäynniksi stabiloituneen tilanteen, jännitteenalenema. Keskijänniteverkossa jännite ei laske merkittävästi käynnistyksessä eikä maksimikuormitustilanteessa. Jännitteen alenema on pahimmillaankin vain 1,6 % ja se palautuu lähes ennalleen hakun tyhjäkäynnillä. Moottorin navoista simuloitu pienjännite alenee käynnistyksen alussa 9,9 %, mikä on vähemmän kuin hyvän insinöörikäytännön mukainen vaatimus <15 %. 2- ja 3-moottorien kytkentä aiheuttaa lyhyen ja pienemmän jännitteenaleneman. Maksimikuormitustilanteessa jännite laskee alimmillaan n. 650 V:n, mikä vastaa alle 6 %:n alenemaa.

Kuva 28. Keskijänniteverkon ja 1-moottorin jännitteiden alenemat [%] sekä tehollisarvot [V] simuloitaessa 300 MVA:n verkkoa ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajia.



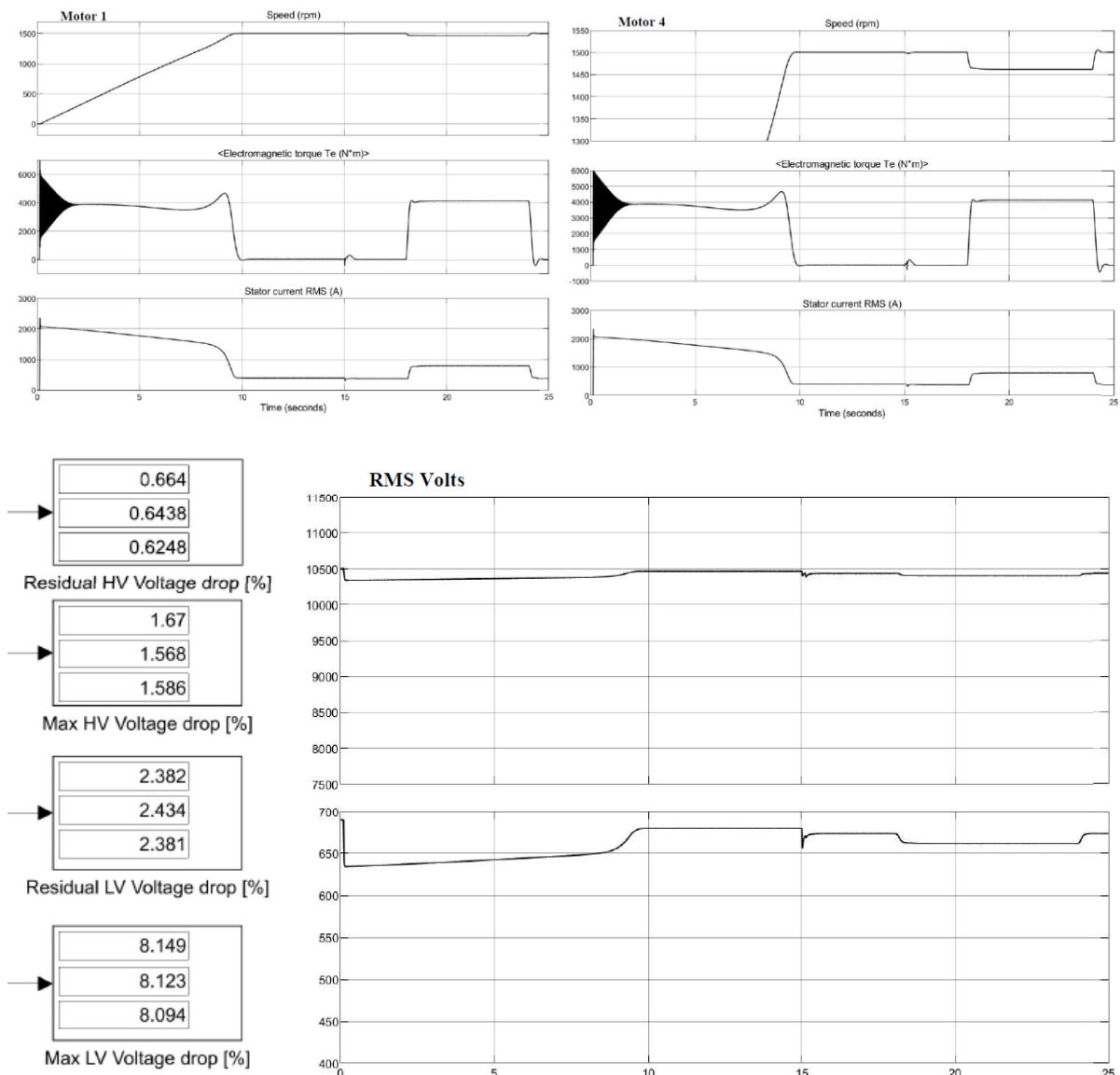
Kuvassa 29 on esitetty saman keskijänniteverkon simulointi reilusti pienemmillä muuntajilla (2 x 1000 kVA). Käynnistymisaika pitenee n. kaksi sekuntia ja jännitteenalenema moottorin navoista simuloituna on käynnistystilanteessa yli 16 %. Huomattava ero on myös haketuskuormituksen aiheuttaman jännitteenalenemassa verrattuna ensimmäiseen simulointiin. Jännite putoaa alimmillaan n. 605 V:n, mikä tarkoittaa yli 12 %:n alenemaa. Näin suuret jännitteenalenemat (käynnistyksessä > 15% ja käytön aikana >10%) eivät yleensä ole hyväksyttäviä; näin pienien muuntajien käyttöä tällaisessa verkossa on syytä välttää.

Kuva 29. Simuloinnin tulos 300 MVA:n verkolla ja 2 x 1000 kVA:n jakelumuuntajilla.



Kolmas simulointi tavanomaisen keskijänniteverkon tapauksessa tehtiin kahdella 4000 kVA:n jakelumuuntajalla. Tulokset, jotka on esitetty kuvassa 30, olivat edellisten simulointien perusteella ennalta arvattavia: Käynnistysajassa havaittiin vain pieni nopeutuminen ensimmäiseen simulointiin verrattuna, mutta jännitteenalenemat sekä käynnistys- että maksimikuormitustilanteessa jäivät alhaisemmiksi. Myös kierrosnopeuden lasku jälkimmäisessä tapauksessa jäi aavistuksen pienemmäksi korkeamman jännitteen ansiosta, mutta mitään merkittävä hyötyä ei saavuteta. 4000 kVA:n muuntajat voidaan todeta ylisuuriksi tähän käyttötilanteeseen.

Kuva 30. Simuloinnin tulos 300 MVA:n verkolla ja 2 x 4000 kVA:n jakelumuuntajilla.

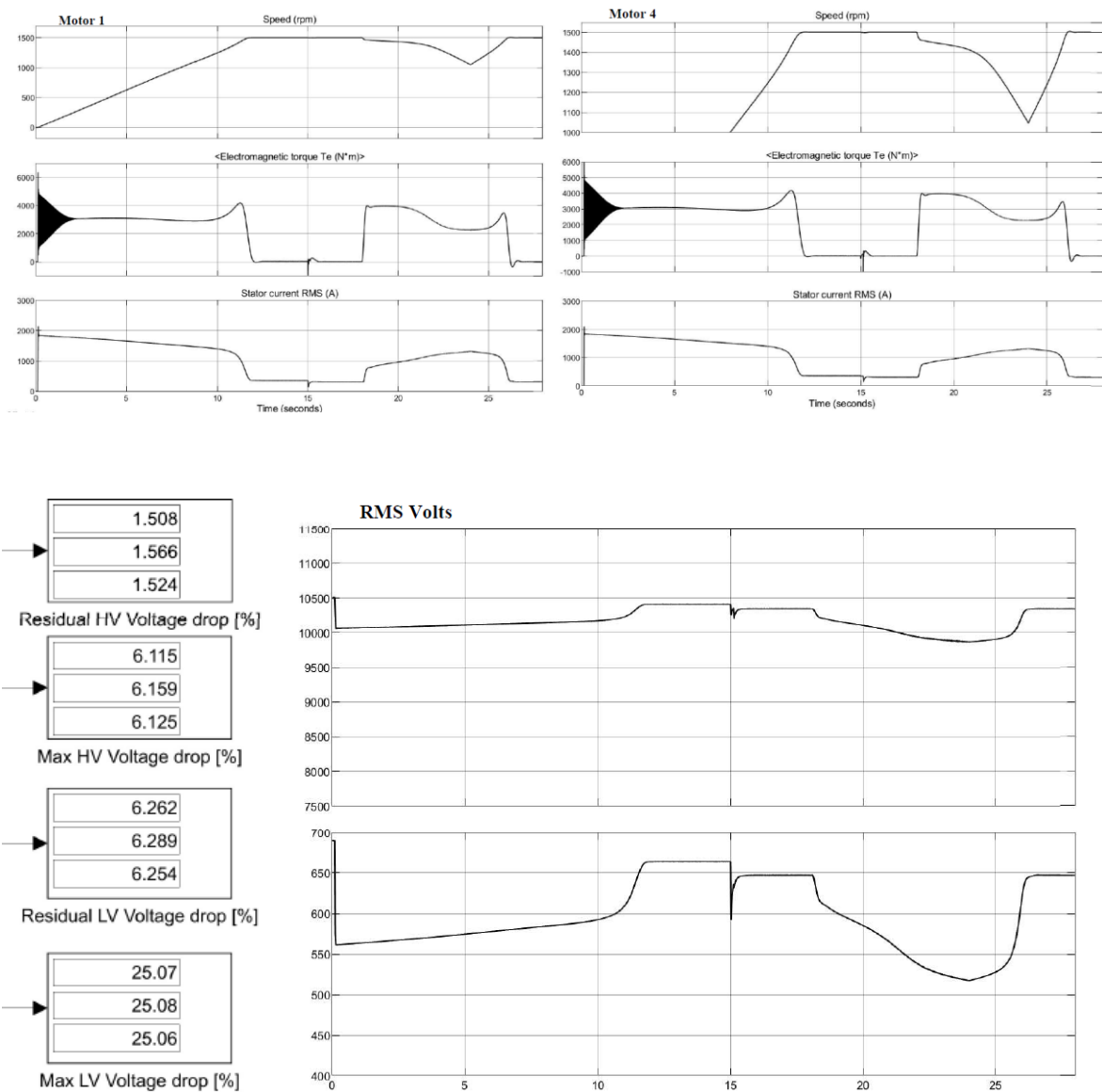


5.3.2 Heikko verkko

Heikolla verkolla tarkoitetaan tässä opinnäytetyössä keskijänniteverkkoa, jonka oikosulkuteho on 100 MVA. Kuvassa 31 on esitetty tällaisesta verkosta kahdella 1000 kVA:n jakelumuuntajalla syötetyn ANDRITZ EXL-18 -hakun pienjännitemonimoottorikäytön simuloinnin tulokset. Kyseinen tilanne edustaa tässä työssä äärimmäisen heikkoa tilannetta, ja simuloinnin odotusarvona olikin jännitteiden suoranainen romahtaminen. Edellisessä kappaleessa kuvatun tavanomaiseen verkkoon verrattuna nyt jännitteenalenemaa tapahtuu merkittävästi myös keskijänniteverkon jakelukiskossa. Käynnistystilanteessa se lähentelee jo hyvän insinöörikäytännön rajaa 5 %, ja haketustilanteessa, josta muodostuukin nyt

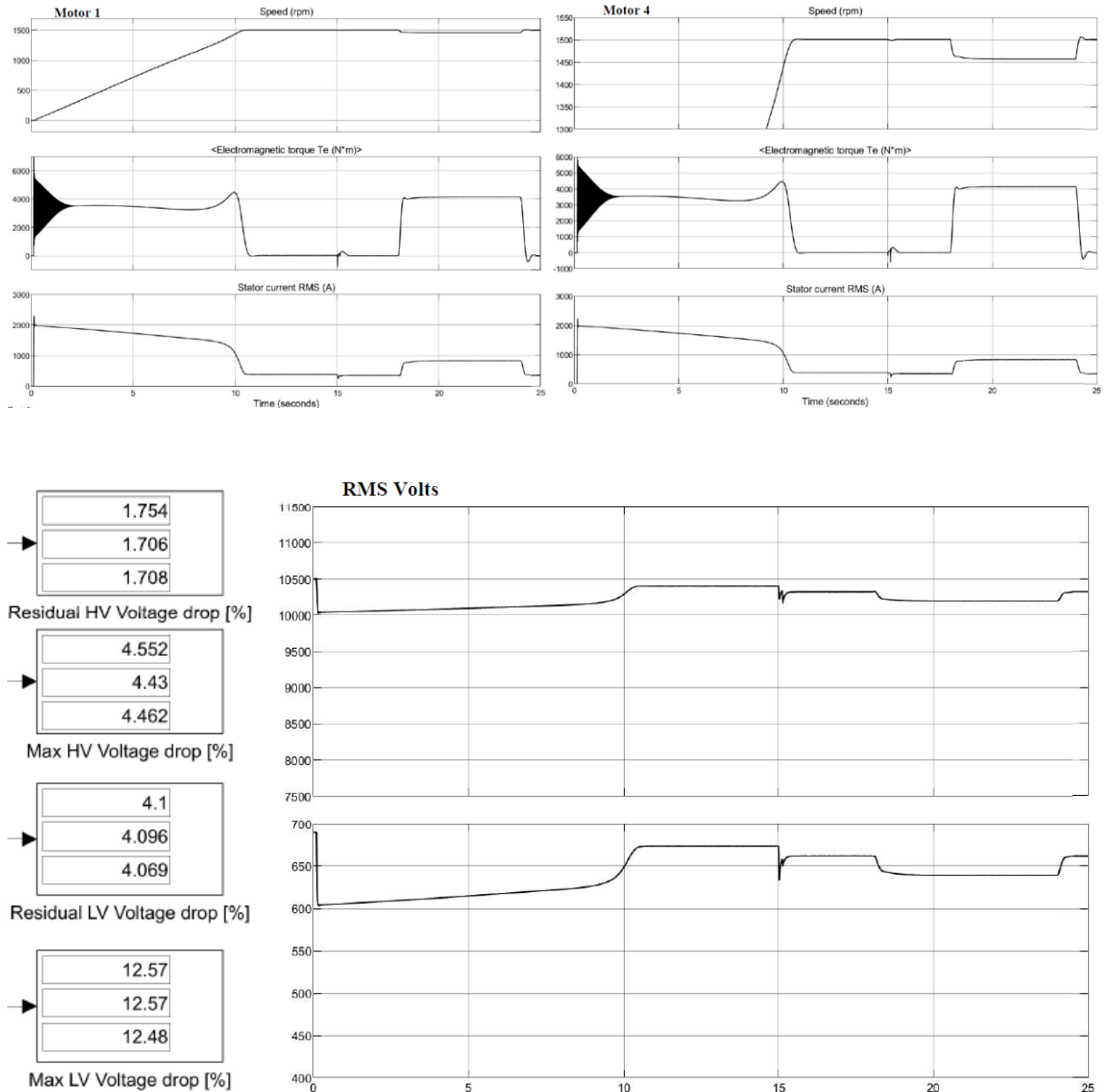
käynnistystä kuormittavampi, jännite putoaa yli 6 %:n nimellisestä. Pienjännitteellä sama ilmiö korostuu entisestään: Moottorin navoista simuloitu jännitteenalenema on jo käynnistystilanteessa yli 18 % ja haketustilanteessa putoaa peräti 25 %:n. Todellisessa käyttötilanteessa tällaisia jännitteenalenemia ei voida sallia. Käynnistysaikaan jännitteenalenemalla on simuloinnin perusteella yllättävän pieni vaikutus, mutta maksimihaketuskuormitus pudottaa moottorien kierrosluvun n. 1000 rpm:n ja nostaa staattorivirran n. 400 %:n nimelliseen verrattuna. Tässä simuloinnissa havaittiin myös, etteivät moottorit ehdi palautua tyhjäkäyntitilaan 25 sekunnin aikaikkunassa.

Kuva 31. Simuloinnin tulos 100 MVA:n verkolla ja 2 x 1000 kVA:n jakelumuuntajilla.

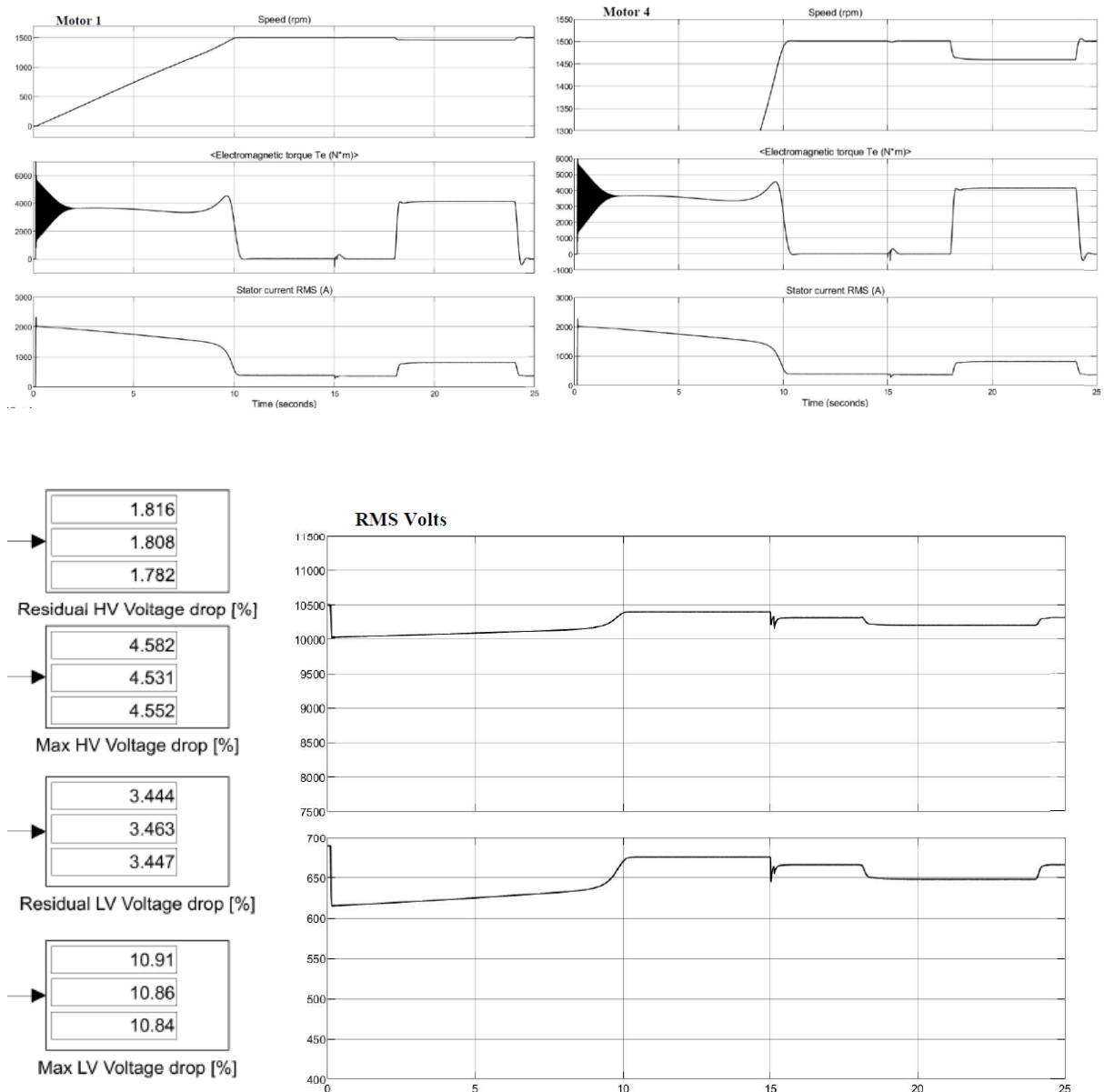


Kuvista 32 ja 33 nähdään vastaavat simulointitulokset käytettäessä joko kahta 2500 kVA:n tai 4000 kVA:n jakelumuuntajaa. Tilanne paranee hieman yllättäen jo 2500 kVA:n muuntajilla kohtuulliseksi eikä parane oleellisesti isommilla muuntajilla.

Kuva 32. Simuloinnin tulos 100 MVA:n verkolla ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajilla.



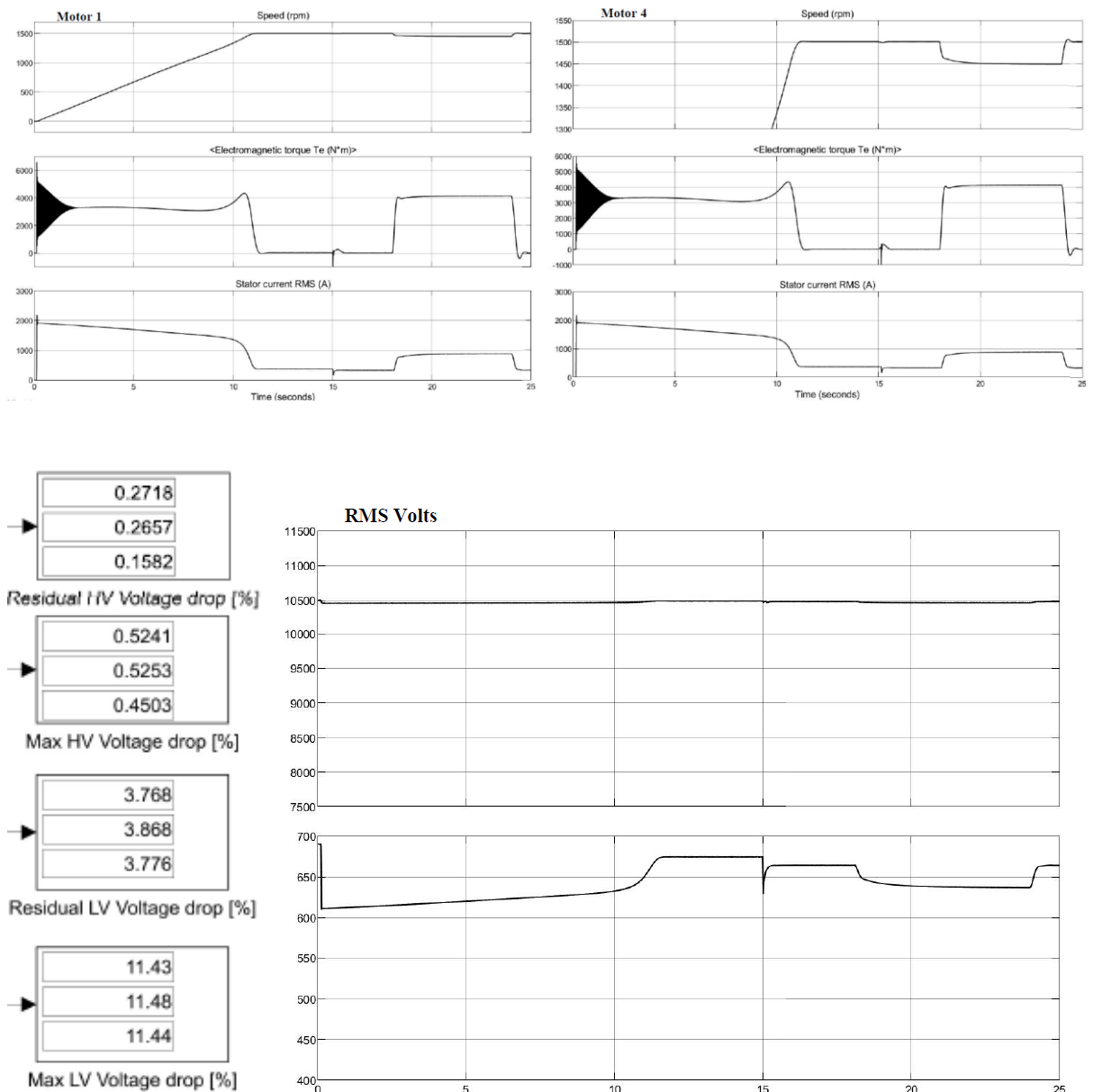
Kuva 33. Simuloinnin tulos 100 MVA:n verkolla ja 2 x 4000 kVA:n jakelumuuntajilla.



5.3.3 Suuritehoinen verkko

Suuritehoista keskijänniteverkkoa kuvaamaan valittiin tähän tarkasteluun 1000 MVA:n oikosulkutehoinen verkko. Edellisten simulointien perusteella oli odotettavissa ainakin suurimman muuntajakoon osoittautuvan ylikokoiseksi tällaisella verkkorakenteella. Suurin mielenkiinto kohdistuikin pienimmälle muuntajakoolle 1000 kVA, jonka tulokset on esitetty kuvassa 34.

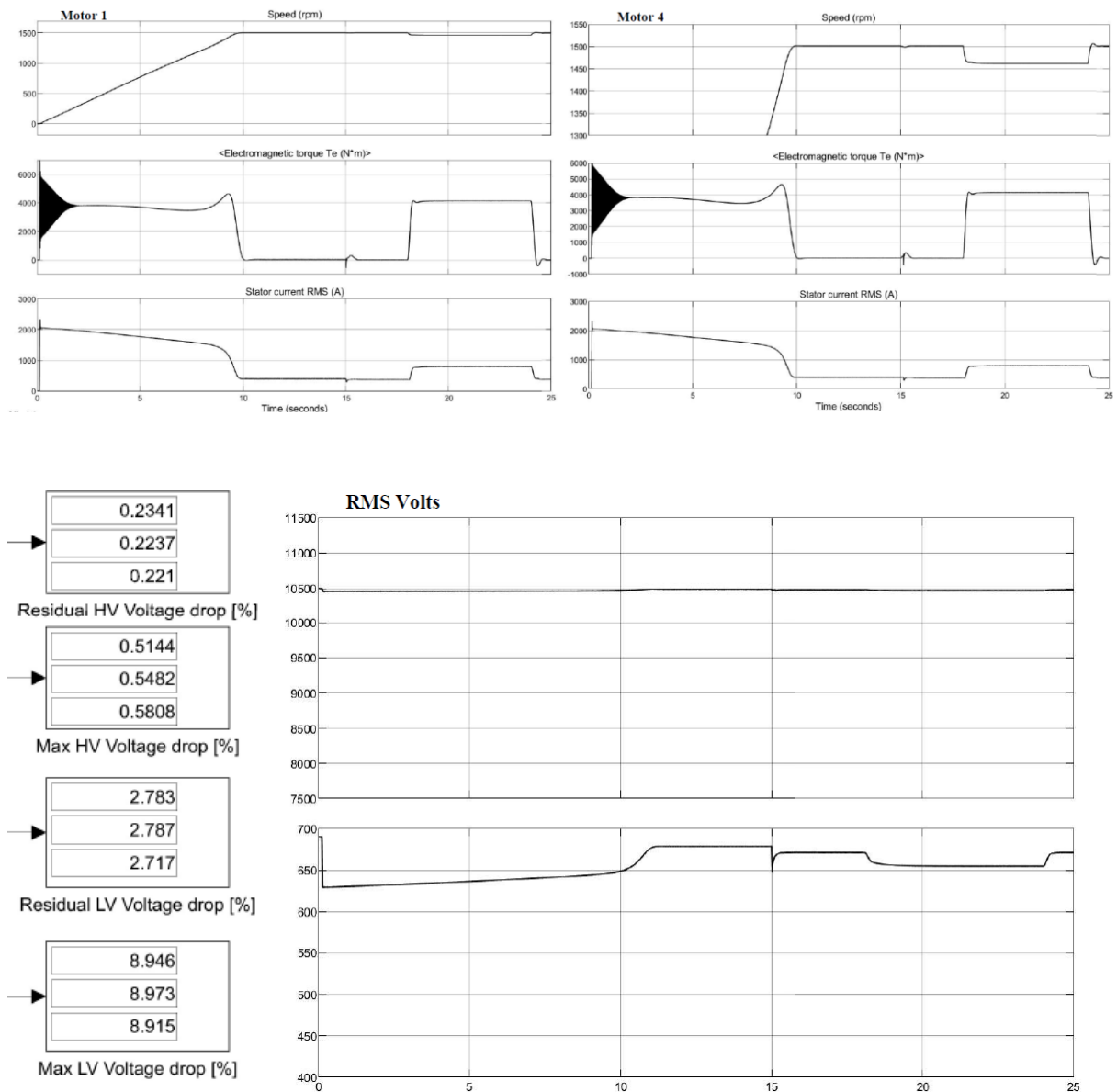
Kuva 34. Simuloinnin tulos 1000 MVA:n verkolla ja 2 x 1000 kVA:n jakelumuuntajilla .



Keskijänniteverkossa ei tapahtunut juuri minkäänlaista jännitteenalenemaa. Pienjännitteellä käynnistystilanne aiheutti kuitenkin yli 10 % pudotuksen nimellisjännitteeseen tällä muuntajakoolla. Haketuksen aiheuttama kuormitus ei osoittautunut haasteelliseksi näin vahvalla keskijänniteverkolla.

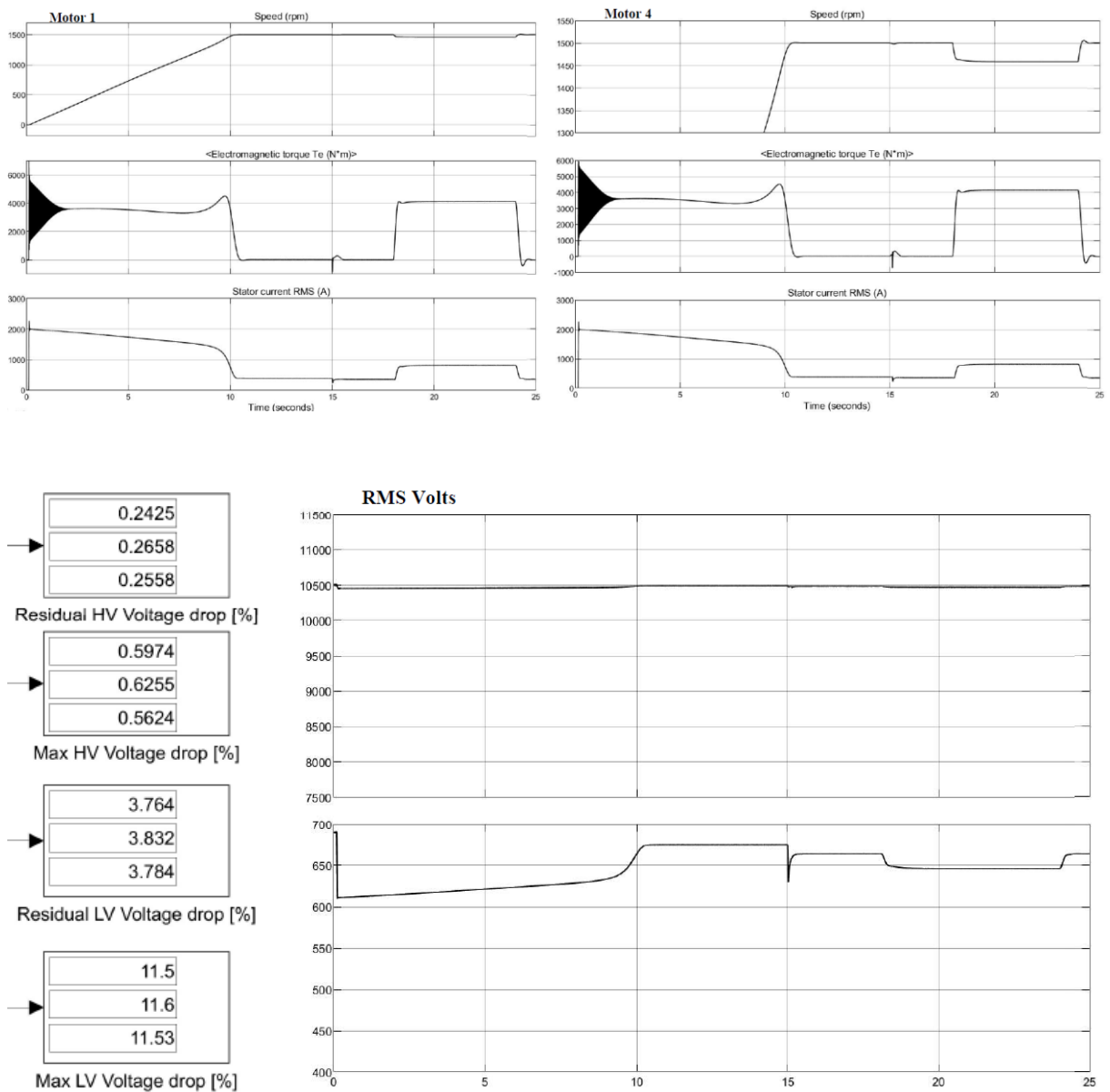
Seuraavaksi simuloitiin 2500 kVA:n muuntajien tapaus. Tulokset on esitetty kuvassa 35.

Kuva 35. Simuloinnin tulos 1000 MVA:n verkolla ja 2 x 2500 kVA:n jakelumuuntajilla.



Keskijänniteverkon toiminta oli hyvin samanlaista edellisen tapauksen kanssa. Verkkoa voisi lähes kuvailla sanalla jäykkä. Pienjännitteelläkin päästiin jo alle 9 % jännitteenalenneman käynnistettäessä ja kuormittavan haketustilanteen haasteellisuus väheni entisestään. Tämän vuoksi ei nähty tarpeelliseksi simuloida enää suurempikokoisella muuntajalla, vaan poikettiin alkuperäisestä suunnitelmasta valitsemalla viimeiseen simulointiin muuntajakoko 1000 kVA:n ja 2500 kVA:n välistä. Tämän 1600 kVA:n muuntajilla suoritettujen simulointien tulokset on esitetty kuvassa 36.

Kuva 36. Simuloinnin tulos 1000 MVA:n verkolla ja 2 x 1600 kVA:n jakelumuuntajilla.



Tulokset sijoittuvat täysin loogisesti kahden aiemmin simuloidun muuntajakoon väliin. Käynnistystilanteen jännitteenalenema kasvaa 1000 kVA:n muuntajien tapaan yli 10 %:n, mutta ei vaikuta oleellisesti järjestelmän toimintaan. Näin vahvan keskijänniteverkon tapauksessa ja kahta muuntajaa käytettäessä muuntajakoko voidaan pitää haluttaessa pienenä.

6 Johtopäätökset

Tämän opinnäytetyön tutkimusongelmana oli selvittää hakun pienjännitemonimoottorikäytön verkkovaikutusta. Käytännön tavoitteeksi asetettiin sähkökäytön ja verkkorakenteen matemaattinen mallinnus siten, että sen pohjalta voitiin luoda ANDRITZ Oy:n käyttöön helposti muokattava simulointimalli erilaisten käyttötilanteiden analysointiin. Työssä käytetyllä hakkumallilla ja verkkorakenteella on vastine todellisessa toimitusprojektissa ja kyseisestä projektista saatujen tietojen vastaavuus simulointituloksen kanssa on yhtäpitävä ainakin moottorien käynnistymisajan suhteen.

Simulointimalli on nyt laadittu kahden jakelumuuntajan tapaukseen, mutta se on helposti muokattavissa yksinkertaisemman yksimuuntajasyötön rakenteeksi. Keskijänniteverkon oikosulkuteho määritellään vain yhdellä parametrilla. Per Unit -yksikköjärjestelmää hyödyntämällä myös muuntajien näennäistehon variointi saatiin toteutettua siten, että käyttäjän tehtäväksi jää vain yhden parametrin muuttaminen. Moottorien parametrinti vaatii vähän enemmän työtä, mutta siinäkin on suureksi avuksi Matlabin tarjoama apuohjelma parametrien estimointiin. Tutkimusongelma voidaan edellä esitetyn perusteella todeta ratkaistuksi ja tavoite saavutetuksi.

Tehtyjen simulointien perusteella näyttäisi siltä, että jakelumuuntajan oikean koon valitseminen korostuu heikkoon keskijänniteverkkoon liityttäessä ja tällöin erityisesti suurihalkaisijaisia puita hakettaessa. Suurissa sellutehdashankkeissa verkkojen tehot ovat lähtökohtaisesti suuria ja toisaalta jakelumuuntajat pyritään standardoimissyistä mitoittamaan koko tehtaalle samankokoisiksi – yleensä hienoiseen ylimitoitukseen päätyen. Hakkukäytön matemaattisen mallin ja simuloinnin tärkeimmät käyttökohteet saattavatkin löytyä vanhempien ja pienempien paperitehtaiden modernisointien yhteydestä sekä kuitulevytehdas- ja biojalostamohankkeista.

7 Pohdinta

Aloitin opintoni Hämeen ammattikorkeakoulussa (HAMK) lokakuussa 2021 tavoitteena täydentää automaatiotekniikan diplomi-insinöörikoulutustani sähköalan opinnoilla S2-pätevyuden hankkimiseksi. Ensimmäisessä opintomodulissa, jonka suoritin avoimen ammattikorkeakoulun puolella, oli yhtenä kurssina sähkövoimatekniikan matematiikka. Tällä kurssilla opetetut asiat saivat kiinnostukseni heräämään matemaattisen mallinnuksen ja erityisesti transientti-ilmiöiden simuloinnin soveltamiseen omaan ammattiini liittyvissä haasteissa. Myös työnantajani näki aiheen mielenkiintoiseksi, joten opinnäytetyön aiheen valinta oli helppoa.

Matlabin, Simulinkin ja Simscapen käyttöä ei HAMKin koulutuksessa tällä hetkellä opeteta, mutta ohjelmistojen sisältämät perehdytyskoulutukset ja internetin kautta löytyvät Youtube-opetusvideot olivat hyvänä apuna. Oma taustani näihin ohjelmiin rajoittui lähinnä 1990-luvun alussa käytettyyn lausekieliseen Matlab-ohjelmointiin. Simulinkin ja Simscapen graafinen käyttöliittymä oli kuitenkin helposti omaksuttavissa ja erityisesti valmiit komponenttilohkot nopeuttivat mallinnusta. Matemaattisen taustan ymmärtäminen oli silti tarpeen esim. differentiaaliyhtälöiden numeeristen ratkaisijoiden valinnassa ja parametroinnissa.

Odotan mielenkiinnolla simulointimallin käyttöönottoa ANDRITZin organisaatiossa ja sen toivottujen hyötyjen toteutumista. Mielenkiintoinen jatkokehityksen kohde voisi olla sähkönsäädön laadun parantamiseen liittyvien verkkokomponenttien lisääminen malliin. Erityisesti moottorien aiheuttaman induktiivisen loistehon rinnakkaiskompensointiin käytettävien kondensaattoriparistojen vaikutus kuulostaa ainakin omaan korvaani tutkimisen arvoiselta asialta. Tehokertoimen parannus siirtää muuntajan näennäistehosta enemmän pätötehoksi ja voi joissain käyttötilanteissa auttaa selviämään pienemmällä muuntajakoolla.

Lähteet

ABB. (2000). *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. Yhdeksäs painos.

ANDRITZ. (n.d.). *Key Equipment: HHQ-Chipper*. [kuva] Haettu 26.10.2022 osoitteesta <https://www.andritz.com/spectrum-en/latest-issues/issue-39/increase-chipper-throughput>

Anttila, I. (2017). *Paperitehtaan sähkönjakelun mallintaminen Neplan-ohjelmalla* [opinnäytetyö, Oulun ammattikorkeakoulu] <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201705036188>

Ascher, U. & Petzold, L. (1998). *Computer Methods for Ordinary Differential equations and Differential-Algebraic equations*. SIAM.

Butcher, J. (2003). *Numerical Methods for Ordinary Differential Equations*. Wiley.

Chonacky N. & Winch D. (2005). Reviews of Maple, Mathematica, and Matlab: Coming Soon to a Publication Near You *Computing in Science & Engineering*, 7(2), 9-10.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/1401796>

de Swardt, H. (9/2007). Torque and starting of high inertia loads, part 1. *ResearchGate*.

<https://www.researchgate.net/publication/353417689>

de Swardt, H. (10/2007). Torque and starting of high inertia loads, part 2. *ResearchGate*.

<https://www.researchgate.net/publication/353417608>

Elovaara, J. & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot II*. Otatieto.

Haataja, J., Heikonen, J., Leino, Y., Rahola, J., Ruokolainen, J., Savolainen, V. (2002).

Numeeriset menetelmät käytännössä. Tieteen tietotekniikan keskus CSC.

Hietalahti, L. (2013). *Teollisuuden sähkökäytöt*. AMK-Kustannus Oy.

Huotari, K. & Partanen, J. (1998). *Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen*.

Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu.

Jyväskylän yliopisto. (n.d.). *Differentiaaliyhtälöt*. TIM - The Interactive Material -palvelu.

<https://urly.fi/2RM8>

Lähteenmäki, M. (2006). *SimMechanics 2.3 Aloitusopas*. Tampereen Ammattikorkeakoulu.

https://mlahteen.fi/arkistot/mlab_pdf/simmechanics_opas_23.pdf

Mathworks. (n.d.-a). *Choose an ODE Solver*. MathWorks help center. Matlab documentation.

[kuva] <https://urly.fi/2Wcj>

Mathworks. (n.d.-b). *Basic Solver Selection*. Choose an ODE Solver. MathWorks help center.

Matlab documentation. [kuva] <https://urly.fi/2Wcj>

Mathworks. (n.d.-c). *Best Practices for Simulating with the daessc Solver*. MathWorks help

center. Matlab documentation. <https://urly.fi/2XAK>

Mathworks. (n.d.-d). *Park Transform. Implement abc to dq0 transform*. MathWorks help

center. Matlab documentation. <https://se.mathworks.com/help/sps/ref/parktransform.html>

Mathworks. (n.d.-e.) MATLAB R2022b System Requirements for Windows. MathWorks help

center. Matlab documentation. <https://se.mathworks.com/support/requirements/matlab-system-requirements.html>

Mathworks. (n.d.-f). *Per-Unit System of Units*. MathWorks help center. Matlab

documentation. <https://urly.fi/30fU>

Mathworks. (n.d.-g). *Asynchronous Machine, Assumptions and Limitations*. MathWorks help

center. Matlab documentation. <https://urly.fi/30jc>

Merikoski, R., Turunen, E., Raivio, K., Mantere, T. (2010). Datapohjaiset mallit. Teoksessa S.

Pohjolainen (toim.), *Matemaattinen mallinnus* (ss. 77–146). Sanoma Pro Oy.

Moler, C. (n.d.). *A Brief History of MATLAB*. Technical Articles and Newsletters. MathWorks.

<https://se.mathworks.com/company/newsletters/articles/a-brief-history-of-matlab.html>

Monjo, L., Kojooyan-Jafari, H., Córcoles, F., Pedra, J. (2015). *Squirrel-Cage Induction Motor*

Parameter Estimation using a Variable Frequency Test. IEEE.

Mäkelä, T. (n.d.) *Matematiikkaa Scilabilla*. Timo Mäkelä.

<https://sites.google.com/site/tjmakela/home?pli=1>

Pohjolainen, S. (2010). *Matemaattinen mallinnus*. Sanoma Pro Oy.

Prysmian Group. (2018). *Kuparijohtiminen kosketussuojattu 1 kV voimakaapeli sektorinmuotoisilla johtimilla*. Datalehti. <https://fi.prysmiangroup.com/node/10398>

Silvennoinen, R. (2010). Kokonaislukumallit. Teoksessa S. Pohjolainen (toim.), *Matemaattinen mallinnus* (ss. 52–76). Sanoma Pro Oy.

Rimaila, J. (2020). *Hakkeen taskuruuvi osaksi älykästä hakkeenkäsittelyä* [diplomityö, Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT] <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020062245307>

Tieteen termipankki. (16.1.2023). *Sähkötekniikka: keskijännite*. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/Sähkötekniikka:keskijännite>

Tuomela, J. (2010). Differentiaaliyhtälömalleja. Teoksessa S. Pohjolainen (toim.), *Matemaattinen mallinnus* (ss. 157–187). Sanoma Pro Oy.