



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**MISKA ÖRMÄLÄ**  
**SÄHKÖENERGIAJÄRJESTELMIEN DYNAAMINEN SIMULOINTI**  
**MATLAB/SIMSCAPE-YMPÄRISTÖSSÄ**  
Kandidaatintyö

Tarkastaja: projektipäällikkö Yrjö Majanne

## TIIVISTELMÄ

**MISKA ÖRMÄLÄ:** Sähköenergiajärjestelmien dynaaminen simulointi Matlab/Simscap-ympäristössä  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Kandidaatintyö, 32 sivua  
Joulukuu 2017  
Automaatiotekniikan koulutusohjelma  
Pääaine: Systeemitieteet  
Tarkastaja: projektipäällikkö Yrjö Majanne

Avainsanat: mallinnus, simulointi, sähköverkko, energiajärjestelmä, tuulivoima, aurinkosähkö

Energiajärjestelmiä tutkitaan ja kehitetään jatkuvasti. Nykypäivänä uusiutuvaa energiaa pyritään lisäämään sähköverkkoihin yhä enemmän. Kasvava uusiutuvan energian osuus sähköverkossa lisää kuitenkin myös vaihtelevan energiantuotannon määrää. Tämä aiheuttaa siten säädön ja säätövoiman kasvavaa tarvetta.

Tässä työssä tutkimuskohteena on sähköenergiajärjestelmien dynaaminen mallinnus ja simulointi Matlab/Simscap-ympäristössä. Työssä esitellään energiajärjestelmien ominaisuuksia sekä Matlabin Simscapen toimintaa. Lisäksi perehdytään aurinko- ja tuulivoimamalleihin. Lopuksi työssä esitetään kaksi mallinnusesimerkkiä, joista toisessa on esitetty dynaaminen sähköverkkomalli.

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	ENERGIAJÄRJESTELMÄT .....	3
	2.1 Järjestelmän rakenne ja toiminta .....	3
	2.2 Uusiutuvan energian vaikutus järjestelmän dynamiikkaan .....	6
	2.3 Tuuli- ja aurinkoenergian toimintaperiaatteet .....	7
	2.3.1 Tuulivoima .....	8
	2.3.2 Aurinkoenergia .....	9
3.	MALLINNUS JA SIMULOINTI .....	12
	3.1 Järjestelmien dynaaminen mallinnus .....	12
	3.2 Simscape Power Systems .....	14
	3.2.1 Simscape Components .....	14
	3.2.2 Specialized Technology .....	15
4.	TUULI- JA AURINKOENERGIAMALLIT .....	17
	4.1 Tuuliturbiini ja generaattori .....	17
	4.2 PV-kenno .....	21
5.	MALLINNUSESIMERKKEJÄ .....	24
	5.1 Tuulivoiman liittäminen verkkoon .....	24
	5.2 Dynaaminen sähköverkko .....	27
6.	YHTEENVETO .....	30
	LÄHTEET .....	31

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

### LYHENTEET

FACTS	Flexible AC Transmission System
Matlab	Matrix Laboratory, tietokoneohjelmisto
PV	Photovoltaic, valosähköinen
Simscape	Simulinkin mallikirjasto
Simulink	Matlabin simulointiympäristö
STATCOM	Static synchronous compensator
Trip-signaali	Turvamekanismi tuuliturbiinille
V2G	Vehicle to grid

### MERKINNÄT

$A$	pinta-ala
$c_p$	kapasiteettikerroin
$E_k$	kineettinen energia
$I$	sähkövirta
$I_d$	diodivirta
$I_L$	valosähköisen ilmiön synnyttämä virta
$I_{mp}$	virta suurimmalla teholla
$I_{sc}$	oikosulkuvirta
$k$	Boltzmannin vakio
$\dot{m}$	massavirta
$nI$	diodin hyötysuhde
$N_{cell}$	moduulissa sarjaankytkettyjen kennojen lukumäärä
$P$	pätöteho
$P_m$	suurin teho
$P_{tuuli}$	tuulen teho
$q$	alkeisvaraus
$Q$	loisteho
$r$	säde
$R_s$	sarjaankytketty vastus
$R_{sh}$	rinnankytketty vastus
$T$	lämpötila
$t$	aika
$v$	tuulen nopeus
$V_{mp}$	jännite suurimmalla teholla
$V_{oc}$	Avoimen piirin jännite

$V_T$	lämpötilaa vastaava jännite
$\beta$	lapakulma
$\lambda$	kärkinopeussuhde
$\lambda_{nom}$	nimelliskärkinopeussuhde
$\rho$	tiheys
$\omega$	kulmanopeus

# 1. JOHDANTO

Energiajärjestelmät ja -teknologia ovat maailmassa murroksen alla. Ihmiskunta taistelee kiihtyvää ilmaston lämpenemistä vastaan korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuville energialähteillä. Energiajärjestelmät tulevat muuttumaan teknologisen vallankumouksen myötä entistä kompleksisemmiksi ja enemmän suunnittelukapasiteettia vaativammiksi kokonaisuuksiksi [1]. Viime vuosikymmenten aikainen tietotekninen kehitys on tuonut uusia mahdollisuuksia energiajärjestelmien suunnitteluun ja kehittämiseen.

Energiajärjestelmiin liittyvät oleellisesti käsitteet energiantuotanto, -kulutus, -siirto sekä energiatalous ja ympäristö [2]. Sähkövoimajärjestelmän energiantuotannon ja -kulutuksen on oltava käytännössä jatkuvasti tasapainossa. Tämä vaatimus asettaa haasteita järjestelmän suunnittelulle, sillä erityisesti energian kulutuksessa tapahtuu jatkuvasti muutoksia vuorokausi-, viikko- ja vuositasolla. Tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi on järjestelmässä oltava säätövoimaa, jonka avulla systeemi kykenee vastaamaan kulutuksen vaihteluun. Säätövoimaksi soveltuu hyvin säädettävissä olevat ja helposti saatavilla olevat energiantuotantomuodot, kuten Suomessa vesivoima. Jos järjestelmässä on muita energiantuotantomuotoja, kuten tuuli- tai aurinkovoimaa, säätövoiman merkitys korostuu. Monien eri energialähteiden sovittaminen järjestelmään asettaa sekä teknisiä että taloudellisia haasteita verkkojen suunnittelijoille. Useat uusituvat energiantuotantomuodot ovat verrattain pienitehoisia, kalliita sekä niiden tuottama teho voi vaihdella hyvinkin voimakkaasti. Jotta tällaisen järjestelmän toimintavarmuus saataisiin turvattua, on tulevaisuudessa vielä tehtävä huomattavasti tutkimus- ja suunnittelutyötä.

Tässä työssä tutkimuskohteena on sähköenergiajärjestelmien dynaaminen mallinnus ja simuloiminen. Lisäksi tutkitaan uusiutuvien energialähteiden vaikutusta järjestelmän käyttäytymisessä. Järjestelmien mallintamiseen ja simuloimiseen hyödynnetään *Matlab*-tietokoneohjelmiston *Simulink*-simulointiympäristöä sekä *Matlabin Simscape Power Systems* -osiota. Tutkimuksen lähteinä toimivat alan kirjallisuus, tieteelliset julkaisut sekä virallisten organisaatioiden tutkimukset ja raportit.

Energiajärjestelmien dynaamisesta mallinnuksesta ja simuloinnista ei ole tutkimustietoa paljoakaan ennen vuosituhannen vaihdetta, johtuen tietoteknisen kehityksen kiihtymisestä vasta 2000-luvulla. Tämän jälkeen tutkimustyötä aiheen piirissä on tehty enemmän ja useissa viime vuosikymmenen sisällä tehdyissä tutkimuksissa [3-5] onkin todettu järjestelmien dynaamisen mallinnuksen ja simuloinnin olevan tehokas työkalu järjestelmän analysointiin ja kehittämiseen. Teknis-taloudellisesta näkökulmasta katsottuna järjestelmien mallinnuksen ja analysoinnin avulla voidaan järjestelmää optimoida tehokkaasti sekä löytää järjestelmästä puutteita tai vikoja. Mallinnuksen avulla mahdollisia häviöitä voidaan vähentää ja näin parantaa mm. prosessin hyötysuhdetta. Myös laitteiston

yhteensopivuusongelmat pystytään helposti tunnistamaan tietokoneavusteisesti. Mallinnus on myös tehokas työkalu erityisesti automaatioissa, kun halutaan suunnitella ja testata järjestelmän säätömahdollisuuksia sekä kerätä tietoa järjestelmän ominaisuuksista. Tietokonepohjaisen mallinnuksen etuna on löytää useita ratkaisuja nopeasti ja yhdellä kertaa tilanteisiin, joissa voi olla monia optimaalisia ratkaisuja. Mallinnus auttaa myös ratkaisujen löytämiseen sellaisiin järjestelmiin, jotka sisältävät diskreettejä sekä aikajatkuvia ominaisuuksia. [1]

Työ rakentuu siten, että aluksi kuvataan energiajärjestelmien yleinen rakenne sekä järjestelmien toimintaperiaatteet ja vaatimukset. Seuraavana käsitellään uusiutuvan energian rooli ja vaikutukset järjestelmien dynamiikassa. Tämän jälkeen käsitellään yleisesti aurinko- ja tuulivoiman ominaisuuksia ja toimintaa. Seuraavaksi esitellään tutkimustyökalu eli Matlabin Simscape sekä Simscape Power Systems ja tämän sisältö, jonka jälkeen esitellään tuuli- ja aurinkovoimamallien ominaisuudet. Lopuksi tässä työssä on kaksi mallinnusesimerkkiä. Tämän jälkeen on yhteenveto sekä työssä käytetyt lähteet.

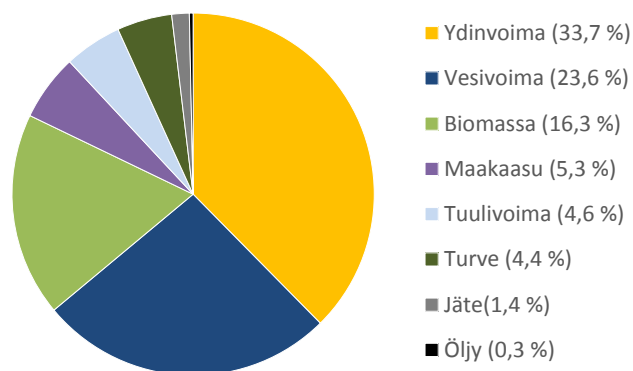
## 2. ENERGIAJÄRJESTELMÄT

Tässä luvussa käsitellään energiajärjestelmien rakennetta ja ominaisuuksia. Luvussa perehdytään myös uusiutuvaan energiaan sekä tuuli- ja aurinkovoiman toimintaperiaatteisiin.

### 2.1 Järjestelmän rakenne ja toiminta

Energiajärjestelmät ovat systeemeitä, joiden pääasiallinen tarkoitus on tuottaa ja toimittaa energiaa kuluttajille. Tuotettu energia voi olla esimerkiksi lämpö- tai sähköenergiaa. Suomessa sähkövoimajärjestelmä on monipuolinen. Siihen kuuluu voimalaitoksia, kantaverkkoa, suurjännitteisiä siirtoverkkoja, alempia jakeluverkkoja sekä sähkön kuluttajia. [6] Suomessa toimii laadukas sekä hyvin hajautettu sähkövoimajärjestelmä, johon kuuluu noin 120 sähköä tuottavaa energiayritystä ja noin 400 voimalaitosta, joista lähes puolet on vesivoimalaitoksia. Energiaa pystytään tuottamaan erilaisia raaka-aineita ja tuotantomuotoja hyödyntämällä. Suomessa noin kolmannes tuotetusta sähköenergiasta tuotetaan sähkön ja lämmön yhteistuotantona, jossa sähköenergian tuotannossa syntynyt lämpöenergia pyritään keräämään ja hyödyntämään mahdollisimman tehokkaasti. Yhteistuotetussa energiassa käytetyn polttoaineen energiasisällön hyödyntämisessä voidaan saavuttaa jopa 90 %:n hyötysuhde [7]. Kokonaissähköntuotanto Suomessa vuonna 2016 oli 66,1 TWh, josta sähkön ja lämmön yhteistuotantoa oli 22,1 TWh. Tuotetun energian osuudet energialähteittäin käyvät ilmi kuvasta 1.

Sähköntuotanto energialähteittäin 2016 (66,1 TWh)

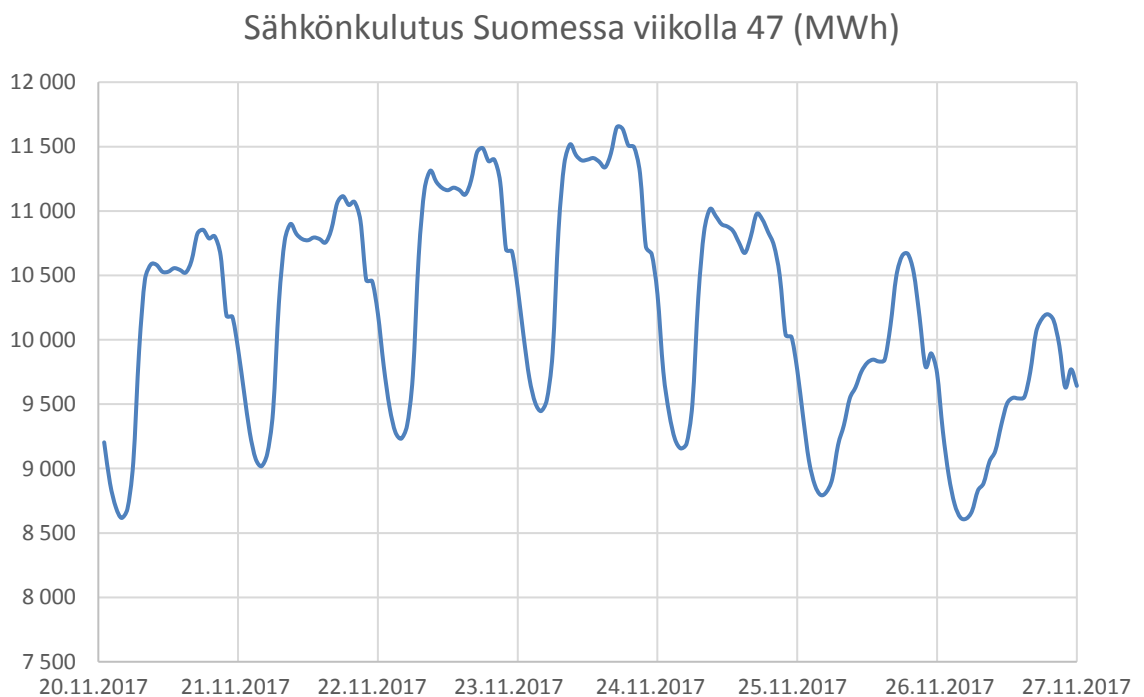


**Kuva 1.** Sähköntuotanto Suomessa energialähteittäin, perustuu lähteeseen [7].

Tärkeimmät energialähteet sähkön ja lämmön tuotannossa Suomessa ovat ydinvoima, vesivoima, biomassa, maakaasu ja puupolttoaineet. Suomi on vielä varsin riippuvainen ulkomailta tuodusta sähköstä. Vuonna 2016 sähkön kokonaiskulutuksesta 78 prosenttia katettiin kotimaisella tuotannolla ja 22 prosenttia sähkön nettotuonnilla Pohjoismaista, Venäjältä ja Virosta [8].

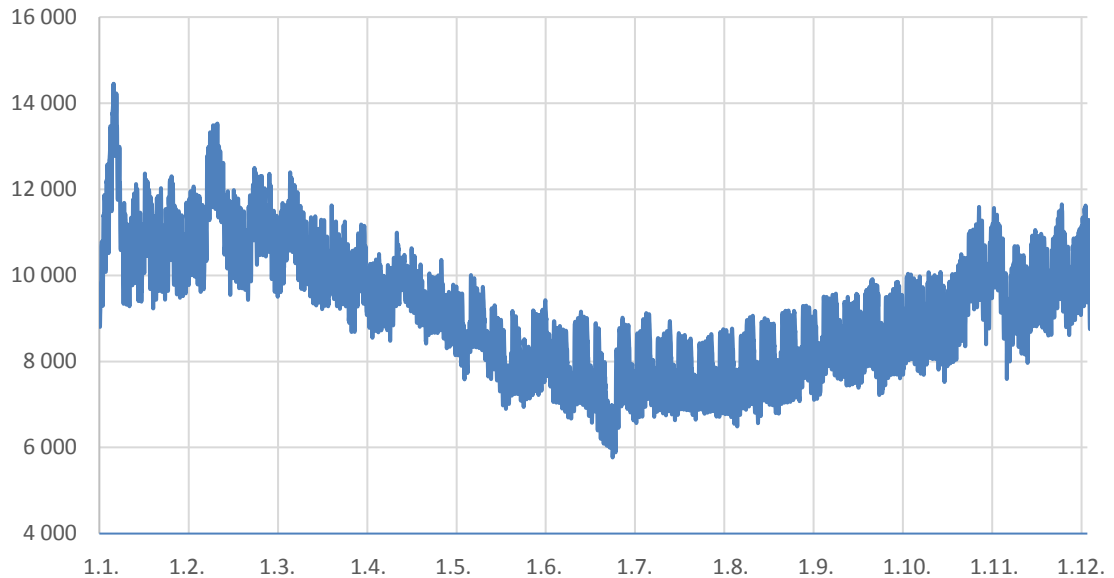


Perusedellytys energiajärjestelmän toiminnalle on energiantuotannon ja -kulutuksen tasapaino. Tuotannon ja kulutuksen välinen epätasapaino ilmenee verkon taajuuden muutoksena. [9] Mikäli kulutus on tuotantoa suurempaa, verkon taajuus laskee sekä tuotannon ollessa kulutusta suurempaa, taajuus kasvaa. Suomessa taajuuden sallitaan vaihtelevan välillä 49,9 – 50,1 Hz. Sähkönsiirron kantaverkon toiminnasta ja sen ylläpitämisestä Suomessa vastaa Fingrid Oyj. Se vastaa myös järjestelmän sähköntuotannon ja -kulutuksen välisen hetkellisen tehotasapainon ylläpidosta eli tasehallinnasta. Sähköverkko kokee jatkuvasti tehotasapainon vaihteluita sekä kulutuksen että tuotannon osalta. Kysynnän vaihtelua tapahtuu esimerkiksi vuorokausi-, viikko ja vuositasolla. Merkittävästi kulutukseen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi teollisuuden tuotanto ja sen vaihteleva määrä eri prosesseissa sekä vallitseva säätila ja siitä johtuvat lämmitystarpeen muutokset. Jotta energiajärjestelmä pystyisi mukautumaan jatkuviin kulutuksen vaihteluihin ja mahdollisiin häiriötilanteisiin, on järjestelmässä oltava joustavaa energiantuotantokapasiteettia eli säätövoimaa [10]. Mitä suurempi tehoepätasapaino järjestelmässä vallitsee, sitä suurempi on säätövoiman tarve. Kuvissa 2 ja 3 on havainnollistettu sähkönkulutuksen vaihtelua viikko- ja vuositasolla.



**Kuva 2.** *Energiankulutuksen vaihtelua Suomessa viikkotasolla [11].*

### Sähkönkulutus Suomessa vuonna 2017 (MWh)

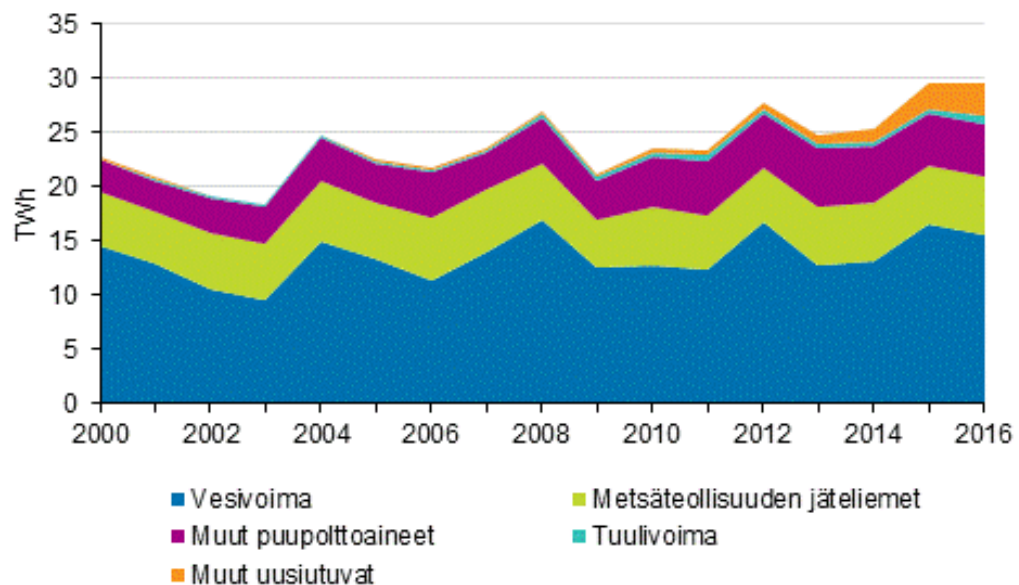


**Kuva 3.** Energiankulutuksen vaihtelua vuositasolla [11].

Joustava sähköjärjestelmä kykenee reagoimaan nopeasti ja luotettavasti suuriinkin muutoksiin energiantuotannossa ja -kulutuksessa. Säättövoiman merkitys kasvaa, mitä enemmän järjestelmässä on vaihtelevaa sähkönkulutusta ja -tuotantoa. [12] Säättövoiman lisäksi tarvitaan myös energian kysynnän joustoa, jotta säättövoiman tarvetta voidaan vähentää. Joustoa sähköjärjestelmään toisi myös energian varastoinnin mahdollisuus. Varastointiin voidaan hyödyntää esimerkiksi erilaisia akustoja mutta näiden laajamittainen hyödyntäminen on kuitenkin vielä nykypäivänä taloudellisesti kannattamatonta. Suurten akustojen hyödyntäminen sähköverkossa on investointikustannuksiltaan vielä liian suurta suhteessa niistä saatuun hyötyyn. Erilaisia energianvarastointitapoja tutkitaan jatkuvasti ja mahdollisesti tulevaisuudessa energian varastointia voitaisiinkin hyödyntää sähköverkoissa silloin, kun se on taloudellisesti kannattavaa. [13] Energian varastointi parantaisi erityisesti järjestelmän säädettävyyttä. Joustavien energiajärjestelmien tutkiminen ja kehittäminen tulee olemaan tulevaisuudessa keskeisessä roolissa, sillä säättötarve tulee lisääntymään Länsi- ja Pohjois-Euroopassa voimakkaasti lähivuosina. Tämä on seurausta siitä, kun suuri määrä lämpövoimaan perustuvaa erillistä sähköntuotantoa poistuu ja elintason nousun aiheuttama energiantarve kasvaa.

## 2.2 Uusiutuvan energian vaikutus järjestelmän dynamiikkaan

Energiantarve lisääntyy jatkuvasti maailmassa ja vain harvoilla energialähteillä näyttää olevan tulevaisuudessa mahdollisuuksia täyttää kaikki pitkäaikaisen energialähteen vaatimukset, kuten ympäristöystävällisyys, riittävyys ja soveltuvuus kaikenlaisiin käyttökohteisiin välittömästi tai välillisesti. Tulevaisuudessa uusiutuvien ja kestävien energialähteiden hyödyntäminen tulee olemaan yhä merkittävämmässä roolissa energiajärjestelmissä. [14] Uusiutuvaa energiaa ovat esimerkiksi tuuli-, aurinko-, bio-, vuorovesi- ja aaltoenergia [15]. Vuonna 2016 Suomessa sähkön kokonaistuotannosta uusiutuvilla energialähteillä tuotettiin 29,6 TWh, joka oli noin 45 prosenttia koko tuotantomäärästä [8]. Uusiutuvilla energialähteillä tuotetusta energiasta yli puolet tuotettiin vesivoimalla, kymmenesosa tuulivoimalla ja lähes koko loppuosa puuperäisillä polttoaineilla. Suomessa Aurinkosähkön osuus on vielä hyvin vähäinen. Kuvassa 4 näkyy uusiutuvien energialähteiden osuudet ja niiden kasvanut määrä viime vuosina.



**Kuva 4.** Sähkön tuotanto uusiutuvilla energialähteillä [8].

Vesivoiman osuus Suomessa tuotetusta uusiutuvasta energiasta on suuri, sillä Suomessa vesistökapasiteettia on runsaasti käytettävissä. Vesivoimalan sijoituspaikka sijaitsee usein koskien ja jokien varrella, jossa veden liike-energia saadaan hyödynnettyä tehokkaasti. Vesivoima soveltuu hyvin säätövoimaksi ja Suomessa sitä hyödynnetäänkin paljon tähän tarkoitukseen. Voimaloiden tuottama teho vaihtelee suuresti vesitilanteen mukaan. Siksi vesivoiman yhteydessä olevilla varastoaltailla saavutettava sähköntuotannon säätö- ja varastointimahdollisuus lisää vesivoiman arvoa. Erityisesti tuulivoiman käyttöönoton kannalta säädettävän energian lisävarastointikapasiteetti olisi tarpeen. Tuulivoima vaatii rinnalleen säätö- ja varatehokapasiteettia, sillä tuuliolosuhteiden voimkaan vaihtelun takia myös tuulivoimalla tuotetun sähkötehon vaihtelu on suurta. Tuuli-

olosuhteiden perusteella parhaat edellytykset tuulivoiman tuotannolle ovat Suomen merialueella, rannikolla ja saaristossa. Myös aurinkoenergian avulla tuotettu sähköteho vaihtelee voimakkaasti sääolosuhteiden mukaan. Energian varastointi olisi hyödyllistä aurinkovoimajärjestelmissä, sillä päivällä tuotetun energian varastoinnilla voitaisiin tasoittaa pimeän vuorokaudenajan energiankulutusta.

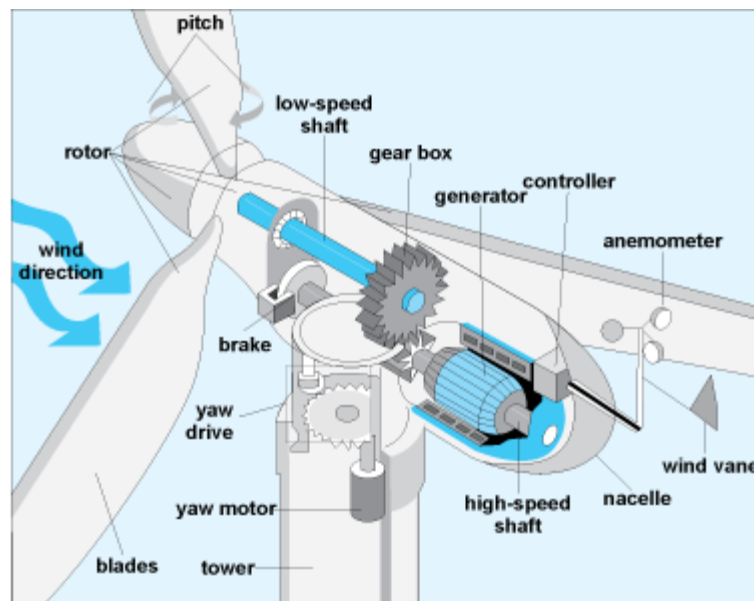
Uusiutuvaa energiaa pyritään lisäämään sähköverkkoihin yhä enemmän. Esimerkiksi tuuli- ja aurinkovoiman avulla voidaan hillitä fossiilisia polttoaineita hyödyntävää energiantuotantoa. Uusiutuvan energian kasvava määrä sähköverkoissa aiheuttaa kuitenkin säätöteknisen haasteen verkkojen suunnittelijoille ja ylläpitäjille. Säätövoiman tuottaminen on useiden sähköverkkojen haaste ja uusiutuvan energian lisääminen sähköverkkoon aiheuttaa yhä enemmän säädön tarvetta. Usein uusiutuvat energianlähteet vaativat rinnalleen lähes samansuuruisen määrän säätövoimaa, sillä järjestelmän toimintavarmuus on turvattava myös silloin, kun uusiutuvalla energialla ei voida tuottaa sähkötehoa. Uusiutuvaa energiaa pyritään lisäämään sähköverkkoon myös siksi, että perusvoimantuottoa ja tätä kautta ympäristön kuormitusta voitaisiin vähentää. Suurissa järjestelmissä perusvoimaa ei voida kuitenkaan täysin korvata uusiutuvilla energianlähteillä näiden voimakkaan tehonvaihtelun vuoksi. Ongelmia voi seurata myös silloin, kun olosuhteet uusiutuvan energian tuotannolle ovat otolliset ja kulutus järjestelmässä on matalaa. Tällöin uusiutuvan energian ja perusvoimantuotannon summa voi ylittää kokonaiskulutuksen. Tällöin perusvoimaa voitaisiin joutua ajamaan hetkellisesti alas, jotta tuotanto saataisiin vastaamaan kulutusta. Tämä on usein kallista ja samalla myös tilanne, jota halutaan välttää. Jotta perusvoimaa ei tarvitsisi ajaa alas, voidaan kulutusta ohjata esimerkiksi sähkön hintaa laskemalla. Riskit tulee ottaa huomioon verkkoa suunniteltaessa. Tulevaisuudessa esimerkiksi aurinko- ja tuulivoimaa tullaan hyödyntämään yhä enemmän energiantuotantorakenteen uudistuessa sekä energiaverkkojen kehitys- ja tutkimustyön edetessä.

### **2.3 Tuuli- ja aurinkoenergian toimintaperiaatteet**

Tuuli- ja aurinkoenergia ovat uusiutuvia energialähteitä, jotka ovat yleistymässä energijärjestelmissä. Tämä on tärkeää erityisesti kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisessa. Tuuli- ja aurinkoenergian osuudet kokonaisenergiantuotannossa ovat kuitenkin vielä pieniä [7]. Tuuli- ja aurinkoenergia ovat peräisin auringosta. Auringon maahan säteilemä teho on noin 170 000 TW [16] mutta siitä vain hyvin pieni osa saadaan vielä hyödynnettyä eri energiantuotantomuotojen avulla.

### 2.3.1 Tuulivoima

Auringon lämmittäessä maanpintaa syntyy ilmanpaine-eroja, jotka pyrkivät tasaantumaan tuulen avulla. Tuulivoima perustuu tuulen liike-energian hyödyntämiseen. Tuuliturbiini muuntaa tuulen liike-energian sähköenergiaksi pyörivien lapojen, akselin ja sähkögeneraattorin avulla. Tuuli pyörittää turbiinin lapoja, jotka saavat aikaan pyörimisliikkeen akselissa, joka on liitetty joko suoraan tai vaihteiston avulla generaattoriin. Generaattori muuntaa akselin pyörimisliikkeen magneetikenttien avulla sähköenergiaksi. Kuvassa 5 on esitetty tuuliturbiinin keskeisimmät komponentit, kuten roottori ja sen siivet, akseli, vaihteisto sekä generaattori.



*Kuva 5. Tuuliturbiini [17].*

Tuulen sisältämä kineettinen energia  $E_k$  saadaan kaavalla

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2, \quad (1)$$

jossa  $v$  on tuulen nopeus. Massavirta  $\dot{m}$  turbiinin läpi voidaan määrittää tuulen nopeuden ja ilmatiheyden  $\rho$  avulla

$$\dot{m} = \rho Av. \quad (2)$$

Tuuli siirtää energiaa turbiiniin teholla  $P_{tuuli}$ . Tuulen teho saadaan yhdistämällä kaavat (1) ja (2)

$$P_{tuuli} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (3)$$

Tämä on teho, jolla tuuli virtaa turbiinin lävitse [14]. Tuuliturbiini ei kuitenkaan kykene hyödyntämään kuin osan tuulen sisältämästä energiasta. Turbiinin teho riippuu monista seikoista, kuten roottorin lapojen pyyhkäisyypinta-alasta  $A$  sekä tuulen nopeuden muutoksesta turbiinin läpimenon aikana. Kapasiteettikerroin  $c_p$  kuvaa osuutta tuulen energiasta, joka siirtyy turbiiniin. Todellinen tehokerroin riippuu kuitenkin myös turbiinin lapakulmasta  $\beta$  sekä kärkinopeussuhteesta  $\lambda$ . Kärkinopeussuhde saadaan jakamalla roottorin kulmanopeuden  $\omega$  ja säteen  $r$  tulo tuulen nopeudella  $v$

$$\lambda = \frac{\omega r}{v}. \quad (4)$$

Tällöin todelliseksi turbiinin tehoksi  $P_{turbiini}$  saadaan

$$P_{turbiini} = c_p(\lambda, \beta) \frac{1}{2} \rho A v^3. \quad (5)$$

Tämä on turbiinin tehon yleinen muoto. Saksalainen fyysikko Albert Betz kehitti *Betzin lakina* tunnetun teoreettisen ylärajan kapasiteettikertoimelle, joka on noin 59,3 % [17]. Tämä on siis teoreettinen maksimiarvo turbiinin hyötysuhteelle, jolla tuulen liike-energia saadaan muutettua sähköksi. Todellisuudessa turbiinien hyötysuhteet ovat pienempiä. 100 %:n hyötysuhde tarkoittaisi ilmapinnan pysähtymistä turbiinin läpimenon aikana, mikä itsessään estäisi ilmavirtauksen. Turbiinit pyörivät parhaiten niille suunnitelluilla tuulennopeusalueilla. Liian alhaisella tai suurella tuulen nopeudella tuulivoiman hyödyntäminen ei ole mahdollista. On todettu, että paras hyötysuhde turbiinista saadaan silloin, kun turbiiniin siirtyy noin 1/3 tuulen sisältämästä liike-energiasta. [15]

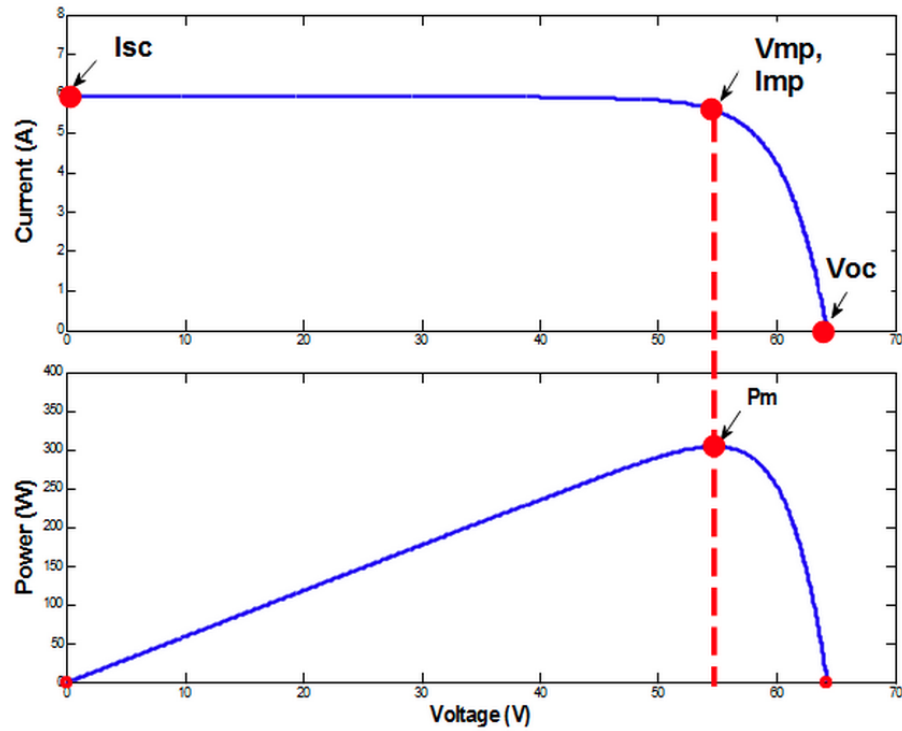
### 2.3.2 Aurinkoenergia

Aurinkoenergiasovellukset jaetaan yleensä lämpöä ja sähköä tuottaviksi. Lämmönkeräimien tarkoitus on kerätä talteen auringon lämpöenergiaa sitomalla sitä esimerkiksi järjestelmässä kiertävään nesteeseen. Sähköä tuotetaan pääasiassa PV-kennoilla, jotka muuntavat niihin osuvan valon sähköenergiaksi. Kennojen toiminta perustuu valosähköiseen ilmiöön, jossa materiaaliin osuva foton absorboituu tämän pintaan samalla irrottaen siitä elektronin. Tämä saa aikaan tasajännitteen kennon napojen välille. Materiaalina kennoissa käytetään usein kiderakenteista piitä [18].



**Kuva 6.** Aurinkopaneeleita [19].

Useista PV-kennoista koostuvaa levyä kutsutaan aurinkopaneeliksi. Kuvassa 6 näkyy PV-kennoista koostuvia aurinkopaneeleita. Aurinkokennon tuottamaan tehoon vaikuttaa saadun jännitteen ja virran tulo sekä kennon valmistusmateriaalit. Tasavirta ei vaihtele itsessään voimakkaasti valon intensiteetin muuttuessa vaan se pysyy lähes vakiona niin kauan kuin kenno on valaistuna. Jännite puolestaan on suoraan verrannollinen valon säteilyintensiteettiin. Sääolosuhteet aiheuttavat kuitenkin paikoitellen reilusti vaihtelua valaistukseen ja tätä kautta kennojen tuottamaan tehoon. Materiaalivalinnoilla voidaan myös pyrkiä parantamaan kennojen hyötysuhdetta. Valitsemalla materiaaleja, jotka eivät heijasta valoa voimakkaasti pois päin tai absorboi fotoneita kennon pintakerrokseen, voidaan vaikuttaa saatuun sähkötehoon [15]. Aurinkoenergia on monikäyttöinen energialähde sen heikkouksista huolimatta. Sitä hyödynnetään tilanteissa, jossa muut energialähteet eivät ole kannattavia tai mahdollisia. Esimerkiksi asumukset kaukana muusta sähköverkosta sekä itsenäiset laitteet, kuten avaruussatelliitit, ovat potentiaalisia aurinkoenergian hyödyntäjiä. Erityisen hyvin aurinkosähkö soveltuu energialähteenä maihin, joissa aurinko paistaa tasaisesti ympäri vuoden. Aurinkokennon tuottama teho riippuu ensisijaisesti kennon pinta-alasta sekä säteilytehosta, joka kohdistuu kennon pintaan. Kuvassa 7 on esitetty virran (A) ja tehon (W) riippuvuus tuotetusta jännitteestä.



**Kuva 7.** PV-kennon virta ja teho jännitteen funktiona [20].

Kuvassa  $I_{sc}$  on oikosulkuvirta,  $V_{mp}$  jännite suurimmalla teholla,  $I_{mp}$  virta suurimmalla teholla,  $V_{oc}$  avoimen piirin jännite ja  $P_m$  suurin teho. Koska PV-kenno tuottaa tasavirtaa, sitä voidaan käyttää suoraan sellaisissa järjestelmissä, jotka eivät vaadi vaihtovirtaa toimiakseen. Jos aurinkoenergiaa halutaan tuottaa sähköverkkoon, on verkkoon liittämiseksi aurinkosähkögeneraattorin tuottama tasajännite vaihtosuunnattava invertterin eli vaihtosuuntaajan avulla.

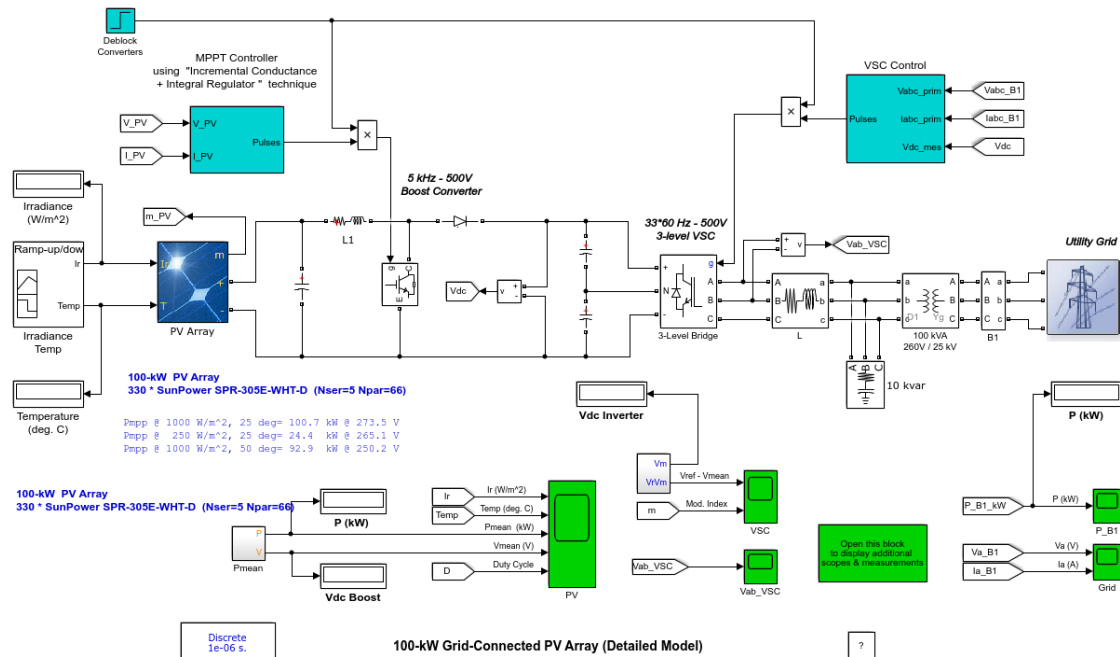


## 3. MALLINNUS JA SIMULOINTI

Tässä luvussa käsitellään järjestelmien mallinnusta ja simulointia sekä näiden mahdollisuuksia järjestelmien analysoinnissa, tutkimuksessa ja kehittämisessä. Mallien avulla voidaan tutkia ja ennustaa reaalimaailman ilmiöitä. Erilaisia malleja voidaan hyödyntää esimerkiksi liiketoiminnassa ja monilla tieteenaloilla.

### 3.1 Järjestelmien dynaaminen mallinnus

Sähköverkoja ja energiajärjestelmiä pystytään tutkimaan ja kehittämään tehokkaasti tietokonepohjaisen mallinnuksen ja simuloinnin avulla. Tämän ideana on luoda tutkimuksen kohteena olevaa systeemiä kuvaavia malleja virtuaaliympäristössä ja mallien avulla tarkasteltavaa järjestelmää voidaan analysoida monella eri tasolla sekä tutkia muutosten vaikutuksia. [2] Graafisen käyttöliittymän sisältävissä simulointiympäristössä mallit näkyvät visuaalisina elementteinä, kuten toimilohkomalleina. Nämä elementit sisältävät usein dataa, matemaattisia algoritmeja tai metodeja. Sisäänmenona toimilohkolle voidaan tuoda erilaista dataa, jonka lohko käsittelee ennalta määrättyllä tavalla. Datan käsittelyn jälkeen lohko antaa ulostulodataa. Sisäänmenoja ja ulostuloja voi olla yhdessä toimilohkossa useita. Esimerkkinä mallien graafisesta ulkoasusta on kuvassa 8 systeemi, joka on mallinnettu *Matlab*-ohjelmiston *Simulink*-ympäristössä. Mallinnettu systeemi kuvaa aurinkopaneelin sähköverkkoon liittämistä.



Kuva 8. Aurinkopaneelin verkkoon liittämisen [20].

Matlabin Simulinkin lisäksi on olemassa useita muita mallinnustyökaluja tietokoneympäristöön, kuten esimerkiksi *Modelica*, *Scilab* sekä *Apros*. Mallinnuksen avulla voidaan tutkia järjestelmän vahvuuksia ja heikkouksia tehokkaasti, sillä sen avulla pystytään käsittelemään suuria määriä dataa ja tietoa hetkessä. Kokonaisjärjestelmän tarkastelusta voidaan siirtyä helposti alemmille tasoille ja analysoida malleja entistä tehokkaammin. Mallinnus soveltuu erityisesti suurten ja monimutkaisten järjestelmien hahmottamiseen, sillä usein näiden järjestelmien toiminnassa esiintyy haasteita. [1] Tietokonepohjaisessa mallinnuksessa järjestelmän dynamiikka ja alijärjestelmien väliset vuorovaikutussuhteet ovat helposti havaittavissa. Erityisesti automaation suunnittelun kannalta mallinnus on tehokas työkalu, sillä säätöä suunniteltaessa mallinnuksen avulla voidaan esimerkiksi testata useita eri säätötapoja sekä tutkia säädetyn järjestelmän dynamiikkaa. Myös erilaisten energiantuotantomuotojen vertailu ja järjestelmän osakokonaisuuksien yhteensovittamisen tutkiminen ovat mallinnuksessa nopeaa ja tehokasta. Jotta järjestelmä saataisiin mahdollisimman hyvin mallinnettua, on laitteiston ja henkilöstön osaamisen oltava hyvällä tasolla.

Mallit voidaan luokitella lähestymistapaan perustuen seuraavasti [2]: *top-down*, *bottom-up* ja *hybrid*. Top-down-mallien avulla on pyritty kuvaamaan kokonaisjärjestelmä keskittymättä yksityiskohtiin. Tämä malli on käytössä usein taloudellisessa suunnittelussa ja erilaisten ennusteiden tekemisessä, kun halutaan hahmottaa järjestelmä kokonaisuudessaan ja tutkia sen toimintaa ylemmällä tasolla. Bottom-up-mallit ovat puolestaan yksityiskohtaisempia ja tarkempia kuvaamaan järjestelmän eri komponentteja. Näiden mallien avulla järjestelmän eri teknologioiden yhteensovittaminen ja ongelmien löytäminen on myös tehokkaampaa. Bottom-up-mallit soveltuvatkin tästä syystä enemmän tekniseen suunnitteluun. Hybridimallit ovat edellä mainittujen lähestymistapojen välimuotoja. Ne pyrkivät yhteensovittamaan molempia lähestymistapoja tasapuolisesti.

Tulevaisuudessa energiajärjestelmät tulevat olemaan entistä suurempia ja monimutkaisempia kokonaisuuksia vaatien yhä enemmän suunnittelu- ja laskentakapasiteettia. [20] Järjestelmiin on sidottu usein myös suuri määrä pääomaa ja sidosryhmiä, jolloin laitteiston toimintavarmuuden merkitys korostuu. Tulevaisuuden tutkimuskohteena tulee olemaan muun muassa sumean logiikan rooli mallinnuksessa ja entistä parempi ymmärrys energiajärjestelmien sisäisistä vuorovaikutussuhteista. [1] Päästöjä pyritään rajoittamaan korvaamalla fossiilisia polttoaineita uusiutuvien energianlähteiden lisäämisellä ja integroimisella systeemiin. Oikeanlaisilla menetelmillä ja systeemien saumattomalla toiminnalla voidaan energiatuotantjärjestelmiä optimoida järkevästi. Tässä tietokonepohjainen mallinnus on tehokas työkalu.

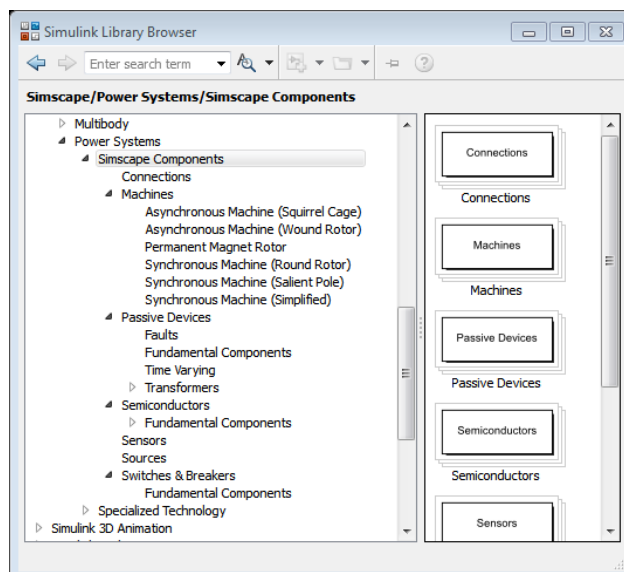
## 3.2 Simscape Power Systems

*Simscape Power Systems* on *Matlab*-ohjelmiston työkalu, jota voidaan hyödyntää sähkövoimajärjestelmien mallintamisessa ja simuloinnissa. Tässä luvussa esitetyt tiedot perustuvat *Matlab*-ohjelmiston dokumentaatioon [20]. Kappaleessa esitetyissä kuvissa esitetyt valikot sekä kirjastojen sisältämät mallit voivat vaihdella riippuen *Matlab*in versiosta sekä lisäosista, joita ohjelmaan on asennettu.

*Simscape Power Systems*in toimilohkoja käytetään *Matlab*in *Simulink*-nimisessä graafisessa simulointiympäristössä. Useat näistä toimilohkoista ovat alijärjestelmiä, jotka on rakennettu *Simulink*in perustoimilohkojen avulla. *Simscape Power Systems* sisältää kaksi luokkaa: *Simscape Components* sekä *Specialized Technology*. Näistä ensimmäinen sisältää perinteisempiä simuloinnissa hyödynnettäviä työkaluja ja toimilohkoja, joiden avulla voidaan rakentaa pohja mallinnettavalle systeemille. Jälkimmäinen näistä luokista sisältää mallin viimeistelyyn ja tarkempaan analysointiin tarkoitettuja toimilohkoja sekä algoritmeja.

### 3.2.1 Simscape Components

*Simscape Components* sisältää yksinkertaisia toimilohkoja, joita voidaan hyödyntää tehokkaasti erilaisten systeemien mallinnuksessa. Tämä sisältää kahdeksan osiota: *Connections*, *Machines*, *Passive Devices*, *Semiconductors*, *Sensors*, *Sources*, *Switches and Breakers* ja *Simulation and Analysis*. *Simulation and Analysis* -osio sisältää algoritmeja, joilla voidaan analysoida mallin ominaisuuksia ja toimintaa. Muut osiot sisältävät järjestelmän mallintamiseen tarkoitettuja toimilohkoja. Kuvassa 9 on esitelty näkymä *Simscape Components*in valikosta. Useiden otsakkeiden alta aukeaa lisää alavalikkoja tarvittaessa.

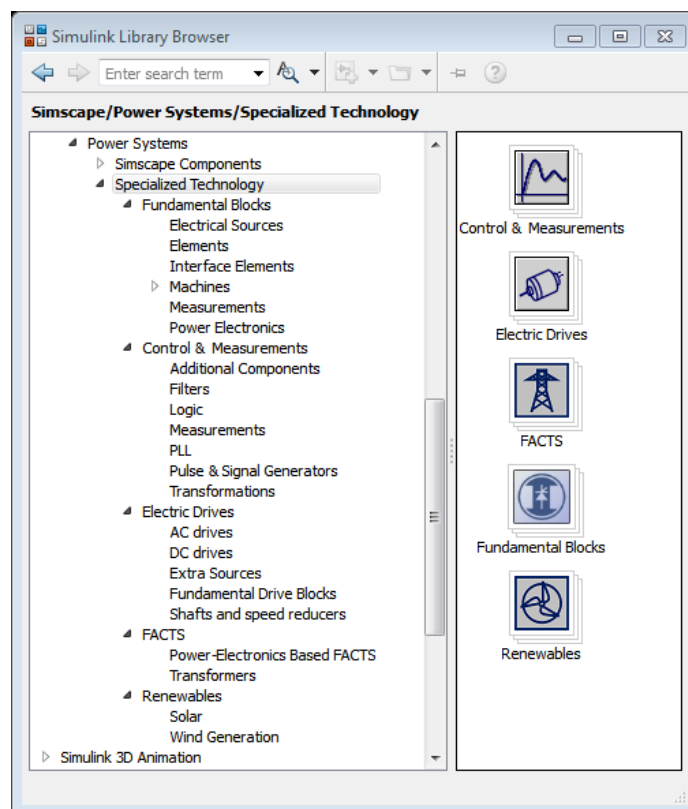


**Kuva 9.** *Simscape Components* *Simulink*in kirjastossa.

Connections-osio sisältää erilaisia signaalin vaiheen käsittelyyn tarkoitettuja lohkoja, kuten esimerkiksi multipleksereitä. Multiplekserin avulla voidaan valita useasta systeemiin sisääntulevasta signaalista yksi ja ohjata se ulostuloon. Machines-osio sisältää puolestaan moottoreita ja laiteominaisuuksia kuvaavia toimilohkoja. Laiteominaisuuksia kuvaavia lohkoja ovat esimerkiksi inertian ja mekaanisen tehon määrittämiseen tarvittavat lohkot. Passive Devices -osio kattaa muuntimia, vastuksia sekä RLC-piirin vastuksia, keloja ja kondensaattoreita. Semiconductors-osio sisältää puolijohdekomponentteja, kuten tasa- ja vaihtovirran muuntimia, diodeja ja tyrystoreita. Sensors ja Sources -osiot sisältävät erilaisia mittareita ja virtalähteitä. Kytkimet ja katkaisimet sisältyvät Switches and Breakers -osioon.

### 3.2.2 Specialized Technology

*Specialized Technology* -luokka on piirteiltään hyvin samankaltainen kuin *Simscape Components*, mutta tämän luokan toimilohkojen ja algoritmien avulla pyritään simuloitavan mallin tarkempaan analysointiin ja kehittämiseen. Specialized Technology sisältää yhdeksän osiota: *Electrical Sources and Elements*, *Motors and Generators*, *Power Electronics*, *Sensors and Measurements*, *Control and Signal Generation*, *Electric Drives*, *FACTS and Renewable Energy Systems*, *Interface to Simscape* ja *Simulation and Analysis*. Näistä Simulation and Analysis -osio sisältää simulointiin ja analysointiin erikoistuneita algoritmeja. Kuvassa 10 on esitelty valikkonäkymä Simscape Power Systemsin Specialized Technology -osiosta ja siihen kuuluvista alavalikoista.



**Kuva 10.** *Specialized Technology* Simulinkin kirjastossa.

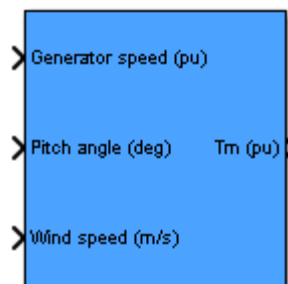
Electrical Sources and Elements -osioon kuuluu laaja valikoima virtapiirin peruskomponentteja: tasa- ja vaihtovirtalähteitä, katkaisimia, muuntimia, käämejä, kondensaattoreita, vastuksia sekä johtimia. Motors and Generators -osioon kuuluvat puolestaan moottoreiden ja generaattoreiden mallintamiseen tarvittavat toimilohkot. Power Electronics ja Sensors and Measurements -osiot vastaavat hyvin paljon Simscape Components -luokan osioita. Kuitenkin Specialized Technology -luokassa nämä kyseiset osiot ovat hyvin kattavia ja siten toimilohkot ovatkin molemmissa osioissa hyvin yksilöllisiä. Control and Signal Generation -osiossa toimilohkot pystyvät kehittämään erityyppisiä signaaleja sekä osa lohkoista kykenee käsittelemään ja ohjaamaan niitä. Electric Drives -osio kattaa erilaisia sähkökäyttöjärjestelmiä sekä niiden komponentteja. Sähkökäyttöjärjestelmissä sähkömoottoreita tai -generaattoreita ohjataan tehoelektronikkalaitteiden kuten esimerkiksi vaihtosuuntaajien avulla. FACTS and Renewable Energy Systems -osio koostuu kahdesta alaosiosta: *Power Electronics FACTS* ja *Renewable Energy Systems*. *FACTS (Flexible AC Transmission Systems)* -alaosio sisältää erinäisiä kolmivaihejärjestelmiin soveltuvia työkaluja. *Renewable Energy Systems* -alaosio sisältää puolestaan valosähköisen kennon toimilohkon, tuuliturbiinilohkon sekä tuuliturbiini-generaattori -kokonaisuudet. Specialized Technology -luokan viimeinen osio on Interface to Simscape, jonka lohkojen avulla Simscapen avulla luotu Simulink-malli voidaan liittää todellisiin järjestelmiin.

## 4. TUULI- JA AURINKOENERGIAMALLIT

Tässä luvussa käsitellään tuuliturbiinin ja PV-kennon Simscape-toimilohkomalleja [20]. Matlabin Simscapesta löytyvät mallit sekä tuuliturbiinille, generaattorille sekä PV-kennolle. Tässä luvussa kerrotaan mihin niiden toiminta perustuu sekä millaisia parametreja malleille voidaan antaa.

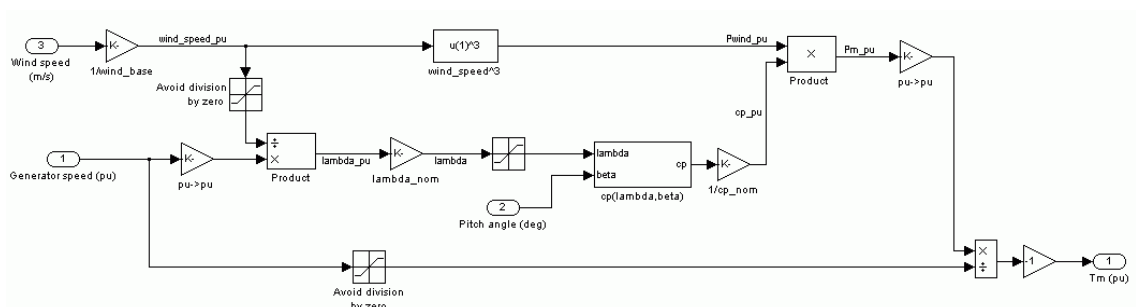
### 4.1 Tuuliturbiini ja generaattori

Matlabin Simscape Power Systemsissä löytyvät tuuliturbiinimalli sekä turbiinin ja generaattorin yhdistetty toimilohkomalli. Nämä löytyvät Simulinkin kirjastossa Renewables-otsikon alta nimellä *Wind Turbine* ja *Wind Turbine Induction Generator (phasor type)*. Tuuliturbiinin toimilohkomalli on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Tuuliturbiinin toimilohkomalli.

Lohkolla on kolme sisäänmenoa: generaattorin pyörimisnopeus ( $pu$ ), turbiinin lapojen lapakulma ( $deg$ ) sekä tuulen nopeus ( $m/s$ ). Ulostulona saadaan vääntömomentti ( $pu$ ). Kyseinen malli voidaan myös kuvata alisysteeminä, joka on esitetty kuvassa 12. Alisysteemi koostuu Simulinkin perusoperaatioista, kuten yhteen-, kerto- ja jakolasku -operaatioista.



Kuva 12. Tuuliturbiini-toimilohkon alisysteemi.

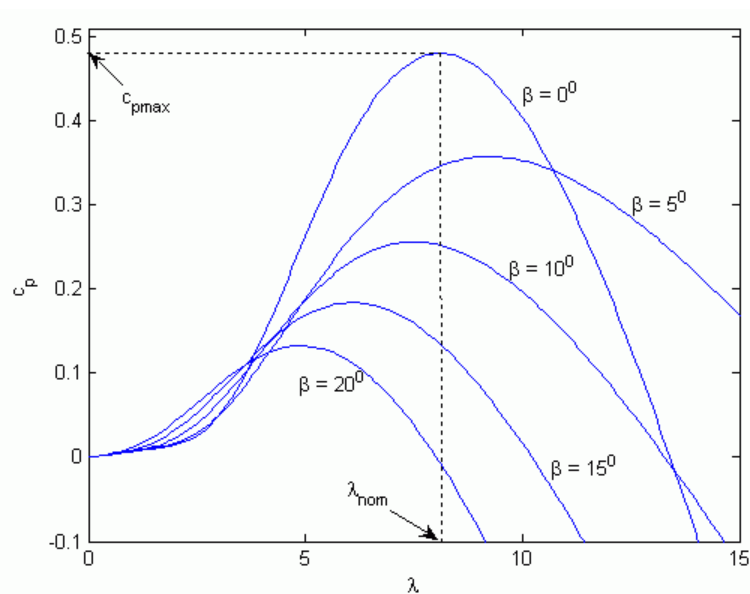
Simscape Power Systemsin malli tuuliturbiinille perustuu *Siegfried Heierin* kirjan *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems* malliin [20], jonka kapasiteettikertoimen laskemiseen pätee yhtälö

$$c_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( c_2 \frac{1}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-c_5 \frac{1}{\lambda_i}} + c_6 \lambda, \quad (6)$$

missä  $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ,  $c_6 = 0.0068$ ,  $\lambda = 8,1$  ja

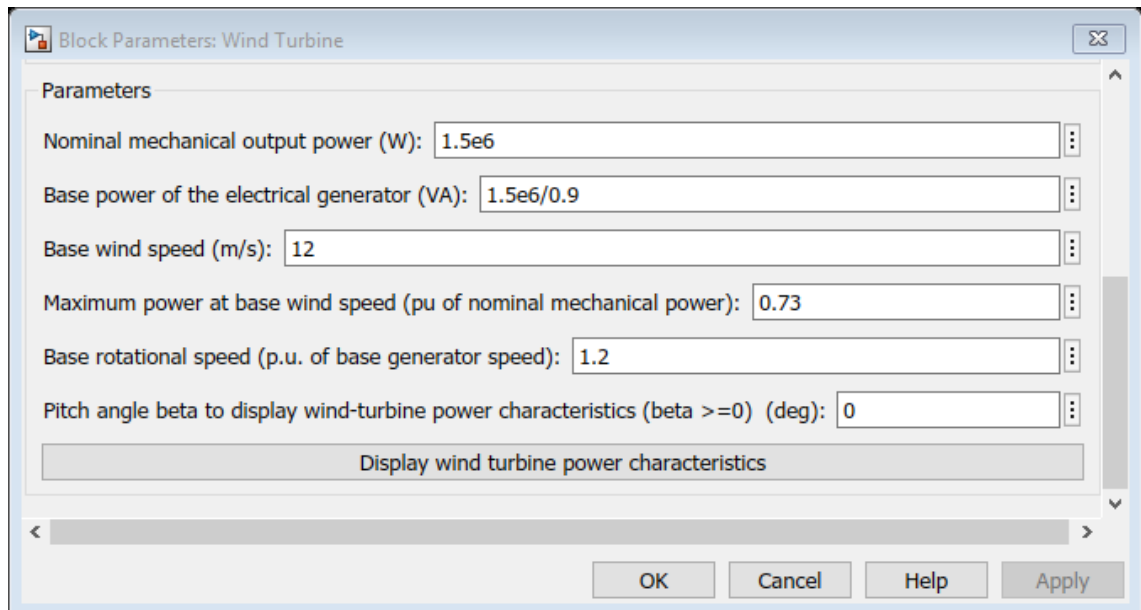
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda_{nom} + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}. \quad (7)$$

$\lambda_{nom}$  kuvaa nimelliskärkinopeussuhdetta eli kärkinopeussuhdetta silloin, kun lapakulma on nolla astetta. Lapakulman avulla voidaan säädellä roottorin pyörimisnopeutta ja siten vaikuttaa turbiinin tuottamaan tehoon. Kuva 13 esittää lapakulmien vaikutuksen kapasiteettikertoimeen ja kärkinopeussuhteeseen.



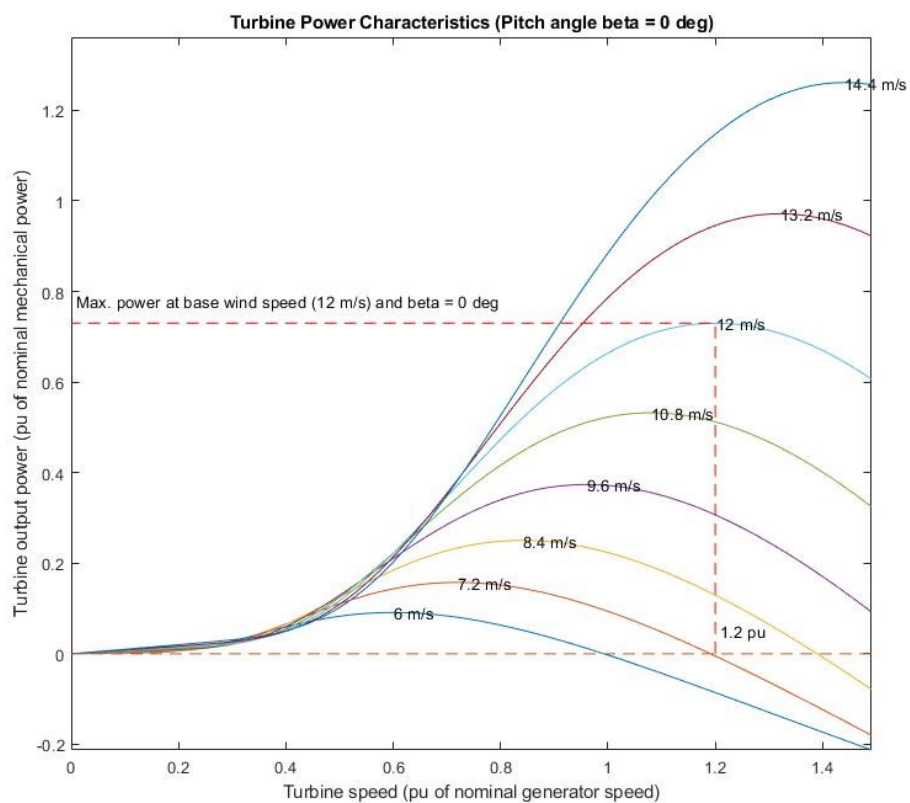
**Kuva 13.** Lapakulmien vaikutus kapasiteettikertoimeen ja kärkinopeussuhteeseen.

Kun malli otetaan käyttöön, sillä on oletusparametrit, joita käyttäjä pystyy muokkaamaan tarvittaessa. Kuvassa 14 on esitetty turbiinin parametrivalikko, jossa näkyvät tuuliturbiinimallin oletusparametrit.



**Kuva 14.** Turbiinimallin parametrivalikko.

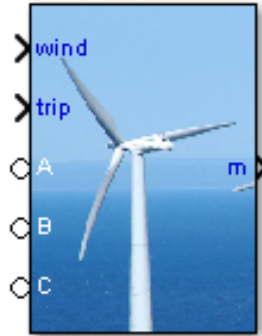
Parametrivalikossa voidaan asettaa turbiinin perusarvot esimerkiksi tuulen nopeudelle ja turbiinin nimellisteholle. Lisäksi mallissa on mahdollisuus luoda kuvaaja, josta voidaan nähdä turbiinin tuottama teho tietyllä lapakulmalla eri tuulen nopeuksilla. Kuvassa 15 on esitetty turbiinin tuottama teho eri tuulen nopeuksilla käytettäessä oletusparametreja ja lapakulmaa nolla.



**Kuva 15.** Turbiinin tuottama teho eri tuulen nopeuksilla.



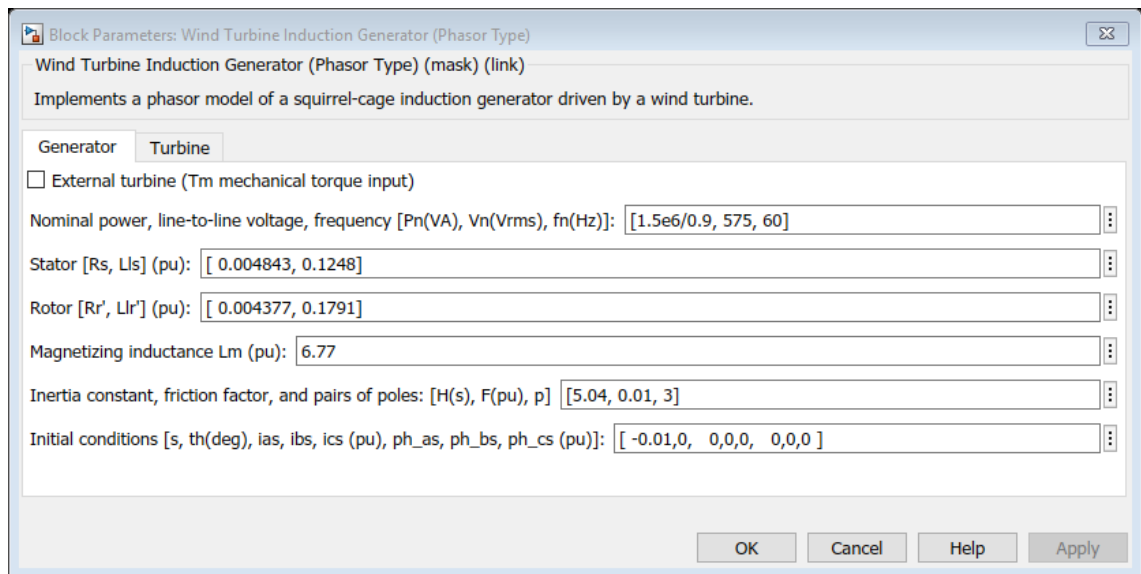
Jotta turbiinin tuottama energia saadaan muutettua sähköenergiaksi, tarvitaan turbiinin lisäksi myös sähkögeneraattori. Simscape Power Systemsin malli tuuliturbiinille ja generaattorille on esitetty kuvassa 16. Se sisältää turbiiniosan sekä induktioon perustuvan generaattorin.



**Kuva 16.** Tuuliturbiinin ja generaattorin yhdistetty malli.

Mallin sisäänmenoja ovat tuulen nopeus sekä *trip*-signaali, jolla on kaksi arvoa: 0 tai 1. Trip-signaali toimii turvamekanismina turbiinille. Sen tehtävä on estää mahdolliset viikaantumiset ja katkaista turbiinin toiminta esimerkiksi vikavirtatilanteessa. Ulostulo turbiinissa on *m*-vektori, joka sisältää kahdeksan parametria systeemin toiminnasta. Nämä ovat kolmivaihevirta ja -jännite, systeemin tuottama teho, loisteho, roottorin pyörimisnopeus ja vääntömomentti, vääntömomentti generaattorissa sekä turbiinin lapakulma. Vektorin avulla voidaan turbiinin tilasta antaa tietoja muille järjestelmän osille sekä tarkkailla turbiinin toimintaa. Generaattori tuottaa verkkoon kolmivaihevirtaa. Mallissa on siten A, B ja C terminaalit, joiden avulla tämä voidaan liittää muihin kolmivaihejärjestelmiin. Toisin kuin pelkässä tuuliturbiinimallissa, tämä malli ei sisällä sisäänmenoinaan roottorin lapakulmaa tai generaattorin pyörimisnopeutta, sillä turbiinimalli on yhdistetyssä mallissa sisäänrakennettuna yhdessä generaattorin kanssa. Mallissa turbiinin lapakulma on säädetty PI-säätimellä.

Turbiini-generaattorin parametrivalikossa on välilehdet sekä turbiinille että generaattorille. Turbiinivälilehti vastaa kuvassa 14 esiteltyä parametrivalikkoa. Generaattorille parametrit voidaan asettaa kuvassa 17 esitetyn välilehden avulla. Valikossa näkyvät oletusparametrit generaattorille.

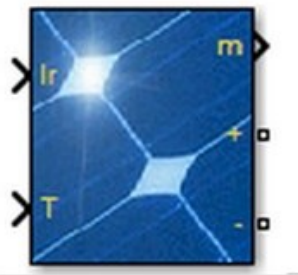


**Kuva 17.** Generaattorin parametrivalikko.

Parametrivalikossa voidaan antaa lähtöarvoja sekä määrittää generaattorin teknisiä ominaisuuksia, kuten generaattorin nimellisteho, pääjännite sekä vaihtovirran taajuus. Lisäksi voidaan määrittää staattorin ja roottorin ominaisuuksia sekä antaa inertia- ja kitkakertoimet.

## 4.2 PV-kenno

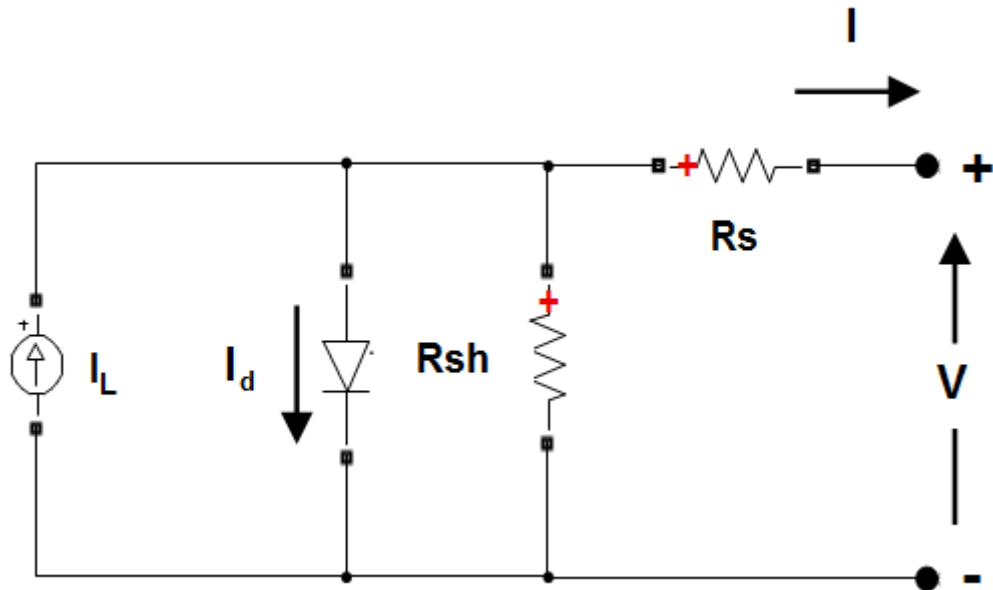
Simscape Power Systemsin PV-kennon toimilohkomalli sijaitsee Simulinkin kirjastossa Renewables-otsikon alla nimellä *PV-array*. Toimilohkomalli PV-kennolle on esitetty kuvassa 18.



**Kuva 18.** PV-kennon toimilohkomalli.

Tässä mallissa on kaksi sisäänmenoa, jotka ovat auringon säteilyteho pinta-alaa kohden ( $W/m^2$ ) sekä kennon lämpötila ( $^{\circ}C$ ). Lohkon ulostulona on vektori  $m$ , joka sisältää viisi parametria: kennon tuottama virta ( $A$ ), jännite ( $V$ ), diodivirta ( $A$ ), säteilyvoimakkuus ( $W/m^2$ ) sekä lämpötila ( $^{\circ}C$ ). Vektorin sisältämiä tietoja pystytään lukemaan hyödyntämällä *Bus Selector* -toimilohkoa. Kennon + ja -navat ovat myös merkitty malliin. Näiden avulla voidaan liittää useita kennoja toisiinsa.

Kuvassa 19 on esitetty virtapiiri, johon mallin toiminta perustuu. Kuvan virtapiiriin on merkitty valosähköisen ilmiön synnyttämä virta  $I_L$ , diodivirta  $I_d$ , rinnankytketty vastus  $R_{sh}$ , sarjaan kytketty vastus  $R_s$  ja kennon tuottama virta  $I$ .



Kuva 19. PV-kennon virtapiiri.

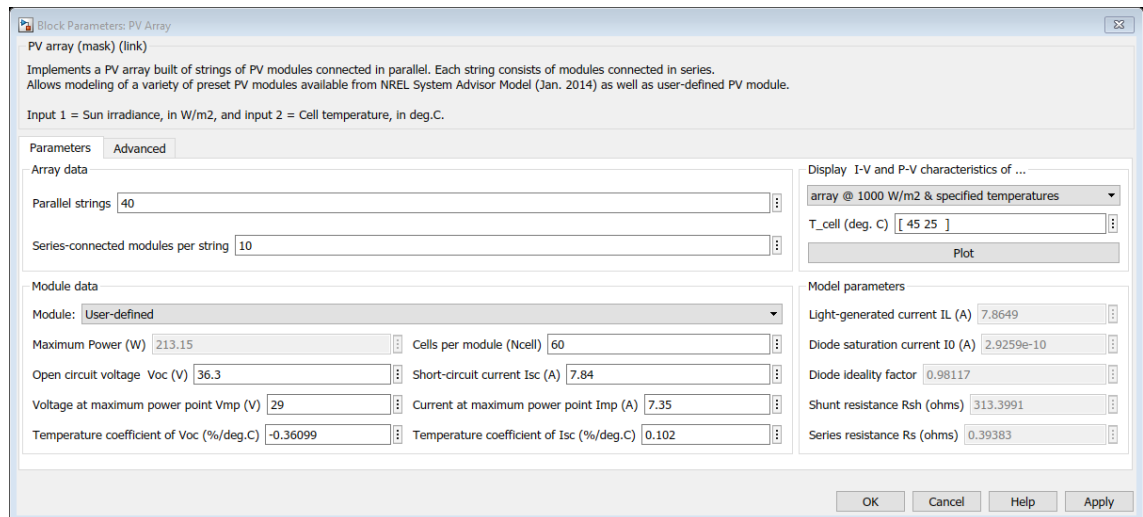
Toimilohkon ominaisuuksista pystytään valitsemaan useista eri vaihtoehdoista aurinkokennon tyyppi, sarjaankytkettyjen kennojen lukumäärä sekä sarjojen lukumäärä paneelissa. Tässä mallissa tietyssä lämpötilassa tuotettu jännite  $V_T$  saadaan

$$V_T = \frac{kT}{q} * nI * n_{cell}, \quad (8)$$

jossa  $k$  on Boltzmanin vakio ( $1.3807 \times 10^{-23}$  J / K),  $T$  lämpötila,  $q$  alkeisvaraus ( $1,6021773 \times 10^{-19}$  C),  $nI$  diodin hyötysuhde,  $N_{cell}$  moduulissa sarjaankytkettyjen kennojen lukumäärä. Diodivirta  $I_d$  puolestaan lasketaan kaavalla

$$I_d = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right], \quad (9)$$

jossa  $I_0$  on diodin kyllästysvirta ja  $V_d$  diodin jännite.



**Kuva 20.** PV-kennon parametrivalikko.

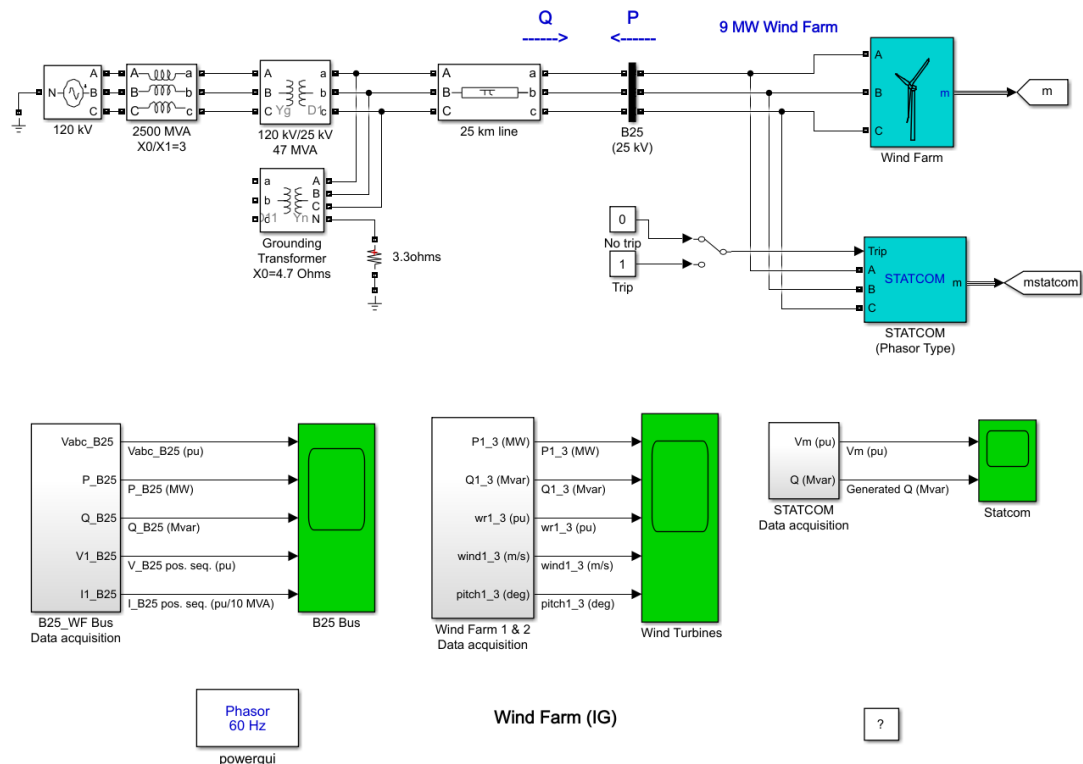
Mallille täytyy asettaa parametrit ennen simulointia. Parametrointi voidaan suorittaa kuvassa 20 esitetyn valikon avulla. Valikossa voidaan määrittää sarjaankytkettyjen moduulien lukumäärä sekä rinnankytkettyjen moduulisarjojen lukumäärä. Moduulin parametrien määrittämisessä voidaan käyttää jo olemassa olevien moduulien parametreja. Valmiita moduulimallien parametreja eri valmistajilta Matlabiin on kerätty satoja. Käyttäjä voi myös itse määrittää moduulin parametrit, kuten esimerkiksi kennojen lukumäärän moduulissa, moduulin maksimitehon, avoimen piirin jännitteen, maksimiteholla saatavan jännitteen ja virran, oikosulkuvirran sekä lämpötilakertoimet. Valikosta voidaan myös avata kuvaaja, josta voidaan lukea jännitteen, virran ja tehon välisiä suhteita käytetyillä parametreilla.

## 5. MALLINNUSESIMERKKEJÄ

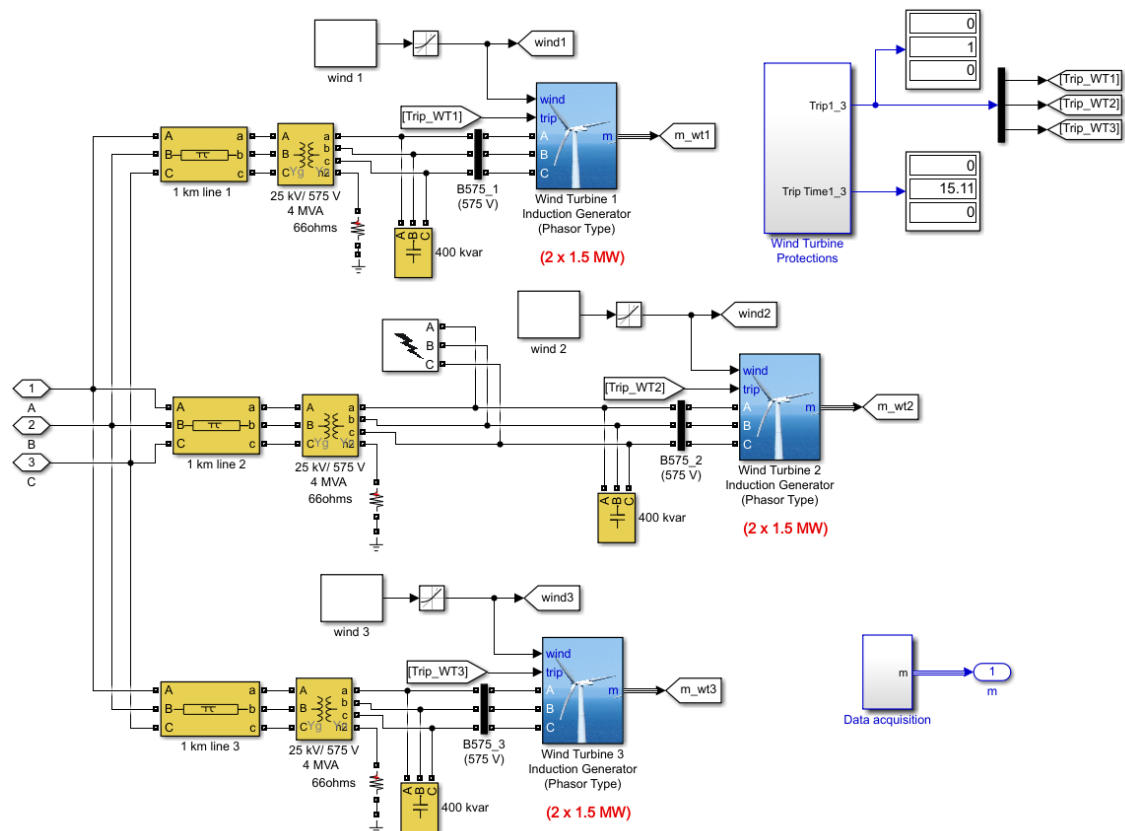
Tässä luvussa esiteltävät *Simulink*-mallit perustuvat *Matlab*-ohjelmiston malliesimerkkeihin. [20] Malleja voidaan soveltaa erilaisiin käyttötilanteisiin muokkaamalla toimilohkojen ja eri komponenttien parametreja. Lisäksi mallien osia voidaan poistaa tai lisätä haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi.

### 5.1 Tuulivoiman liittäminen verkkoon

Seuraavaksi esitellään simulointiesimerkki siitä, kuinka luvussa 4 mainitun tuuliturbiinimallin avulla voidaan simuloida sähköenergian tuottamista sähköverkkoon. Mallinnettu systeemi kuvaa tuulipuistoa, joka on liitetty sähköverkkoon. Tuulipuistomalliin kuuluu kuusi kappaletta 1,5 MW tuuliturbiini-generaattorimallia. Tällöin mallinnetun puiston nimellinen pätöteho  $P$  on 9 MW. Puiston tuottama sähköenergia saadaan kolmivaihevirtana, joka on vaiheistettu 60 Hz taajuuteen. Kolmivaihevirtaa tuottavan systeemin tunnistaa mallien A, B ja C terminaleista sekä sähköverkon kolmena rinnakkaisena linjana. Vaihtovirtapiireissä syntyvää loistehoa  $Q$  kompensoidaan *Simscapen FACTS*-osion *STATCOM*-kompensaattorilla sekä kondensaattoreilla lähellä turbiinia. Tuulipuisto on toteutettu kolmella *Simscapen* tuuliturbiini-generaattorimallilla, joista jokainen simuloi kahta 1.5 MW turbiinia. Turbiiniparien teho on 3 MW ja sisäänrakennettu PI-säädin ohjaa tehontuottoa säätämällä lapakulmia. Järjestelmän malli on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Tuulipuisto verkkoon liitettynä.



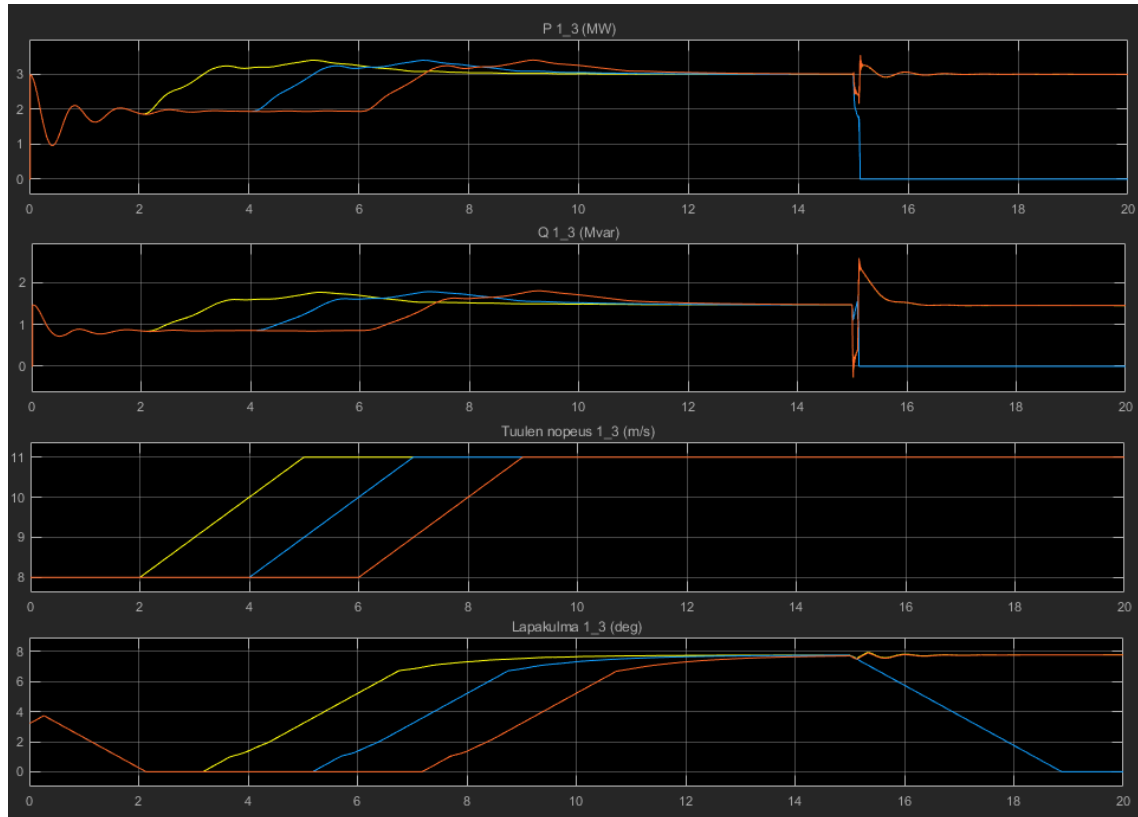
*Kuva 22. Tuulipuisto.*

Kuvassa 22 on esitetty tuulipuiston malli, joka on alisysteemi tuulipuistotoimilohkolle. Siitä nähdään tuulipuiston yksityiskohtainen rakenne, kuten loistehoa kompensoivat kondensaattorit maadoitukset sekä erilaiset muuntimet, siirtolinjat ja tuulen nopeuden sisäänmenot. Mallin rakenne on tehty mahdollisimman realistiseksi esimerkiksi ottamalla huomioon todellisen järjestelmän sähkötekniset vaatimukset sekä mallintamalla siirtolinjojen pituudet. Järjestelmän ominaisuuksia voidaan modifioida esimerkiksi muokkaamalla tuuliturbiinien parametreja, kuten maksimaalista tuulen nopeutta, nimellistuulennopeutta tai turbiinin tuottamaa nimellistehoa. Myös turbiineille menevää tuulidataa voidaan muokata erilaisia ympäristöolosuhteita vastaaviksi.

Kokonaisjärjestelmän mallin alareunassa sijaitsevien monitorien kautta pystytään tarkkailemaan järjestelmän käyttäytymistä. *B25 Bus* -monitorista voidaan esimerkiksi seurata tuulipuiston kokonaistehoa ja -jännitettä. *Wind Turbines* -monitorista voidaan puolestaan seurata esimerkiksi jokaisen turbiiniparin kokema tuulen nopeuden muutosta, turbiinien lapakulmien, sekä tuotettujen lois- ja pätötehojen generoitumista. Statcom-kompensaattorin toiminnalle on myös oma monitorinsa.

Simuloinnissa käytetään 20 sekunnin simulointiaikaa, jonka aikana jokaiselle turbiiniparille tehdään tuulennopeudenmuutos 8 m/s:sta 11 m/s:iin. Muutos toteutetaan ramppi-funktiona rampin keston ollessa 3 sekuntia. Tuulennopeudenmuutos alkaa turbiineilla ajanhetkillä  $t_{\text{turbiini1}} = 2$  s,  $t_{\text{turbiini2}} = 4$  s ja  $t_{\text{turbiini3}} = 6$  s. Kuvassa 23 nähdään, kuinka

turbiiniparien tehot reguloituvat 3 MW tehoon noin 8 sekunnin kuluessa tuulen nopeuksien muutoksista.

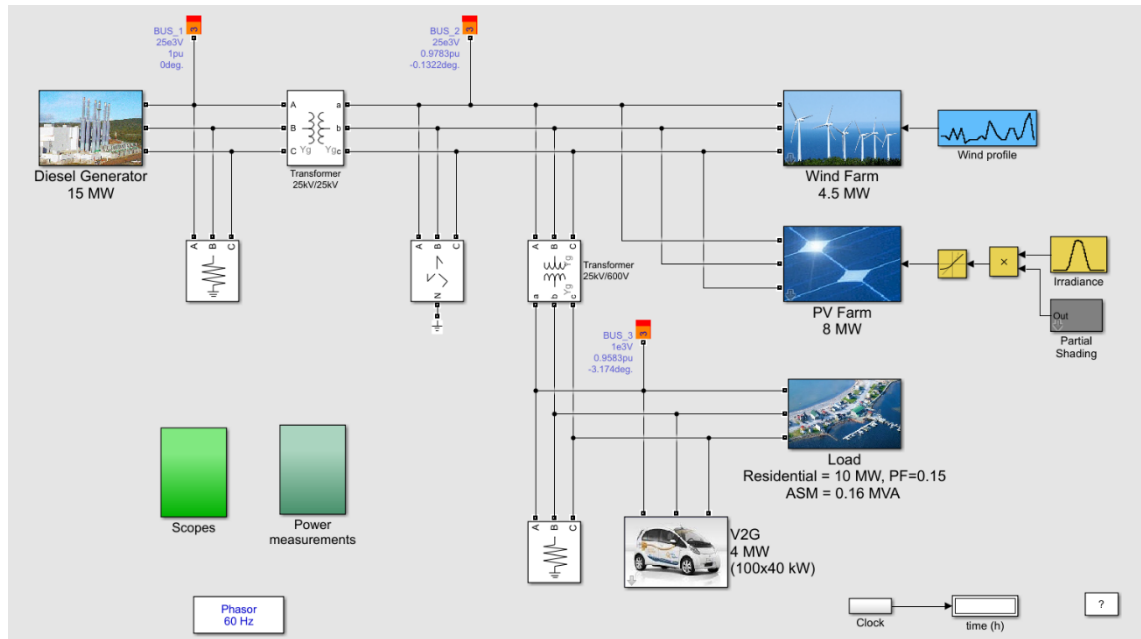


**Kuva 23.** Turbiiniparien vasteet tuulen nopeuden muutokseen.

Noin 15 sekunnin simulointiajanhetkellä huomataan, että 2-turbiiniparin tuottama teho putoaa nolnaan. Koska työssä haluttiin simuloida reaalimaailman ilmiötä, 2-turbiinipariin on luotu häiriö noin 15 sekunnin ajanhetkelle. Tässä tapauksessa häiriö on vikavirtahäiriö. Kuten luvussa 4. olevissa turbiinien malleissa todettiin, mallit sisältävät *trip*-sisäänmenon, jonka tarkoitus on toimia varokatkaisijana vikatilanteessa. Tuulipuistomalliin on luotu tarkkailumekanismi, joka tarkkailee mahdollisia vikaantumisia. Turbiinin vikaantuessa varomekanismi katkaisee trip-signaalin avulla turbiinin toiminnan. Häiriön seurauksena katkaisin toimii ja näin turbiiniparin teho putoaa 0.1 sekunnin aikana nolnaan.

## 5.2 Dynaaminen sähköverkko

Tässä luvussa esitellään malli sähköverkolle, johon on liitetty perusvoimaa sekä tuuli- ja aurinkovoimaa. Sähkön kuluttajia ovat verkkoon liitetyt pieni asuinalue sekä sähköautoverkko. Asuinalue kuvaa noin tuhatta taloutta matalan energiankulutuksen vuodenaikana, kuten esimerkiksi kevät- tai syysaikana. Järjestelmän malli on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Dynaaminen sähköverkkomalli

Perusvoimaa järjestelmään tuottaa 15 MW:n diesel-generaattori. Sen tehtävä on toimia järjestelmän säätövoimana ja siten tasapainottaa järjestelmän kokonaisenergiantuotantoa vaihtelevan kulutuksen ja muun energiantuotannon mukaan. Kun olosuhteet uusiutuvan energian tuotannolle ovat otolliset ja kulutus verkossa on matalaa, diesel-generaattori ei välttämättä tarvitse tuottaa tehoa. Se myös kykenee vastaamaan kokonaissähköntuotannosta silloin, kun uusiutuvaa energiaa ei ole käytettävissä. Järjestelmässä toimiva sähköautoverkkomalli on nimeltään *V2G* (eng. Vehicle to Grid). *V2G*-toimilohkossa on sisäänrakennettuna verkonseuranta ja -ohjausjärjestelmä. Lohko ohjaa diesel-generaattorin tuottamaa sähkötehoa täydentämään järjestelmän energiantuotannon tämän kulutusta vastaavaksi. *V2G*-lohkon tehtävä on myös tasapainottaa järjestelmän energiantuotantoa ja -kulutusta sähköautojen akustojen avulla. Akuissa olevaa varausta voidaan hyödyntää nopeasti äkillisiin energiankulutuspiikkeihin.

Edellä mainittujen lohkojen lisäksi järjestelmässä on myös tuuli- ja aurinkoenergiaa. Yksinkertaistettu malli 4,5 MW:n tuulipuistosta tuottaa järjestelmään sähköä vaihtelevalla teholla riippuen tuuliolosuhteista. Liian matalalla tuulen nopeudella puisto ei

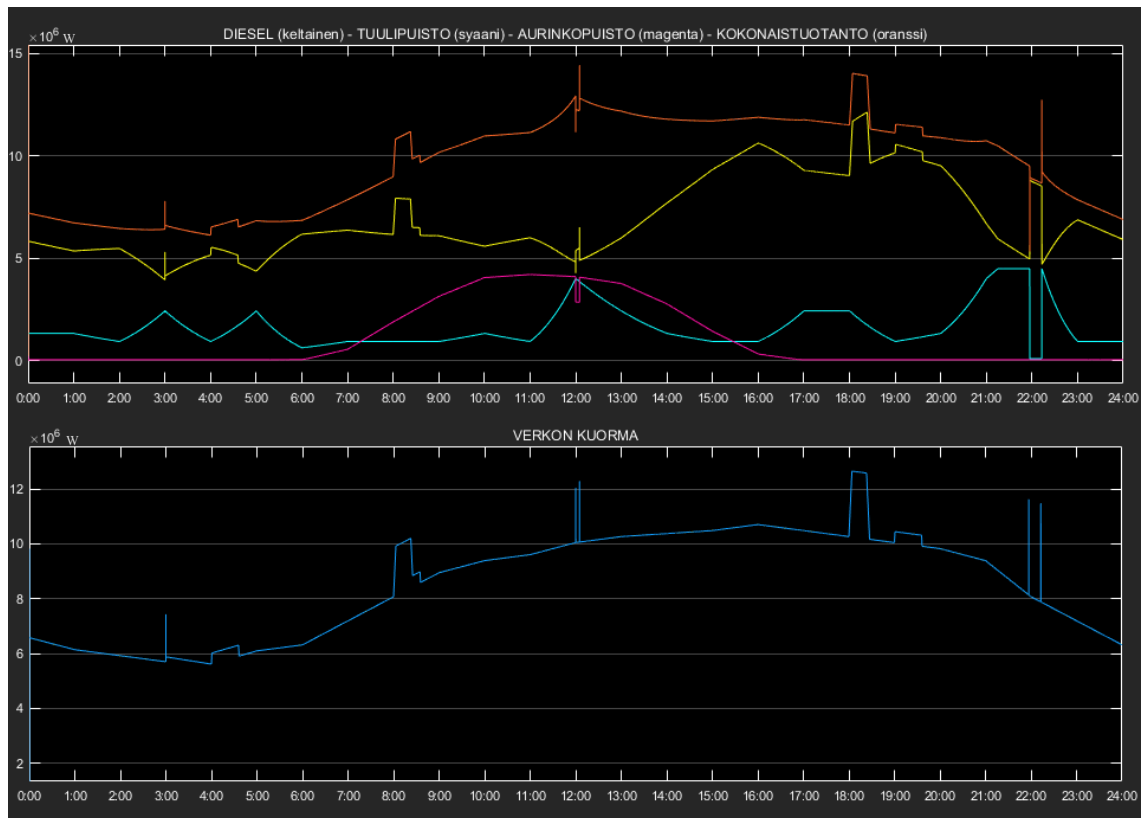


tuota sähköenergiaa sekä tuulen nopeuden kasvaessa liian suureksi, turbiinien suojamekanismit katkaisevat turbiinien toiminnan. Puisto saa sisäänmenonaan ennalta luotua tuulidataa, jota voidaan tarvittaessa modifioida erilaisten tuuliolosuhteiden luomiseksi. Tuulipuiston rinnalla toimii 8 MW:n aurinkopuisto. Puisto tuottaa vaihtelevalla teholla sähkövoimaa järjestelmään. Tuotettu teho riippuu kennojen pinta-alasta, hyötysuhteesta sekä kennojen pintaan kohdistuvan säteilyn intensiteetistä. Aurinkopuisto saa sisäänmenonaan ennalta luotua dataa valon intensiteetistä. Säteilystä pyrkii noudattamaan normaalia vuorokausirytmää. Datassa on otettu myös huomioon valaistusta heikentävät ajoittaiset paneelien varjostumiset, kuten pilvisuus.

Järjestelmässä energiankuluttajina toimii 100 kappaletta 40 kW:n sähköautoja sekä asuinalue, joka vastaa noin tuhannen asukkaan energiankulutusta. Tässä mallissa asuinalueen kulutukseksi on määritetty 10 MW. Asuinalueen kulutus seuraa ennalta luotua kulutusprofiilia. Kulutusprofiilin mukainen kulutus vaihtelee vuorokaudenajan mukaan. Kulutus on suurimmillaan illalla ja laskee yön yli kohti aamua. Asuinalueen mallin rinnalla toimii myös teollisuuden järjestelmiä jäljittelevä asynkroninen laite, jonka toiminta kuormittaa verkkoa ajoittain. Alueen rinnalla toimivat sähköautot vaativat vaihtelevasti lataustehoa riippuen akkujen varauksista ja latauksessa olevien autojen lukumäärästä. Mallissa autojen lukumäärän voi vaihtaa viidelle eri käyttöasteprofiilille. Jokainen profiili kuvaa erilaista auton käyttöastetta. Autojen lukumäärää eri profiileissa ja V2G-lohkon muita parametreja voidaan muokata mallin parametrivalikosta.

Jotta erilaisten ominaisuuksien testaaminen olisi nopeampaa, tässä mallissa tuuli- ja aurinkopuistomalleista on tehty kuvalliset maskit. Maskien etuna on se, ettei alijärjestelmän parametreja tarvitse asettaa erikseen vaan parametointi tapahtuu maskin oman parametrivalikon kautta. Tuulipuiston parametreja ovat nimellisteho ja -tuulennopeus sekä suurin sallittu tuulen nopeus. Aurinkopuiston parametreja ovat puiston hyötysuhde ja pinta-ala. Tarvittaessa jokaista mallia voidaan muokata yksityiskohtaisemmin avaamalla alijärjestelmät ja käsitellä kukin komponentti erikseen.

Simuloiminen suoritetaan 24 tunnin simulointiajalla. Aurinkopuiston tuottama teho on suurimmillaan keskipäivällä 12 tunnin kuluttua simuloinnin aloittamisesta. Pimeällä aurinkopuisto ei tuota sähköenergiaa. Tuulivoiman tuottama teho vaihtelee vuorokauden ympäri. Tuulidata sisältää suuria ja matalia tuulen nopeuksia sekä turbiinien nimellistuulennopeutta. Asuinalueen kulutus on matalaa keskipäivällä ja suurta illalla. Alueen kulutus laskee yön edetessä aamua kohden. Järjestelmän energiantuotanto ja kulutus on esitetty kuvassa 25, jossa ylemmässä kuvaajassa näkyy kokonaisenergiantuotanto sekä tuotanto energialähteittäin. Alemmassa kuvaajassa näkyy järjestelmän kokonaiskulutus.



*Kuva 25. Energiantuotanto ja -kulutus.*

Järjestelmässä tapahtuu vuorokauden aikana kolme tapahtumaa. Ensimmäinen tapahtuma tapahtuu kolmannen tunnin kohdalla, kun asynkroninen laite käynnistyy. Tämä huomataan kulutuksessa hetkellisenä impulssina. Laitteen toiminta näkyy kuvaajissa myös myöhemminä kulutuspiikkeinä. Toinen tapahtuma on iltapäivällä, kun aurinkopuistoon kohdistuu osittainen varjostuminen. Tämä laskee puiston tehoa hetkellisesti. Kolmas tapahtuma tapahtuu simulaation viimeisinä tunteina, kun tuulipuiston teho putoaa hetkeksi nolnaan liian voimakkaan tuulen nopeuden seurauksena. Ylemmästä kuvaajasta nähdään, kuinka diesel-generaattori reagoi tuuli- ja aurinkovoiman tehon vaihteluihin.

Mallin avulla voidaan analysoida järjestelmän eri komponentteja useilla malliin liitetyillä monitoreilla. Esiteltyä järjestelmää voidaan muokata ja kehittää eri tilanteisiin soveltuvaksi. Myös ympäristöolosuhteita ja laitteiston ominaisuuksia voidaan varioida. Tämä vaatii kuitenkin ymmärrystä järjestelmän käyttäytymisestä ja riittävää asiantuntemusta sähköverkkojen mallinnuksesta ja simuloinnista.

## 6. YHTEENVETO

Tässä työssä tutkittiin sähköenergiajärjestelmien dynaamista simulointia Matlab/Simscape ympäristössä. Tehdyn tutkimuksen ja kahden mallinnusesimerkin perusteella voidaan todeta mallinnuksen olevan tehokas työkalu energiajärjestelmien tutkimuksessa ja kehittämisessä. Työssä todettiin myös uusiutuvan energian vaikuttavan positiivisesti ympäristöön ja ilmastonmuutokseen. Kuitenkin uusiutuvan energian kasvava määrä sähköverkossa aiheuttaa myös haasteita. Uusiutuva energia usein lisää vaihtelevan energiantuotannon määrää sähköverkossa, mikä itsessään lisää säädön ja säätövoiman tarvetta.

Työn tavoitteena oli tutkia dynaamisen mallinnuksen ja simuloinnin mahdollisuuksia sähköverkkojen analysoinnissa ja kehittämisessä. Mielestäni tavoitteet saavutettiin hyvin suhteessa aiempaan sähkötekniiseen osaamiseen ja kokemukseen järjestelmien mallintamisesta. Haasteeksi työssä osoittautui sopivien mallinnusesimerkkien löytäminen tai niiden luominen. Työssä päädyttiin kahteen erilaiseen malliin, joista toisessa käsiteltiin tuulipuistoa yksityiskohtaisemmin ja toisessa mallissa tuulipuisto oli osa suurempaa kokonaisuutta. Dynaaminen sähköverkkomalli oli työn kannalta toimiva ratkaisu, sillä se sisälsi vaihtelevaa energiantuotantoa ja -kulutusta sekä uusiutuvaa energiaa.

Työssä opittiin paljon mallinnuksesta, energiajärjestelmistä, energia-alasta sekä tulevaisuuden mahdollisuuksista aiheen piirissä. Työtä olisi voitu jatkaa hankkimalla lisää tietämystä järjestelmien mallinnuksesta ja siten jatkaa mallien testaamista ja analysointia. Olisi voitu myös tehdä yhteistyötä esimerkiksi Tampereen teknillisen yliopiston sähkötekniikan laitoksen kanssa ja saada siten lisää asiantuntemusta työhön.

## LÄHTEET

- [1] K. Metaxiotis, Intelligent information systems and knowledge management for energy: applications for decision support, usage, and environmental protection, Information Science Reference, Hershey (PA), 2010, 501 p.
- [2] B.S. Hodge, S. Huang, J.D. Siirola, J.F. Pekny, G.V. Reklaitis, A multi-paradigm modeling framework for energy systems simulation and analysis, Computers and Chemical Engineering, Vol. 35, Iss. 9, 2011, pp. 1725—1737.
- [3] S. Mishra, I. Palu, S. Madichetty, L.V. Suresh Kumar, Modelling of wind energy- based microgrid system implementing MMC, International Journal of Energy Research, Vol. 40, Iss. 7, 2016, pp. 952—962.
- [4] Q. Yan, E. Hu, Y. Yang, R. Zhai, Dynamic modeling and simulation of a solar direct steam-generating system, International Journal of Energy Research, Vol. 34, Iss. 15, 2010, pp. 1341—1355.
- [5] T. Yubo, C. Hongkun, W. Jie, L. Xin, Research on the Dynamic Simulation Model of the New-Energy Power System Based on Grey-Correlation Analysis, Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, Vol. 2016, Iss. 18B, 2016, pp. 259-269.
- [6] Voimajärjestelmä, Fingrid.  
Saatavissa: <http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/Sivut/default.aspx> .
- [7] Sähköntuotanto energialähteittäin, Energiateollisuus, 2017.  
Saatavissa: <https://energia.fi> > Perustietoa energia-alasta > Energiantuotanto > Sähköntuotanto.
- [8] Sähkön ja lämmön tuotanto, Tilastokeskus, 2016.  
Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/salatuo/2016/salatuo\\_2016\\_2017-11-02\\_tie\\_001\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/salatuo/2016/salatuo_2016_2017-11-02_tie_001_fi.html) .
- [9] Kulutuksen ja tuotannon tasapainon eli taajuuden ylläpito, Fingrid Oyj, 2017.  
Saatavissa: [www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi) > voimajärjestelmä > voimajärjestelmän hallinta.

- [10] A. Aalto, N. Honkasalo, P. Järvinen, J. Jääskeläinen, M. Raiko, A. Sarvaranta, Loppuraportti – Mistä lisäjoustoja sähköjärjestelmään?, 2012. Mistä lisäjoustoja sähköjärjestelmään? 2012, 123 p. Saatavissa (viitattu 20.10.2017): [https://energia.fi/files/694/Mista\\_lisajoustoja\\_sahkojarjestelmaan\\_loppuraportti\\_28\\_11\\_2012.pdf](https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoja_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf).
- [11] Sähkön kulutus, Fingrid Oyj, 2017. Saatavissa: [www.fingrid.fi](http://www.fingrid.fi) > sähkömarkkinat > kulutus ja tuotanto.
- [12] Säättövoima - säädettävää sähköntuotantoa, Energiateollisuus. Saatavissa: <https://energia.fi> > Perustietoa energia-alasta > Energiantuotanto > Sähköntuotanto > Säättövoima.
- [13] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Zeraouli, Energy storage: Applications and challenges, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 120, Iss. Part. A, 2014, pp. 59-80.
- [14] M. Markula, Uusituvan energian täydentävät sähköenergiaratkaisut osana kattilalaitoksen sähköverkkoa, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2014. 92 s.
- [15] V. Nelson, Introduction to renewable energy, Taylor & Francis, Boca Raton, 2011, 384 p.
- [16] Aurinsähkö, Energiateollisuus. Saatavissa: <https://energia.fi> > Perustietoa energia-alasta > Energiantuotanto > Sähköntuotanto > Aurinkovoima.
- [17] R. W. Flumerfelt, S. Wang, Wind power, McGraw-Hill Education, 2017. Saatavissa: <http://www.accessscience.com.libproxy.tut.fi/content/746400>.
- [18] J. Pöyhönen, Aurinkosähköjärjestelmän verkkoon liittäminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, Tampere, 2009. 70 s.
- [19] Aurinkokennojärjestelmä, Pixabay, 2017. Saatavissa: <https://pixabay.com/fi/aurinkokennoj%C3%A4rjestelm%C3%A4-aurinko-2742302/>.
- [20] Documentation – Matlab, MathWorks, 2017. Saatavissa: <https://se.mathworks.com/help/matlab/>.
- [21] J.L. Bernal-Agustín, R. Dufo-López, Simulation and optimization of stand-alone hybrid renewable energy systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, Iss. 8, 2009, pp. 2111—2118.