

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**TUULIVOIMAKÄYTÖN SIMULOINTITYÖKALUN KÄYTTÖLIITTYMÄN  
KEHITTÄMINEN**

Työn tarkastajat ja ohjaajat:

Professori Riku Pöllänen

TkT Julius Luukko

Lappeenrannassa 11.11.2008

Valtteri Haverinen

Liljankatu 1

53810 Lappeenranta

Puh: 040-5191781

## TIIVISTELMÄ

Tekijä: Valtteri Haverinen

Työn nimi: **Tuulivoimakäytön simulointityökalun käyttöliittymän kehittäminen**

Osasto: Sähkötekniikka

Vuosi: 2008

Paikka: Lappeenranta

Diplomityö. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 57 sivua, 33 kuvaa ja 3 taulukkoa.

Tarkastajat: Professori Riku Pöllänen ja TkT Julius Luukko

Hakusanat: tuulivoimakäyttö, simulointi, simulointiohjelmisto, käyttöliittymä

Tämä diplomityö käsittelee tuulivoimakäytön simulointia. Tuuligeneraattoreiden yleisimpiä konsepteja tarkastellaan sekä konseptien markkinaosuudet esitetään. Työssä käsitellään tuulivoimakäytön simulointiohjelmistoja, ja esitellään Matlab/Simulink-ohjelmistolla kehitetyn simulointityökalun käyttöliittymä. Käyttöliittymää analysoidaan syvällisemmin kuvaamalla sen kehitykseen liittyneitä vaiheita ja toiminnallisuuden kannalta tehtyjä ratkaisuja. Kehitetystä simulointityökalusta esitetään käyttötapa-analyysi.

## **ABSTRACT**

Author: Valtteri Haverinen

Title: **Development of a user interface for a wind turbine simulator**

Department: Electrical Engineering

Year: 2008

Place: Lappeenranta

Master's Thesis. Lappeenranta University of Technology. 57 pages, 33 figures and 3 tables.

Supervisors: Professor Riku Pöllänen and D.Sc. Julius Luukko

Keywords: wind power, simulation, simulation tool, user interface

This thesis concerns wind power simulation. An overview of wind turbine concepts and their market shares is given. Simulation programs for wind power simulation are discussed and a user interface for a Matlab/Simulink-based simulation tool is developed. The user interface is analyzed further and phases involved in its development are discussed. A use-case analysis is presented for the developed user interface.

## **ALKUSANAT**

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolla osana The Switch Oy:n rahoittamaa tutkimushanketta, jonka osana kehitettiin simulointityökalu tuulivoimakäytölle.

Haluan kiittää työni tarkastajia ja ohjaajia, professori Riku Pöllästä ja tekniikan tohtori Julius Luukkoa, asiantuntemuksesta ja ideoista työn aikana. Lisäksi haluan kiittää DI Risto Tiaista lukuisista neuvoista ja vastauksista kysymyksiini.

## SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>5</b>
1.1	Maailman sähköntuotannon taustaa .....	5
1.2	Tuulivoima sähköntuotannossa.....	7
1.3	Tuulivoimaloiden vaikutukset sähköverkolle .....	10
1.4	Diplomityön sisältö luvuittain.....	11
<b>2</b>	<b>TUULIVOIMAKÄYTTÖ.....</b>	<b>12</b>
2.1	Tuulivoimaloiden jaottelu konseptien mukaan .....	13
2.1.1	Konsepti A – Vakionopeuksinen konsepti.....	14
2.1.2	Konsepti B – Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen konsepti .....	16
2.1.3	Konsepti C – Muuttuvanopeuksinen konsepti osatehoisella taajuusmuuttajalla .....	16
2.1.4	Konsepti D – Täysin muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö täysitehoisella taajuusmuuttajalla.....	18
2.2	Vertailua konseptien välillä .....	19
2.2.1	Markkinaosuudet ja kehityssuunta .....	22
2.3	Verkkoliityntäehdot.....	23
<b>3</b>	<b>TUULIVOIMAKÄYTÖN SIMULOINTI.....</b>	<b>25</b>
3.1	Dynamiikan vaikutus simuloinnissa ja yhteiskäyttö .....	25
3.2	Simulointiohjelmistot .....	26
3.2.1	Matlab / Simulink .....	26
3.2.2	Muut piirisimulaattorit .....	29
<b>4</b>	<b>TUULIVOIMAKÄYTÖN SIMULOINTIYMPÄRISTÖN KÄYTTÖLIITTYMÄ.....</b>	<b>32</b>
4.1	Simulaattoriprojektin kuvaus .....	32
4.2	Simulointimallin rakenne.....	32
4.3	Simulointikirjaston käyttöliittymä.....	34
4.4	Käyttöliittymän toteutussuunnitelma.....	35
4.5	Käyttöliittymän toteutunut toimintamalli .....	38
4.5.1	UI Callbacks .....	40

4.5.2	Simulointimallin pää- ja alihaarat.....	40
4.5.3	Käyttöliittymän ulkoasu.....	41
4.5.4	Käyttöliittymä rakennusvaiheessa .....	42
4.5.5	Simulointimallin parametrisointi.....	44
4.6	Valmiin käyttöliittymän pohdintaa.....	47
4.7	Kehitysehdotukset .....	47
<b>5</b>	<b>SIMULOINTITYÖKALUN KÄYTTÖTAPAUSSANALYYSI .....</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>YHTEENVETO .....</b>	<b>54</b>
	<b>LÄHTEET.....</b>	<b>55</b>

## KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Merkinnät:

$f$	taajuus
$I$	virta
$n$	pyörimisnopeus
$t$	tonni
$\Delta t$	aika-askel
$T$	vääntömomentti

### Lyhenteet:

AC	<i>Alternating Current</i> , vaihtovirta
DC	<i>Direct Current</i> , tasavirta
DD	<i>Direct Drive</i> , suoraveto
DFIG	<i>Double-fed Induction Generator</i> , kaksoissyöttöinen epätahtigeneraattori
EESG	<i>Electrically Excited Synchronous Generator</i> , vierasmagneoitu tahtigeneraattori
EIA	<i>Energy Information Administration</i>
EMTDC	<i>Electromagnetic Transients including DC</i> , PSCAD:n simulointimoottori
EMTP	<i>ElectroMagnetic Transients Program</i> , sähkömagneettisten transienttien simulointiohjelma
FEM	<i>Finite Element Method</i> , elementtimenetelmä
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , nopea Fourier-muunnos
G	<i>Gear</i> , vaihde
GUI	<i>Graphical User Interface</i> , graafinen käyttöliittymä
GUIDE	<i>Graphical User Interface Developing Environment</i> , Matlabin käyttöliittymän suunnitteluun tarkoitettu graafinen työkalu
PLECS	<i>Piece-wise Linear Electrical Circuit Simulation</i> , paloittain lineaarinen sähköpiirien simulointikirjasto Simulinkiin
PM	<i>Permanent Magnet</i> , kestmagneetti
PMG	<i>Permanent Magnet Generator</i> , kestmagneettigeneraattori

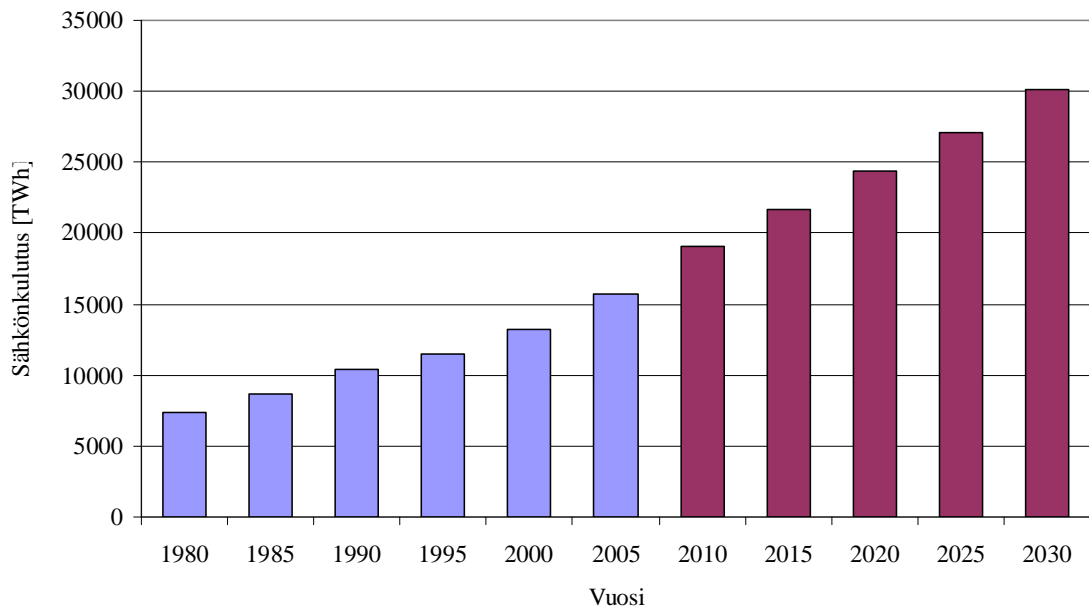
PMSG	<i>Permanent Magnet Synchronous Generator</i> , kestmagneetti- tahtigeneraattori
PSB	<i>Power System Blockset</i> , SimPowerSystemsä edeltävä nimitys Simulinkin kaupallisesta kirjastosta
PSCAD	<i>Power System Computer Aided Design</i> , sähkövoimajärjestelmien simulointiympäristö
SCIG	<i>Squirrel-cage Induction Generator</i> , oikosulkugeneraattori
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> , harmoninen särö
UI	<i>User Interface</i> , käyttöliittymä
WRIG	<i>Wound Rotor Induction Generator</i> , liukurengasgeneraattori
WRSG	<i>Wound Rotor Synchronous Generator</i> , vierasmagnetoitu tahtigeneraattori
WWEA	<i>World Wind Energy Association</i> , Maailman tuulienergiayhdistys



## 1 JOHDANTO

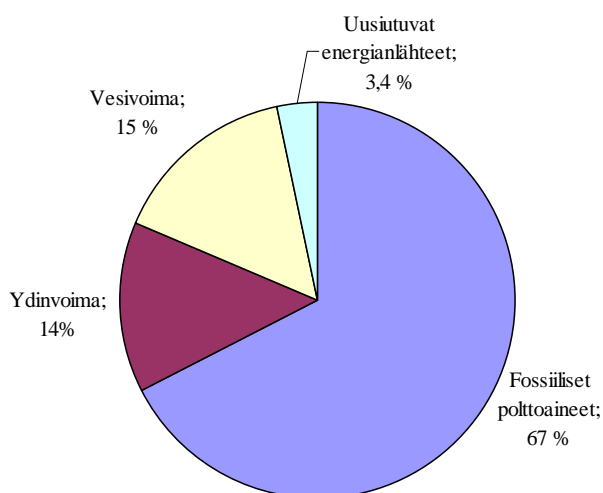
### 1.1 Maailman sähköntuotannon taustaa

Maailman sähkönkulutus on kasvanut voimakkaasti valtioiden teollistumisesta lähtien. Vuonna 2005 maailman sähkönkulutus oli 15 700 TWh ja vuoden 2010 sähkönkulutukseksi ennustetaan 19 000 TWh. Kuvassa 1.1 esitetään sähkönkulutuksen kehitys vuodesta 1980 vuoteen 2005 sekä ennuste vuoteen 2030 saakka.



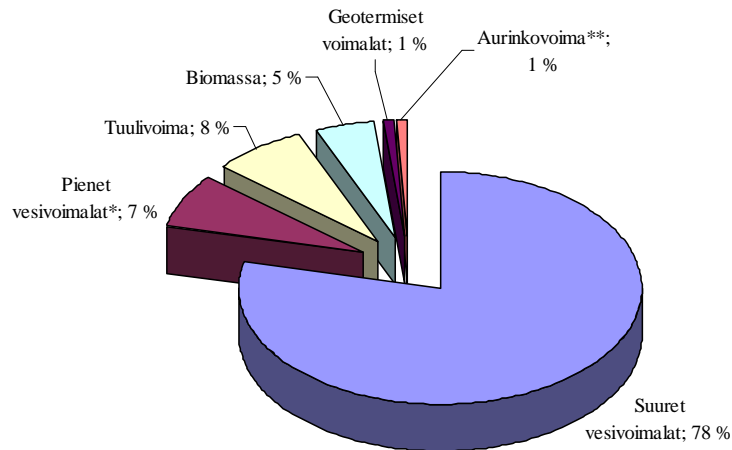
Kuva 1.1 Maailman sähkönkulutus vuosilta 1980-2005, sekä ennuste vuosille 2010-2030. (EIA 2008)

Suurimmat energialähteet sähköntuotannossa tällä hetkellä voidaan jakaa fossiilisiin polttoaineisiin, ydinvoimaan ja vesivoimaan. Edellä mainituista fossiiliset polttoaineet ovat olleet kautta aikojen merkittävä energianlähde ja tällä hetkellä niillä tuotetaan selkeästi suurin osuus sähköstä. Neljäntenä energialähderyhmänä voidaan pitää uusiutuvia energialähteitä pois lukien suuret vesivoimalat. Suuret vesivoimalat erotetaan usein muista uusiutuvista energialähteistä, koska vesivoiman osuus on todella suuri niihin nähden. Kuva 1.2 esittää energialähteiden osuuksia maailman sähköntuotannossa.



Kuva 1.2 Sähkön tuotannon energialähteiden osuudet maailman sähkön tuotannossa. (REN21 2008)

Kuvan 1.2 mukaan fossiilisilla polttoaineilla tuotetaan tällä hetkellä 67 % tarvittavasta sähköstä, kun taas uusiutuvien energialähteiden osuus on alle viidesosa. Uusiutuvista energialähteistä vesivoimalla on selkeästi suurin osuus, mutta sen lisäyskapasiteetti on rajallinen. Vuosina 2002–2006 suurten vesivoimaloiden tuotantokapasiteetti kasvoi vuosittain noin 3 %. Hidas kasvu sekä voimakkaasti kohonnut sähkönkulutus ovatkin pääsyitä vesivoiman osuuden 4 %-yks laskulle vuodesta 1996. Sen sijaan aurinko- ja tuulivoima ovat kaupalliselta potentiaaliltaan mielenkiintoisia energialähteitä tarkasteltaviksi, koska niiden kasvunopeus ja potentiaalinen lisäyskapasiteetti on aivan eri luokassa vesivoimaan verrattuna. (REN21 2008) Kuvassa 1.3 vertaillaan uusiutuvien energialähteiden keskinäisiä osuuksia maailman sähkön tuotannossa vuonna 2006.



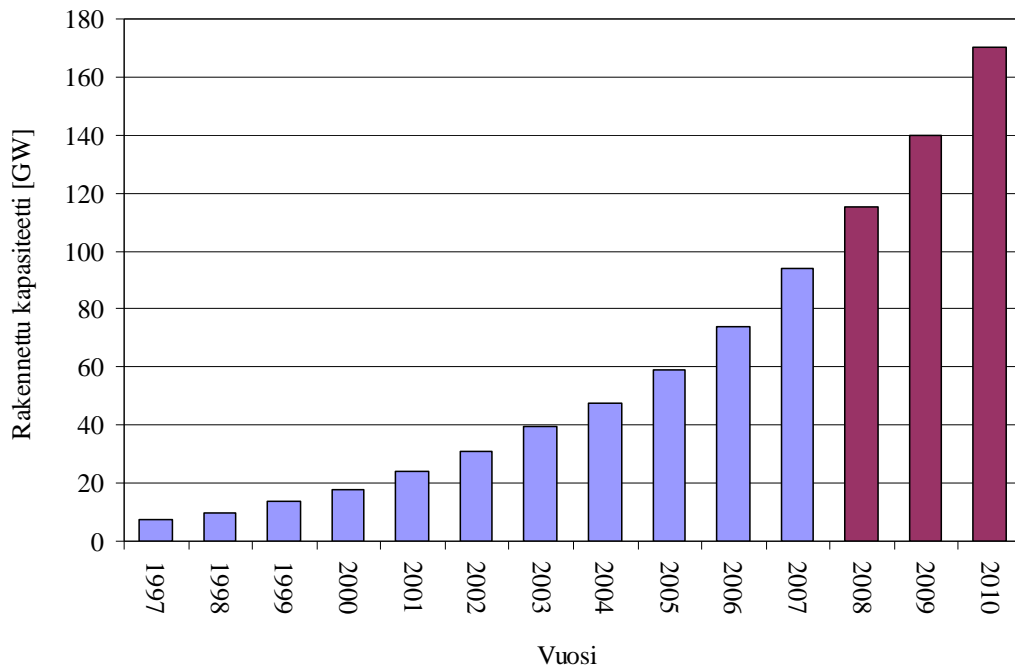
Kuva 1.3 Uusiutuvien energialähteiden keskinäiset osuudet maailman sähköntuotannossa vuoden 2006 lopulla. (REN21 2008)  
 \* yleensä alle 10MW voimalaitokset  
 \*\* Paikallisessa sähköverkossa sekä itsenäisinä verkkoina toimivat voimalaitokset.

Kuvasta 1.3 nähdään suurien vesivoimaloiden merkittävän suuri osuus, sekä pienempien energialähteiden keskinäiset osuudet sähköntuotannossa. Aurinkovoimalla tuotetun sähkön osuus kasvoi vuosittain 60 % aikavälillä 2002–2006, mikä on suurin kasvunopeus kuvan 1.3 osuuksista. Vuoden 2007 aikana tuulivoimalla tuotettua tehoa lisättiin kuitenkin verkkoon enemmän kuin millään muulla uusiutuvalla tehonlähteellä tuotettua tehoa. Tuulivoiman vuosittainen kasvunopeus oli 30 % ja muiden energialähteiden vuosittaiset kasvunopeudet olivat noin 3-7 % (REN21 2008). Koska tässä työssä tarkastellaan tuulivoimatuotantoa, ei muita energialähteitä käsitellä syvällisemmin jatkossa.

## 1.2 Tuulivoima sähköntuotannossa

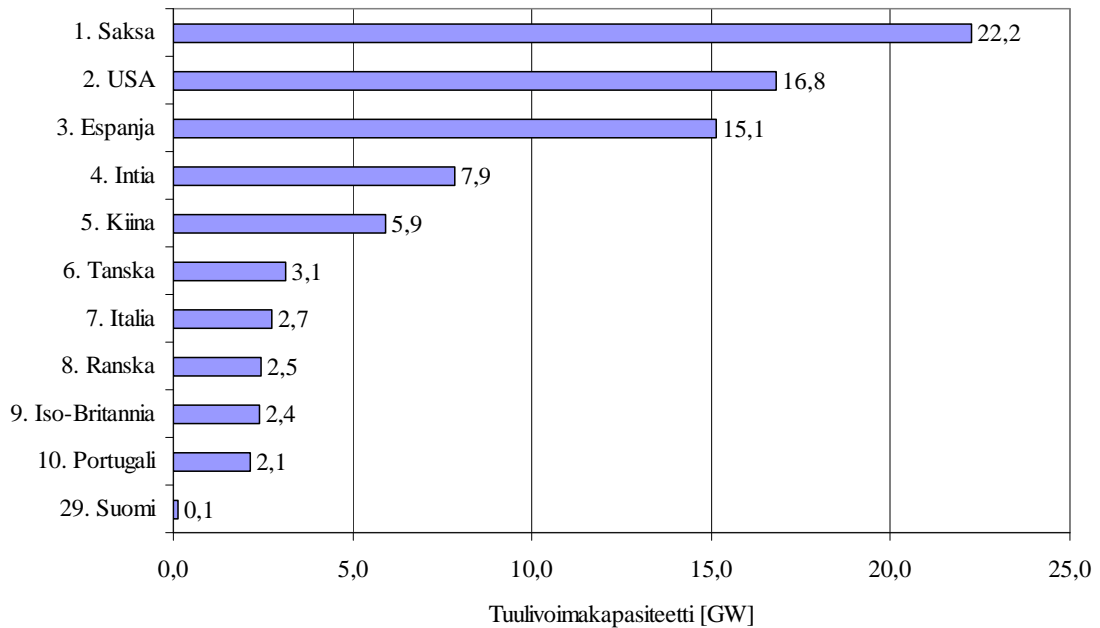
Tuulivoima on nopeasti kasvava uusiutuvan energiatuotannon toimiala. Viimeisten 10 vuoden aikana tuulivoimala-asennusten vuosittainen kasvu on ollut noin 30 % (Li, Chen 2008). Vuonna 2007 sähköverkkoihin lisättiin 19,7 GW edestä tuulivoimaloita kokonaiskapasiteetin noustessa 93,8 GW:iin. Vuoteen 2010 mennessä tuulivoimakapasiteetin ennustetaan nousevan 170 GW:iin. Suomessa vuoden 2007 kasvu oli 28 %.

Kuva 1.4 esittää tuulivoimaloiden sähköntuotantokapasiteetin lisäystä aikavälillä 1997–2010 (WWEA, 2008).



Kuva 1.4 Maailman tuulivoimakapasiteetti vuosilta 1997-2007, sekä ennuste vuosille 2008-2010.

Vuoden 2007 lopussa sähköverkkoon kytketystä tuulivoiman kokonaiskapasiteetista 61 % oli Euroopassa. Eurooppa onkin perinteisesti ollut suurin tuulienergian hyödyntäjä. Vastaavasti Pohjois-Amerikan osuus vuonna 2007 oli 20 % ja Aasian 17 % (WWEA 2008). Kuvassa 1.5 on esitetty tuulienergian 10 suurinta tuottajamaata.



Kuva 1.5 Tuulivoimalla tuotetun sähkön kapasiteetit kymmenessä kärkimaassa sekä Suomessa vuoden 2007 lopussa. (WWEA 2008)

Kuvasta 1.5 nähdään, että tuulienergian tuotanto jakaantuu pääasiassa muutaman maan kesken, koska 58 % sähköverkkoon kytketystä kapasiteetista löytyy kolmen ja 86 % kymmenen kärkimaan verkosta. Kuvasta näkyy myös Euroopan vahva panostus tuulivoimaan, mikä näkyy myös suurimpien tuulivoimalavalmistajien joukossa. Markkinoiden tilanne vuonna 2006 oli taulukon 1.1 mukainen.

Taulukko 1.1 Tuulivoimalavalmistajien markkinaosuudet vuonna 2006. (Merril Lynch 2007)

Yritys	Maa	2006 osuus [%]	Lisäys 2006 [MW]	Kokonaisosuus [%]
Vestas	Tanska	28	4239	34
Gamesa	Espanja	16	2346	14
GE Wind	USA	15	2326	13
Enercon	Saksa	15	2316	15
Suzlon	Intia	8	1157	4
Siemens	Saksa	7	1103	8
Nordex	Saksa/Tanska	3	505	4
Repower	Saksa	3	480	3
Acciona	Espanja	3	426	1
Goldwind	Kiina	3	416	1
Muut		5	689	10

Tuulivoima-alan voimakas kasvu on suurentanut yritysten lukumäärää markkinoilla, mikä on pakottanut yritykset kilpailemaan aktiivisesti asiakkaita. Uusia teknisiä ratkaisuja etsitään ja ideoita tutkitaan jatkuvasti. Esimerkiksi kaksoissyöttöiset

epätahtigeneraattorit (DFIG, *Doubly-fed Induction Generator*) olivat melko tuntemattomia tuulivoimakäytöissä vielä 90-luvun alkupuolella, kun taas tällä hetkellä DFIG:iin perustuva konsepti on yksi yleisimmistä uusissa tuuligeneraattoreissa. Joitakin vuosia sitten myöskään suoravetoisia kestromagneettitahtigeneraattoreita (PMSG, *Permanent Magnet Synchronous Generator*) ei juuri käytetty, mutta niiden suorituskyvyn parantuminen, korkea hyötysuhde sekä kestromagneettimateriaalin halventuminen ovat tehneet niistä kilpailukykyisiä muiden joukossa.

### **1.3 Tuulivoimaloiden vaikutukset sähköverkolle**

Sähköntuotanto on jo kauan pohjautunut suuriin keskitettyihin tuotantolaitoksiin korkeajännitelinjojen läheisyydessä, kun taas tuulivoimalat edustavat päinvastaista suuntausta. Tuulivoimalat kytkeytyvät usein keskijänniteverkkoon ja ovat pienitehoisia tuotantolaitoksia ympäri sähköverkkoa. Sähköntuotannon kannalta tämä edustaa hajautettua tuotantomenetelmää, mikä asettaa uusia teknisiä haasteita sähköverkossa mm. suojauskien ja tehonsäädön kannalta.

Sähköverkkojen operaattorit ovat vastanneet hajautetun sähköntuotannon asettamiin haasteisiin laatimalla voimantuotannon verkkoliitynnälle ehtoja ja säännöksiä. Säännökset vaihtelevat kuitenkin eri maissa paljon. Tällä hetkellä paljon Euroopassa käytetty säännöstö on pohjoissaksalaisen sähköyhtiön E.ON:n kirjoittama. Säännöstö käsittää voimalaitoksien liityntäehdot korkeajänniteverkkoon sekä laitoksien toimintavaatimukset sähköverkon vikatilanteissa (E.ON 2006). Säännöksiä täsmällinen selvitys ja tuulivoimaloiden vaikutusten ennustaminen sähköverkolle onkin jo suunnitteluvaiheessa tärkeää niin valmistajalle kuin myös asiakkaalle. Suunnittelussa voidaan hyödyntää simulointiohjelmistoja, joiden avulla voidaan tarkastella tuulivoimalan vaikutuksia esimerkiksi sähköverkon jännitevaihteluihin. Tässä työssä esitetään projektissa kehitetylle simulointityökalulle suunnitellun käyttöliittymän kehitysvaiheita ja analysoidaan sen toimintaa.

#### **1.4 Diplomityön sisältö luvuittain**

**Luvussa 2** tarkastellaan aluksi yleisimpiä markkinoilla olevia tuuligeneraattori-konsepteja jaotellen konseptit sähköteknisestä näkökulmasta. Sen jälkeen konsepteja vertaillaan keskenään sekä esitetään niiden markkinaosuudet. Lopuksi käsitellään tuuligeneraattorien verkkoliityntäehtoja

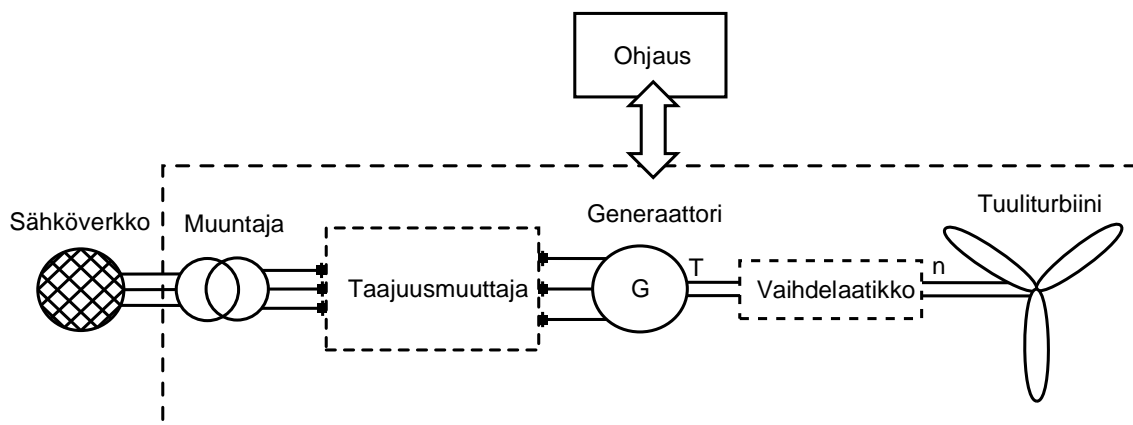
**Luvussa 3** käsitellään tuulivoimakäytön simulointiin soveltuvia ohjelmistoja. Dynamiikan vaikutuksiin perehdytään sekä Matlab/Simulink – ohjelmiston ominaisuuksia käsitellään tarkemmin.

**Luvussa 4** käsitellään tuulivoimasimulaattoriprojektin yhteydessä kehitettyä simulointityökalua sekä sen käyttöliittymää. Käyttöliittymää analysoidaan syvällisemmin esittämällä sen kehitykseen liittyneitä vaiheita ja toiminnallisuuden kannalta tehtyjä ratkaisuja.

**Luvussa 5** esitetään kehitetyn simulointityökalun käyttötapaanalyysi, jossa kuvataan vaiheittain käyttäjän toimia simulointityökalun eri käyttövaiheissa.

## 2 TUULIVOIMAKÄYTTÖ

Tuulivoimakäytöllä tarkoitetaan tuuliturbiinin, generaattorin, mahdollisen vaihdelaatikon ja suuntaajien sekä ohjauksen ja verkkoliittymän muodostamaa kokonaisuutta. Kuvassa 2.1 havainnollistetaan tuulivoimakäytön rakennetta.

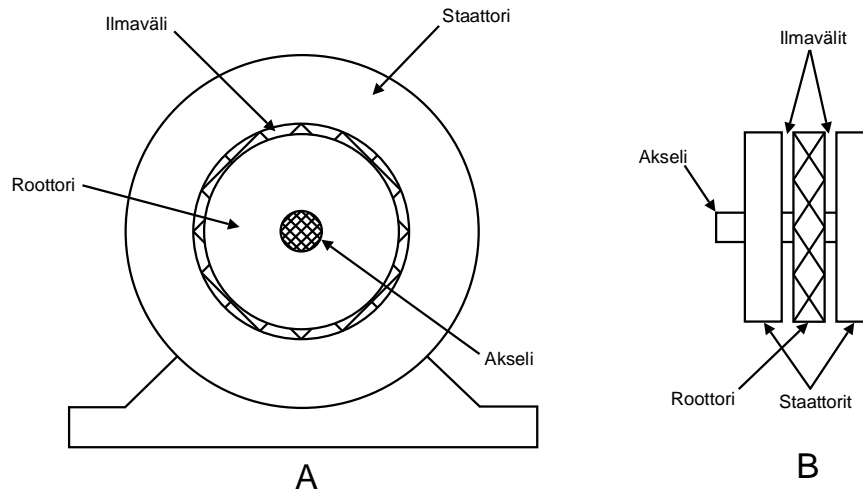


Kuva 2.1 Tuulivoimakäytön periaatekuva.

Kuvan 2.1 taajuusmuuttajalla tarkoitetaan tasa- ja vaihtosuuntaajien sekä DC-välipiirin muodostamaa kokonaisuutta. Vaihdelaatikkaa käytetään sovittamaan turbiinin nopeus generaattorin nopeuteen, koska on vaikea tehdä generaattoria joka olisi hyvä turbiinin nopeudella. Vaihdelaatikon käyttö on yleistä esimerkiksi suurinopeuksisissa käytöissä.

Tuulivoimakäytön generaattorit voidaan jakaa tahtigeneraattoreihin ja epätahtigeneraattoreihin. Tahtigeneraattorit jaetaan edelleen vierasmagnetoituihin ja kestmagnetoituihin generaattoreihin. Epätahtigeneraattoreiden jako tehdään puolestaan häkkikäämittyjen- ja liukurengasgeneraattorien välillä. Lisäksi generaattorit voidaan jaotella sähkömagneettisen rakenteensa perusteella radiaali- ja aksiaalivuogeneraattoreihin, joiden periaatteelliset rakenteet on esitetty kuvassa 2.2.





Kuva 2.2 Tyypillisen pyörivän sähkökoneen pääosat. Staattori on paikallaan ja roottori vapaa pyörimään. Kuvassa A radiaalivuogeneraattorin ja kuvassa B tuplastaattorisen aksiaalivuokestomagneettigeneraattorin rakenne.

## 2.1 Tuulivoimaloiden jaottelu konseptien mukaan

Tuulivoimalat voidaan jakaa ryhmiin niiden rakenteiden ja käytettyjen generaattorien perusteella. Generaattorin pyörimisnopeuden mukaan konseptit jaetaan vakionopeuksisiin, rajoitetusti muuttuvanopeuksisiin sekä täysin muuttuvanopeuksisiin luokkiin. Viimeisenä mainittu konsepti voidaan jakaa edelleen osatehoisten ja täysitehoisten suuntaajien mukaan. Vaihteistoa käyttävillä tuulivoimaloilla yleinen jakoperiaate on jako moniportaisia vaihteita käyttäviin nopeisiin generaattoreihin sekä yksiportaisia vaihteita käyttäviin hitaisiin generaattoreihin. Yleisesti käytetään seuraavaa neljän pääkonseptin jaottelutapaa. (Hansen 2007)

### Konsepti A – Vakionopeuksinen tuulivoimakäyttö

Vakionopeuksinen tuuliturbiini moniportaisella vaihdelaatikolla ja suoraan muuntajan kautta sähköverkkoon kytketyllä oikosulkugeneraattorilla (SCIG, *Squirrel-cage Induction Generator*). Konsepti tunnetaan yleisesti myös tanskalaisena konseptina, koska monet tanskalaiset valmistajat käyttivät rakennetta 80- ja 90-luvulla.

### Konsepti B – Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö muutettavalla roottorin resistanssilla

Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini moniportaisella vaihdelaatikolla ja liukurengasgeneraattorilla (WRIG, *Wound Rotor Induction Generator*). Roottorin

käämitys on kytketty sarjaan säädettävän vastuksen kanssa. Tunnetaan myös Optislip-konseptina.

### **Konsepti C – Muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö osatehoisella taajuusmuuttajalla**

Muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini kaksoissyöttöisellä epätahtigeneraattorilla (DFIG, *Doubly-fed Induction Generator*) ja lapakulmien säädöllä. Staattori on kytketty sähköverkkoon suoraan muuntajan kautta, ja roottori osatehoisen taajuusmuuttajan välityksellä. Nopeuden muutosrajat ovat  $\pm 30\%$  generaattorin synkronisesta nopeudesta.

### **Konsepti D – Täysin muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö täysitehoisella taajuusmuuttajalla**

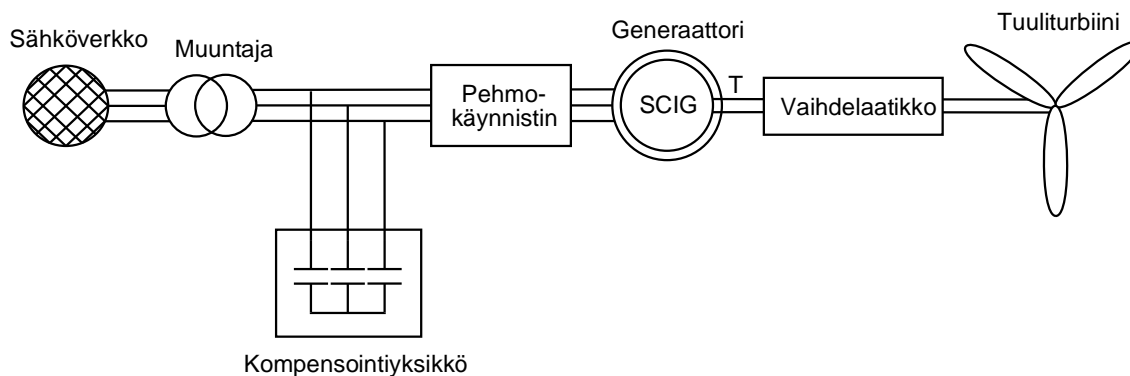
Täysin muuttuvanopeuksinen lapakulmasäätöinen tuuliturbiini, jossa generaattori on kytketty sähköverkkoon täysitehoisen taajuusmuuttajan kautta. Usein kyseessä on vaihteeton tuulivoimakäyttö, jossa käytetään suoravetoista hitaasti pyörivää tahtigeneraattoria. Generaattorina voidaan käyttää joko vierasmagnetoitua konseptia (WRIG tai WRSG, *Wound Rotor Synchronous Generator*), kestmagnetoitua konseptia (PMSG, *Permanent Magnet Synchronous Generator*) tai epätahtigeneraattoria (SCIG).

Lisäksi on olemassa useita edellä mainituista päätyypeistä poikkeavia tai niitä mukailevia konsepteja. Yksi tällaisista mukaelmista on lisätä D-konseptiin yksiportainen vaihteisto, joka nostaa pyörimisnopeuden vähintään kuusinkertaiseksi, jolloin generaattorin (esim. PMSG) hyötysuhdetta saadaan parannettua. Järjestelmää kutsutaan Multibrid-konseptiksi. Tämä on mahdollinen ratkaisu ongelmaan, jossa suurille generaattoreille ominaista hidasta pyörimisnopeutta saadaan lisättyä jolloin generaattorin tuottamaa tehoa saadaan kasvatettua. Toisaalta ratkaisu tuo mukanaan vaihteiston sisältämät haitat. (Polinder ym. 2006)

#### **2.1.1 Konsepti A – Vakionopeuksinen konsepti**

Vakionopeuksisia tuuliturbiineja käytetään moniportaisen vaihdelaatikon kanssa muuntajan kautta sähköverkkoon kytkettynä. Generaattorina käytetään

oikosulkugeneraattoria SCIG. Konseptia kutsutaan vakionopeuksiseksi, koska SCIG toimii ainoastaan kapealla alueella synkronisen nopeuden lähellä. Konseptin mukainen rakenne kuluttaa loistehoa, ja siksi siihen lisätään yleensä oma loistehon kompensointiyksikkö rinnalle. Pehmokäynnistintä käytetään tasaamaan verkkoon liityntää. Kuvassa 2.3 esitetään konseptin rakenne.



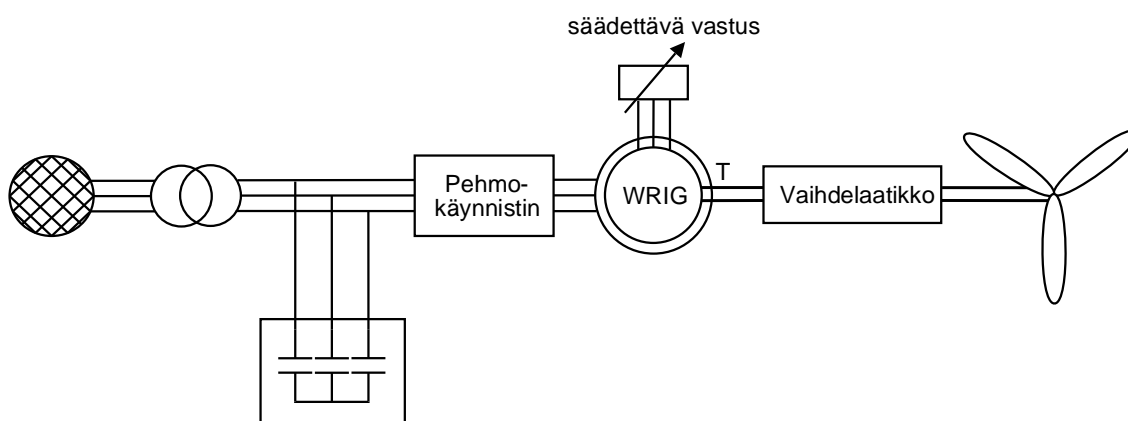
Kuva 2.3 Konseptin A periaatekuva, jossa SCIG:a käytetään vakionopeudella.

SCIG:n etuja ovat yksinkertainen ja robusti rakenne sekä helppo ja suhteellisen halpa valmistus. Haittoja puolestaan ovat nopeuden säädöttömyys ja toimivuus ainoastaan kapealla nopeusalueella, jossa vain generaattorin synkronista nopeutta suuremmat nopeudet ovat sallittuja. Vakionopeuksisessa tuulivoimakäytössä tuulen nopeuden vaihtelut vaikuttavat suoraan mekaanisen ja sähköisen vääntömomentin vaihteluun. Tämä aiheuttaa suuria mekaanisia voimia ja voi johtaa värähtelyyn turbiinin ja generaattorin akselin välillä. Turbiinin nopeutta ei voida myöskään säätää tuulen aerodynaamisen tehokkuuden mukaan. Konseptin mukainen rakenne vaatii kolmiosaisen vaihdelaatikon, joka lisää merkittävästi voimansiirron hitausmassaa sekä investointikustannuksia. Vaihteisto edustaa myös aina hyvin vikaherkkää komponenttia tuulivoimaloissa. Lisäksi sähköverkon jännitteen säätäminen ei onnistu, koska generaattorin magnetointivirta otetaan suoraan staattorilta. (Li, Chen 2008)

Konsepti oli 90-luvun alussa ylivoimaisesti suosituin ja vuonna 1995 sitä käytettiin yli 70 %:ssa uusista tuulivoimaloista. Konseptin käyttö on kuitenkin ollut tasaisessa laskussa muihin uudempiin ja teknisesti kehittyneempiin konsepteihin verrattuna. Vuonna 2005 konseptin mukaista rakennetta käytettiin enää noin neljäsosassa uusista tuulivoimaloista. (Hansen 2007)

### 2.1.2 Konsepti B – Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen konsepti

Rajoitettu muuttuvan nopeuden tuulivoimakäyttö moniportaisella vaihdelaatikolla tunnetaan myös Optislip-konseptina, joka on tanskalaisen Vestas-yrityksen 90-luvun puolivälissä lanseeraama tekniikka. Konsepti käyttää liukurengasgeneraattoria (WRIG), jossa roottorin käämityksiin on kytketty säädettävä resistanssi. Generaattorin staattori on kytkettynä suoraan muuntajan kautta sähköverkkoon. Pyörimisnopeutta ja tehoa säädetään muuttamalla resistanssia ja jättämää, jolloin dynaaminen säätöalue on tyypillisesti 0-10 % generaattorin synkronisen nopeuden yläpuolella. Liukurenkaiden käyttö generaattorissa ei ole välttämätöntä ja esimerkiksi Vestas on korvannut ne optisesti ohjatulla ulkoisella vastuksella. Konsepti tarvitsee lisäksi loistehon kompensointiyksikön ja pehmokäynnistimen kuten A-konsepti. Konseptin rakenne esitetään kuvassa 2.4.



Kuva 2.4 Rajallisesti muuttuvanopeuksisen konseptin periaatekuva.

Konseptin käyttö on ollut aina suhteellisen vähäistä, ja parhaimmillaankin 2000-luvun alussa rakennetta käytettiin alle neljäsosassa uusista tuulivoimaloista. Nykyään sen käyttö on lähes olematonta suhteessa konsepteihin verrattuna niiden paremman säädettävyyden ja hyötysuhteen ansiosta.

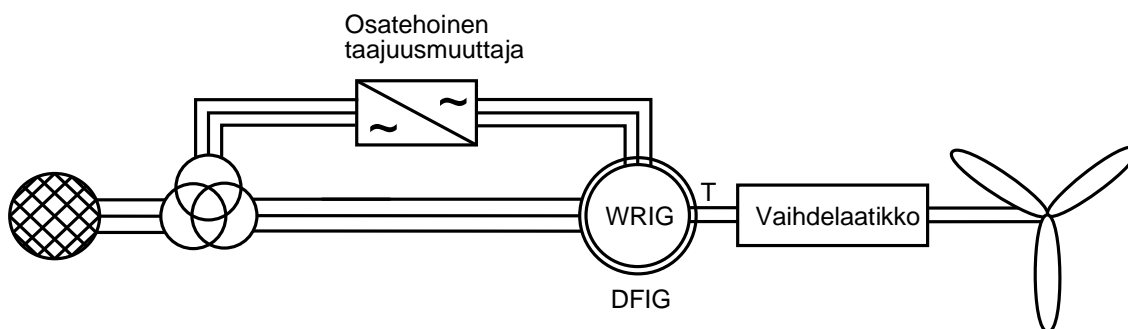
### 2.1.3 Konsepti C – Muuttuvanopeuksinen konsepti osatehoisella taajuusmuuttajalla

Tämä konfiguraatio tunnetaan DFIG-konseptina, mikä tarkoittaa muuttuvanopeuksista tuuliturbiinia WRIG:lla ja osatehoista taajuusmuuttajaa roottoripiirissä. Konsepti on alun perin saksalaisen Tacke-yrityksen markkinoille tuoma tekniikka vuodelta 1996.

Staattori on kytketty suoraan sähköverkkoon kuten edellisessä konseptissa, mutta roottori kytketään osatehoisen taajuusmuuttajan kautta. Tyypillisesti käytön nopeusalue on  $\pm 30\%$  generaattorin synkronisesta nopeudesta. Osatehoinen taajuusmuuttaja mitoitetaan 25-30% mukaan generaattorin kapasiteetista, joka tekee konseptista taloudellisesti kiinnostavan vaihtoehdon. Verrattuna Optislip-konseptiin, roottorin jarrutusenergia voidaan syöttää sähköverkkoon taajuusmuuttajan kautta. Taajuusmuuttajan avulla säädetään myös loistehon kompensointia sekä suoritetaan generaattorin pehmokytkeä verkkoon. Konseptin mukainen rakenne on esitettyä kuvassa 2.5

Konseptin huonot puolet:

- Moniportainen vaihdelaatikko on välttämätön voimansiirrossa, koska DFIG:n pyörimisnopeus on kaukana normaalista turbiinin nopeudesta (10–25 rpm). Vaihdelaatikko taas vaatii säännöllistä huoltoa ja lisää tehohäviöitä.
- Liukurenkaita käytetään taajuusmuuttajan kytkemiseksi roottoriin, ja liukurenkaiden hiiliharjat vaativat säännöllistä huoltoa.
- Verkon vikatilanteissa suuret staattorivirrat synnyttävät suuria roottorivirtoja, joten taajuusmuuttaja täytyy suojata tuhoutumiselta.

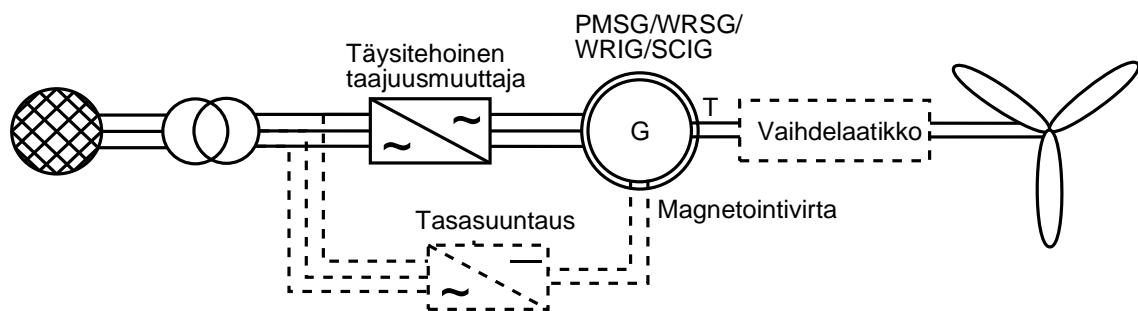


Kuva 2.5 Muuttuvanopeuksisen konseptin periaatekuva, jossa kaksoissyötetty WRIG.

Konseptin mukainen rakenne tuli markkinoille 90-luvun lopussa ja on siitä lähtien ollut voimakkaassa kasvussa jatkuvasti. Vuonna 2005 yli puolet uusista tuulivoimaloista oli konseptin mukaisia tehden siitä ylivoimaisesti suosituimman.

### 2.1.4 Konsepti D – Täysin muuttuvanopeuksinen tuulivoimakäyttö täysitehoisella taajuusmuuttajalla

Konseptin mukaisessa käytössä on täysin muuttuvanopeuksinen lapakulmasäätöinen tuuliturbiini, jonka staattori on kytketty sähköverkkoon täysitehoisen taajuusmuuttajan kautta. Usein kyseessä on vaihteeton tuulivoimakäyttö, jossa käytetään suoravetoista hitaasti pyörivää moninapaista tahtigeneraattoria. Merkittävin ero vaiheistetun ja suoravetoisen tuuliturbiinin välillä on generaattorin pyörimisnopeus. Suoravetoisen generaattori pyörii hitaasti, koska generaattorin roottori on suoraan kytketty turbiinin keskiöön. Generaattorina voidaan käyttää vierasmagnetoitua konseptia (WRSG), kestmagnetoitua konseptia (PMSG) tai epätahtigeneraattoria (SCIG). Verrattuna osatehoiseen taajuusmuuttajaan, täysitehoinen taajuusmuuttaja suorittaa loistehosäädön ja generaattorin pehmokytken sähköverkkoon koko tuuliturbiinin nopeusalueella (0-100 % synkronisesta nopeudesta). Ratkaisu on kalliimpi ja aiheuttaa suuremmat tehohäviöt taajuusmuuttajan tehoelektronikassa, koska kaiken tehon täytyy mennä taajuusmuuttajan kautta. Konseptissa on kuitenkin kaikkia muita konsepteja parempi hyötysuhde osakuormilla, joilla tuulivoimalat toimivat suurimman osan ajastaan. Kuvassa 2.6 esitetään konseptin periaatekuva.



Kuva 2.6 Konseptin D suoravetoisen tuuligeneraattorikonseptin periaatekuva. Vaihteiston käyttö ei ole välttämätöntä, mutta myös siihen perustuvia ratkaisuja on olemassa. Vierasmagnetoitujen generaattorien tapauksessa niille syötetään magnetointivirta esimerkiksi kuvan esittämällä tavalla.

Kuvassa 2.6 esitetyt generaattorit voidaan jakaa vierasmagnetoituihin ja kestmagnetoituihin generaattoreihin, joiden osilta rakenne sekä kytkentä poikkeavat esitetyssä kuvassa. Vierasmagnetoiduista generaattoreista käytetään usein lyhennettä EESG (*Electrically Excited Synchronous Generator*). Vierasmagnetoiduilla generaattoreilla (WRSG ja WRIG) magnetointivirta tuodaan roottorin käämityksille

ulkoisen vastuksen ja tasasuuntaajan kautta. Magnetointia varten generaattorissa täytyy olla liukurenkaat ja hiiliharjat, mikä lisää häviöitä. Tämä lisää myös tarvittavien osien ja käämitysten määrä, mikä johtaa painavaan ja kalliiseen rakenteeseen.

### **Kestomagneettitahtigeneraattori PMSG**

Generaattorityypin edut vierasmagnetoituun generaattoriin nähden:

- Korkeampi hyötysuhde ja energian tuotto.
- Ei tarvita erillistä teholähdettä magnetoinnille.
- Paremmat lämpöominaisuudet pienempien häviöiden vuoksi.
- Parempi toimintavarmuus, koska ei sisällä esimerkiksi liukurenkaiden kaltaisia mekaanisia osia.
- Kevyempi ja siten parempi teho/paino-suhde.

Toisaalta kestopagneettimateriaali on kallista ja sen käsittely valmistuksessa on hankalaa. Lisäksi kestopagneettien magneettiset ominaisuudet heikkenevät korkeissa lämpötiloissa. Viime vuosina kestopagneetteja hyödyntävien generaattoreiden käytöstä on kuitenkin tullut kannattavampaa, koska niiden suorituskyky on parantunut sekä kestopagneettien materiaalikulut ovat laskeneet. Kehityssuunta on tehnyt PM-koneista yhdessä täystehotaajuusmuuttajan kanssa houkuttelevan vaihtoehdon. PM-koneet voidaan jakaa kolmeen tyyppiin: radiaalivuo-, aksiaalivuo- sekä poikittaisvuokoneisiin. (Li, Chen 2008)

D-konseptin mukaista konseptia (käsittäen sekä vierasmagnetoidun että kestopagneetoidun generaattorin) on käytetty B-konseptin mukaisesti suhteellisen vähän, johtuen lähinnä sen kalleudesta ja painosta. Vuosittain rakennettujen tuulivoimaloiden määrä on kuitenkin kasvanut tasaisesti ja vuonna 2005 uusista verkkoon lisätyistä tuulivoimaloista noin joka kuudes oli D-konseptin mukainen.

## **2.2 Vertailua konseptien välillä**

Tässä työssä käsitellään tarkemmin D-konseptin mukaista konseptia PMSG:lla, jonka vuoksi PMSG-konseptia vertaillaan tässä kappaleessa muihin konsepteihin. Vertailtaessa vakionopeuksisen SCIG:n ja suoravetoisen radiaalivuogeneraattorin

(PMSG) ominaisuuksia 500 kW ja 3 MW tehoisissa tuulivoimaloissa saatiin seuraavia tuloksia (Grauers 1996). Suoravetoisen PMSG:n ulkohalkaisija on lähes kaksinkertainen verrattuna perinteiseen vaihteelliseen SCIG:iin. Lisäksi suoravetoisessa PMSG:ssä on 2,3- ja 1,6 %-yksikköä parempi hyötysuhde kuin rajoitetun nopeuden SCIG:ssä 500 kW ja 3 MW tehoisissa järjestelmissä. Lisäksi PMSG pystyy tuottamaan 10–15 % enemmän energiaa kuin vakionopeuksinen konsepti.

Vertailtaessa 500 kW tehoisia PMSG ja SCIG –järjestelmiä toisessa tutkimuksessa saatiin taulukon 2.1 mukaisia tuloksia (Annon 1996).

Taulukko 2.1 Kahden kaupallisen 500 kW tuulivoimalan vertailudata (Annon 1996). Kyseessä on suoravetoinen PMSG sekä vakionopeuksinen SCIG.

	PMSG	SCIG
tuuliturbiinin nopeus [rpm]	18-38	30
generaattorin nopeus [rpm]	18-38	1500
vuosittainen energiatuotto tuulen keskinopeudella [kWh]		
5 [m/s]	615	528
10 [m/s]	2350	2189
tuuliturbiinin roottorin halkaisija [m]	40,3	38,2
tuuliturbiinin paino [t]		
roottori (sis. keskiö)	20,5	9,2
naselli	5,6	19,9
roottori+naselli	26,1	29
torni	34	27,8
Yhteensä [t]	60,1	56,9

Taulukon 2.1 mukaan vuosittainen energian tuotto on suurempi suoravetoisella PMSG:llä kuin vaiheistetulla SCIG:llä. Konseptien kokonaispainojen voidaan todeta olevan samaa luokkaa, vaikka PMSG:n tuuliturbiinin roottori onkin tässä tapauksessa suurempi kuin SCIG –konseptissa.

Vertailtaessa muuttuvanopeuksisia 3 MW generaattorijärjestelmiä saatiin taulukon 2.2 mukaisia tuloksia (Polinder ym. 2006). Järjestelmät olivat DFIG kolmiportaisella vaihteistolla (DFIG 3G), suoravetoinen EESG (EESG DD), suoravetoinen PMSG (PMSG DD), PMSG yksiportaisella vaihteistolla (PMSG 1G) ja DFIG yksiportaisella vaihteistolla (DFIG 1G).



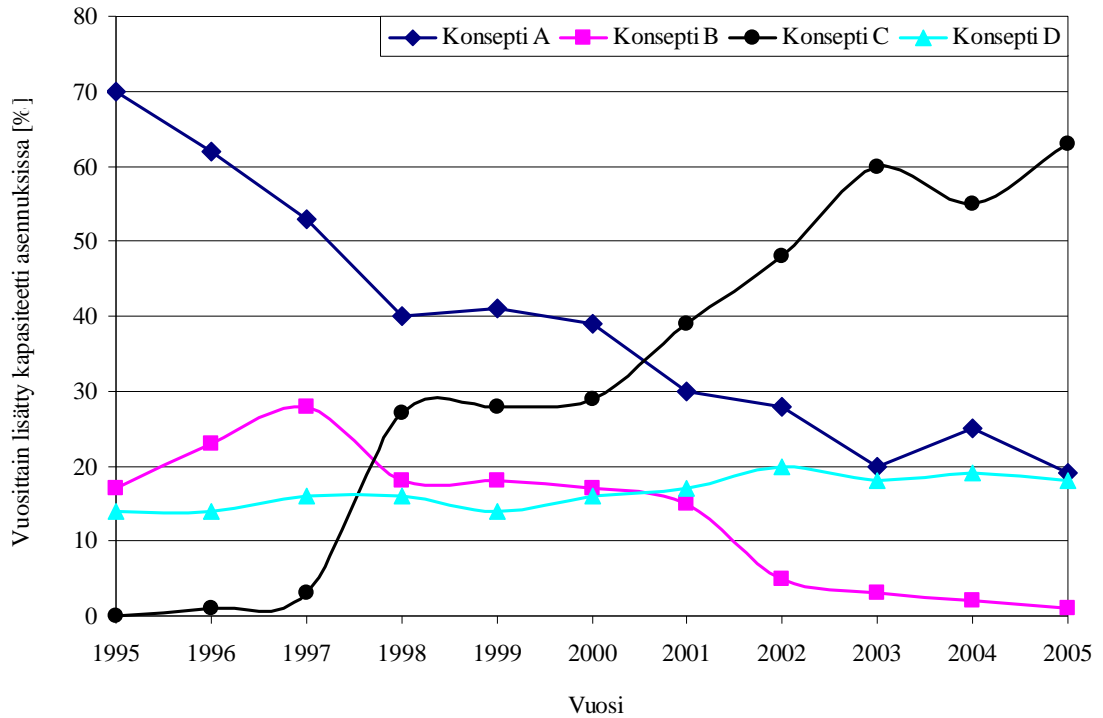
Taulukko 2.2 Vertailua viiden erilaisen tuuligeneraattorin välillä. (Polinder ym. 2006)

	<b>DFIG 3G</b>	<b>EESG DD</b>	<b>PMSG DD</b>	<b>PMSG 1G</b>	<b>DFIG 1G</b>
Generaattorin mitat					
Staattorin ilmvälin säde [m]	0,42	2,5	2,5	1,8	1,8
Staattoripakan pituus [m]	0,75	1,2	1,2	0,4	0,6
Napapariluku	3	40	80	56	40
Generaattorin materiaalien painot [t]					
Rauta	4,03	32,5	18,1	4,37	8,65
Kupari	1,21	12,6	4,3	1,33	2,72
PM	-	-	1,7	0,41	-
Yhteensä	5,25	45,1	24,1	6,11	11,37
Kustannukset [k€]					
Generaattorin materiaalit	30	287	162	43	67
Generaattorin rakennus	30	160	150	50	60
Vaihteisto	220	-	-	120	120
Taajuusmuuttaja	40	120	120	120	40
Generaattorijärjestelmän kustannukset	320	567	432	333	287
Muut osat (arvio)	1300	1300	1300	1300	1300
Kokonaiskustannukset (sis. kate)	1870	2117	1982	1883	1837
Vuosittainen tuotto [MWh]					
Häviöt yhteensä	763	739	513	674	701
Vuosittainen energiatuotto	7730	7880	8040	7840	7800
Vuosittainen tuotto / kustannukset [kWh/€]					
[kWh/€]	4,13	3,72	4,05	4,16	4,25

DFIG 3G on kevyin ja halvin rakenne standardeilla komponenteilla, mikä selittää myös konseptin laajan kaupallisen käytön. Konseptin energiatuotto on kuitenkin pienin johtuen suurista tehohäviöistä vaihdelaatikossa. Peräti 70 % häviöistä johtuu juuri vaihteiston kitkasta. Konseptille ei ole odotettavissa suurta kehitystä tai hintojen laskua, koska sen hinta muodostuu lähinnä raudan ja kuparin kustannuksista. PMSG DD:llä on paras hyötysuhde ja suurin energiantuotto, mutta verrattuna vaihteellisiin ratkaisuihin se on kalliimpi. Konseptille on kuitenkin odotettavissa hintojen laskua, koska PM-materiaalin sekä tehoelektronikan hinnat ovat laskussa ja lisäksi generaattorijärjestelmän optimointi on vielä mahdollista. EESG DD on vertailtavista vaihtoehtoista kallein ja painavin. Kaupallisista valmistajista ainoastaan Enercon valmistaa kyseisen rakenteen mukaista konseptia. (Polinder ym. 2006)

### 2.2.1 Markkinaosuudet ja kehityssuunta

Kuva 2.7 esittää vuosien 1995 ja 2005 välillä sähköverkkoon lisättyjen tuulivoimaloiden kapasiteettia aiemmin esiteltyjen konseptien jaottelun mukaan.



Kuva 2.7 Maailmalla sähköverkkoihin vuosittain liitettyjen tuulivoimalakonseptien osuudet tehon mukaan asennuksissa. (Hansen 2007)

Kuvasta 2.7 nähdään, että konseptin A osuus on laskenut 70 %:sta 20 %:iin 11 vuodessa. Samaan aikaan konsepti C on kasvattanut osuuttaan 0 %:sta lähes 60 %:iin. Konsepti B on selkeästi poistumassa markkinoilta merkittävänä tekijänä. Konseptin D osuus on pysynyt koko tarkasteluajalla hyvin tasaisena, mutta sille ennustetaan kasvua lähivuosina. Kuvasta erottuu selkeä suuntaus kohti muuttuvanopeuksisia konsepteja (konseptit C ja D). Muuttuvan nopeuden tuomat edut ovat selkeät: vähäisempi mekaaninen rasitus, suurempi tehontuotto, vähäisempi melu ja tärkeimpänä säädettävyys tehoelektroniikan ansiosta. Säädettävyys on tärkeää juuri suurissa tuulipuistoissa sähköverkkoliitynnän hallinnan kannalta.

### 2.3 Verkkoliityntäehdot

Tuulivoimaloiden vaikutuksia sähköverkolle voidaan tarkastella kahdessa osassa:

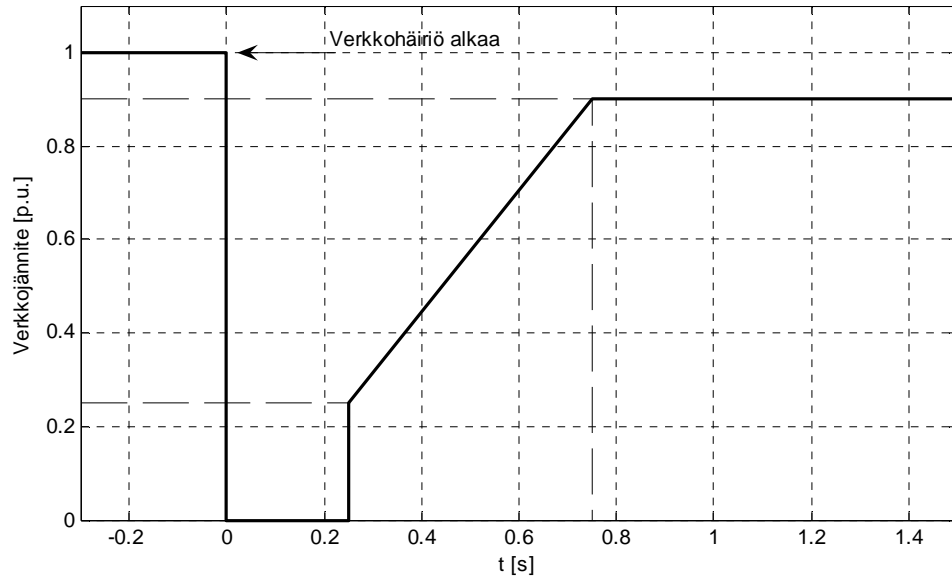
1. Paikalliset vaikutukset jännitteen laadussa
2. Globaalit vaikutukset tehosäädössä ja stabiiliudessa

80-luvulla yleensä pienet tuulivoimalat (konsepti A) kytkettiin normaalisti suoraan pien- tai keskijänniteverkkoon. Tuohon aikaan tuulivoimaloiden tehosäädön päähuomio keskittyi jakeluverkon jännitteen säilyttämisessä sallituissa rajoissa paikallisesti. Viime vuosina tilanne on muuttunut muutamien tuulivoimaloiden jakeluverkkoon kytkemisestä suurien tuulipuistojen kytkemiseen suoraan kantaverkkoon. Tällöin joudutaan tarkastelemaan tehosäätöä ja stabiiliutta suuremmassa mittakaavassa. Kantaverkkoja hallinnoivat verkkoyhtiöt ovat reagoineet tilanteeseen kehittämällä verkkoliitynnän ehtoja ja säännöksiä tuulivoimaloille, joiden mukaisesti tuulivoimalan on kyettävä toimimaan sekä normaaliolosuhteissa että erilaisissa vikatilanteissa. Tuulivoimakäytön edelläkävijämaissa Tanskassa (Energinet 2004) ja Saksassa (E.ON 2006) säännöksiä on kehitelty jo pitkään, ja niitä käytetäänkin yleisesti myös muualla perusehtoina uusien tuulivoimalaitoksien kytkennälle. Pohjoismaiden kantaverkkojen yhteistoimintaelin Nordel on myös kehittänyt omat säännökset, mutta ne eivät ole niin kattavia eikä niiden käyttö ole välttämättä pakollista vaan pikemminkin ohjeellista. Säännösten sisältö voidaan jakaa seuraaviin pääkohtiin:

- Pätötehosäätö
- Loistehosäätö
- Jännite- ja taajuussäätö
- Sähkönlaatu sisältäen esimerkiksi välkynnän ja harmoniset
- Voimalan säilyminen verkkoon kytkeytyneenä vikatilanteiden aikana

Edellä mainituista kohdista viimeinen on säännösten tärkein osio. Kohta täsmentää tuulivoimalan toimintaa sähköverkon vikatilanteissa, kuten lyhytaikaisen jännitteenaleneman aikana. Näissä tilanteissa tuulivoimalan tulee säilyä verkkoon kytkeytyneenä verkkohäiriöiden ajan ja näin ollen estää suuret tehomenetykset, jotka voisivat aikaansaada ketjureaktion. Kuvassa 2.8 esitetään eräs tuulivoimaloiden

toimintasäännöksistä, jossa tarkastellaan tuulivoimalan vaadittua toimintaa jännitteenaleneman seurauksena.



Kuva 2.8 Tuulivoimalan toimintarajat kytkentäpisteessä, joiden sisällä voimalaitoksen tulee pysyä verkossa jännitteenaleneman seurauksena NORDEL-säännösten mukaan. (NORDEL 2007)

Tuulivoimalan suorituskyky riippuu käytetystä tekniikasta, eli aiemmin käsitellyt konseptit suoriutuvat eri tavalla verkon vikatilanteista. Vanhimmat tuuligeneraattorikonseptit (konsepti A) kytkeytyivät irti verkosta jo pienestä häiriöstä, eivätkä pystyneet syöttämään tehoa lainkaan verkon vikatilanteissa. Uusissa tuulivoimaloissa (konseptit C ja D) käytetty tehoelektronikka tarjoaa verkkoa säästäviä ominaisuuksia ja ne selviytyvätkin parhaiten vikatilanteiden aikana toiminnasta.

### 3 TUULIVOIMAKÄYTÖN SIMULOINTI

Tuulivoimakäytön suunnittelun apuvälineenä käytetään erilaisia simulointiohjelmistoja. Niiden avulla voidaan ennustaa tuulivoimalan vaikutuksia sähköverkolle sekä tarkastella itse tuulivoimalan toimintaa. Tässä luvussa käsitellään simulointiin liittyviä kysymyksiä sekä tällä hetkellä yleisiä käytössä olevia simulointiohjelmistoja ja niiden soveltuvuuksia tuulivoimakäytön simulointiin. Tutkimushankkeen osana kehitettävän simulointityökalun toteutukseen valittiin jo alkuvaiheessa Matlab/Simulink & SimPowerSystems – yhdistelmä simulointiympäristöksi, minkä vuoksi muita simulointiohjelmistoja ei analysoida syvällisesti. Sen sijaan tarkoituksena on antaa yleiskuvaus muista vaihtoehdoista ja niiden tärkeimmistä ominaisuuksista.

#### 3.1 Dynamiikan vaikutus simuloinnissa ja yhteiskäyttö

Simuloitaessa mitä tahansa suurempaa sähkömekaanista kokonaisuutta on otettava huomioon erilaiset dynamiikat. Yleistyksenä voidaan ajatella, että elektroniikassa vasteajat ovat pieniä (<1 ms), kun taas mekaniikassa vasteajat ovat paljon pidempiä (>100 ms). Simuloitaessa voimajärjestelmien dynamiikkaa transienttien ja signaalien stabiiliuden osalta matalat taajuudet 0-10 Hz riittävät tarkasteluun. Tälle taajuuksivälille soveltuvat esimerkiksi Saber ja PSCAD. Korkeammille taajuuksille soveltuvat puolestaan Simulink/SimPowerSystems ja ATP-EMTP (Fuentes ym. 2007). Vasteajat asettavat vaatimuksia simuloinnin toteutuksen osalta ja suurien kokonaisuuksien osalta vasteaikojen erilaisuus hankaloittaa tehtävää. Jotkut simulointiympäristöistä toimivat erinomaisesti elektroniikalle tai yleisemmin sähköteknisille ilmiöille, mutta niitä ei ole suunniteltu mallintamaan mekaanisia ilmiöitä.

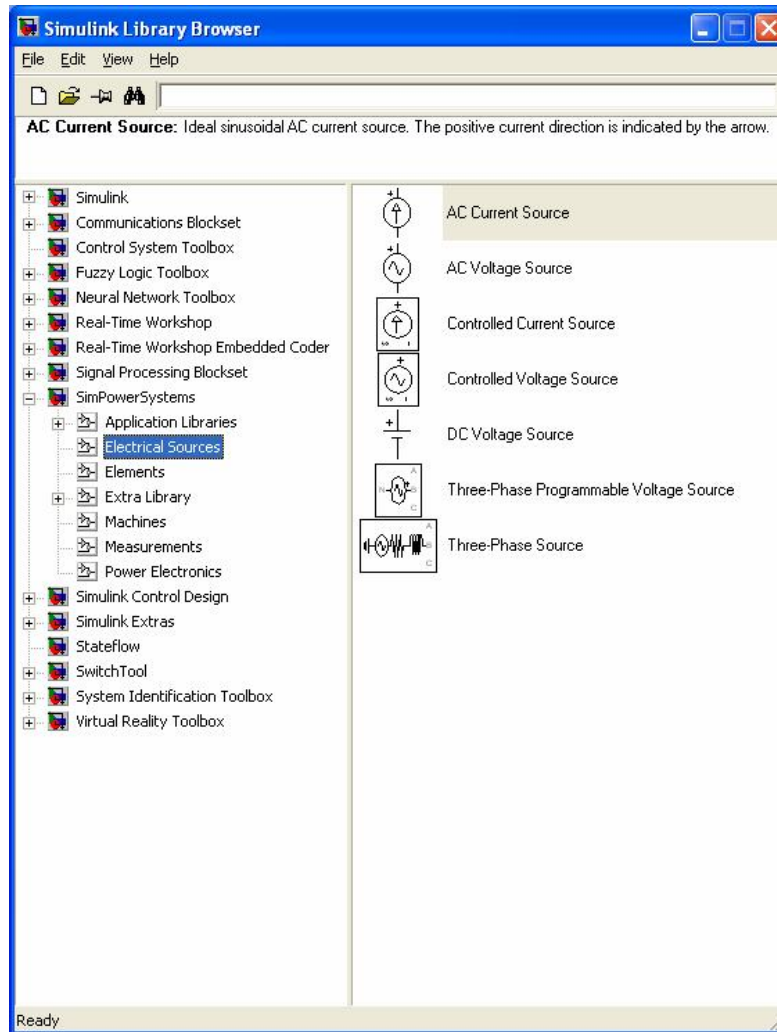
Vastauksena edellä kuvattuun ongelmaan on simulointiohjelmistojen yhteiskäyttö. Yhteiskäytöllä tarkoitetaan sitä, että simuloitava kokonaisuus jaetaan osiin ja useampi ohjelmisto suorittaa simuloinnin. Yleisimmässä tapauksessa simulointiohjelmiston rajapinta kommunikoi toisen ohjelmiston kanssa, jolloin edellä mainittu hallitsee simuloinnin kulkua jälkimmäisen syöttäessä sille oman simuloinnin tuloksia. Esimerkiksi PSCAD&Simulink –yhteiskäyttö tuulivoimakäytön simuloinnissa voidaan

toteuttaa siten, että PSCAD:iin mallinnetaan tuuliturbiinin sekä tuulivoimakäytön malli, ja Simulink huolehtii rajapinnan välityksellä tuuligeneraattorin taajuusmuuttajan säädöstä (Milo ym. 2005).

## **3.2 Simulointiohjelmit**

### **3.2.1 Matlab / Simulink**

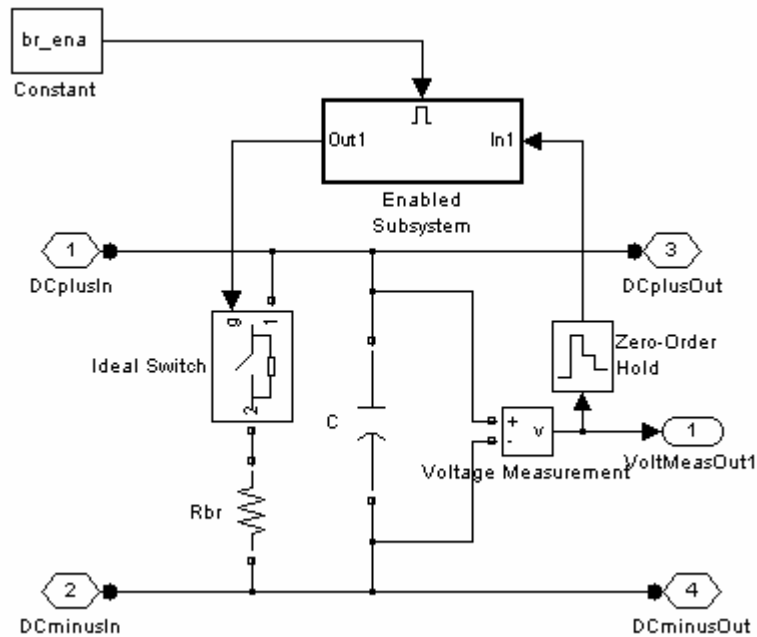
Matlab on yliopistomaailmassa alkunsa saanut teknisen ja tieteellisen laskennan ohjelmisto. Havaittuaan Matlabin kaupallisen potentiaalin kehittäjät perustivat MathWorksin ohjelmiston jatkekehitykseen. Siitä on muodostunut laajalti käytetty kehitysympäristö yliopistomaailmassa, mutta teollisuudessa sen käyttö on vähäisempää. Simulink on Matlabin simulointiympäristö, johon sisältyy useita mallikirjastoja eri sovellusalueita varten. Simulaatioiden ratkaisu perustuu differentiaaliyhtälöiden ratkomiseen. Mallikirjastoja on mahdollista kehittää myös itse, ja niitä löytyy myös kolmannen osapuolen valmistamina markkinoilta. Ulkoisilla kirjastoilla saadaan luotua räätälöity simulointityökalu, joka toimii Simulinkin osana. Monet ulkoisista kirjastoista täydentävätkin Simulinkistä puuttuvia simulointiosia hyödyntäen samalla Simulinkin valmista simulointimootoria, käyttöliittymää sekä soveltuvin osin muita kirjastoja. Simulinkin tärkeimpiin vahvuuksiin kuuluvat myös monipuoliset työkalut säätösuunnitteluun. Kokonaisuutena Simulinkia voidaan kutsua vapaasti laajennettavissa olevaksi differentiaaliyhtälöiden ratkaisuohjelmistoksi, jossa on graafinen käyttöliittymä. Kuvassa 3.1 esitetään Simulinkin kirjastonäkymän ikkuna.



Kuva 3.1 Simulinkin kirjastonäkymä, jossa vasemmalla ovat kirjastot ja oikealla kirjaston lohkot. Avattuna kirjastona näkyvissä on SimPowerSystems ja sen alikirjastot.

### SimPowerSystems

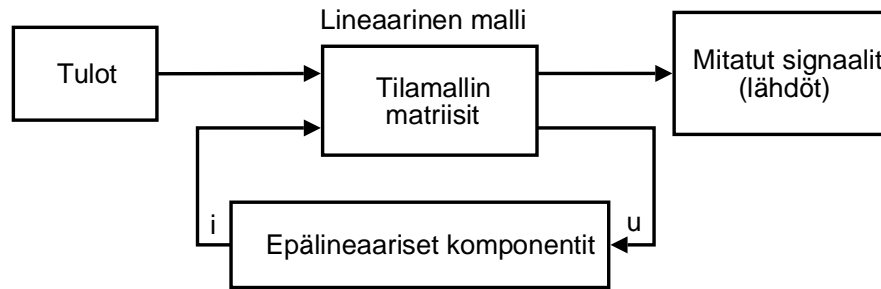
SimPowerSystems (aiemmin PSB, *Power System Blockset*) on Mathworksin kaupallinen lisäosa Simulinkiin. Kirjasto laajentaa Simulinkin käyttöä sähköisten piirien ja sähkövoimajärjestelmien mallintamiseen sekä simulointiin. Kirjasto sisältää laajan valikoiman valmiita lohkoja sähkötekniikan peruskomponenteista aina monimutkaisempiin sähkökäytön malleihin. Rakennettua mallia voidaan simuloida aikajatkuvana, diskreettinä tai edellä mainittujen yhdistelmänä. Kuvassa 3.2 esitetään esimerkki Simulink-mallista, jossa käytetään SimPowerSystems-kirjastoa.



Kuva 3.2 Esimerkki Simulink-mallista, jossa on käytetty SimPowerSystems-kirjastoa.

Ennen jokaista simulointia SimPowerSystems muodostaa tilamallin tehdystä sähköpiiristä ja rakentaa siitä sijaiskytkennän, jota voidaan simuloida Simulinkillä. Sijaiskytkennän määrittäminen aloitetaan simulointimallin verkkotopologialla, jonka jälkeen SimPowerSystemsin lohkot lajitellaan lineaarisiin ja epälineaarisiin lohkoihin. Tämän jälkeen mallin lineaarisesta osasta muodostetaan tilamalli (matriisit A, B, C ja D). Mahdollinen diskretointi suoritetaan jatkuva-aikaiselle tilamallille Tustinin menetelmällä. Viimeisenä mallista muodostetaan Simulink-malli, joka tallennetaan jokaisesta SimPowerSystemsin käyttämästä mallista löytyvään Powergui-lohkoon. Simulink-malli käyttää S-funktio lohkoa mallintamaan mallin lineaarisia komponentteja. Epälineaarille komponenteille käytetään ennalta tehtyjä Simulink-malleja. Nämä mallit ovat sisällytettynä SimPowerSystemsin kirjastoon. Kuvassa 3.3 havainnollistetaan epälineaaristen komponenttien ja lineaarisen mallin välistä yhteyttä lopullisessa Simulink-mallissa. (MathWorks 2008)





Kuva 3.3 Lineaarisen osuuden ja epälineaaristen komponenttien välinen yhteys SimPowerSystem toiminnassa.

### PLECS

PLECS (Piece-wise Linear Electrical Circuit Simulation) on myös kaupallinen kirjasto Simulinkiin. Sen käyttötarkoitus on SimPowerSystemsin tavoin laajentaa Simulinkin toimintaa sähkövoimajärjestelmien ja tehoelektronikan simuloinnissa. Kirjasto ei kuitenkaan ole täysin integroitu Simulinkiin, vaan rajapinnaksi tarvitaan erillinen PLECS:n lohko, joka sisältää simuloitavan sähköpiirin. (Karlsson 2005)

### Muut Matlabin kaltaiset ohjelmistot

#### Octave

Octave on Matlabin tavoin teknisen ja tieteellisen laskennan ohjelmisto. Se on Matlabista poiketen kuitenkin vapaan lähdekoodin ohjelmisto, jota kehittää erillinen yhteisö. Octave on kehitetty suurelta osin yhteensopivaksi Matlabin kanssa, mikä tarkoittaa pitkälti samanlaista käskykantaa.

#### Scilab

Scilab on numeerisen laskennan ohjelmisto, joka on Octaven tavoin avoimeen lähdekoodiin perustuva. Syntaksi on Matlabin kaltaista, mutta ohjelmat eivät ole yhteensopivia.

### 3.2.2 Muut piirisimulaattorit

Seuraavat ohjelmistot ovat myös tunnettuja työkaluja simulointikäytössä. Niistä PSCAD on varsin laajalti käytetty tuulivoimakäytön simuloinnissa, ja sen yhteiskäyttö kehitettävän Matlab/Simulink-simulointityökalun kanssa onkin jatkokehityksen kannalta mahdollista.

### **PSCAD / EMTDC**

PSCAD (*Power System Computer Aided Design*) pohjautuu Hermann Dommel in esittämään periaatteeseen ja sen sovelluksena syntyneeseen EMTP-ohjelmaan (*ElectroMagnetic Transients Program*), jossa järjestelmää kuvaavat differentiaaliyhtälöt ratkaistaan numeerisella integrointimenetelmällä (Dommel 1969). PSCAD on kehitetty sähkövoimajärjestelmien ja erityisesti sähköverkkojen suunnitteluun ja mallintamiseen. Ohjelmisto soveltuu sähkömagneettisten transienttien eli nopeiden muutosilmiöiden simulointiin sähköjärjestelmissä. Kyseessä on virtojen ja jännitteiden simulointi aikatasossa, jolloin tuloksina saadaan näiden suureiden kuvaajat ajan funktiona. EMTDC (*Electromagnetic Transients including DC*) on PSCAD:n simulointimoottori, joka suorittaa edellä mainitut tehtävät ratkomalla differentiaaliyhtälöitä aikatasossa käyttäjän valitsemalla kiinteällä aika-askeleella. Simulointimalliin voidaan lisätä monenlaisia ohjelmasta löytyviä sähkökoneita sekä mittaus- ja säätöpiirejä kuvaavia malleja, joiden perusteella saadaan tarkasteltua järjestelmässä tapahtuvia ilmiöitä. PSCAD:lla voidaan mallintaa useita sähköverkkoihin liittyviä kysymyksiä kuten sähkönlaadun analysointia, suojausten ja sähkölaitosten suunnittelua, sekä vikatilanteiden simulointia. Soveltuvuus sähköverkkojen simulointiin onkin tehnyt ohjelmistosta suosituksen sähköverkkoyhtiöissä. PSCADia on mahdollista yhteiskäyttää Simulinkin kanssa.

### **Simplorer**

Simplorer on tehoelektronikan piirisimulaattori, joka mahdollistaa tehoelektronikan simuloinnin usealla abstraktiotasolla. Simulaattorin suurimpia vahvuuksia ovat vakaa simulointialgoritmi ja helppokäyttöisyys, mutta säätösuunnittelu on sillä hankalampaa kuin Matlab/Simulinkillä. Simplorer tukee yhteiskäyttöä Simulinkin ja Mathcadin kanssa, ja lisäksi Simplorerilla voidaan simuloida Maxwell-ohjelmistolla laadittuja FEM-malleja (*Finite Element Method*). Maxwell on Simplorerin kehittäjien sähkömagneettikenttien simulointiohjelmisto.

**Orcad / PSpice**

Orcad PSpice on simulointiohjelma, joka mallintaa sähköpiirin analogisien ja digitaalisten komponenttien käyttäytymistä. Ohjelman avulla voidaan suunnitella ja simuloida sähköpiirejä. Ohjelman käyttöliittymää (Capture) käytetään piirikaavioiden suunnitteluun, jonka jälkeen piirin toimintaa simuloidaan esimerkiksi PSpicella. Suunniteltujen piirikaavioiden perusteella voidaan valmistaa sähköisiä piirejä ilman erillistä layout-suunnittelua. Yhteissimulointi on mahdollista Simulinkin kanssa.

**Saber**

Saber on sähköpiirien ja tehoelektronikan simulointityökalu. Se soveltuu sähkö-, lämpö-, magneetti- ja mekaanisten komponenttien sekä järjestelmien simulointiin. Tällä hetkellä työkalu ei kuitenkaan ole suuntautunut tuulivoimalaitoksien simulointiin, vaan sen pääasialliset markkinat ovat autoteollisuuden, ilmailuteollisuuden, sähkövoimajärjestelmien ja piirisuunnittelun aloilla (Iov ym. 2004). Yhteissimulointi on mahdollista Simulinkin kanssa.

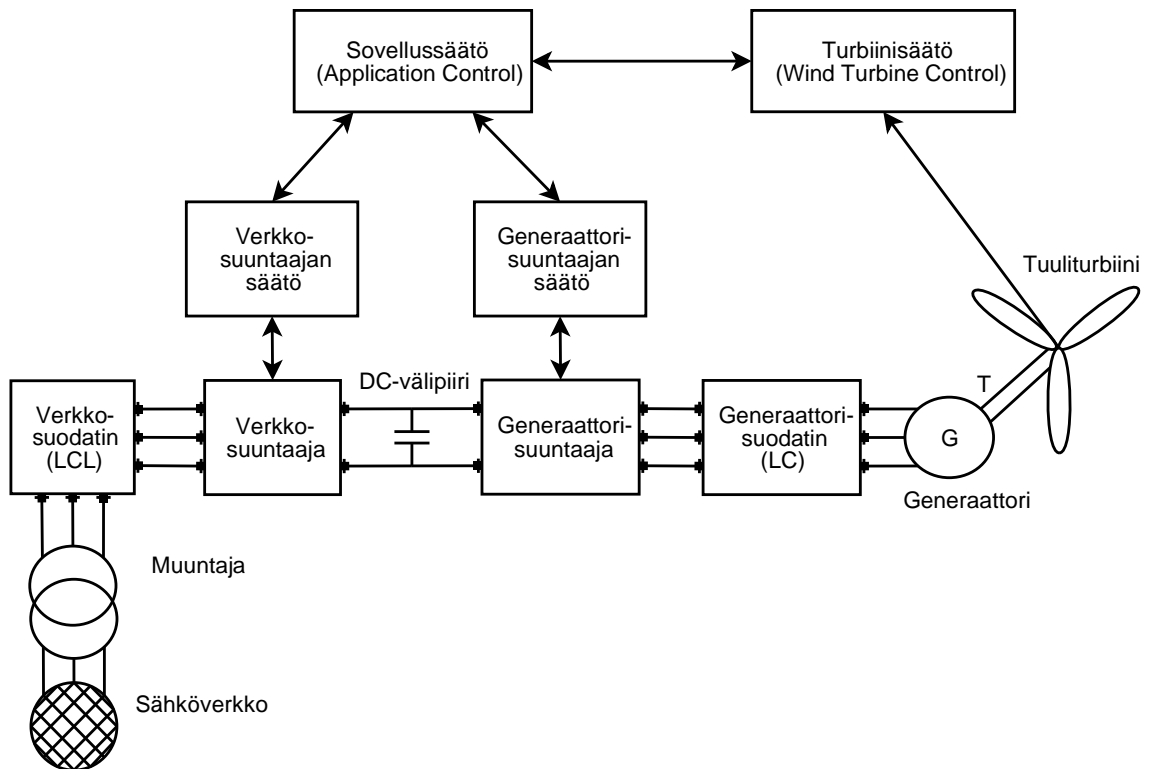
## **4 TUULIVOIMAKÄYTÖN SIMULOINTIYMPÄRISTÖN KÄYTTÖLIITTYMÄ**

### **4.1 Simulaattoriprojektin kuvaus**

Projektin tavoitteena oli kehittää tuulivoimakäytön simulointityökalu käyttäen kehitysympäristönä Matlab/Simulink -ohjelmistoa sekä Simulinkin lisäosaa SimPowerSystemsiä. Suunnitelman mukaisesti Matlabiin kehitettiin projektin puitteissa itsenäinen kirjasto, jonka avulla simulointimalleja voidaan rakentaa ja simuloida Simulinkillä. Kirjasto koostuu itse tehdyistä ja SimPowerSystemsin lohkoja käyttäen tehdyistä simulointilohkoista. Nämä lohkot edustavat tuulivoimakäytön osia, joita käytetään kokonaisuuksien simulointiin. Näin ollen malleilla voidaan simuloida erilaisia tuulivoimalakokonaisuuksia erilaisissa sähköverkkoliitynnöissä. Kirjaston sisältämien lohkojen kehitykseen osallistui useita henkilöitä.

### **4.2 Simulointimallin rakenne**

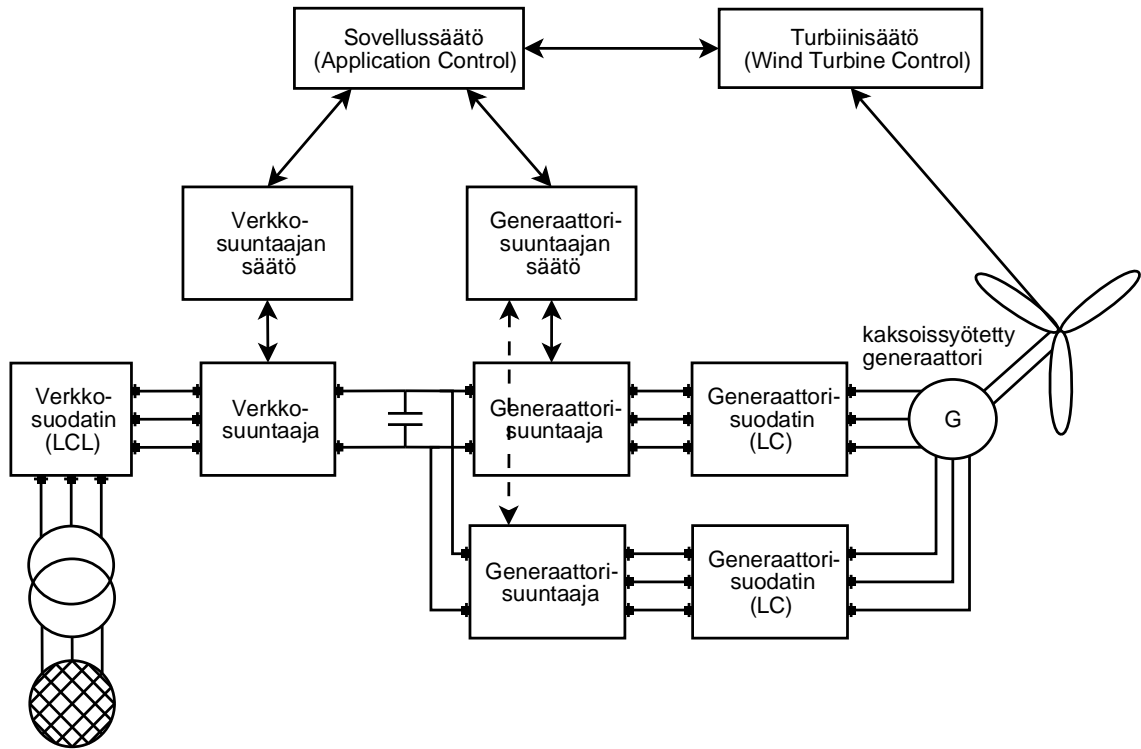
Projektin yhteydessä käsiteltiin kappaleessa 2.1.4 esitellyn PMSG-konseptin mukaista rakennetta. Rakenteelle ovat tyypillisiä suoravetoiset hitaasti pyörivät generaattorit täysitehoisella taajuusmuuttajalla. Kuva 4.1 havainnollistaa tuulivoimakäytön simuloitavaa kokonaisuutta. Esitetyt lohkot kuvaavat simulointikirjaston lohkoja periaatteellisella tasolla.



Kuva 4.1 Tuulivoimakäytön simulointiin työn yhteydessä käytettyjen lohkojen periaatekuva.

Kuvassa 4.1 tuulen tuottama vääntömomentti saa aikaan generaattorin roottorin pyörimisen, jolloin generaattorissa alkaa indusoitua jännitettä. Syntynyt sähkövirta suodatetaan suuritehoisissa käytöissä tyypillisesti LC-suodattimella, jonka jälkeen generaattorin vaihtojännite tasasuunnataan tasajännitteeksi. Generaattorin tasasuuntaajan säätö huolehtii generaattorin pyörimisnopeussäädöstä tuuliolosuhteiden mukaan. DC-välipiiri toimii energiavarastona ennen vaihtosuuntausta. Verkkopuolen vaihtosuuntaaja muuntaa välipiirin tasajännitteen vaihtojännitteeksi sähköverkon taajuudelle, jonka jälkeen jännite suodatetaan tyypillisesti LCL-suodattimella ja syötetään muuntajan kautta sähköverkkoon. Verkkosuuntaajan säätö kontrolloi DC-välipiirin jännitteen mukaan sähköverkkoon syötettävää tehoa sekä tuotetun sähkön tehokerrointa. Sovellussäädöllä hallitaan säätöjen yhteistä toimintaa, ja turbiinin lapakulmien ohjausta. Sovellussäädön ylempänä ohjaajana on lisäksi turbiinisäätö, joka toimii tuulivoimakäytön ylimpänä säädön toimielimenä.

Tällä konseptilla voidaan muodostaa useita kombinaatioita riippuen mm. käytetystä generaattorityypistä sekä komponenttien parametreista. Kuvassa 4.2 esitetään esimerkki mallin mahdollisesta rakenteesta, kun käytetään kaksoissyötettyä generaattoria.



Kuva 4.2 Periaatekuva kaksoissyötetyn generaattorin kytkennästä simulointiohjelmassa.

Kuvassa 4.2 kaksoiskäämittyä generaattoria syötetään kahdella rinnakkain kytketyllä generaattorisuuntaajalla, joita ohjaa sama generaattorisuuntaajan säätölohko. Generaattorisuuntaajia voidaan kytkeä rinnakkain myös yksisyöttöisten generaattorien kanssa, kun halutaan lisätä suuntaajien virtakestoisuutta.

### 4.3 Simulointikirjaston käyttöliittymä

Käyttöliittymän kehitys oli tämän työn keskeisin teema. Simulointityökalun käytettävyyden parantamiseksi siihen päätettiin kehittää projektin yhteydessä myös käyttöliittymä. Simulointimallin hallinta onnistuu itsenäisesti myös Simulinkin avulla, mutta käyttöliittymän tarkoituksena oli helpottaa mallin rakentamista sekä muokkaamista. Simulointimallin rakentaminen käyttöliittymän avulla tarkoittaa, että Matlabin simulointimallia (\*.mdl) muokataan toisen ohjelman (käyttöliittymän)

välityksellä Matlabissa. Simulointiin käytetään Simulinkia, mutta simuloinnin hallinta onnistuu täysin myös käyttöliittymästä.

Käyttöliittymälle asetettiin kehitysvaiheessa seuraavia tavoitteita:

1. Käytännöllisyys. Käyttöliittymän etu on suurin vähän Simulinkia käyttäneille ja siksi käyttöliittymän tulee palvella erityisesti uusia käyttäjiä simulointityökalun käytössä.
2. Helppous. Simulointimallin rakennus ja muokkaus on sujuttava jouhevasti käyttöliittymän avulla.
3. Nopeus. Koska simulointimallin voi luoda myös ilman käyttöliittymää, tulee käyttöliittymän nopeuttaa rakentamista myös kokeneiden käyttäjien kohdalla.
4. Selkeys. Rakentamisen logiikan tulee olla yksinkertaista ja selkeää, ja sen tulee palvella niin uusia kuin kokeneitakin käyttäjiä.
5. Dynaamisuus. Vaikka simulointimalliin kohdistuvat toimenpiteet suoritetaan käyttöliittymän kautta, se ei saa kuitenkaan rajoittaa mallin muokkaamista Simulinkin kautta käyttäjän niin halutessa.
6. Kirjaston jatkokehittävyyys. Dynaamisuuteen liittyen käyttöliittymän tulee olla riippumaton kirjaston sisällöstä. Toisin sanoen käyttöliittymän on oltava riippumaton simulointikirjaston sisällöstä.

Yksi käyttöliittymän kehityksen suurimmista haasteista oli uusien ja kokeneiden käyttäjien huomiointi käytettävyydessä. Esimerkiksi simulointimallin rakentamisvaiheessa askeleittain etenevä wizard-tyylinen lähestymistapa voi olla uusille käyttäjille helpoin toimintamalli. Kokeneille käyttäjille tämä taasen on hidasta, ja jokin vapaampi lähestymistapa soveltuu heille paremmin. Lisäksi oli pidettävä mielessä, että Simulink tarjoaa jo täysin vapaan rakennus & simulointi –ohjelmiston, jollaista ei ollut tarkoitus toteuttaa uudelleen.

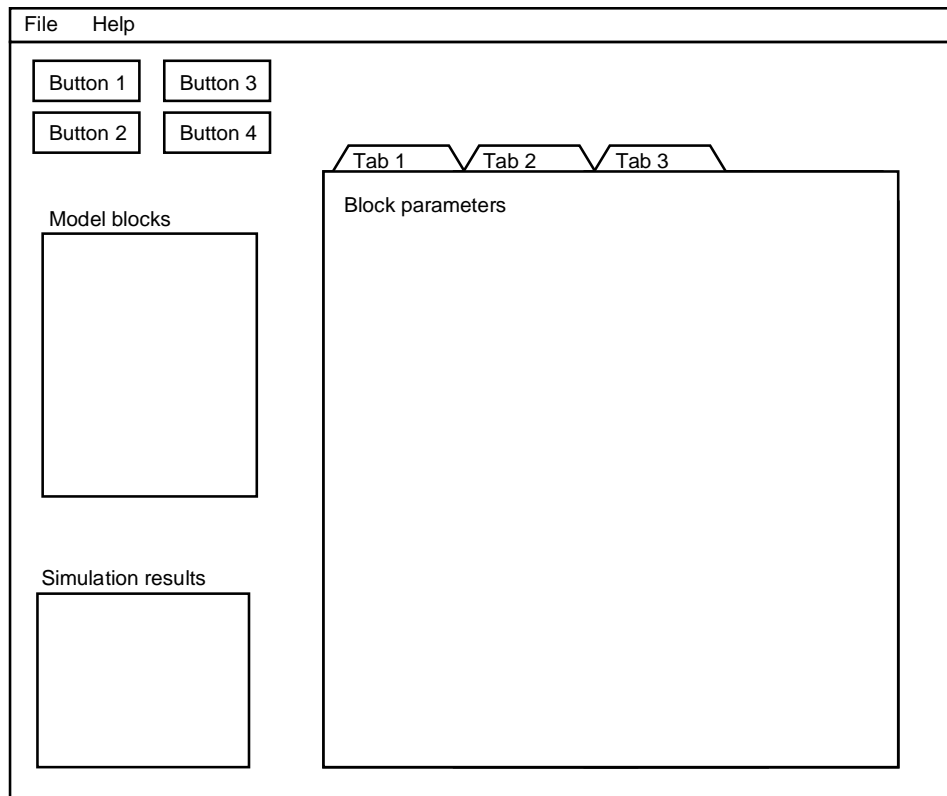
#### **4.4 Käyttöliittymän toteutussuunnitelma**

Käyttöliittymän ohjelmointiin valittiin Matlab, koska simulointikirjasto vaatii toimiakseen Simulinkin. GUIDE (*Graphical User Interface Developing Environment*) on Matlabin tarjoama käyttöliittymän kehitykseen tarkoitettu työkalu. Sen avulla

käyttöliittymälle muokataan aluksi haluttu ulkoasu, painikkeet sekä valikot (\*.fig). Tämän jälkeen edellä mainittujen painikkeiden ja valikoiden toiminnallisuudet ohjelmoidaan erilliseen tiedostoon (\*.m). Käytetty ohjelmointikieli on Matlabin kehittämä m-kieli, joka on syntaksiltaan sekä rakenteeltaan yksinkertaistettu kieli.

Simulointikirjaston lohkot ovat maskattuja alijärjestelmiä (masked Subsystem), joissa käyttäjälle näkyy vain ylimmän tason rajapinta. Jokaisen lohkon maski sisältää lohkon toimintaan vaikuttavat parametrit kuten jännitteen, taajuuden ja napapariluvun. Näiden parametrien tulee olla muokattavissa UI:n (*User Interface*) kautta samalla kun käyttäjä rakentaa mallia. Parametrisointi voidaan suorittaa myös mallin rakentamisen jälkeen. Lohkojen parametrit sijoitetaan erillisille välilehdille, jotta niiden hallinta olisi selkeää. UI:n näkymään sisällytetään muutamia painikkeita, joista simulointimallin rakennus ja hallinta suoritetaan. Tällaisia painikkeita voivat olla lohkojen lisääminen, poistaminen, yhdistäminen sekä mallin simulointi. Simulointimallien lataaminen sekä tallentaminen tapahtuvat valikosta. Edellisessä kappaleessa mainittu dynaamisuus tulee ottaa jo tässä vaiheessa huomioon, koska ulkoasua ei voida luoda valmiiksi kokonaan johtuen simulointikirjaston sisällön muuttuvuudesta. Ajatuksena onkin toteuttaa vain välttämättömät staattiset komponentit etukäteen ja luoda ohjelmallisesti simulointikirjaston sisältö käyttöliittymään. Tämä ratkaisu erottaa käyttöliittymän simulointikirjastosta ja mahdollistaa kirjaston vapaan muokattavuuden sekä helpon jatkokehityksen. Lisäksi käyttöliittymä toimii myös muiden samanlaisten simulointikirjastojen käyttöliittymänä. Kuvassa 4.3 esitetään hahmotelma käyttöliittymästä.





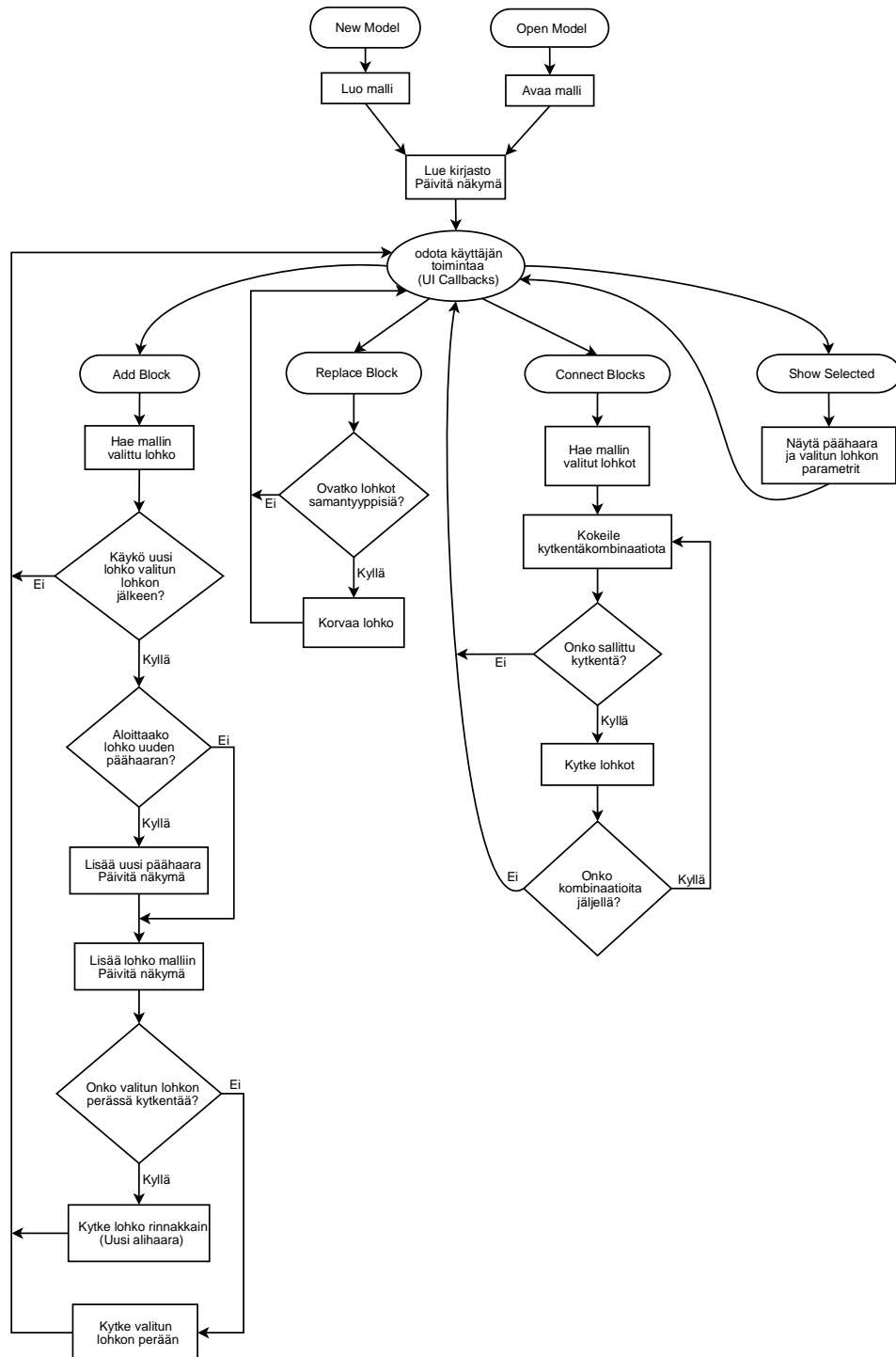
Kuva 4.3 Hahmotelma käyttöliittymän ulkoasusta.

Kuvan 4.3 mukaisessa käyttöliittymässä ainoastaan vasemmalla sijaitsevat painikkeet ovat staattisia ja kirjaston sisältämät lohkot generoidaan käynnistyksen yhteydessä luetteloruutuun vasemmalle sekä kirjastolohkojen parametrit oikealle välilehtiin. Käsiteltävä simulointimalli sijaitsee UI:n vieressä Simulinkin omassa ikkunassa. Mallia voidaan käsitellä käyttöliittymästä `get_param()`- ja `set_param()`-funktioiden avulla. Mallin sisällön tarkasteluun löytyy `find_system()`-funktio, joka palauttaa mallin sisältämät lohkot. Lohkojen lisäämisen, poistamisen ja yhdistämisen funktiot ovat `add_block()`, `delete_block()` ja `add_line()`. Käyttöliittymän näkyvät elementit luodaan ohjelmallisesti `uicontrol()` ja `uipanel()`-funktioilla poisluettuna staattiset elementit, jotka luodaan GUIDE:lla. GUIDE:n toimintamallin mukaan parametrit välitetään funktioille niiden kutsujen yhteydessä (UI Callbacks) tietorakenteena, jota nimitetään kahvoiksi. Kahvoihin voidaan lisätä vapaasti uusia muuttujia, joihin päästään käsiksi myöhemmin muissa funktioissa. Kahvoja voikin ajatella suurena muuttujavarastona, joka välitetään funktioille käyttäjän painaessa painikkeita. Kahvat voidaan lukea myös ohjelmallisesti `guidata()`-funktioilla, jolla myös tallennetaan kahvoihin tehdyt muutokset. Kahvojen avulla esimerkiksi

simulointikirjaston sisältämien lohkojen pohjat voidaan generoida valmiiksi tietorakenteeseen ja vaihdella niitä näkymässä tarpeen mukaan.

#### **4.5 Käyttöliittymän toteutunut toimintamalli**

Simulointimallin rakentamisessa pyrittiin käytännöllisyyteen ja helppouteen käyttäjän vapauksia kuitenkin rajoittamatta. Ratkaisu edustaa asteittain etenevää rakennusmallia, jossa muokkaus tapahtuu UI:n ja simulointimallin kautta. Toimintamallissa malliin lisätään lohkoja yksi kerrallaan lähtien sähköverkosta ja päättyen generaattoriin. Generaattorin lisääminen ei kuitenkaan tarkoita, ettei sitä edeltävän piirin rakennetta voisi muuttaa. Rakennusjärjestykseksi valittiin edellä mainittu, jotta se olisi kuvan 4.1 mukainen. Rakentaminen etenee siten, että uusi lohko lisätään simulointimallissa valitun lohkon perään, jolloin lisäystä lohkosta tehdään valittu lohko ja vanhan lohkon valinta poistetaan. Oletusarvoisesti lohkoja lisätään automaattisesti viimeiseksi lisätyn lohkon perään, mutta käyttäjä voi myös muuttaa valittua lohkoa simulointimallin tai UI:n kautta. Lohkojen lisäystä valvoo rakennussäännöstö, joka estää virheelliset kytkennät ja ohjeistaa sallituista kytkennöistä. Säännöstö on sijoitettuna erilliseen tiedostoon muokattavuuden ja jatkokehityksen helpottamiseksi. Jos lisättävä lohko sisältää ainoastaan lähtöjä, ei valitulla loholla tai säännöillä ole kuitenkaan merkitystä, ja lisäys onnistuu ilman rajoituksia. Kuva 4.4 esittää vuokaavion avulla mallin rakentamisen ohjelmallista rakennetta.



Kuva 4.4 Vuokaavio UI:n sisäisestä toiminnasta käyttäjän toimien mukaan mallin muokkauksen aikana.

Kuvasta 4.4 nähdään, että mallin käsittely alkaa joko avaamalla valmis malli tai luomalla uusi malli. Kaavion alkuun sisältyvä kirjaston lukeminen tarkoittaa, että kirjaston sisältämät lohkot generoidaan UI:n muistiin erillisiksi paneeleiksi, jotka tuodaan esille ja piilotetaan tarpeen mukaan. Käyttöliittymän hahmotelmassa (kuva 4.3)

näkyvät välilehdet toteutettiin näin, koska GUIDE ei sisällä valmista rutiinia välilehdille. Näin ollen lohkojen sisältämät parametrikentät luetaan muistiin ja niille tehdään muokattavissa olevat kentät parametrisointia varten. Paneelien generointi suoritetaan ainoastaan kerran kirjastoa luettaessa, joka nopeuttaa paneelien vaihtoa käytön aikana. Ajatusmallina on se, että UI näkee aktiivisena olevan mallin sisällön ja päivittää näkymän muutoksien yhteydessä. Valitun lohkon parametrien osalta päivitys koostuu kolmesta vaiheesta, jotka ovat edellisen paneelin piilottaminen, uuden paneelin esittäminen sekä kyseisen lohkon parametrien hakeminen paneeliin. Käyttäjän toimenpiteet (UI Callbacks) toimivat laukaisijoina tälle synkronoinnille.

#### **4.5.1 UI Callbacks**

Käyttöliittymään toteutettiin neljä painiketta: lohkon lisäys, korvaus, kytkeminen ja kohdistaminen. Painike lohkon poistamiseksi katsottiin tarpeettomaksi, koska vuorovaikutteisen toimintamallin ansiosta lohkon poistaminen simulointimallin kautta on selkeämpää ja nopeampaa. Käyttöliittymä päivittää näkymän automaattisesti lohkon poistamisen yhteydessä. Simulointimallin rakentaminen pyörii pääasiassa lohkojen lisäyksen ympärillä. Uusi lohko lisätään mallissa valitun perään. Lohkon korvaamista voidaan käyttää, jos käyttäjä haluaa nopeasti vaihtaa jonkin kokoonpanon lohkon toiseksi, esimerkiksi generaattoria vaihdettaessa. Hitaampi vaihtoehto tähän olisi lohkon poistaminen ja uuden lisääminen. Kohdistaminen vaihtaa päähaaran oikeaksi, päivittää näkymän, valitsee luetteloruudusta mallin valitun lohkon, sekä hakee parametrit näkymään. Neljäntenä painikkeena on lohkojen kytkentä. Rakennusmallin toimintaperiaatteena on kytkeä lohkot automaattisesti toisiinsa, mutta jos haaroitetusta kytkennästä halutaan palata takaisin päähaaraan, tulee tilanne jossa tarvitaan erillinen painike. Pää- ja alihaaroista kerrotaan tarkemmin seuraavassa kappaleessa.

#### **4.5.2 Simulointimallin pää- ja alihaarat**

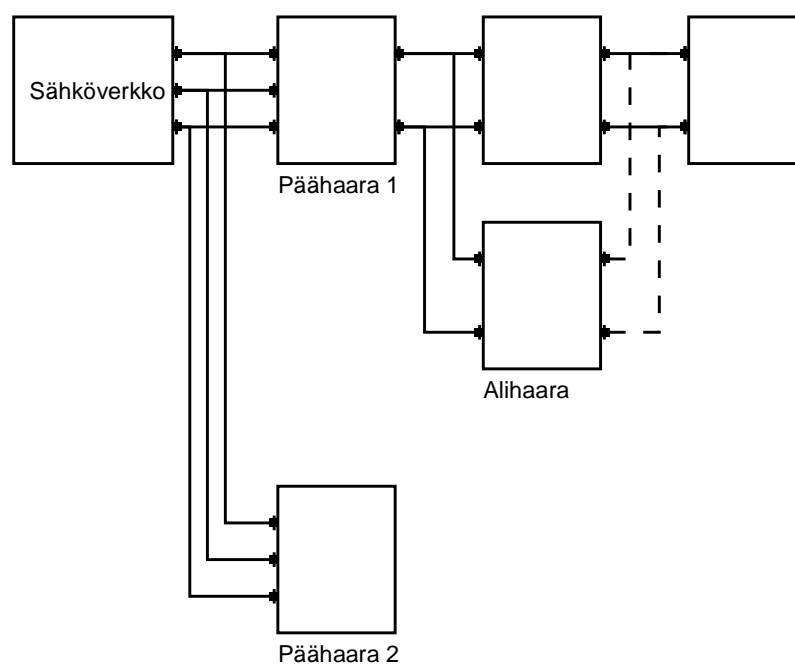
##### **Päähaarat**

Simulointimalliin lisätyt lohkot esitetään käyttöliittymän luetteloruudussa vasemmalla alhaalla (kuva 4.6), mutta paljon lohkoja sisältävässä mallissa niiden erottaminen toisistaan voi olla hidasta. Tämän vuoksi käyttöliittymään lisättiin alavetovalikko, josta valitaan luetteloruudussa esitettävän päähaaran lohkot. Päähaaroiksi lasketaan jokainen

sähköverkosta lähtevä haara, mikä rajaa suuremmissa mallissa huomattavasti käsiteltävien lohkojen määrää. Erittelemällä päähaarojen lohkot eri luetteloruutuihin suurien mallien hallittavuus on selkeämpää.

### Alihaarat

Alihaarat ovat päähaarojen sisällä syntyviä haaroituksia. Tällainen tilanne syntyy, kun käyttäjä haluaa lisätä lohkon rinnalle toisen samanlaisen lohkon. Käyttöliittymä lisää uuden lohkon automaattisesti alihaaraksi rinnakkain, jos valitun lohkon perässä on jo lohko. Kuva 4.5 havainnollistaa pää- ja alihaaroja.

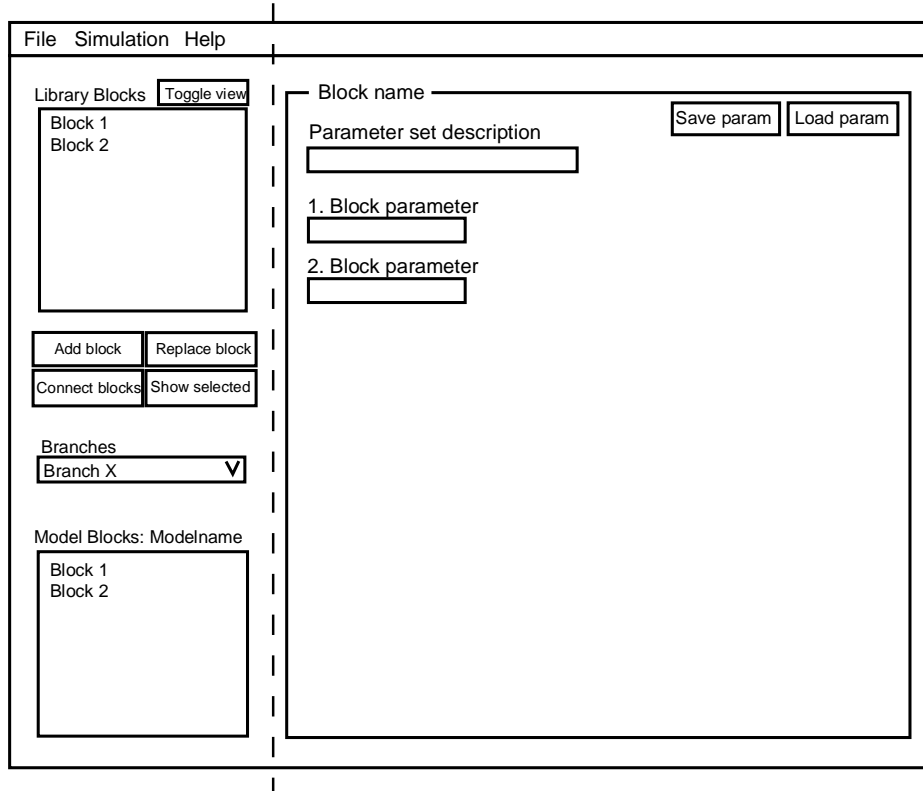


Kuva 4.5 Simulointimallin pää- ja alihaarat esiteltynä. Katkoviivat kuvaavat tilannetta, jossa tarvitaan lisäkytkentä.

Kuvassa 4.5 on esimerkki tilanteesta, jossa tarvitaan erillinen kytkentä, koska alihaarasta halutaan palata päähaaraan.

### 4.5.3 Käyttöliittymän ulkoasu

Ulkoasuun tehtiin kehitystyön aikana muutamia muutoksia alkuperäiseen hahmotelmaan nähden. Kuvassa 4.6 esitetään toteutuneen käyttöliittymän ulkoasu pääpiirteittäin.



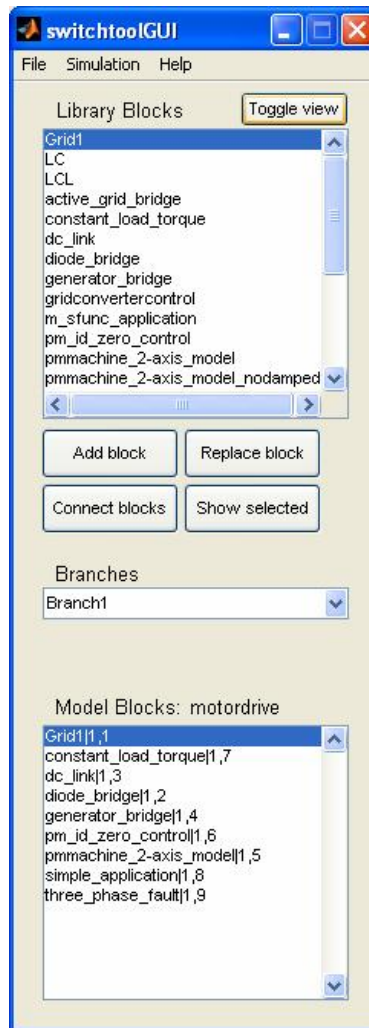
Kuva 4.6 Käyttöliittymän toteutunut ulkoasu. Katkoviiva esittää näkymän muutosta (Toggle view).

Verrattaessa kuvaa 4.6 käyttöliittymän hahmotelmaan (kuva 4.3) nähdään, että ulkoasun perusrakenne on säilynyt suunnitelman mukaisena. Hahmotelmaan verrattuna simulointituloksien luetteloruutu on poistettu ja mallin päähaaroille on lisätty alavetovalikko. Alavetovalikko päivittää sen alapuolella olevien lohkojen nimet päähaaran mukaisiksi. Lisäksi simulointimallin muokkaamisen helpottamiseksi käyttöliittymään lisättiin painike (Toggle view) piilottamaan parametrinäkökatsokkiin katkoviivan merkitsemän kohdan oikealta puolelta.

#### 4.5.4 Käyttöliittymä rakennusvaiheessa

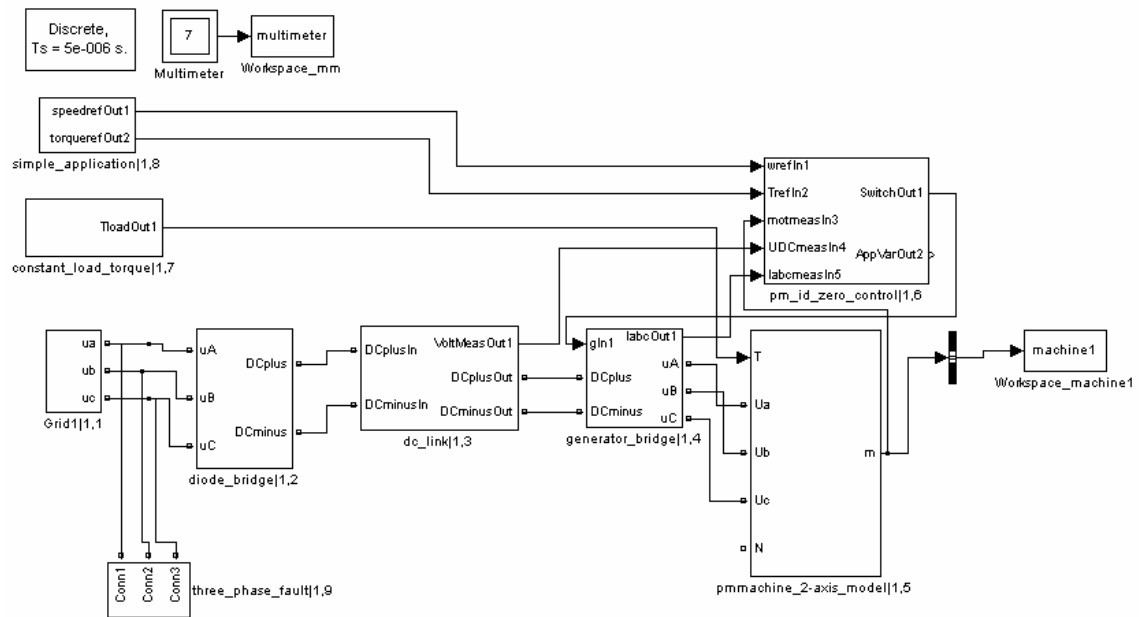
Käyttöliittymän toiminnallisuuden suunnittelun lähtökohdaksi otettiin ajatus rakentamisen ja parametrisoinnin erottamisesta. Projektissa arvioitiin, että useimmat käyttäjät rakentavat ensin simulointimallin, ja siirtyvät sen jälkeen mallin parametrien tarkasteluun. Kuvassa 4.3 esitettyssä hahmotelmassa parametrien välilehdet vievät selkeästi suurimman osan ikkunan tarvitsemasta tilasta, ja mallin rakennuksessa välilehdet eivät ole tarpeellisia. Lisäksi arvioitiin, että suurimmalla osalla käyttäjistä ei

ole kahta näyttöä, jolloin rakennettaessa mallia yhdellä näytöllä ikkunat menevät väistämättä päällekkäin. Ratkaisuksi ongelmaan käyttöliittymään lisättiin painike (Toggle view) näkymän muuttamiseksi. Kuva 4.7 esittää UI:n näkymää rakennusvaiheessa, kun rakenteilla on kuvan 4.8 mukainen simulointimalli. Näkymän muuttava painike on oikealla ylhäällä.



Kuva 4.7 Käyttöliittymän näkymä rakennusvaiheessa, missä ylimmässä luetteloruudussa ovat kirjaston sisältämät lohkot ja alimmassa luetteloruudussa simulointimallin sisältämät lohkot.

Kuvassa 4.7 ylimpänä ovat kirjaston lohkot, keskellä päähaarojen alasetovalikko ja alhaalla mallin lohkot.

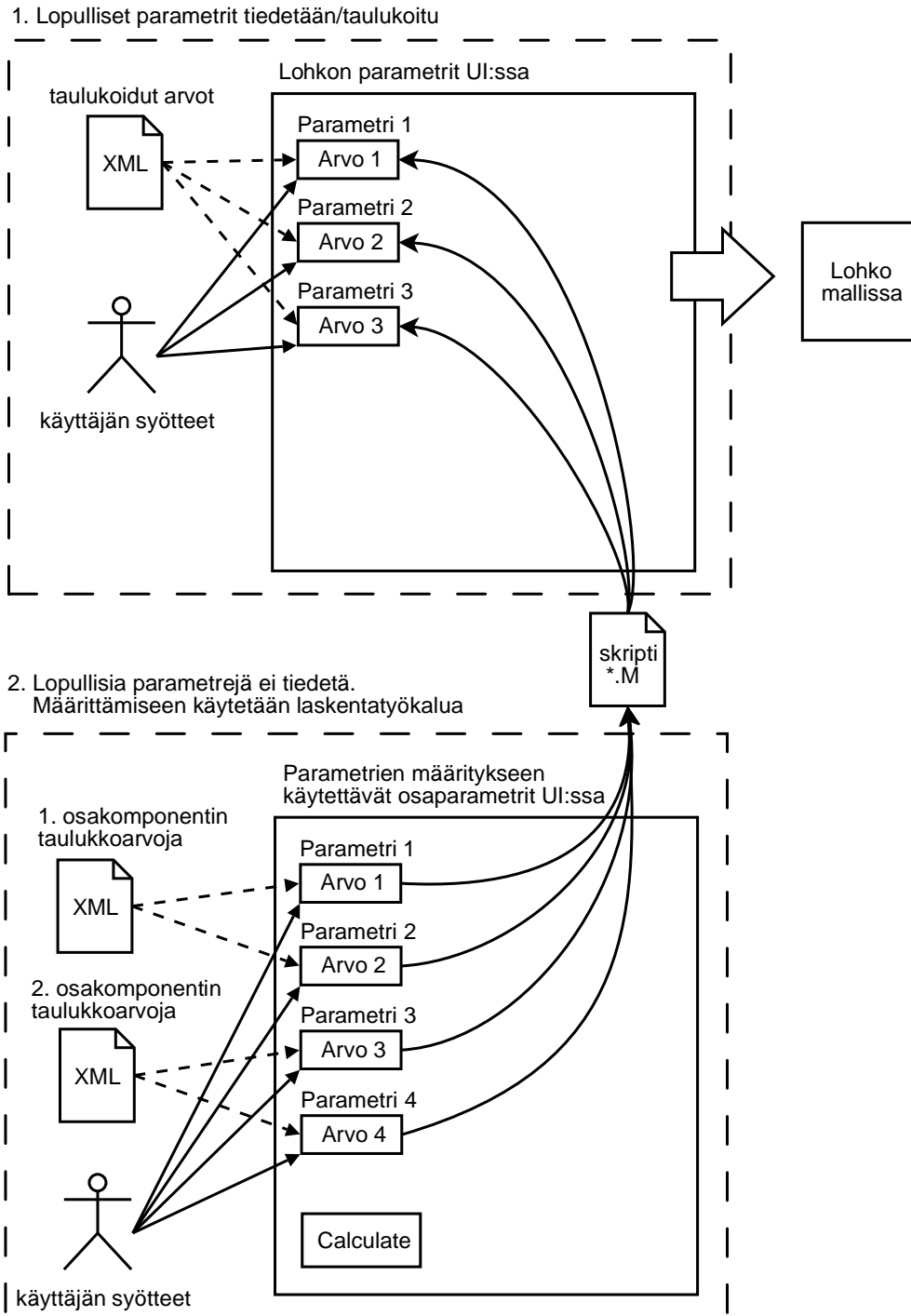


Kuva 4.8 Kuva UI:lla rakennetusta simulointimallista.

#### 4.5.5 Simulointimallin parametrusointi

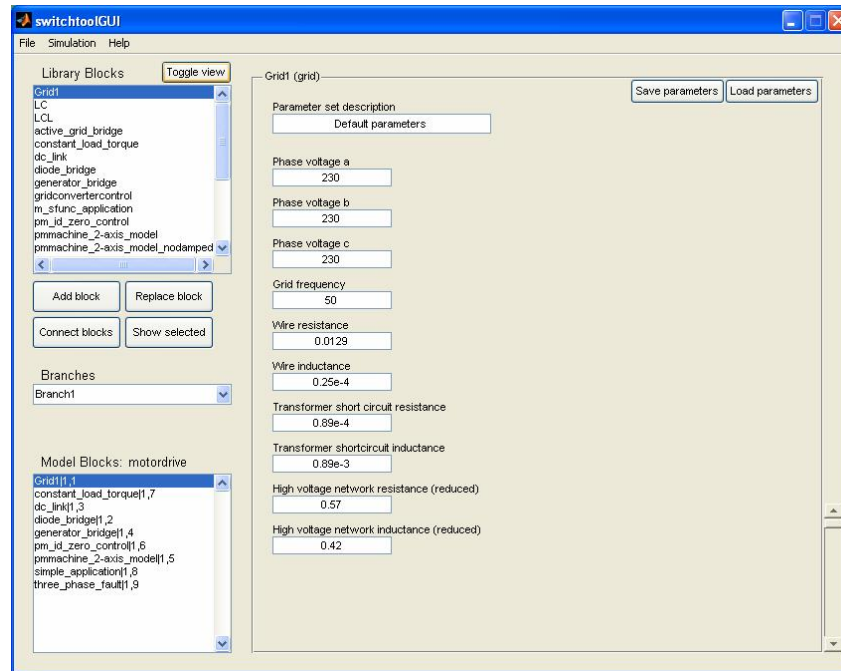
Simulointimallin lohkot sisältävät muokattavia parametreja, kuten jännitteen ja napapariluvun. Eri parametreilla lohko saadaan jäljittelemään haluttua komponenttia. Parametrusoinnilla tarkoitetaan parametrien määrittämistä käyttöliittymän avulla, joko mallin rakentamisen aikana tai muokatessa valmista mallia. Käyttöliittymä sisältää parametrusointiin kaksi erillistä muokkausmenetelmää, joita ovat lohkon arvojen suora muokkaus tai arvojen määrittäminen erillisen apuohjelman avulla. Edellisessä tapauksessa käyttäjä syöttää suoraan lopulliset arvot lohkon parametreiksi, mikä on nopein tapa jos parametrit ovat oikeassa muodossa suoraan tiedossa. Jälkimmäisessä tavassa käyttäjä voi ladata valmiita taulukkoarvoja ohjelmaan, joiden avulla lopulliset parametrit lasketaan suorittamalla lohkoa vastaava skripti. Jos arvoja ei ole taulukoitu, käyttäjä voi syöttää itse alkuarvot, jonka jälkeen lohkoa vastaava skripti ajetaan. Molempia tapoja koskevia arvoja voidaan myös tallentaa käyttöliittymän kautta, jos käyttäjä haluaa taulukoida syöttämiään arvoja. Tiedostot tallennetaan XML-formaatissa, jotta niiden muokkaaminen on mahdollista myös muiden ohjelmien kautta. Kuva 4.9 havainnollistaa parametrusoinnin vaiheita.





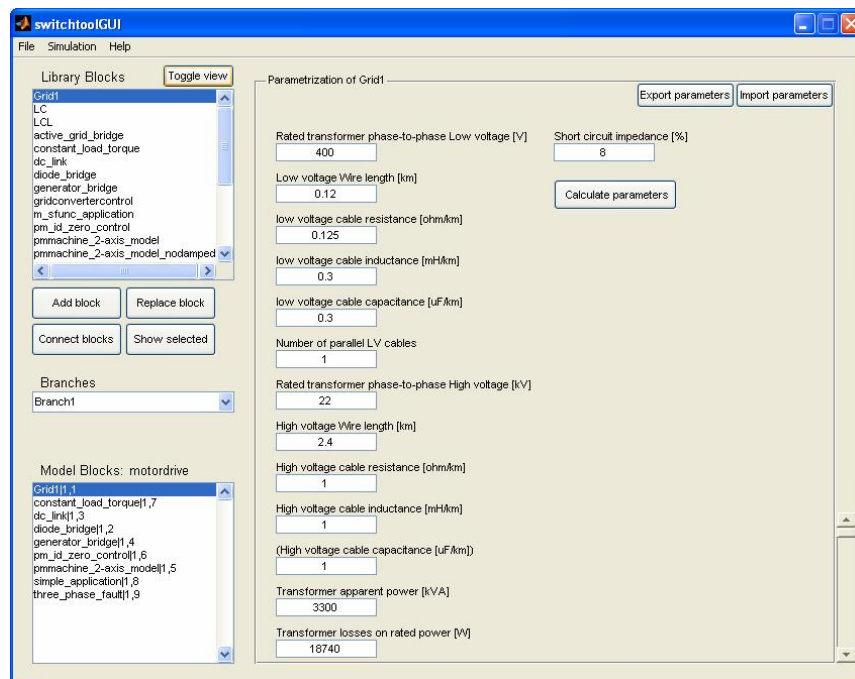
Kuva 4.9 Simulointimallin parametrisointimahdollisuudet käyttöliittymän avulla.

Kuvassa 4.9 esitetään kuinka käyttäjä voi parametrisoida simulointimallin lohkon kahdella eri tavalla käyttäen taulukoituja arvoja tai omia syötteitä. Calculate-painike käynnistää skriptin, joka laskee osaparametrien avulla uudet arvot lohkon maskin välilehdelle (Mask). Kuvassa 4.10 esitetään käyttöliittymän näkymä parametrisoinnin aikana, kun halutaan muokata suoraan maskin lopullisia parametreja (Mask).



Kuva 4.10 Käyttöliittymän näkymä mallin parametrisointivaiheessa, kun näkyvillä on lohkon sisältämät parametrit.

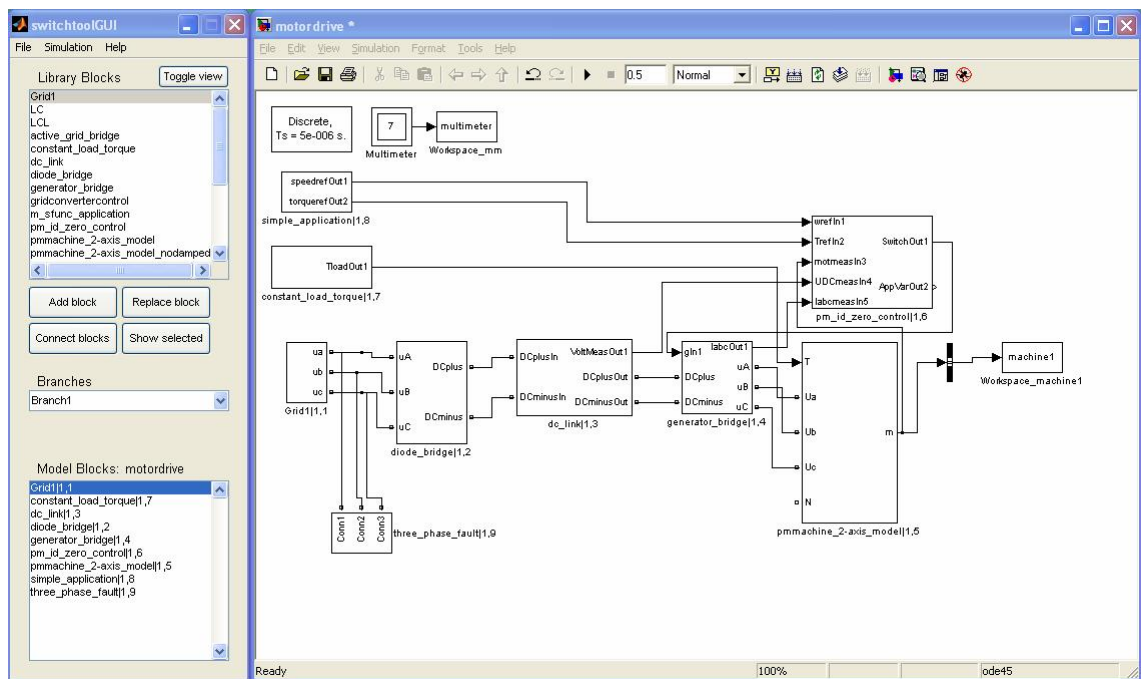
Kuvassa 4.11 esitetään käyttöliittymän näkymä parametrisoinnin aikana, kun käytetään parametrisoinnin laskentatyökalua apuvälineenä (Parametrization).



Kuva 4.11 Käyttöliittymän näkymä mallin parametrisointivaiheessa, kun esillä on parametrien määrittämiseen kehitetyn työkalun näkymä sähköverkkolohkon osalta.

#### 4.6 Valmiin käyttöliittymän pohdintaa

Käyttöliittymän päätavoitteena oli helpottaa simulointikirjaston käytettävyyttä mallin rakennuksessa ja muokkaamisessa. Erityisesti uusien käyttäjien huomioiminen asetettiin tärkeäksi suunnittelussa, mikä oli osaltaan suurin vaikuttaja rakennuslogiikan kehityksessä. Tavoitteissa mainittu dynaamisuus oli myös tärkeässä asemassa, minkä vuoksi muokkauksessa päädyttiin käyttöliittymän ja Simulinkin (simulointimallin) yhteistyöhön. Käyttöliittymä näkee mitä malli sisältää, eivätkä suoraan malliin tehdyt muutokset häiritse käyttöliittymän toimintaa. Dynaamisuuden ansiosta simulointikirjastoa sekä kytkentäsäännöstöä voidaan täydentää vapaasti ilman käyttöliittymän ohjelmakoodin muokkaamista. Näin ollen uuden lohkon lisääminen kirjastoon aiheuttaa ainoastaan kytkentäsäännösten muokkaamisen ylläpidon kannalta. Kuvassa 4.12 esitetään simulointityökalun näkymä mallin rakennuksen aikana.



Kuva 4.12 Simulointityökalun näkymä, jossa vasemmalla on käyttöliittymä ja oikealla käsittelyssä oleva simulointimalli.

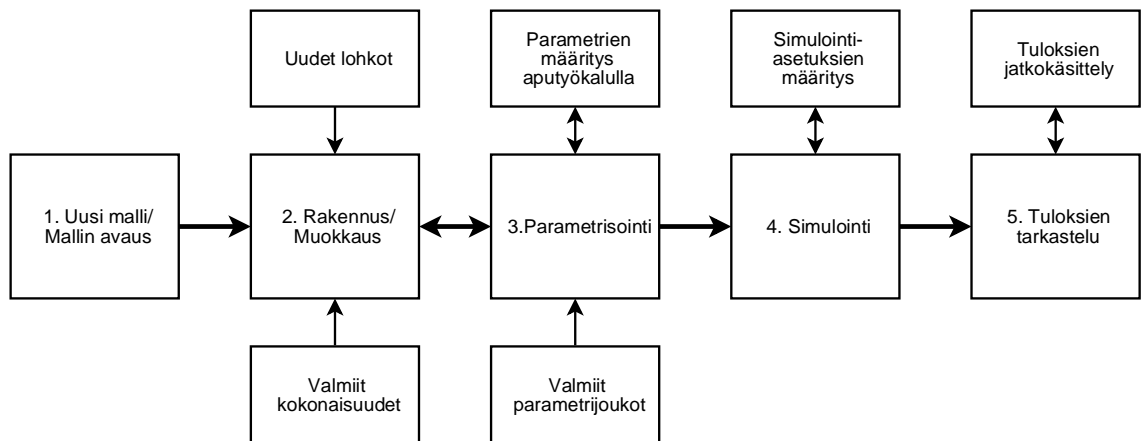
#### 4.7 Kehitysehdotukset

Kuvassa 4.4 esitettiin kaavio UI:n sisäisestä toiminnasta. Aiemmin todettiin, että kaavion alkuun sisältyvä kirjaston lukeminen tarkoittaa kirjaston sisältämien lohkojen generoimista paneeleiksi ohjelman muistiin. Muistiin lukeminen nopeuttaa paneelin

vaihtoa muokkauksen aikana, mutta se ei ole lainkaan välttämätöntä. Toimintamallia olisi mahdollista muuttaa siten, että kirjastoa ei luettaisi muistiin alussa lainkaan lukuun ottamatta kirjaston sisältämien lohkojen nimiä luetteloruudussa. Tällöin maskien sisällöt generoitaisiin parametripaneeleihin valittaessa lohko joko mallista tai UI:sta. Muutoksen hyöty olisi parempi yhteensopivuus simulointikirjastoon kuulumattomien lohkojen kanssa. Tällä hetkellä tuntemattomien lohkojen lisäys on mahdollista käsin, mutta UI ei osaa generoida kyseisten lohkojen parametreja näkymään, eikä kytkeä lohkoa automaattisesti. Toinen mahdollisuus olisi säilyttää paneelien generointi alussa, ja käsitellä tuntemattomia lohkoja erikoistapauksina. Tämä tapa on nopeammin toteutettavissa, mutta pidemmällä aikavälillä ratkaisu luultavasti monimutkaistaa ohjelmistorakennetta enemmän ja aikaansaa uusia vikaherkkiä tilanteita.

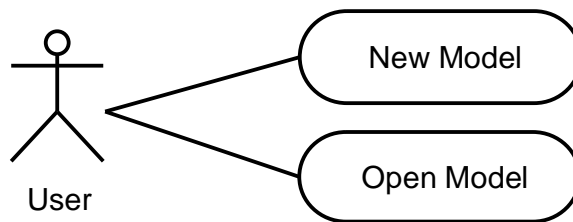
## 5 SIMULOINTITYÖKALUN KÄYTTÖTAPAUSSANALYYSI

Simulointityökalun käyttöä voidaan kuvailla pääpiirteiltään kuvan 5.1 mukaisesti. Vuo kuvaa käyttäjän toimenpiteitä simulointimallin muokkauksen vaiheissa.



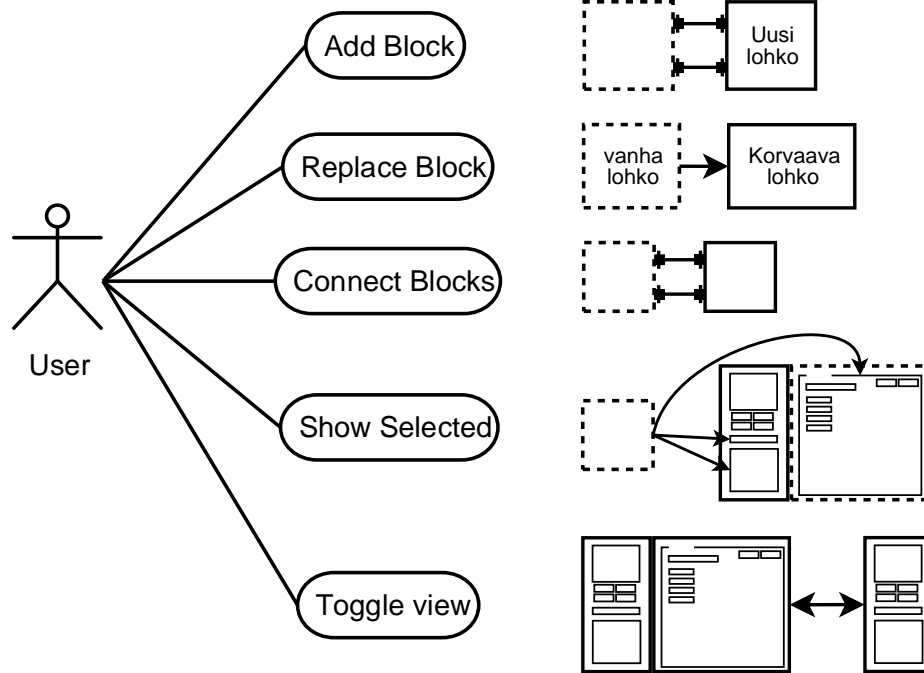
Kuva 5.1 Simulointityökalulla käsitellyn simulointimallin käsittelyvuo

Kuvassa 5.1 esitetään, kuinka käyttö aloitetaan luomalla uusi malli tai avaamalla aiemmin talletettu malli. Avattaessa ennalta luotua mallia UI avaa Simulink-tiedoston, lukee simulointimallin rakenteen ja generoi sen näkymään. Kuvassa 5.2 esitetään ensimmäisen vaiheen käyttötapaukset.



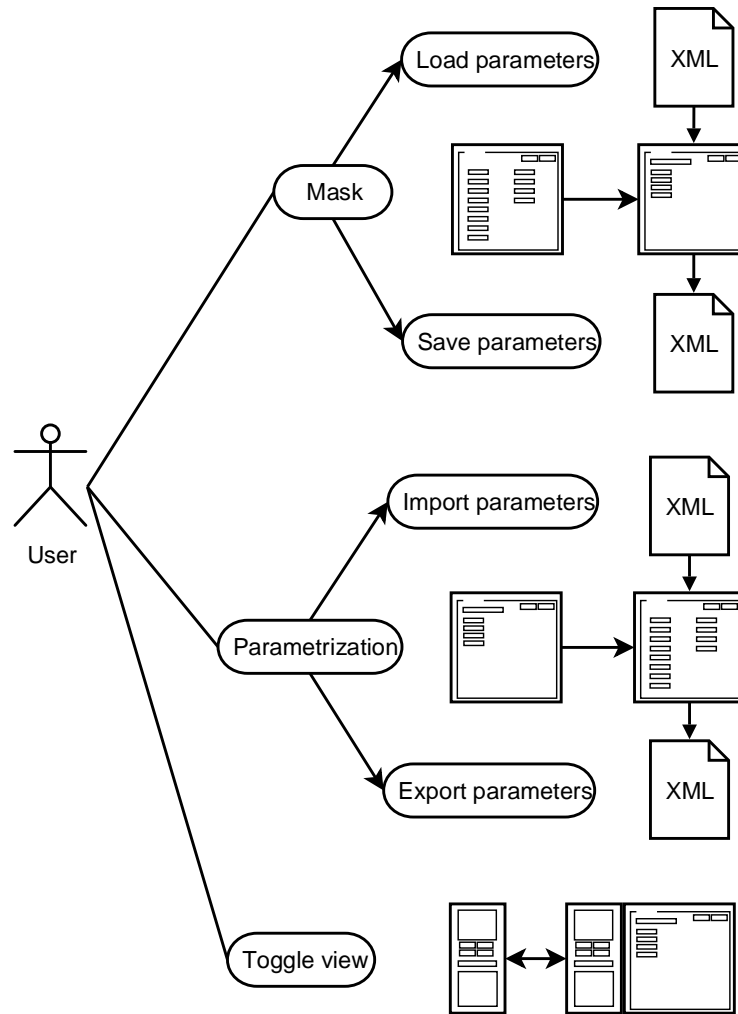
Kuva 5.2 Simulointityökalun käytön ensimmäinen vaihe, jossa joko luodaan uusi malli tai avataan malli.

Toisessa vaiheessa mallia muokataan lisäämällä uusia lohkoja simulointikirjastosta tai suurempia kokonaisuuksia muista malleista. Vaiheeseen liittyvä käyttötapausskaavio esitetään kuvassa 5.3.



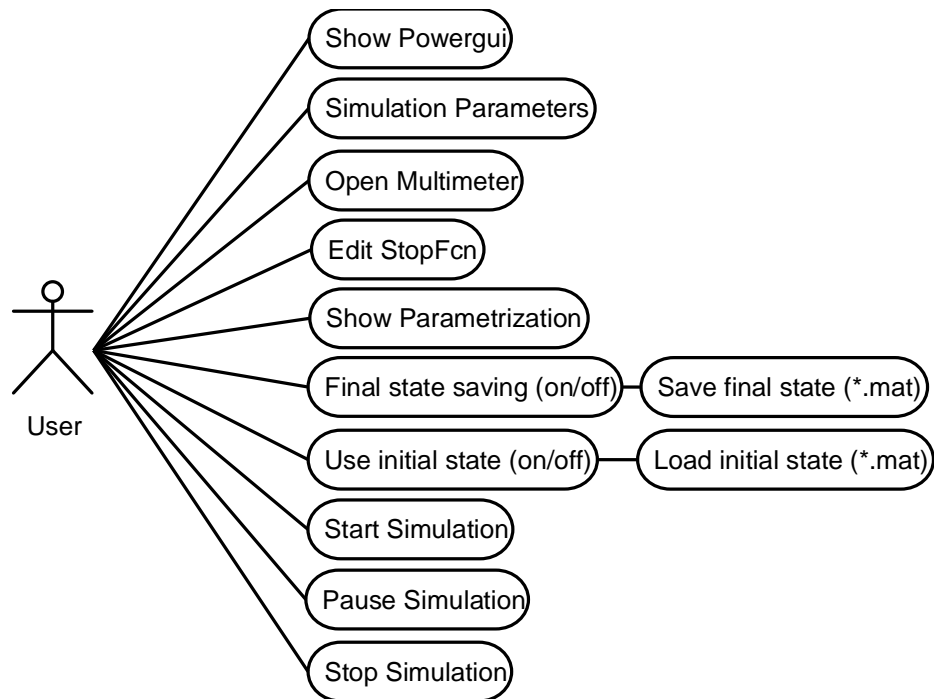
Kuva 5.3 Simulointityökalun käytön toinen vaihe, jossa simulointimallia muokataan UI:n avulla. Katkoviivalla merkityt lohkot merkitsevät mallin valittua lohkoa.

Kolmannessa vaiheessa malli parametrisoidaan joko käyttämällä valmiita parametrisettejä, osaparametrien ja aputyökalun avulla, tai syöttämällä parametrit itse. Toisen ja kolmannen vaiheen käsittely tehdään usein rinnakkaisesti. Vaiheen käyttötapauskaavio löytyy kuvasta 5.4.



Kuva 5.4 Simulointityökalun käytön kolmas vaihe, jossa simulointimalli parametrisoidaan UI:n avulla.

Kun kuvissa 5.3 ja 5.4 esitetyt mallin rakennus ja parametrisointi ovat valmiita, siirrytään mallin simulointiasetusten määrittämiseen ja simulointiin. Simulointiasetuksista olennaisimpia ovat simulointiajan määrittäminen ja valinta simuloidaanko mallia diskreettinä (diskretointiaika) vai aikajatkuvana. Kuvassa 5.5 esitetään vaiheen käyttötapa-kaavio.



Kuva 5.5 Simulointityökalun käytön neljäs vaihe, jossa määritetään simulointiasetukset ja simuloidaan mallin käyttäytymistä.

Kuvassa 5.5 Powergui on SimPowerSystemsin lohko simulointimallissa, josta määritetään simulointityyppi (aikajatkua vai diskreetti), sekä mahdollinen diskreetointiaika. Simulation Parameters -valikko avaa Simulinkin omat simuloinnin asetukset, joissa määritetään simulointiaika, simuloinnissa käytettävä integrointimenetelmä sekä simulointiaskeleen pituus. Open Multimeter avaa SimPowerSystemsin lohkon, josta valitaan simuloinnin aikana talletettavat signaalit sekä niiden piirtäminen jälkikäteen. Simulointimalliin lisätään automaattisesti myös jokaisen generaattorin lisäyksen yhteydessä To Workspace -lohko, josta voidaan valita generaattorin tarkastelun kannalta mielenkiintoiset signaalit. Näitä signaaleja voidaan käsitellä määrittelemällä To Workspace -lohkon StopFcn-funktio, joka aktivoituu simuloinnin jälkeen. Funktion käyttö on oletuksena päällä. Tällöin jokaisen generaattorilohkon lisäyksen jälkeen sille luodaan oma pysäytykseen liittyvä skripti, joka esimerkiksi tulostaa valitut signaalit. Edit Stopfcn tarjoaa mahdollisuuden muokata skriptiä. Show Parametrization näyttää kappaleessa 4.5.5 esitellyn mallin parametrisoinnin välilehden, mikäli kyseiselle lohkolle on kehitetty sellainen. Simulointia ei ole pakko aina aloittaa alusta, vaan simulointi voidaan asettaa alkamaan halutusta aloitustilasta (ennalta simuloitu päätöstila). Päätöstilan tallennus on oletuksena



päällä, ja se voidaan simuloinnin jälkeen tallentaa (Save final state) tiedostoon (\*.mat) käyttöliittymän avulla. Tallennetusta tilasta voidaan myöhemmin jatkaa simulointia kytkemällä aloitustilan käyttö päälle (Use initial state), sekä lataamalla haluttu tila (Load initial state). Mallia simuloidaan joko Simulinkin tai käyttöliittymän kautta käynnistämällä simulointi (Start Simulation).

Viimeisenä vaiheena on tulosten tarkastelu sekä mahdollinen jatkokäsittely. Tulosten tarkastelu tapahtuu ensisijaisesti kuvaajien avulla, joita piirretään automaattisesti simuloinnin jälkeen käyttäjän valinnan mukaan. Jälkikäsittelyssä saadulle datalle voidaan suorittaa analyyseja, kuten FFT (*Fast Fourier Transform*) tai THD (*Total Harmonic Distortion*).

## 6 YHTEENVETO

Sähkötarpeen jatkuva kasvu ja tarve etsiä vaihtoehtoisia energialähteitä uusiutumattomien energialähteiden rinnalle ovat tehneet tuulivoimasta entistä kilpailukykyisemmän ja voimakkaasti kasvavan sähköntuotantoalan. Sähköntuotanto on jo kauan pohjautunut suuriin keskitettyihin tuotantolaitoksiin korkeajännitelinjosten läheisyydessä, kun taas tuulivoimalat edustavat päinvastaisesti hajautettua tuotantomenetelmää, mikä asettaa uusia teknisiä haasteita sähköverkolle. Tuulivoimaloiden aiheuttamia vaikutuksia sähköverkolle ja itse voimalan sisäistä toimintaa voidaan simuloida ja simulointiohjelmistoja löytyy markkinoilta useita.

Työssä esitettiin tuulivoimaloiden erilaisten konseptien pääpiirteet sekä niiden markkinaosuudet. Konsepteja vertailtiin myös keskenään ja tuulivoimaloiden verkkoliityntäehtoja käsiteltiin. Tällä hetkellä muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat osatehoisella taajuusmuuttajalla (konsepti C) hallitsevat selkeästi markkinoita, mutta myös täysitehoisiin taajuusmuuttajiin perustuvat muuttuvanopeuksiset konseptit (konsepti D) ovat hyvässä asemassa tulevaisuutta ajatellen mm. hyvän säädettävyyden ja hyötysuhteen ansiosta.

Tuulivoimakäyttöön soveltuvia simulointiohjelmiä tarkasteltiin yleisellä tasolla sekä Matlab/Simulink –simulointiympäristöön perehdyttiin tarkemmin. Tuulivoimakäytön simulointiin kehitetyn simulointityökalun Matlabilla (GUIDE) ohjelmoitua käyttöliittymää ja sen kehitystä analysoitiin, sekä valittuja toimintatapoja kuvailtiin yksityiskohtaisesti. Käyttöliittymän päätarkoituksena oli helpottaa Simulink&SimPowerSystems –lohkoilla kehitetyn simulointikirjaston käytettävyyttä ja huomioida siinä uudet käyttäjät ensisijaisesti kehittämällä rakennuslogiikka sen mukaisesti. Käyttöliittymästä toteutettiin suunnitelman mukaisesti dynaaminen sekä mahdollisimman helposti jatkokehitettävissä oleva kokonaisuus. Simulointityökalun käyttötapausanalyysissä käytiin läpi mallin rakennukseen kuuluva käsittelyvuo käyttäjän näkökulmasta.

**LÄHTEET**

- (Annon 1996) Annon. *European wind turbine catalogue*. European commission, Brussels, Belgium, 1996
- (Dommel 1969) Dommel H.W., *Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks*, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS-88, #4, s.388-399
- (EIA 2008) Energy Information Administration. "Official Energy Statistics from the U.S. Government". Verkkodokumentti. Saatavissa: <http://www.eia.doe.gov/emeu/international/electricityconsumption.html> [Viitattu 1.9.2008]
- (Energinet 2004) Energinet.dk (2004) "Wind turbines connected to grids with voltages above 100 kV - Technical regulations for the properties and the control of wind turbines". Energinet.dk, Transmission System Operator of Denmark for Natural Gas and Electricity, Technical Regulations TF 3.2.5, 2004, 35 p. Saatavissa: [www.energinet.dk](http://www.energinet.dk)
- (E.ON 2006) E.On Netz. *Grid Code*, "High and extra high voltage". Verkkodokumentti. Saatavissa: <http://www.eon-netz.com/Ressources/downloads/ENENARHS2006eng.pdf> [Viitattu 5.9.2008]
- (Fuentes ym. 2007) Fuentes J., Molina A., Ruz F., Gómez E., Jiménez F., 2007. "Wind Turbine Modelling: Comparison of Advanced Tools for Transient Analysis". IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2007. Saatavissa: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/4275198/4275199/04275638.pdf?tp=&isnumber=&arnumber=4275638> [Viitattu 23.9.2008]

- (Grauers 1996) Grauers A., 1996. *Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines*. Väitöskirja. Chalmers University of Technology, Goteburg, 1996
- (Hansen 2007) Hansen A., Hansen L., 2007. "Market penetration of wind turbine concepts over the years". Verkkodokumentti. Saatavissa: [http://www.risoe.dk/rispubl/art/2007\\_136\\_paper.pdf](http://www.risoe.dk/rispubl/art/2007_136_paper.pdf)  
[Viitattu 3.9.2008]
- (Iov ym. 2004) Iov F., Hansen A., Jauch C., Sorensen P., Blaabjerg F., 2004 "Advanced tools for modeling, design and optimization of wind turbine systems". Nordic Wind Power Conference, 2004
- (Karlsson 2005) Karlsson A. *Evaluation of Simulink/SimPowerSystems and other Commercial Simulation Tools for the Simulation of Machine System Transients*. Opinnäytetyö. Saatavissa: <http://www.ee.kth.se/php/modules/publications/reports/2005/IR-RT-EX-0505.pdf> [Viitattu 11.8.2008]
- (Li, Chen 2008) Li H., Chen Z., 2008. "Overview of different wind generator systems and their comparisons". IET Renewable Power Generation., 2008, Vol. 2, No.2, pp. 123-138. Saatavissa: [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4469298](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4469298)  
[Viitattu 11.7.2008]
- (MathWorks 2008) MathWorks, 2008. "How SimPowerSystems™ Software Works". Verkkodokumentti. Saatavissa: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/ug/f7-6941.html> [Viitattu 10.9.2008]

- (Merril Lynch 2007) Merrill Lynch. "Wind turbine manufacturers; here comes pricing power". Verkkodokumentti. Saatavissa:  
<http://www.ml.com/media/81290.pdf> [Viitattu 1.9.2008]
- (Milo ym. 2005) Milo A., Martinez A., 2005. "Cosimulation of a wind turbine with doubly fed induction generator with PSCAD and SIMULINK". Flux Magazine, Nro. 47, 2005, Cedrat Technologies. Saatavissa:  
[http://www.cedrat.com/fileadmin/user\\_upload/cedrat\\_groupe/Publications/Publications/2005/01/doubly\\_fed\\_induction\\_generator.pdf](http://www.cedrat.com/fileadmin/user_upload/cedrat_groupe/Publications/Publications/2005/01/doubly_fed_induction_generator.pdf) [Viitattu 11.11.2008]
- (NORDEL 2007) Nordel. *Nordic Grid Code 2007 (Nordic collection of rules)*. Verkkodokumentti. Saatavissa:  
<http://www.nordel.org/content/default.asp?pagename=openfile&DocID=4948> [Viitattu 15.9.2008]
- (Polinder ym. 2006) Polinder H., Van Der Pijl F.A., 2006. "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines". IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, 2006. Saatavissa:  
<http://ieeexplore.ieee.org/iel5/10252/32672/01531394.pdf?arnumber=1531394> [Viitattu 11.9.2008]
- (REN21 2008) Renewable energy Policy Network for the 21st Century. *Renewables 2007 Global Status Report*. Verkkodokumentti.  
[http://www.ren21.net/pdf/RE2007\\_Global\\_Status\\_Report.pdf](http://www.ren21.net/pdf/RE2007_Global_Status_Report.pdf)  
[Viitattu 1.8.2008]
- (WWEA 2008) World Wind Energy Association, 2008. *Statistics*. Verkkodokumentti. Saatavissa:  
[http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com\\_content&task=view&id=198&Itemid=43](http://www.wwindea.org/home/index.php?option=com_content&task=view&id=198&Itemid=43) [Viitattu 1.8.2008]