



TEKNIS-TALOUDELLISET TEKIJÄT DFIG-TUULIVOIMALAN SUOSION TAUSTALLA

Joona Niemelä

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2015
Sähkötekniikan ko.
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Sähkövoimatekniikka

NIEMELÄ, JOONA:

Teknis-taloudelliset tekijät DFIG-tuulivoimalan suosion taustalla

Opinnäytetyö 51 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Huhtikuu 2015

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä erilaisiin tuulivoimalaratkaisuihin ja erityisesti niissä käytettäviin generaattoriratkaisuihin. Pää tavoitteena oli selvittää teknisesti DFIG (Double Fed Induction Generator) –tyyppisen eli kaksoissyötetyllä liukurengasepätahti-generaattorilla varustetun tuulivoimalan toimintaa ja raportoida olennaisimpia asioita siitä. DFIG-generaattoriratkaisu on tällä hetkellä ylivoimaisesti suosituin tuulivoimaloiden generaattoriratkaisu, joten suuren suosion selvittämiseksi tehtiin teknis-taloudellista vertailua pääosin PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) –tyyppiseen eli kestopagneettitahtigeneraattorilla varustettuun tuulivoimalaan, joka on DFIG-tuulivoimalan lisäksi nykypäivänä suosittu tuulivoimalan generaattoriratkaisu. Tiedonhaussa pääasiallisina lähteinä käytettiin kirjoja, artikkeleita sekä tieteellisiä julkaisuja. Käytetyt lähteet olivat pääasiassa englanninkielisiä, johtuen kotimaisten lähteiden vähydestä.

DFIG-tuulivoimalan teknisestä toiminnasta saatiin selvitettyä sen toiminnassa yleisimmän askarruttavia asioita kuten osatehoisen taajuusmuuttajan merkitys sekä tehon ja taajuuden käyttäytyminen generaattorijärjestelmässä. Tarkoituksena oli raportoida selvittävät asiat helposti ymmärrettävällä tavalla ja välttää esimerkiksi vaikeampien matemaattisten kaavojen tarkastelua.

Teknis-taloudellisessa vertailussa PMSG-tuulivoimalaan nähden löydettiin hyviä ja huonoja puolia kummankin tuulivoimalatyypin osalta, joten täysin selkeää syytä DFIG-tuulivoimalan suureen suosioon ja valtavaan markkinaosuuteen ei löytynyt. Syy miksi DFIG-tuulivoimala on kaikkein suosituin tuulivoimalakonsepti, johtuu siitä, että se tuottaa energiaa kohtuullisen hyvin alhaisilla kustannuksilla. Tulevaisuudessa PMSG-tuulivoimaloissa käytettävien kestopagneettien hintojen on stabiloiduttava, jos PMSG-tuulivoimala haluaa kasvattaa sen markkinaosuuttaan.

Asiasanat: dfig, pmsg, tuulivoimala, tuulienergia.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Electrical Engineering
Option of Electrical Power Engineering

NIEMELÄ, JOONA:

Technical and economic factors behind the popularity of double fed induction generator wind turbine

Bachelor's thesis 51 pages, appendices 0 pages
April 2015

The objective of the thesis was to study a variety of wind turbine solutions and in particular those used in generator solutions. The main objective was to find out technically the operation of the wind turbine, which is equipped with a double fed induction generator and report the most essential issues in connection with. A double fed induction generator is nowadays by far the most popular generator solution in wind turbines, so in addition to determine the reasons for high popularity, technical and economic comparison mostly to a permanent magnet synchronous generator was made. A permanent magnet synchronous generator is in also nowadays a popular wind turbine generator solution with a double fed induction generator. The main sources in information retrieval were books, articles and scientific reports. These sources were mainly in English language, due to the lack of domestic sources.

The commonly preoccupying technical operation of the double fed induction generator wind turbine was solved such as the meaning of partial rated converter and also how power and frequency behaves in the generator system. The purpose was to report the clarified issues in an easy way and to avoid for example difficult mathematical formulas review.

In technical and economic comparison advantages and disadvantages of both the permanent magnet synchronous generator and the double fed induction generator wind turbines were found. Because of that no completely clear reason for the high popularity of a double fed induction generator wind turbine and massive market share was found. The reason why double fed induction generator wind turbine is most popular wind turbine concept, due to the fact that it produces energy reasonably well with low cost. In the future it is important that the price of permanent magnet stabilizes, if permanent magnet synchronous generator wind turbine wants to increase its market share. Permanent magnets are used in permanent magnet synchronous generator wind turbines.

Key words: dfig, pmsg, wind turbine, wind energy.

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	TUULIVOIMA	7
	2.1 Yleistä tuulivoimasta	7
	2.2 Energiantuotanto tuulivoimalla.....	10
	2.3 Tuulivoimalan rakenne	16
3	TUULIVOIMALOIDEN GENERAATTORITYYPIT	18
	3.1 Epätahtigeneraattori	18
	3.2 Tahtigeneraattori	20
4	TUULIVOIMALATOPOLOGIAT	23
	4.1 Vakionopeuksinen tuulivoimala	23
	4.2 Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala	24
	4.3 Muuttuvanopeuksinen täysohjattu tuulivoimala.....	25
5	KAKSOISSYÖTETTY RAJOITETUSTI MUUTTUVANOPEUKSINEN TUULIVOIMALA	27
	5.1 Toimintaperiaate	27
	5.2 Asiaa taajuusmuuttajasta.....	32
6	TUULIVOIMALOIDEN TEKNIS-TALOUDELLINEN VERTAILU.....	35
	6.1 Yleistä	35
	6.2 Ominaisuuksien vertailu	36
	6.3 Suorituskyky ja energiantuotanto	37
	6.4 Generaattorijärjestelmän hinta.....	44
	6.5 Muita asioita	45
7	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA	48
	LÄHTEET.....	49

LYHENTEET JA TERMIT

DFIG	Double Fed Induction Generator, kaksoissyötetty liukurengasepätahtigeneraattori
EESG	Electrically Excited Synchronous Generator, vierasmagne-toitu tahtigeneraattori
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator, kestmagne-toitu tahtigeneraattori
SCIG	Squirrel Cage Induction Generator, häkkikäämitty epätahti-generaattori
WRIG	Wound Rotor Induction Generator, liukurengasepätahtigen- eraattori
WRSG	Wound Rotor Synchronous Generator, liukurengastahtigen- eraattori

1 JOHDANTO

Opinnäytetyön tavoitteena on perehtyä tuulivoimaloihin ja niissä käytettäviin generaattoriratkaisuihin. Pää tavoitteena on selvittää eri lähdeaineistoja käyttäen kaksoissyötetyllä liukurengasepähtigeneraattorilla varustetun tuulivoimalan eli DFIG-tuulivoimalan (Double Fed Induction Generator) toimintaa teknisesti. Asiat pyritään pitämään helposti ymmärrettävällä tasolla ja vältetään esimerkiksi monimutkaisten matemaattisten kaavojen käyttöä. Tärkeimpinä asioina DFIG-tuulivoimalan toiminnassa pyritään selvittämään sen osatehoisen taajuusmuuttajan mitoituksen periaatteita sekä selvitetään sitä, miten esimerkiksi teho ja taajuus käyttäytyvät generaattorijärjestelmässä.

Nykypäivän tuulivoimalakonsepteista DFIG-tuulivoimalan lisäksi teknisesti hyvä ratkaisu on PMSG-tuulivoimala (Permanent Magnet Synchronous Generator), johon tässä opinnäytetyössä pääasiassa tehdään vertailua teknisesti ja taloudellisesti. Lisäksi mietitään DFIG-tuulivoimalan suureen markkinaosuuteen vaikuttavia tekijöitä.

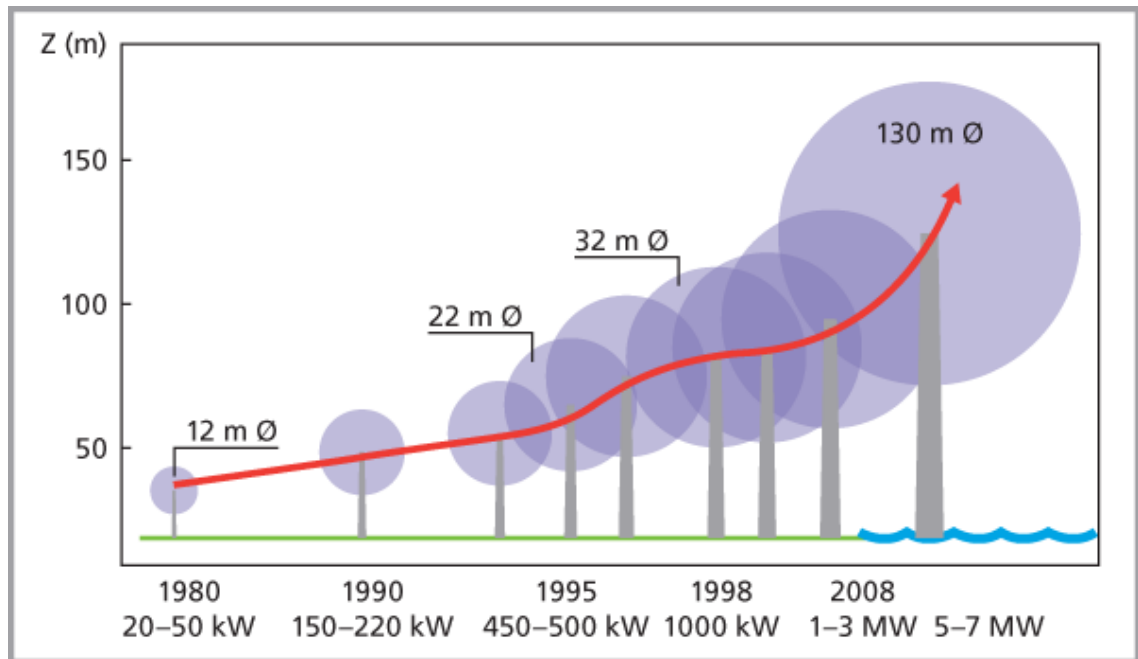
Tuulivoima on nopeimmin kasvava uusiutuvan energian lähde, joka on lähes päästötöntä. Tuulivoimaa rakentamalla pystytään kasvattamaan kotimaassa tuotetun energian määrää, jonka avulla myös saadaan vähennettyä riippuvuutta tuontipolttoaineisiin, kuten kivihiiileen ja maakaasuun.

2 TUULIVOIMA

2.1 Yleistä tuulivoimasta

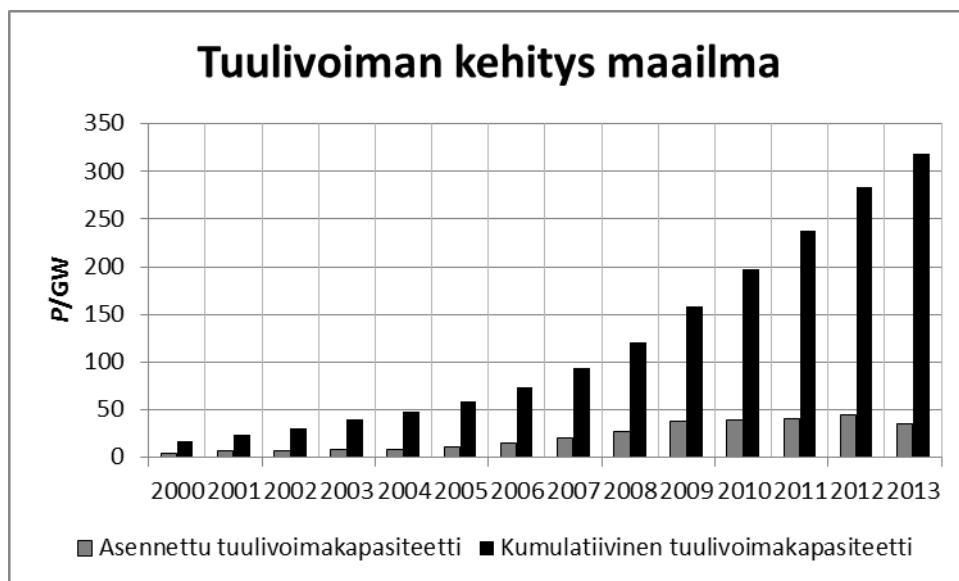
Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa, jota tuotetaan tuulivoimaloilla muuntamalla tuulen liike-energia pyörimisliikkeeksi, joka saadaan muutettua sähköenergiaksi generaattorin avulla. Tuulivoiman hyvänä puolena voidaan pitää sitä, että siitä ei synny päästöjä ympäristöön juuri lainkaan. Huonoina puolina ympäristön kannalta voidaan mainita tuulivoimalan vaikuttavan maisemaan negatiivisesti ja mahdollisesti aiheuttavan melua, johon tuulivoimalan roottorin pyörivästä liikkeestä. Maisemavaikutuksien minimoimiseksi ne tulisi sijoittaa alueille, joissa ne olisivat mahdollisimman vähän näkyvillä, kuten meri tai teollisuusalueet. Meluongelmien ehkäisemiseksi tuulivoimalat tulisi sijoittaa riittävän kauas asutuksesta ja muista melulle herkistä kohteista. Sallitut meluarvot varmistetaan melumallinnuksen avulla jo tuulivoimalaa suunniteltaessa. (Energiateollisuus ry 2015)

Suurten luokkien eli teollisuusluokan tuulivoimaloiden koot vaihtelevat tänä päivänä nimellisteholtaan yhden ja viiden megawatin välillä. Tällä hetkellä myydyimpiä tuulivoimaloita ovat kahden ja kolmen megawatin tuulivoimalat, mutta suurempien tuulivoimaloiden markkinaosuudet ovat kasvussa. Tuulivoimaloiden kokoa voidaan kuvata nimellistehon lisäksi myös niiden pyyhkäisyypinta-alalla, potkurin halkaisijalla, vuosittaisella energiantuotolla, napakorkeudella tai painolla. Tuulivoimalan tuottama energia on täysin verrannollinen sen roottorin pyyhkäisyypinta-alaan. Tuulivoimaloiden korkeudet ovat kasvaneet jo yli sataan metriin, kuten myös roottorin halkaisijat. Syy miksi tuulivoimaloista rakennetaan entistä korkeampia, on se, että tuulivoimalan tuotto paranee, kun sen napakorkeus kasvaa. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 1) on esitettyä tuulivoimaloiden koon kehitys vuosien saatossa. (Suomen tuulivoimayhdistys ry 2015; Energiateollisuus ry 2015)



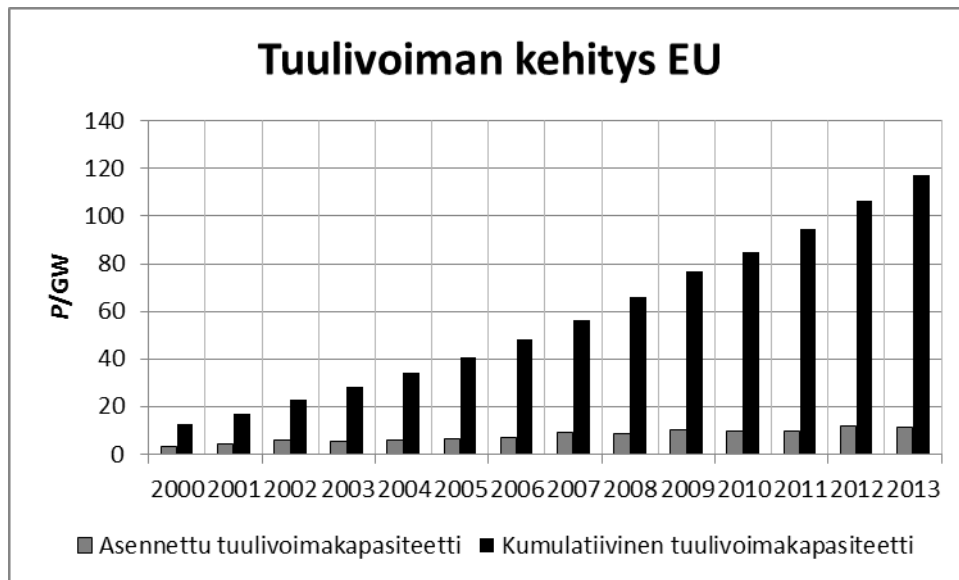
Kuvio 1. Tuulivoimaloiden koon kehitys vuodesta 1980 alkaen (Suomen tuulivoimayhdistys ry 2015)

Maailman tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2013 lopussa 318,105 gigawattia ja sen osuus kaikesta sähköntuotannosta on noin 2,5 % maailmassa. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 2) on esitettyä tuulivoiman kehitys maailmassa 2000-luvulla vuosittain asennettun tuulivoimakapasiteetin ja kumulatiivisen tuulivoimakapasiteetin osalta. (Global wind report. Annual market update 2013 2014, 21; Wind in numbers 2015)



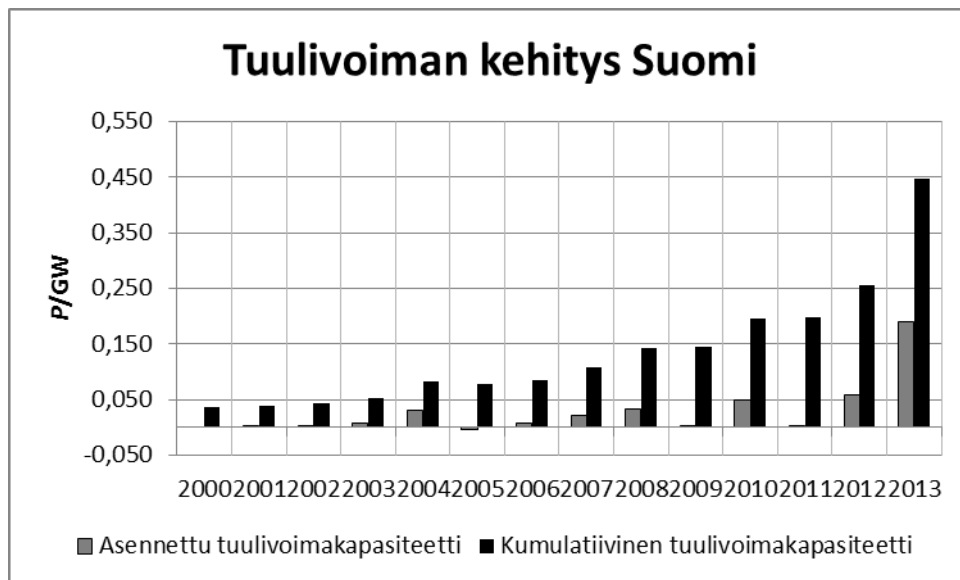
Kuvio 2. Tuulivoimakapasiteetin kehitys maailmassa vuosina 2000-2013 (Global wind report. Annual market update 2013 2014, 21)

EU-alueella tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2013 lopussa 117,289 gigawattia ja sen osuus EU-alueen sähköntuotannosta on noin 13 %. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 3) on esitettyä tuulivoiman kehitys EU-alueella 2000-luvulla vuosittain asennetun tuulivoimakapasiteetin ja kumulatiivisen tuulivoimakapasiteetin osalta. (Wind in power. 2013 European statistics 2014, 4, 11)



Kuvio 3. Tuulivoimakapasiteetin kehitys EU-alueella vuosina 2000-2013 (Wind in power. 2012 European statistics 2013, 9; Wind in power. 2013 European statistics 2014, 4, 11)

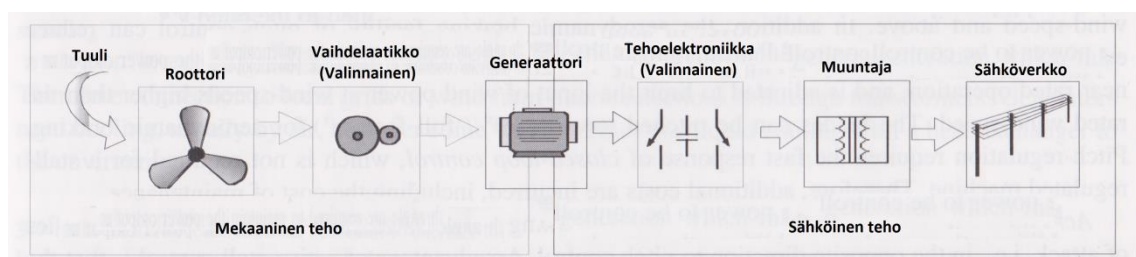
Suomen tuulivoimakapasiteetti oli vuoden 2013 lopussa 447 megawattia ja sen osuus Suomen sähköntuotannosta on noin 0,9 %. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 4) on esitettyä tuulivoiman kehitys Suomessa 2000-luvulla vuosittain asennetun tuulivoimakapasiteetin ja kumulatiivisen tuulivoimakapasiteetin osalta. Asennetun tuulivoimakapasiteetin lukemat ovat muodostettu laskennallisesti kumulatiivisen tuulivoimakapasiteetin perusteella. (Suomen tuulivoimatuotanto vuosi- ja kuukausitasolla 2014)



Kuvio 4. Suomen tuulivoimakapasiteetin kehitys Suomessa vuosina 2000-2013 (Suomen tuulivoimatuotanto vuosi- ja kuukausitasolla 2014)

2.2 Energiantuotanto tuulivoimalla

Energia tuotetaan tuulivoimalla muuttamalla ilman virtauksen liike-energia sähköenergiaksi tuulivoimalalla eli käytännössä mekaaninen teho muutetaan sähköiseksi tehoksi. Sähköiset pääosat energian tuottamiseen tuulivoimalassa ovat tuulivoimalan roottori, vaihdelaatikko (valinnainen), generaattori, tehoelektroniikan komponentti (valinnainen) ja muuntaja, jolla tuulivoimala kytketään sähköverkkoon. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 5) on esitettyä periaatekuva energiantuotannosta tuulivoimalalla. (Twidell & Gaudiosi 2009, 71)



Kuvio 5. Energiantuotanto tuulivoimalalla (Twidell & Gaudiosi 2009, 71, muokattu)

Vaihdelaatikon tarve riippuu käytettävästä generaattorityypistä ja sen napaluvusta. Riittävän moninapaisissa generaattoreissa ei tarvita vaihdelaatikkoa, koska ne toimivat laajalla säteellä eri pyörimisnopeuksilla. Tehoelektroniikan komponentteja tuulivoimaloissa ovat esimerkiksi pehmokäynnistimet, kondensaattoripankit ja taajuusmuuttajat. Te-

hoelektroniikan komponenttien tarve tuulivoimalassa riippuu generaattorityypistä ja tuulivoimalatyypistä. (Ackermann 2005, 72-75; Twidell & Gaudiosi 2009, 71)

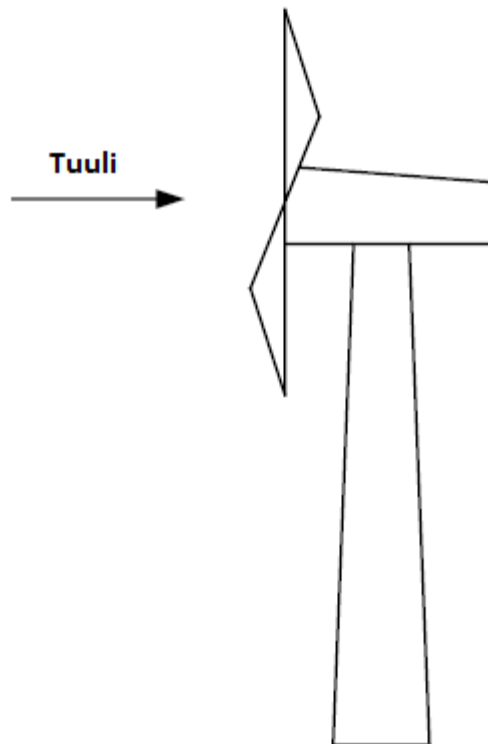
Tuulen teho eli ilmavirtauksen teho P_{Tuuli} saadaan laskettua kaavalla 1. (Anaya-Lara ym. 2009, 4)

$$P_{Tuuli} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

, jossa

ρ	ilmantiheys [kg/m^3], noin 1,225 [kg/m^3]
A	roottorin pyyhkäisypinta-ala [m^2]
v	tuulen nopeus [m/s]

Seuraavassa kuvassa (Kuva 1) on esitettyä vaaka-akselinen tuulivoimala, jossa nähtävillä periaate, miten tuulivoimala muodostaa tehoa tuulesta.



Kuva 1. Vaaka-akselinen tuulivoimala. (Fox ym. 2007, 57, muokattu)

Edellisellä kaavalla (Kaava 1) voidaan laskea tuulen teho, mutta tuulivoimalan tehon laskemiseen tarvitaan tehokerrointa C_p , joka saadaan laskettua kaavalla 2. (Anaya-Lara ym. 2009, 4)

$$C_p = \frac{P_{\text{Tuulivoimala}}}{P_{\text{Tuuli}}} \quad (2)$$

, jossa

$P_{\text{Tuulivoimala}}$ tuulivoimalan teho [MW]

C_p tehokertoimen maksimiarvo perustuu Betzin-lakiin, jonka perusteella tuulivoimala ei voi koskaan hyödyntää enempää, kuin 59,3 % (16/27 tai 0,593 toisilla esitystavoilla) tuulen tehosta. Todellisuudessa tuulivoimaloiden tehokertoimien maksimiarvot liikkuvat 25-45 % välillä. (Anaya-Lara ym. 2009, 5)

Edellisestä kaavasta (Kaava 2) pyörittämällä, tuulivoimalan teho $P_{\text{Tuulivoimala}}$ saadaan laskettua kaavalla 3. (Anaya-Lara ym. 2009, 5)

$$P_{\text{Tuulivoimala}} = C_p \cdot P_{\text{Tuuli}} \quad (3)$$

Tuulivoimalan suorituskykyä arvioitaessa on hyvä laskea tehokertoimen C_p lisäksi myös kärjen nopeussuhde λ . Kärjen nopeussuhde λ saadaan laskettua kaavalla 4. (Anaya-Lara ym. 2009, 5)

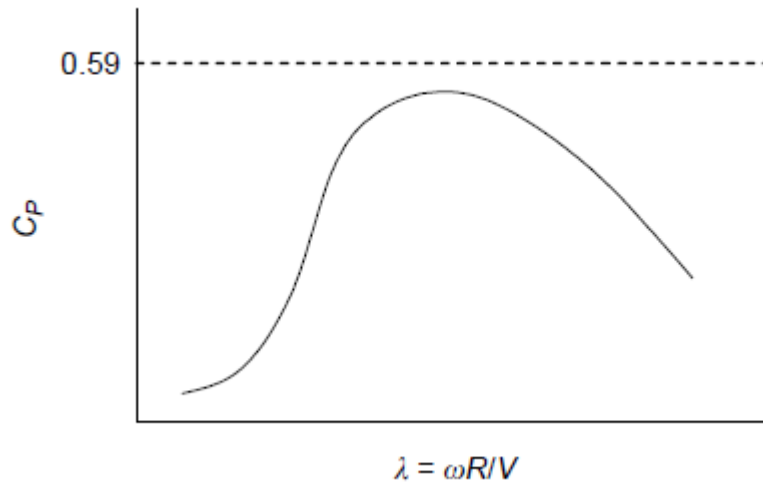
$$\lambda = \frac{\omega \cdot r}{v} \quad (4)$$

, jossa

ω roottorin pyörimistaajuus [1/s]

r roottorin säde [m]

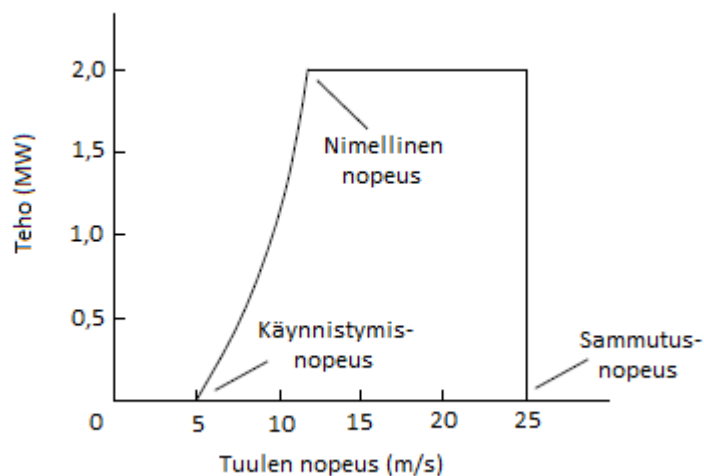
Tehokerroin C_p ja kärjen nopeussuhde λ ovat molemmat yksiköttömiä suureita, joten niiden avulla saadaan kuvattua minkä tahansa kokoisen tuulivoimalan suorituskykyä. Alla olevassa kuviossa (Kuvio 6) on esitettyä periaatekuva tuulivoimalan suorituskyvystä. (Fox ym. 2007, 57)



Kuvio 6. Tehokertoimen C_p arvo kärjen nopeussuhteen λ funktiona. (Fox ym. 2007, 58)

Kuten kuviosta (Kuvio 6) nähdään, tuulivoimalan tehokerroin C_p saavuttaa maksimiarvonsa vain tietyillä kärjen nopeussuhteen λ arvoilla. Vakionopeuksisessa tuulivoimalassa tehokertoimen C_p maksimiarvo saavutetaan ainoastaan yhdellä tuulen nopeudella, mutta muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa maksimiarvo voidaan saavuttaa laajemmalla säteellä eri tuulen nopeuksilla. (Anaya-Lara ym. 2009, 5)

Tuulivoimalan tehoa eri tuulen nopeuksilla voidaan kuvata tehokäyrällä (power curve). Seuraavassa kuviossa (Kuvio 7) on esitettyä periaatteellinen tehokäyrä kahden megawatin tuulivoimalasta. (Fox ym. 2007, 58)



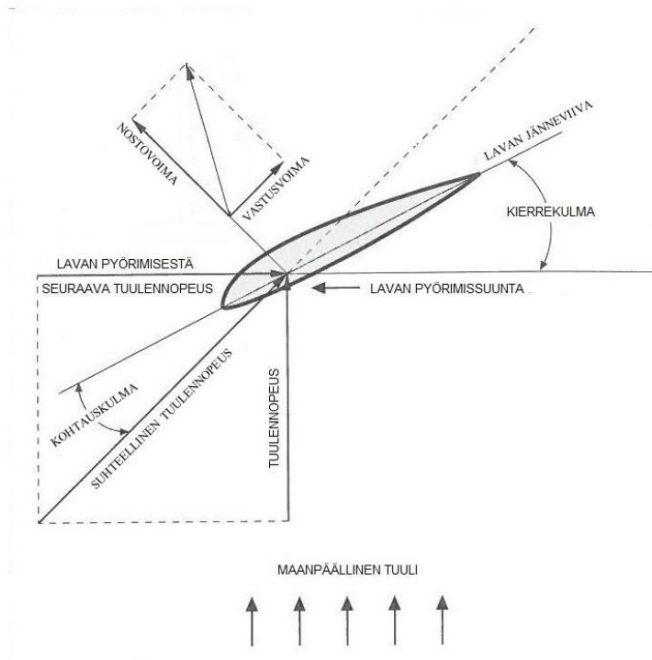
Kuvio 7. 2 MW:n tuulivoimalan tehokäyrä (Fox ym. 2007, 58, muokattu)

Tehokäyrän kuviossa (Kuvio 7) tuulivoimalan käynnistymisnopeus (cut-in wind speed) tarkoittaa sitä, millä tuulen nopeudella tuulivoimala käynnistyy ja alkaa tuottaa tehoa. Nimellinen nopeus (rated wind speed) tarkoittaa sitä tuulen nopeutta, jolla tuulivoimala tuottaa käytännössä maksimi tehonsa. Sammutusnopeudella (cut-out wind speed) taas tarkoitetaan sitä, millä tuulen nopeudella tuulivoimala sammutetaan mekaanisten laitevaurioiden estämiseksi tuulivoimalassa. (Anaya-Lara ym. 2009, 6)

Suurilla tuulen nopeuksilla tehon talteenotto tuulesta ylittää tuulivoimalan roottorille asetetut rakenteelliset rajoitteet. Tämä on erityisesti suurten luokan tuulivoimaloiden ongelma ja turvallisuusmarginaalit komponenttien lujuusrajoitteissa ovat suppeammat, kun tuulivoimaloiden koko kasvaa. Sen lisäksi tuulivoimalan roottorista generaattorille syötettävä teho on rajoitettu sallittujen rajojen puitteissa. (Hau 2006, 102)

Riippumatta tuulivoimalan roottorin tehon rajoituksesta suurilla tuulen nopeuksilla, ongelmana on roottorin nopeuden ylläpitäminen vakiona ennalta määrätyissä rajoissa. Roottorin nopeuden rajoittaminen tulee ennen kaikkea tarpeelliseksi esimerkiksi sähkökatkon aikana, kun roottorin vääntömomentti katoaa yhtäkkiä. Tällaisessa tapauksessa roottorin nopeus kasvaa voimakkaasti ja johtaa roottorin hajoamiseen, ellei vastatoimia oteta käyttöön. Tuulivoimalan roottori tarvitsee aerodynaamisia keinoja rajoittamaan tehoa ja sen pyörimisnopeutta. (Hau 2006, 102)

Perus periaatteena on se, että liian kovia roottorin lapoihin kohdistuvia voimia pystytään vähentämään muuttamalla tuulen ja roottorin lavan kohtauskulmaa, pienentämällä roottorin pyyhkäisyypinta-alaa tai muuttamalla ilmavirtausta roottorin lavoissa. Koska itse tuulen nopeuteen ei voida vaikuttaa, vain ilmavirtaus roottorin lavoissa muuttaa roottorin nopeutta. Roottorin nopeutta voidaan siis käyttää säätösuurena teholle, mikäli tuulivoimala mahdollistaa muuttuvanopeuksisen toiminnan. Tehon säädössä tällä tavalla pitää ottaa huomioon, että roottorin nopeuden muuttaminen on hyvin rajoitettua, joten roottorin nopeuden muuttamista voidaan pitää ainoastaan lisäoptiona. Roottorin pyyhkäisyypinta-alan pienentäminen tulee kyseeseen vain pienten roottoreiden tapauksissa. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 8) on havainnollistettuna tuulen ja roottorin lavan kohtauskulma. Lisäksi näkyvillä ovat tuulen nopeuksien sekä voimien suunnat ja suuruudet. (Hau 2006, 102-103)



Kuvio 8. Tuulen ja roottorin lavan kohtauskulma (Korpela 2014, 49)

Ylivoimaisesti paras tapa tuulen ja roottorin lapojen kohtauskulman muuttamiseen ja täten myös tehon muuttamiseen on säätää mekaanisesti roottorin lapojen lapakulmaa (pitch angle). Tätä säätötapaa kutsutaan lapakulman säädöksi (pitch control). Sen tarkoituksena on kääntää roottorin lavat niiden pitkittäisakseleilla aktiivisesti ohjattujen kääntömoottoreiden avulla. (Hau 2006, 103)

Periaatteessa tehon säätö tuulen ja roottorin kohtauskulmaa muuttamalla voidaan säävyttää kahdella tavalla. Tavanomainen ratkaisu on säätää lavan kohtauskulma pienempään kulmaan, jotta tehoa saadaan pienennettyä. Jos kohtauskulma kasvaa, silloin päinvastoin teho kasvaa. Toinen tapa on muuttaa lapakulmaa suurempaan kohtauskulmaan niin sanottuun sakkaustilaan, jossa ilmavirtaus irtoaa roottorin lavoista, joka taas rajoittaa aerodynaamista tehon tuotantoa. Tätä ilmiötä kutsutaan sakkaustilaksi. Lapakulman säädön hyvänä puolena voidaan pitää sitä, että sen tarvittavaa lapakulmaa voidaan pitää pienempänä, kuin sakkaussäätöisissä tuulivoimaloissa. (Hau 2006, 103-104)

Passiivinen sakkaussäätö (passive stall control) on automaattisesti toimiva mekanismi, joka mahdollistaa roottorin tehon säätelyn hyödyntäen sakkauksen säätöä sen käytännöllisessä merkityksessä. Tätä säätötapaa käytetään erityisesti pienissä tuulivoimaloissa, koska niissä ei ole yleensä lapakulman säätöominaisuuksia. Suurilla tuulennopeuksilla teho on siis rajoitettu pelkästään aerodynaamisella sakkauksella roottorin lavoissa. Pas-

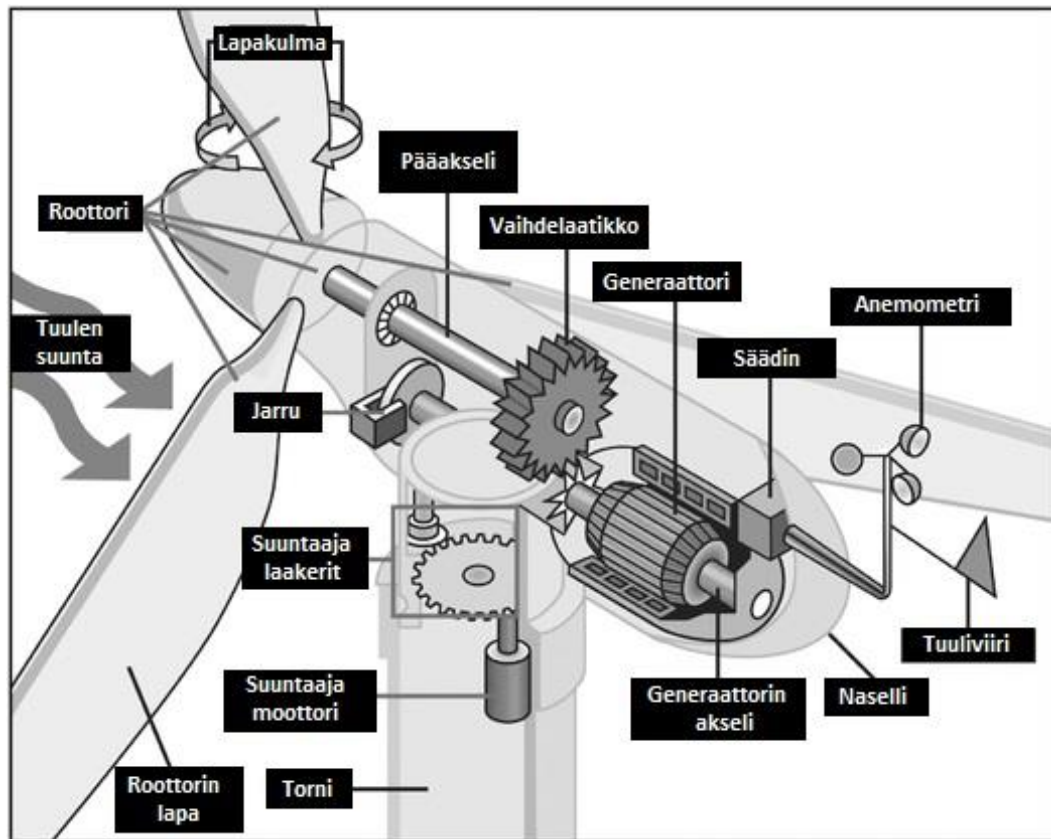
siivinen sakkaussäätö tarvitsee huolellisesti suunnitellun roottorin lapojen geometrian ja huolellisesti valitun roottorin nopeuden (vakionopeus). Tietyllä tuulenopeudella täytyy varmistaa, että ilmavirtaus on todellakin irrotettu roottorin lavoista, jotta tehon nousu on tehokkaasti estetty. (Hau 2006, 108-109)

Aktiivisessa sakkaussäädössä (active stall control) roottorin lavat säädetään kääntymään pitkittäissuunnassa tuulivoimalan toimiessa eri tuulen nopeuksilla, ottaen huomioon ilmantiheyden muutokset esimerkiksi kesä- ja talviaikoina sekä roottorin lapojen pinnanlaadun muutokset esimerkiksi likaantumisen johdosta. Rajuilla tuulilla roottorin lavat käännetään vastakkaisuuntaisesti vähentämään tuulen kuormitusta roottoriin. Tuulivoimaloiden rakenne aktiivisten sakkaussäätöisten järjestelmien ja lapakulmaisten järjestelmien välillä ei juuri eroa. Molemmissa roottorin lavat kääntyvät pitkittäissuuntaisesti kääntömoottoreiden avulla. Tuulen turbulenssi voidaan suodattaa paremmin sakkaussäätöisillä roottoreilla, jonka avulla myös tehon ja kuormitusten piikit ovat pienemmät kuin lapakulman säätöisillä roottoreilla. Nämä hyödyt ovat osoitettu toimiviksi matemaattisilla malleilla sekä tutkimuksellisilla kokeilla. (Hau 2006, 112-113)

2.3 Tuulivoimalan rakenne

Suuren luokan tuulivoimalat ovat kauttaaltaan kolmilapaisia, johtuen siitä, että niiden on todettu olevan kaikkein kustannustehokkaimpia. Tämä johtuu siitä, että roottorin pyyhkäisyypinta-ala on suuri suhteessa siihen, mitä ovat materiaalikustannukset ja roottorin paino. Tuulivoimalan pyyhkäisyypinta-ala on alue, josta tuulivoimala voi hyödyntää tuulen sisältämän energian. Lisäksi tuulivoimalan tasapainottaminen on yksinkertaisempaa kolmilapaisella ratkaisulla. (Ympäristöministeriö 2013)

Seuraavassa kuvassa (Kuva 2) on esitettyä periaatekuva tuulivoimalan rakenteesta. Periaatekuvaa katsoessa tulee ottaa huomioon, että komponenttien tarve vaihtelee tuulivoimalatyypin mukaan, joten kaikkia kuvassa esitettyjä komponentteja ei löydy kaikista tuulivoimaloista. Tuulivoimalan pääosat ovat torni, roottori ja konehuone eli naselli. (Tuulivoimalan rakenne 2011)



Kuva 2. Periaatekuva tuulivoimalasta ja sen komponenteista (The inside of a wind turbine, muokattu)

Tuulivoimalan konehuoneessa sijaitsevat vaihdelaatikko, pääakseli, generaattorin akseli, generaattori, säädin ja jarru. Anemometri mittaa tuulennopeutta ja siirtää tiedot säätimelle. Roottorin lavat pyörivät ja nousevat, kun tuuli puhaltaa niihin, joka saa roottorin pyörimään. Jarrun tehtävänä on pysäyttää roottori vikatilanteissa. Jarru voi toimia mekaanisesti, sähköisesti tai hydraulisesti. Säätimen tehtävänä on käynnistää tuulivoimala tietyllä tuulen nopeudella ja sammuttaa se, jos tuulen nopeus nousee liian suureksi laitteiston vaurioitumisen estämiseksi. Vaihdelaatikolla saadaan pääakseli yhdistettyä generaattorin akselin kanssa, jotta niiden pyörimisnopeudet saadaan yhteensopiviksi. Vaihdelaatikkoa ei tarvita suoravetoisiksi kutsutuissa tuulivoimaloissa, koska niissä generaattori pystyy toimimaan hitaammillakin pyörimisnopeuksilla. Lapakulmalla pystytään rajoittamaan roottorin pyörimisnopeutta ja pystytään pitämään se pyörimässä silloin, kun tuulet ovat liian alhaisia tai liian voimakkaita sähkön tuottamiseen. Tuulivoimalan roottori koostuu yleensä kolmesta lavasta. Suuntaajalaakereilla (kutsutaan myös YAW-järjestelmä) voidaan kohdistaa roottori tuulen suuntaan päin, jos tuulen suunta on muuttunut. Suuntaajamoottorilla saadaan suuntaaja laakerit pyörimään. Tuuliviirillä mitataan tuulen suuntaa, jonka perusteella suuntaajalaakerit saavat tiedon tuulen suunnasta. (The inside of a wind turbine)

3 TUULIVOIMALOIDEN GENERAATTORITYYPIT

3.1 Epätahtigeneraattori

Tuulivoimaloissa yleisimmin käytetty generaattoryyppi on epätahtigeneraattori. Epätahtigeneraattorista käytetään myös nimitystä induktiogeneraattori ja oikosulkugeneraattori. Sen etuihin lukeutuvat kestävyys, mekaanisesti yksinkertainen rakenne ja sen edullinen hinta. Huonona puolena voidaan todeta se, että epätahtigeneraattori tarvitsee reaktiivista magneetoimisvirtaa staattoriinsa. Nimitys epätahtigeneraattori juontaa juurensa siitä, että roottorin pyörimisnopeus on aina staattorin magneettikentän pyörimisnopeudesta poikkeava. Epätahtigeneraattorissa energia siirretään staattorista ilman galvaanista yhteyttä roottoriin sähkömagneettisen induktion avulla, josta johtuu nimitys induktiogeneraattori. Lisäksi nimitys oikosulkugeneraattori tulee siitä, että roottorin käämitys voidaan joissain tapauksissa toteuttaa alumiinisauvoilla, jotka ovat oikosuljettu molemmista päistä oikosulkurenkailla. (Ackermann 2005, 66; Hietalahti 2011, 59-62)

Epätahtigeneraattorin pääosat ovat staattori ja roottori. Staattori koostuu rautalevypaketista, jonka urissa on staattorikäämitykset. Staattori on paikallaan pysyvä osa (seisoja) ja sen tarkoituksena on muodostaa pyörivä magneettikenttä. Pyörivä magneettikenttä muodostuu staattoriin kolmivaiheisiin staattorikäämityksiin kytketyllä verkkovirralla. Roottori on generaattorin pyörivä osa (pyörijä), joka koostuu rautalevypaketista roottorikäämityksineen. (Aura & Tonteri 2009, 305; Hietalahti 2011, 59-62)

Epätahtigeneraattorit voidaan jakaa kahteen luokkaan niiden roottorikäämityksien perusteella. Roottorikäämitys voidaan toteuttaa siten, että laitetaan alumiinisauvoja roottorin uriin, jotka oikosuljetaan roottorin päissä sijaitsevilla oikosulkurenkailla. Tällaista roottorikäämistä kutsutaan nimellä häkkikäämitys (squirrel cage). Toinen tapa roottorikäämistyksen toteutukseen on tuoda roottorikäämistyksen toiset päät ulos roottorin akselille, jossa sijaitsevat liukurenkaat ja joita liukuharjat laahaavat. Tällä tavalla toteutettu roottorikäämitys mahdollistaa ulkoisen vastuksen liittämiseen roottoriin ja sillä voidaan muuttaa generaattorin sähköisiä ominaisuuksia. Tällaista generaattoria kutsutaan liukurengasepätahtigeneraattoriksi (wound rotor induction generator, WRIG). (Korpinen 1998a, 9; Hietalahti 2011, 61)

Epätahti staattorin pyörivän magneettikentän ja roottorin välillä eli jättämä s saadaan laskettua kaavalla 5. (Hau 2006, 326)

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (5)$$

, jossa

n_s staattorin pyörivän magneettikentän pyörimisnopeus [rpm]

n_r roottorin pyörimisnopeus [rpm]

Jättämän s kaavassa 5 on tärkeää ottaa huomioon, että jättämän ollessa negatiivinen, epätahtikone toimii generaattorina ja kun jättämän arvo on positiivinen, se toimii moottorina. (Hau 2006, 326)

Staattorin pyörivän magneettikentän nopeus n_s (rpm) eli epätahtigeneraattorin tahtinopeus saadaan laskettua kaavalla 6. (Hau 2006, 326)

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (6)$$

, jossa

f taajuus [Hz]

p generaattorin napapariluku

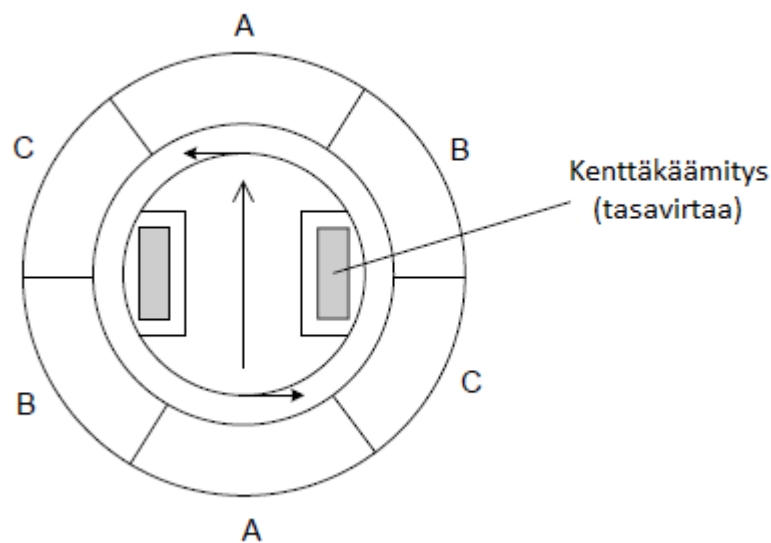
3.2 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattori on epätahtigeneraattoria kalliimpi sekä mekaanisesti monimutkaisempi generaattorityyppi. Selkeä etu tahtigeneraattorissa epätahtigeneraattoriin verrattaessa on se, ettei sen staattori tarvitse reaktiivista magnetointivirtaa. Tahtigeneraattorin staattori on samanlainen, kuin epätahtigeneraattorissa, mutta roottori eroaa toiminnaltaan siitä. Riittävän moninapaista tahtigeneraattoria voidaan käyttää suoravetoisissa tuuli-voimaloissa, jolloin tuuli-voimalaan ei tarvita vaihdelaatikkaa tuuli-voimalan roottorin ja generaattorin roottorin välille. (Ackerman 2005, 69-70; Hietalahti 2011, 87)

Tahtigeneraattorin toiminta perustuu siihen, että roottori pyörii samalla nopeudella staattorin pyörivän magneettikentän ja sähköverkon kanssa tahtinopeudella, joten tahti-

generaattorissa ei siis synny jättämää staattorin ja roottorin välille, kuten epätahtigeneraattorissa. Tahtigeneraattorin toiminnassa on tärkeää ottaa huomioon se, että jos generaattorin kuormitus kasvaa liian suureksi, generaattori ei enää pyöri tahtinopeudella, jolloin se tulee irrottaa sähköverkosta. (Korpinen 1998b, 1)

Seuraavassa kuvassa (Kuvio 10) on esitettyä ideaalinen tahtigeneraattori. Tässä tapauksessa magneettikenttä luodaan syöttämällä tasavirtaa roottorin käämityksiin. Tasavirta voidaan syöttää roottorin käämityksiin esimerkiksi pienemmällä vaihtosähkögeneraattorilla, joka sijaitsee samalla akselilla tahtigeneraattorin kanssa. Tätä magnetointikoneetta kutsutaan herätekoneeksi. Herätekoneen käämitykset on tehty erilalla kuin tahtikoneessa, koska siinä sen kenttäkäämitys on staattorissa ja ankkurikäämitys roottorissa eli tässä tapauksessa jännite indusoituu staattorista roottoriin eikä toisinpäin, kuten normaalin tahtikoneen tapauksessa. Magnetointikoneella tuotettu vaihtojännite tassaunnataan, jonka jälkeen se syötetään tahtikoneen roottorikäämityksiin. (Korpinen 1998b, 3; Fox ym. 2007, 34)



Kuvio 10. Periaatekuva tahtigeneraattorista (Fox ym. 2007, 35, muokattu)

Tahtigeneraattorin tahtinopeus n_s (rpm) saadaan laskettua epätahtigeneraattorin kanssa samaan tapaan aiemmin esitetyllä kaavalla 6. (Hau 2006, 326)

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (6)$$

Tahtigeneraattorin magneettikenttä voidaan luoda joko kestopagneeteilla tai tavanomaisilla kenttäkäämityksillä. Tuulivoimaloissa käytetään tyypillisesti vierasmagnetoi-
tua liukurengastahtigeneraattoria (wound rotor synchronous generator, WRSG) tai kes-
tomagneettitahtigeneraattoria (permanent magnet synchronous generator, PMSG). Vie-
rasmagnetoidussa tahtigeneraattorissa roottorikäämityksiin syötetään tasavirtaa liuku-
renkaiden ja liukuharjojen avulla. Tämä synnyttää herätemagneettikentän, joka pyörii
staattorin pyörivän magneettikentän kanssa samalla nopeudella eli tahtinopeudella. Kes-
tomagneettitahtigeneraattorissa roottori on valmistettu kestopagneeteista, jotka pystyvät
itse luomaan herätemagneettikentän. joten tasavirran syöttöä roottoriin ei tarvita. Kes-
tomagneettitahtigeneraattorilla on hyvä hyötysuhde, mutta kestopagneettien hinta on
korkea, joka lisää tuulivoimalan kustannuksia. Lisäksi kestopagneetit ovat herkkiä
lämpötilalle, jolloin niiden magnetointiominaisuudet heikkenevät suurilla lämpötiloilla.
Tällöin tuulivoimala on varustettava jäähdytysjärjestelmällä. (Ackerman 2005, 69-70)

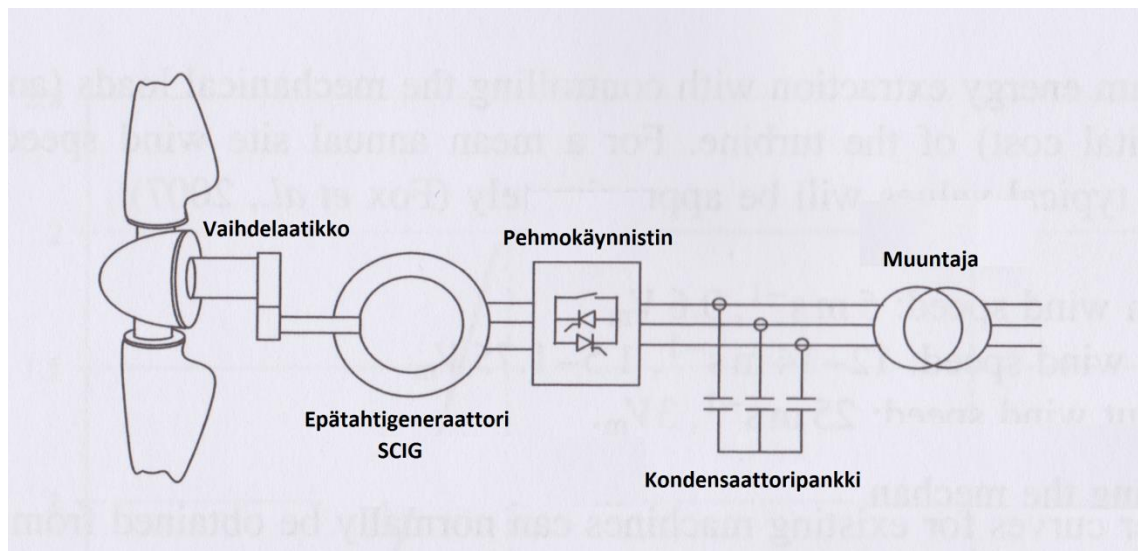
4 TUULIVOIMALATOPOLOGIAT

4.1 Vakionopeuksinen tuulivoimala

Vakionopeuksisen (fixed speed) tuulivoimalan toiminta perustuu siihen, että sen roottori pyörii kokoajan lähes samalla nopeudella. Generaattorityyppinä vakionopeuksisessa tuulivoimalassa käytetään häkkikämmittyä epätahtigeneraattoria (squirrel cage induction generator, SCIG). Roottorin pyörimisnopeus määräytyy verkon taajuuden, vaihdelaatikon välityssuhteen ja generaattorin napapariluvun perusteella. Vakionopeuksisen tuulivoimalan eduksi voidaan katsoa yksinkertainen, luotettava ja halpa rakenne. Sen huonona puolena voidaan pitää sitä, että muutokset tuulen nopeudessa aikaansaavat mekaanisen tehon vaihtelua, joka heijastuu myös syöttötehoon. Lisäksi vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa tuulen nopeuden muutokset aiheuttavat mekaanisia rasituksia, jotka voivat rikkoa vaihdelaatikon. Tehonsäätömenetelmänä vakionopeuksisessa tuulivoimalassa voidaan käyttää lapakulmasäätöä, passiivista sakkaussäätöä tai aktiivista sakkaussäätöä. (Ackerman 2005, 53-54; Twidell & Gaudiosi 2009, 78)

Vakionopeuksinen tuulivoimala voidaan toteuttaa myös kaksinopeuksisena ratkaisuna. Sen tarkoituksena on parantaa energian talteenottoa, vähentää sähköisiä häviöitä roottorissa ja vähentää tuulivoimalasta aiheutuvia meluhaittoja. Kahdella eri pyörimisnopeudella saadaan optimoitua vuosittaista energiantuotantoa paremmaksi oletettujen tuulen nopeuksien perusteella. Kaksinopeuksinen generaattori on toteutettu siten, että siihen on rakennettu kaksoiskäämitys staattoriin, jolla saadaan generaattorin napaparilukua muutettua, joka taas muuttaa generaattorin tahtinopeutta ja siten myös roottorin pyörimisnopeutta. (Patel 2006, 111-112)

Vakionopeuksisen tuulivoimalan roottori on kytketty vaihdelaatikkoon, jonka välityksellä se on kytketty epätahtigeneraattorin roottoriin. Epätahtigeneraattori on kytketty pehmokäynnistimeen, joka edelleen muuntajan kautta sähköverkkoon. Lisäksi loistehon kompensointia varten järjestelmään on lisätty kondensaattoripankki. Vakionopeuksisen tuulivoimalan periaatekuva on esitettyä seuraavassa kuviossa (Kuvio 11).

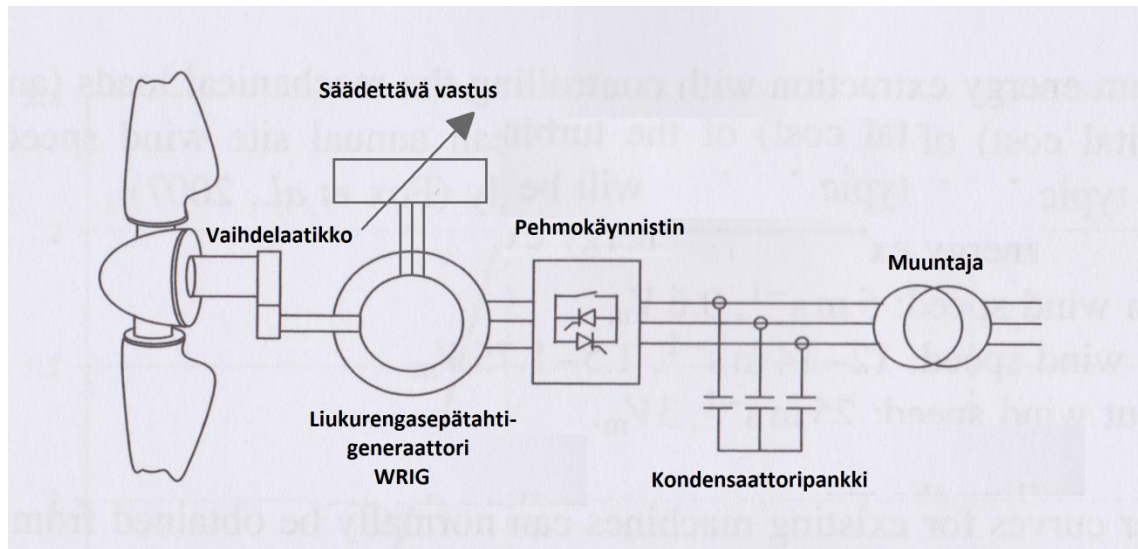


Kuvio 11. Periaatekuva vakionopeuksisesta tuulivoimalasta ja sen komponenteista. (Anaya-Lara ym. 2009, 8, muokattu)

4.2 Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala

Rajoitetusti muuttuvanopeuksisen (limited variable speed) tuulivoimalan toiminta perustuu siihen, että liukurengasepätahtigeneraattorin (wound rotor induction generator, WRIG) roottorikäimityksissä on säädettävä vastus, jolla generaattorin pyörimisnopeutta ja jättämää voidaan säätää 0-10 % välillä. Resistanssia voidaan säätää tuulen puuskien aikana siten, että resistanssia kasvatetaan, joka lisää jättämää ja kasvattaa pyörimisnopeutta. Tuulenpuuskan jälkeen resistanssia pienennetään, joka palauttaa pyörimisnopeuden hitaammaksi. Liukuharjat sekä liukurenkaat tekevät tämän tyyppin generaattorista monimutkaisemman ja koska kuluvia osia on enemmän, se nostaa kunnossapitokustannuksia ja kunnossapitotarpeen määrää. (Twidell & Gaudiosi 2009, 82; Patel 2006, 111-112)

Rajoitetusti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan toiminta on lähes samanlainen, kuin aiemmin esitetystä kuviossa (Kuvio 11) olevan vakionopeuksisen tuulivoimalan vastaava, mutta generaattorina toimii liukurengasepätahtigeneraattori, jonka roottorikäimitykseen on liitetty säädettävä vastus. Rajoitetusti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan periaatekuva on esitettyä seuraavassa kuviossa (Kuvio 12).



Kuvio 12. Periaatekuva rajoitetusti muuttuvanopeukisesta tuulivoimalasta ja sen komponenteista. (Anaya-Lara ym. 2009, 8, muokattu)

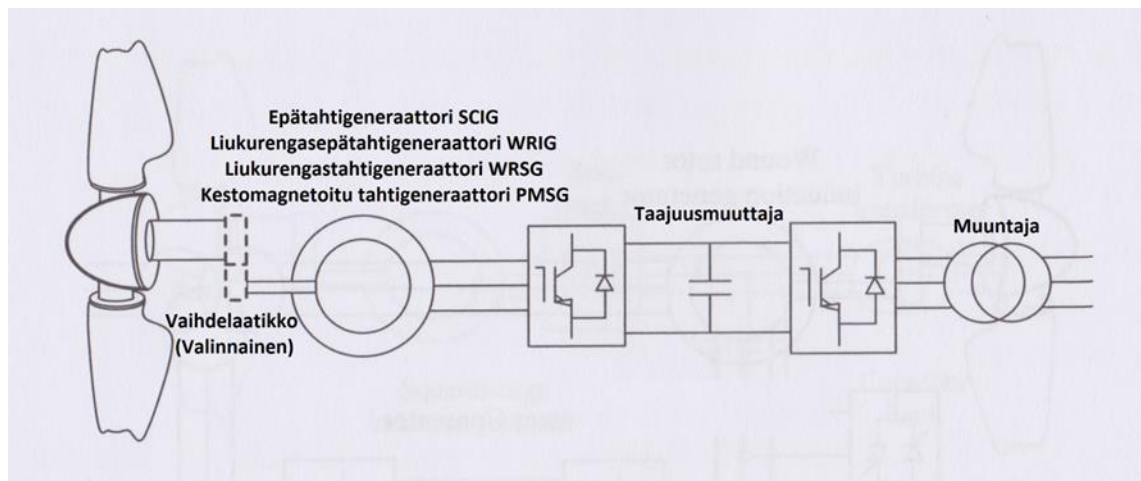
4.3 Muuttuvanopeuksinen täysohjattu tuulivoimala

Muuttuvanopeuksisen täysohjatun tuulivoimalan toiminta perustuu siihen, että roottorin pyörimisnopeus muuttuu tuulen nopeuden muuttuessa. Termillä täysohjattu tarkoitetaan sitä, että kaikki teho kulkee taajuusmuuttajan kautta sähköverkkoon, joten taajuusmuuttaja pitää myös mitoittaa tuulivoimalan generaattorin nimellistehon mukaisesti.

(Renewable Energy in Power Systems s.144-145)

Generaattorityyppeinä tässä tuulivoimalassa voidaan käyttää häkkikäämittyä epätahtigeneraattoria (SCIG), liukurengastahtigeneraattoria (WRSG), liukurengasepätahtigeneraattoria (WRIG) tai kestmagnetoitua tahtigeneraattoria (PMSG). Tuulivoimalassa ei tarvita vaihdelaatikkoa, jos käytössä on riittävän moninapainen liukurengastahtigeneraattori (WRSG) tai kestmagnetoitu tahtigeneraattori (PMSG), tällaista tuulivoimalaa kutsutaan suoravetoiseksi (direct drive) tuulivoimalaksi. (Ackerman 2005, 59, 67, 69)

Muuttuvanopeuksisen täysohjatun tuulivoimalan roottori on yhteydessä vaihdelaatikkoon tai vaihtoehtoisesti roottori on suoraan yhteydessä generaattoriin. Generaattori on kytketty täystehotaajuusmuuttajaan, josta se on yhteydessä sähköverkkoon muuntajan kautta. Muuttuvanopeuksisen täysohjatun tuulivoimalan periaatekuva on esitettyä seuraavassa kuviossa (Kuvio 13).



Kuvio 13. Periaatekuva muuttuvanopeuksista täysohjatusta tuulivoimalasta ja sen komponenteista. (Anaya-Lara ym. 2009, 10, muokattu)

5 KAKSOISSYÖTETTY RAJOITETUSTI MUUTTUVANOPEUKSINEN TUULIVOIMALA

5.1 Toimintaperiaate

Kaksoissyötetyn rajoitetusti muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan eli DFIG-tuulivoimalan (double fed induction generator, DFIG) generaattorina käytetään liukurengasepätahtigeneraattoria (wound rotor induction generator, WRIG). Liukurenkaiden kautta voidaan syöttää virtaa roottorikäimityksiin sekä ottaa virtaa roottorikäimityksistä ulos. Muuttuvanopeuksinen toiminta saadaan aikaan syöttämällä ohjattava jännite roottoriin, jolla saadaan haluttu jättämätaajuus aikaan. Tehon syöttö roottorikäimityksiin kulkee osatehoisen taajuusmuuttajan kautta. Taajuusmuuttaja erottaa sähköverkon sähköisen taajuuden roottorin mekaanisesta taajuudesta, joka aikaansaa muuttuvanopeuksisen toiminnan tuulivoimalassa. (Anaya-Lara ym. 2009, 8-9)

Tuulivoimalan tarkoituksena on syöttää vakiotaajuista (50 Hz) jännitettä sähköverkkoon, jolloin staattorin taajuuden f_s tulee olla sama kuin sähköverkon taajuus $f_{\text{Sähköverkko}}$. Jotta staattorin taajuus f_s saadaan samaksi kuin sähköverkon taajuus $f_{\text{Sähköverkko}}$, tulee roottorikäimityksiin syöttää tietyn taajuista jännitettä. Roottoriin syötettävä taajuus f_r riippuu roottorin pyörimisnopeudesta n_r . (Electricity and New Energy, 2011, 35)

Asiaa voidaan tarkastella matemaattisten kaavojen avulla. Jos staattorin pyörivän magneettikentän ja pyörivän roottorin välillä on jättämää s , roottorikäimityksiin indusoituu tietyn taajuista virtaa. Tällöin roottorin taajuus f_r on yhtä suuri kuin jättämätaajuus $s \cdot f_s$. Roottorin taajuus f_r saadaan laskettua kaavalla 7. (Anaya-Lara ym. 2009, 57)

$$f_r = s \cdot f_s \quad (7)$$

, jossa

f_s staattorin taajuus [Hz]

Seuraavaksi on tarkasteltuna kolme eri tapausta, miten roottorin pyörimisnopeus n_r vaikuttaa roottorin syötettävään taajuuteen f_r , kun staattorin taajuus f_s sekä sähköverkon taajuus $f_{\text{Sähköverkko}}$ pysyvät samansuuruisina koko ajan.

Staattorin taajuus f_s saadaan laskettua kaavalla 8. Kaavassa 8 on esitettyä generaattorin napaluku N , eikä esimerkiksi luvussa 3.1 esitettyssä kaavassa (Kaava 6) generaattorin napapariluku p . Tämän vuoksi jakajana käytetään lukua 120 ($2 \cdot 60$), jotta generaattorin pyörimisnopeus saadaan yhdistettyä taajuuteen. (Electricity and New Energy, 2011, 33-34)

$$f_s = \frac{n_r \cdot N}{120} \quad (8)$$

, jossa

N generaattorin napaluku

Roottoriin syötettävä taajuus f_r eli se taajuus, jolla sähköverkon taajuus $f_{\text{sähköverkko}}$ ja staattorin taajuus f_s saadaan pysymään samana, saadaan laskettua kaavalla 9. (Electricity and New Energy, 2011, 36)

$$f_r = f_{\text{sähköverkko}} - \frac{n_r \cdot N}{120} \quad (9)$$

, jossa

$f_{\text{sähköverkko}}$ sähköverkon taajuus [Hz]

Oletetaan generaattorin olevan 4-napainen 1500 rpm:n epätahtigeneraattori. Tapauksessa, jossa roottori pyörisi samaa tahtia generaattorin tahtinopeuden kanssa eli jättämää s ei olisi lainkaan, tällöin roottoriin syötettävä taajuus f_r saadaan laskettua kaavalla 9.

$$f_r = f_{\text{sähköverkko}} - \frac{n_r \cdot N}{120} = 50\text{Hz} - \frac{1500\text{rpm} \cdot 4}{120} = 0\text{Hz} \quad (9)$$

Toisessa tapauksessa, jossa roottori pyörisi tahtinopeutta nopeammin eli jättämä olisi negatiivinen, roottoriin syötettävä taajuus f_r saadaan laskettua kaavalla 9.

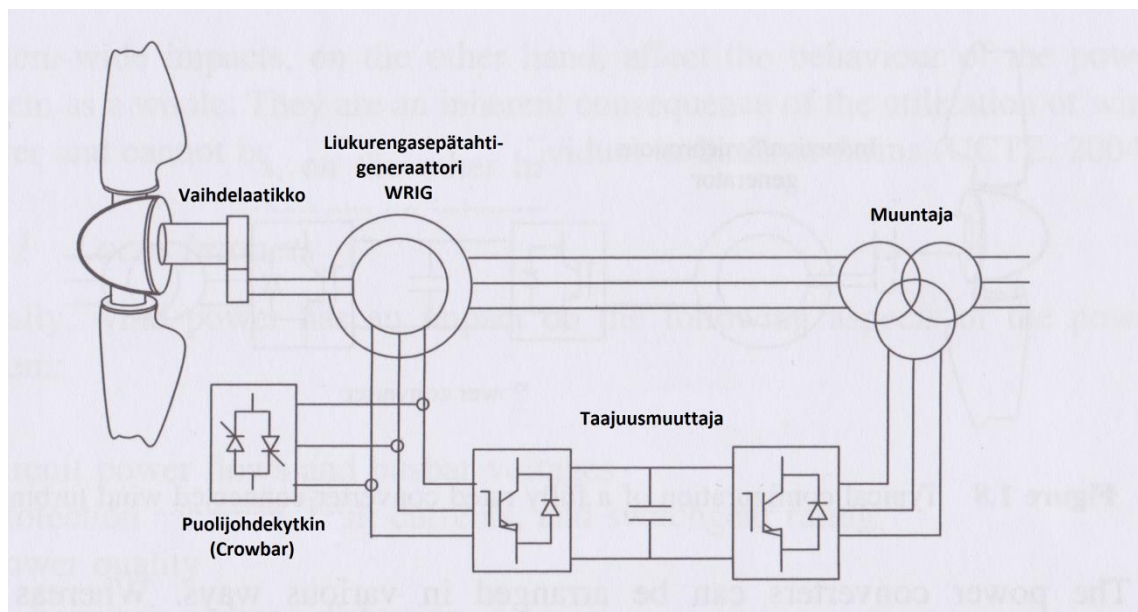
$$f_r = f_{\text{sähköverkko}} - \frac{n_r \cdot N}{120} = 50\text{Hz} - \frac{1600 \cdot 4}{120} = -3,33\text{Hz} \quad (9)$$

Viimeisessä tapauksessa, jossa roottori pyörisi tahtinopeutta hitaammin eli jättämä olisi positiivinen, roottoriin syötettävä taajuus f_r saadaan laskettua kaavalla 9.

$$f_r = f_{\text{sähköverkko}} - \frac{n_r \cdot N}{120} = 50\text{Hz} - \frac{1400 \cdot 4}{120} = 3,33\text{Hz} \quad (9)$$

Tulosten perusteella voidaan todeta, että aina kun roottorin nopeus n_r poikkeaa generaattorin tahtinopeudesta n_n , roottorille syötettävällä taajuudella f_r kompensoidaan staattorin taajuutta f_s , jotta ne ovat samansuuruisia sähköverkon taajuuden $f_{\text{sähköverkko}}$ kanssa.

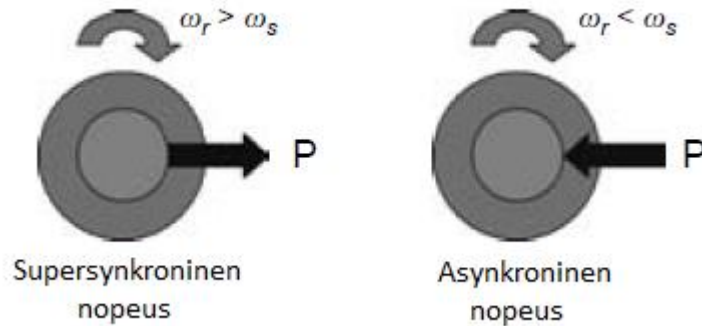
DFIG- tuulivoimalassa tuulivoimalan roottori on yhteydessä vaihdelaatikkoon, jonka kautta se on kytketty liukurengasepähtigeneraattoriin. Generaattorin roottoripiiri on kytketty osatehoiseen taajuusmuuttajaan, jonka kautta se on kytkettynä muuntajaan sekä edelleen sähköverkkoon. Lisäksi roottoripiiri on kytkettynä tuulivoimalan suojauskomponenttiin (puolijohdekytkin, crowbar) tuulivoimalan vikatilanteita varten. Generaattorin staattori on kytketty suoraan muuntajaan, jonka kautta se on yhteydessä sähköverkkoon. Alla olevassa kuvassa (Kuvio 14) on esitetty periaatekuva DFIG- tyyppisestä tuulivoimalasta.



Kuvio 14. Periaatekuva DFIG-tuulivoimalasta ja sen komponenteista. (Anaya-Lara ym. 2009, 9, muokattu)

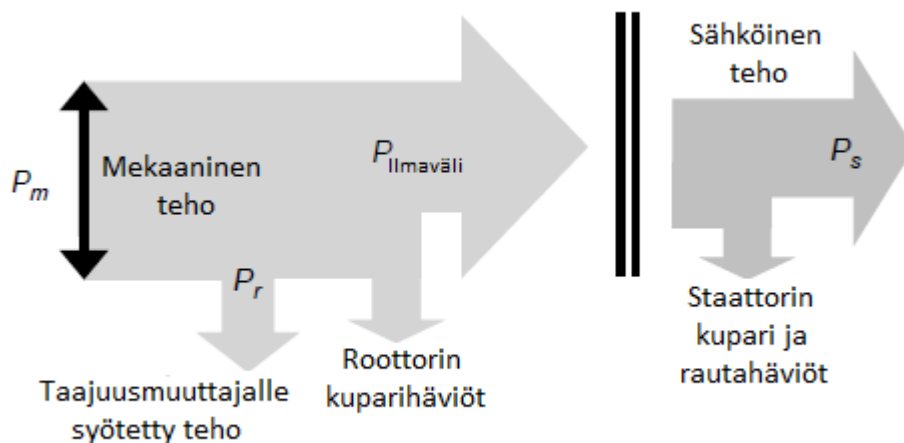
DFIG-tuulivoimalassa tehoa voidaan syöttää sähköverkkoon staattorin ja roottorin kautta, mutta tehoa voidaan syöttää myös sähköverkosta roottoriin päin, riippuen generaattorin pyörimisnopeudesta. Jos generaattorin roottori pyörii tahtinopeutta nopeampaa, silloin roottorista syötetään tehoa sähköverkkoon taajuusmuuttajan kautta, mutta jos generaattorin roottori pyörii tahtinopeutta hitaammin, silloin sähköverkko syöttää tehoa root-

toriin taajuusmuuttajan kautta. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 15) on esitettyä tehonsiirron suunta riippuen siitä, pyöriikö roottori supersynkronisella eli tahtinopeutta nopeammalla nopeudella ($\omega_r > \omega_s$) vai asynkronisella eli tahtinopeutta hitaammalla nopeudella ($\omega_r < \omega_s$). (Anaya-Lara ym. 2009, 77-78)



Kuvio 15. Tehonsiirron suunnat DFIG- tuulivoimalassa. (Fox ym. 2007, 74, muokattu)

Seuraavassa kuvassa (Kuvio 16) on esitettyä DFIG-tuulivoimalan jatkuvan tilan mekaanisen tehon sekä sähköisen teho jakautuminen. Mekaaninen teho P_m on tuulivoimalan roottorista saatu teho. Generaattorin roottorin teho on P_r , joka on myös samalla taajuusmuuttajalle syötetty teho. $P_{\text{Ilmaväli}}$ on teho, jota syötetään generaattorin ilmavälissä roottorilta staattorille. P_s on staattorilta sähköverkkoon syötetty teho. (Anaya-Lara ym. 2009, 80)



Kuvio 16. Tehon jakautuminen DFIG- tuulivoimalassa jatkuvassa tilanteessa. (Fox ym. 2007, 74, muokattu)

Jos staattorin häviöt jätetään huomioimatta, silloin ilmvälin teho $P_{\text{Ilmväli}}$ saadaan laskettua kaavalla 10. (Fox ym. 2007, 73)

$$P_{\text{Ilmväli}} = P_s \quad (10)$$

, jossa

P_s staattorin teho [W]

Roottorin häviöt huomioimatta, ilmvälin teho $P_{\text{Ilmväli}}$ saadaan laskettua kaavalla 11. (Fox ym. 2007, 75)

$$P_{\text{Ilmväli}} = P_m - P_r \quad (11)$$

, jossa

P_m mekaaninen teho [W]

P_r roottorin teho [W]

Yhdistämällä kaavat 10 ja 11, staattorin teho P_s saadaan laskettua kaavalla 12. (Fox ym. 2007, 75)

$$P_s = P_m - P_r \quad (12)$$

Kaava 12 voidaan esittää myös generaattorin vääntömomenteilla T kaavalla 13. (Fox ym. 2007, 75)

$$T \cdot \omega_s = T \cdot \omega_r - P_r \quad (13)$$

, jossa

T vääntömomentti [Nm]

ω_s staattorin pyörivän magneettikentän pyörimisnopeus [rad/s]

ω_r roottorin pyörimisnopeus [rad/s]

Uudelleen järjestämällä tunnuksat kaavasta 13, roottorin teho P_r saadaan laskettua kaavalla 14. (Fox ym. 2007, 75)

$$P_r = -T \cdot (\omega_s - \omega_r) \quad (14)$$

Roottorin tehon P_r suuruus on riippuvainen staattorin tehosta P_s ja generaattorin jättämästä s , jolloin roottorin teho P_r saadaan laskettua kaavalla 15. Tätä kaavaa ja sen tarkoitusta on avattu paremmin jäljempänä luvussa 5.2 kaavalla 16. (Fox ym. 2007, 75)

$$P_r = -s \cdot T \cdot \omega_s = -s \cdot P_s \quad (15)$$

5.2 Asiaa taajuusmuuttajasta

DFIG- tuulivoimalassa käytetään osatehoista taajuusmuuttajaa, koska taajuusmuuttajan tehtävänä on käsitellä ainoastaan roottorin tehoa, eikä koko generaattorin tehoa, kuten täysiohjatussa tuulivoimalassa. Tyypillisesti taajuusmuuttajan teho on noin 30 % tuulivoimalan nimellisestä tehosta. Tämän vuoksi taajuusmuuttajan tehohäviöt vähenevät, verrattuna järjestelmään, jossa taajuusmuuttaja on täysitehoinen ja teho kulkee kokonaisuudessaan taajuusmuuttajan kautta. Lisäksi järjestelmän kustannukset pienenevät, kun käytetään osatehoista taajuusmuuttajaratkaisua. (Fletcher & Yang 2010, 11)

Mietittäessä termiä rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, nimitys tulee siitä, että generaattorin roottori voi pyöriä ± 30 % nimellisestä nopeudesta. Tämä johtuu jättämästä, joka sallii roottorin pyörimisen staattoriin nähden tietyllä alueella. Generaattorin roottorin pyörimisnopeudessa on otettu huomioon generaattorin napapariluvut, vaihdelaatikon välityssuhde ja tuulivoimalan kierrosnopeus. Seuraavassa asiaa on käsitelty matemaattisten kaavojen avulla. (Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä 2009, 10)

Muokataan aiemmin luvussa 5.1 esitettyä kaavaa (Kaava 15) helpommin ymmärrettävään muotoon, jolloin tuulivoimalan ollessa jatkuvassa tilanteessa roottoriin kytketty osatehoinen taajuusmuuttaja $P_{\text{Taajuusmuuttaja}}$ eli siis aikaisemmin kaavassa 15 esitetty roottorin teho P_r , ottaa epätahtigenaattorin staattorin tehosta P_s seuraavan suuruisen osan, joka saadaan laskettua kaavalla 16. (Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä 2009, 15)

$$P_{\text{Taajuusmuuttaja}} = -s \cdot P_s \quad (16)$$

Kaavassa 16 on jätetty huomioimatta generaattorin roottorin ja staattorin häviöt. Häviöitä aiheuttavat esimerkiksi aiemmin luvussa 5.1 esitetystä kuviossa (Kuvio 16) näkyvillä olevat roottorin kuparihäviöt sekä staattorin kupari- ja rautahäviöt.

Seuraavaksi lasketaan esimerkkinä lasku, johon kiteytyy yksi DFIG- tuulivoimalan periaatteista. Koska generaattorin roottori pyörii maksimissaan $\pm 30\%$ nimellisestä nopeudesta, se voidaan todistaa seuraavalla tavalla.

Lasketaan aluksi generaattorin jättämä s luvun 3.1 kaavalla (Kaava 5) olettaen, että käytössä on nelinapainen epätahtigeneraattori eli sen nimellinen pyörimisnopeus on 1500 rpm ja halutaan generaattorin roottorin pyörivän 30% staattorin pyörivää magneettikenttää nopeammin eli tässä tapauksessa roottorin pyörimisnopeus on 1950 rpm.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{1500 \text{rpm} - 1950 \text{rpm}}{1500 \text{rpm}} = -0,3 \quad (5)$$

Kuten jo aiemmin luvussa 3.1 todettiin, jättämän s tulee olla negatiivinen, kun kyseessä on generaattorikäyttö.

Lasketaan seuraavaksi taajuusmuuttajalle syötetty pätöteho $P_{\text{Taajuusmuuttaja}}$ olettaen, että tuulivoimala on nimellisteholtaan 2 MW. Koska jättämän s arvoksi saatiin -0,3 saadaan taajuusmuuttajalle syötetty pätöteho $P_{\text{Taajuusmuuttaja}}$ laskettua kaavalla 16.

$$P_{\text{Taajuusmuuttaja}} = -s \cdot P_s = -0,3 \cdot 2 \text{MW} = -0,6 \text{MW} \quad (16)$$

Taajuusmuuttajalle syötetyn pätötehon $P_{\text{Taajuusmuuttaja}}$ arvoksi saatiin -0,6 MW, joten sen prosentuaalinen osuus tuulivoimalan nimellistehosta 2MW saadaan laskettua kaavalla 17.

$$\frac{-0,6 \text{MW}}{2 \text{MW}} = -0,3 = -30\% \quad (17)$$

Taajuusmuuttajalle syötetyn pätötehon $P_{\text{Taajuusmuuttaja}}$ prosentuaaliseksi osuudeksi tuulivoimalan nimellistehosta saatiin -30%. Jos jättämä s olisi -0,2, tällöin taajuusmuuttajalle syötetyn pätötehon $P_{\text{Taajuusmuuttaja}}$ arvo olisi -20%. Taajuusmuuttajaa mitoittaessa riittää, että se pystyy käsittelemään roottoripiirin tehon P_r , eikä sen tarvitse käsitellä koko

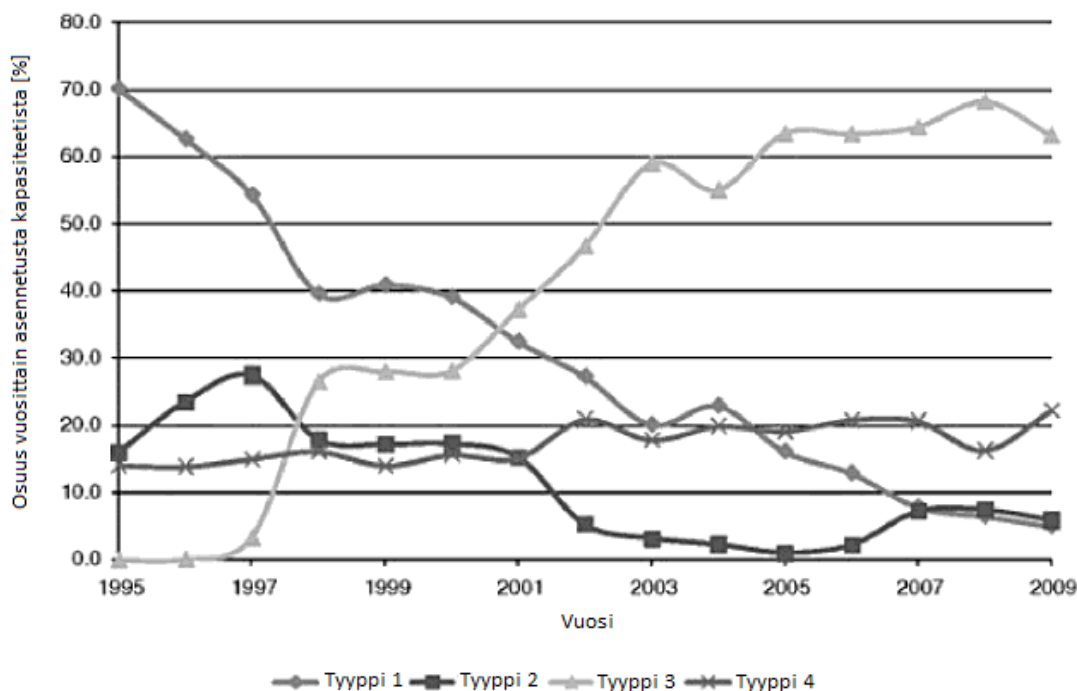
tuulivoimalan tehoa, kuten täysohjatun tuulivoimalan tapauksessa. Tämän vuoksi DFIG- tuulivoimalan taajuusmuuttajaa voidaan kutsua osatehoiseksi taajuusmuuttajaksi.

Epätahtigeneraattorille on luotava pyörivä magneettikenttä sen toiminnan mahdollistamiseksi, johon lähes kaikkien sähkökoneiden toiminta perustuu. DFIG- tuulivoimaloissa käytettävissä liukurengasepähtigeneraattoreissa magnetointi voidaan toteuttaa sähköverkkoon yhteydessä olevan staattorikäämityksen avulla, roottoripiiriin kytketyllä taajuusmuuttajalla tai niillä molemmilla. Jatkuvassa tilanteessa optimaalinen tilanne olisi se, että tuulivoimala tuottaisi pelkästään pätötehoa sähköverkkoon, jolloin loistehoa ei syntyisi lainkaan. Tällaisessa tilanteessa magnetointi tapahtuisi pelkästään roottoripiirin kautta eli staattoripiiri ei osallistuisi magnetointiin. Taajuusmuuttajan roottoripiirin puoleinen silta tuottaisi liukurengasepähtigeneraattorin magnetointiin tarvittavan loistehon. (Korpinen 1998a, 1; Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä 2009, 16)

6 TUULIVOIMALOIDEN TEKNIS-TALOUDELLINEN VERTAILU

6.1 Yleistä

Vertailtaessa eri tuulivoimalakonsepteja tämän päivän tuulivoimamarkkinoilla, kyseen tulevat lähinnä DFIG-tuulivoimalat eli kaksoissyötetyt rajoitetusti muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat sekä muuttuvanopeuksiset täysohjatut tuulivoimalat, kuten PMSG-tuulivoimalat. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 17) on esitettyä eri tuulivoimalakonseptien markkinaosuudet vuosien 1995 ja 2009 välillä. Kuviossa tyyppi 1 on vakionopeuksinen tuulivoimala, tyyppi 2 on rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, tyyppi 3 kaksoissyötetty rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala ja tyyppi 4 muuttuvanopeuksinen täysohjattu tuulivoimala.



Kuvio 17. Tuulivoimalakonseptien markkinaosuudet vuosina 1995-2009. (Ackerman 2012, muokattu)

Kuviosta (Kuvio 17) nähdään, että DFIG-tuulivoimalat (Tyyppi 3) ovat ottaneet ylivoimaisen johdon markkinaosuudessa verrattuna muihin tuulivoimalakonsepteihin. Vakionopeuksisten tuulivoimaloiden (Tyyppi 1) markkinaosuus on laskenut tasaisesti vuoden 1995 noin 70 prosentista vuoden 2009 noin 5 prosenttiin. Vuonna 2009 rajoitetusti muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden (Tyyppi 2) markkinaosuus oli noin kuusi prosenttia, DFIG-tuulivoimaloiden (Tyyppi 3) noin 63 prosenttia ja muuttuvanopeuksisten

täysohjattujen tuulivoimaloiden (Tyyppi 4) noin 22 prosenttia. Muuttuvanopeuksisista täysohjatuista tuulivoimaloista ei voida tässä yhteydessä puhua pelkästään PMSG-tuulivoimaloista, koska osaa niistä ei ole valmistettu kestromagneettigeneraattoreista.

6.2 Ominaisuuksien vertailu

Vertailtaessa DFIG-tuulivoimalan ja PMSG-tuulivoimalan ominaisuuksia, tarkastellaan molemmista tuulivoimalatyypistä tärkeimpiä toimintaan liittyviä seikkoja sekä listataan niiden hyviä ja huonoja puolia.

DFIG-tuulivoimalan ominaisuuksiin liittyy olennaisena osana se, että se on varustettu liukurengasepähtigeneraattorilla ja osatehoisella, noin 30 % tuulivoimalan nimellistehosta mitoitettulla taajuusmuuttajalla, joka taas mahdollistaa muuttuvanopeuksisen toiminnan noin ± 30 % pyörimisnopeuden alueella. Tämä tekee siitä houkuttelevan ja suosituksen ratkaisun ekonomisesta näkökulmasta katsottuna. (Li & Chen 2007, 3)

Vaihdelaatikko on DFIG-tuulivoimaloissa välttämätön, koska DFIG-tuulivoimaloissa käytetyissä generaattoreissa niiden roottorin pyörimisnopeudet ovat kaukana tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeuksista. Lisäksi jopa 70 % vuosittaisista tehohäviöistä syntyy vaihdelaatikon vuoksi. (Chen & Li 2007, 4; Pijl ym. 2006, 5)

Koska tehon siirtoon käytetään roottoripiirissä liukurenkaita ja liukuharjoja, ne kuluvat ja tarvitsevat kunnossapitoa aikojen kuluessa. Lisäksi niiden vuoksi voi aiheutua vikatilanteita tuulivoimalassa ja sähköisiä häviöitä. (Li & Chen 2007, 3)

DFIG-tuulivoimala on fyysisesti keveimpiä tuulivoimalaratkaisuja, joissa käytetään standardikomponentteja, joka selittää sitä, miksi se on kaupallisesti suosituin tuulivoimalakonsepti. (Pijl ym. 2006, 7)

PMSG-tuulivoimalan hyviin puoliin kuuluu sen korkea hyötysuhde ja energiantuotanto. Lisäksi luotettavuus on paremmalla tasolla DFIG-tuulivoimalaan verrattuna, koska mekaanisia osia kuten vaihdelaatikkoa tai liukurenkaita ei ole PMSG-tuulivoimalassa. (Li & Chen 2007, 5; Abrahamsen ym. 2013, 4)

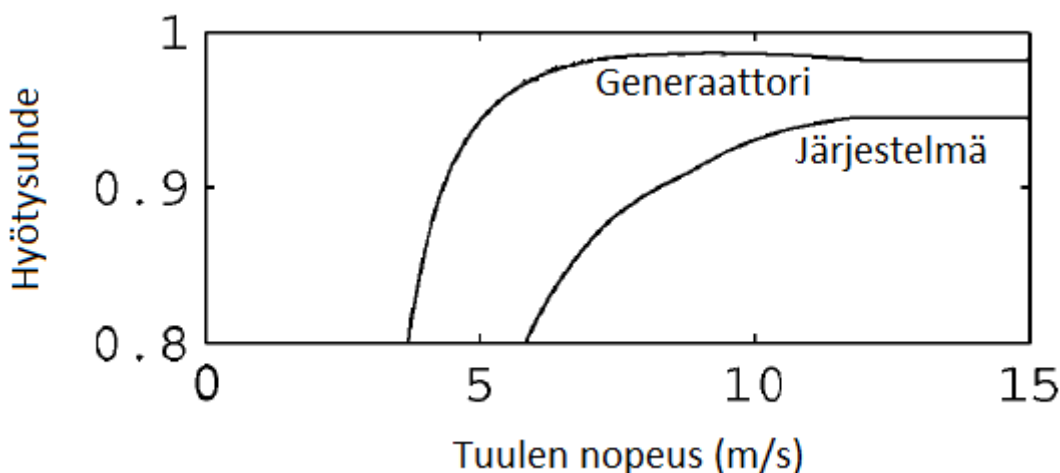
Koska PMSG-tuulivoimalassa käytetään kestmagneetteja, siihen ei tarvita ulkoista magnetointipiiriä herätemagneettikentän luomiseen. Huonona puolena kestmagneeteissa on niiden korkea hinta ja niiden mahdollinen demagnetisoituminen korkeissa lämpötiloissa. (Li & Chen 2007, 5)

Huonoin puoli PMSG-tuulivoimalassa on se, että vaihteettomana ratkaisuna sen generaattorista pitää rakentaa sellainen, että se pystyy toimimaan hitailla pyörimisnopeuksilla, joka tekee sitä fyysisesti suurikokoisen, painavan ja kalliin. (Abrahamsen ym. 2013, 4)

6.3 Suorituskyky ja energiantuotanto

Tuulivoimaloiden suorituskykyä vertailtaessa voidaan ottaa vertailuun niiden hyötysuhteet sekä vuosittaiset energiantuotanto-odotukset.

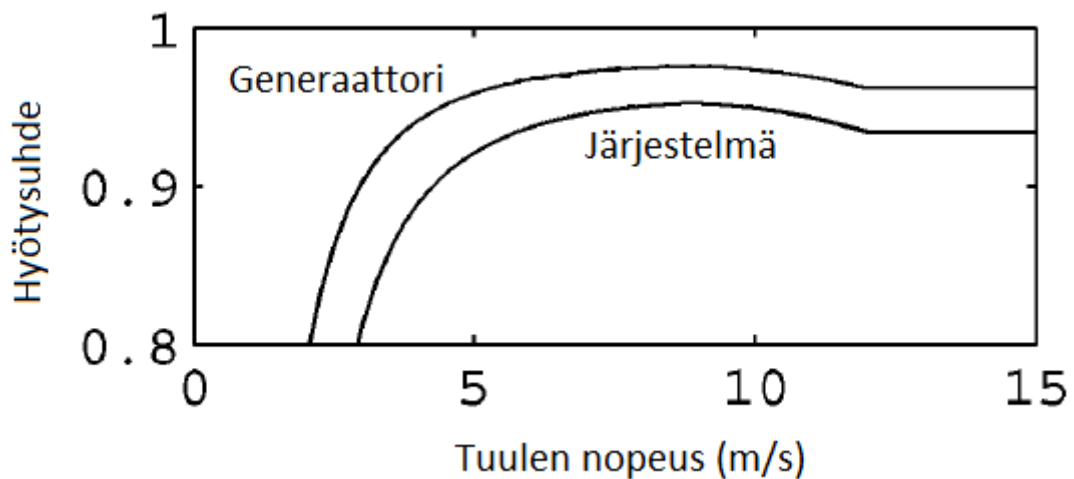
DFIG-tuulivoimalassa tehohäviöt koostuvat kuparihäviöistä, rautahäviöistä, taajuusmuuttajan häviöistä ja suurimmaksi osaksi vaihdelaatikon häviöistä. DFIG-tuulivoimalan taajuusmuuttajan häviöt ovat noin 1/3 verrattuna PMSG-tuulivoimalan taajuusmuuttajan häviöihin, johtuen osatehoisesta taajuusmuuttajasta. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 18) on esitetty erään kolmiportaisella vaihdelaatikolla varustetun 3 MW:n DFIG-tuulivoimalan hyötysuhteen käyttäytyminen tuulen nopeuden muuttuessa. (Pijl ym. 2006, 5)



Kuvio 18. 3 MW:n DFIG-tuulivoimalan hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona. (Pijl ym. 2006, 5, muokattu)

Kuviosta (Kuvio 18) nähdään, että DFIG-tuulivoimala saavuttaa hyvän hyötysuhteen vasta tuulen nopeuden ollessa 12 m/s, joka on tässä tapauksessa myös sen nimellinen tuulen nopeus. Tätä alemmilla tuulen nopeuksilla DFIG-tuulivoimalan hyötysuhde ei yllä kovin hyvään hyötysuhteeseen.

PMSG-tuulivoimalassa tehohäviöt koostuvat kuparihäviöistä, rautahäviöistä, taajuusmuuttajan häviöistä ja koska suoravetoisessa tuulivoimalassa ei tarvita vaihdelaatikkaa, ei siitä täten synny tehohäviöitäkään. Koska PMSG-tuulivoimalan taajuusmuuttaja on täysitehoinen, siitä syntyvät tehohäviöt ovat kolminkertaiset DFIG-tuulivoimalaan verrattuna. (Pijl ym. 2006, 5)



Kuvio 19. 3 MW:n PMSG- tuulivoimalan hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona. (Pijl ym. 2006, 6, muokattu)

Kuviosta (Kuvio 19) nähdään, että PMSG-tuulivoimalan hyötysuhde nousee hyvään arvoon jo silloin, kun tuulen nopeus on noin 4 m/s. Energian tuotanto on täten parempaa varsinkin pienillä tuulen nopeuksilla DFIG-tuulivoimalaan verrattuna. Pelkästään tuulivoimaloiden generaattorien hyötysuhteita tarkasteltaessa huomataan, että molemmissa tuulivoimaloissa niiden hyötysuhteet nousevat hyvälle tasolle jo alhaisilla tuulen nopeuksilla.

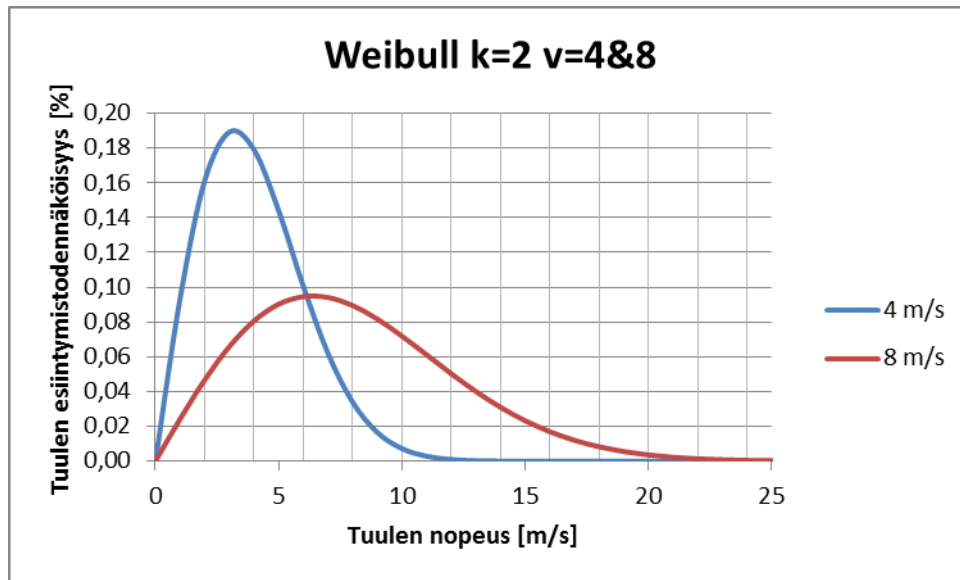
Seuraavaksi on tarkasteltuna ja vertailtuna muutamien tällä hetkellä markkinoilla olevien tuulivoimaloiden tehokäyriä sekä niiden laskennallista vuosittaista energiantuotantoa. Tarkoituksena on tarkastella eri tuulivoimalakonseptien suorituskykyä erilaisilla tuulen olosuhteilla ja katsoa miten tuuliolosuhteet vaikuttavat niiden suorituskykyyn.

Tuulivoimaloiden tehokäyrät on muodostettu valmistajien antamien tehokäyrien perusteella tehokäyrämenetelmällä, joten niiden tarkkuus ei ole täysin oikea, mutta kuitenkin suuntaa antava.

Tarkasteluun on otettu kolme DFIG-tuulivoimalaa eri kokoluokasta, kaksi PMSG-tuulivoimalaa eri kokoluokasta sekä yksi EESG-tuulivoimala, joka on PMSG-tuulivoimalan tavoin vaihteeton tuulivoimalaratkaisu ja varustettu täystehoisella taajuusmuuttajalla. Ongelmaksi vertailussa muodostui täysin saman kokoluokan tuulivoimaloiden löytäminen eri generaattoriratkaisuilla, jonka vuoksi vaihteettomista tuulivoimaloista valittiin nimellisteholtaan hieman pienemmät vaihtoehdot sekä mahdollisesti hieman pyyhkäisyypinta-alaltaan pienemmät vaihtoehdot vertailuun. Lisäksi tehokäyriä ei kaikilla valmistajilla ollut saatavilla. Vertailusta tulee kuitenkin oleellinen asia selvillä tuulivoimaloiden suorituskykyä mietittäessä.

Tuulisuusaineisto on mallinnettu yleisen Weibull-jakauman perusteella, jonka avulla mitatuista tuulen nopeuksista voidaan luoda malli, jossa esitetään tiettyjen tuulen nopeuksien esiintyminen prosentuaalisesti. Weibull-jakaumaan tarvittavat tiedot ovat tuulen keskinopeudet sekä skaalausparametri k . Suomessa vallitsevissa olosuhteissa k -parametrin arvona toimii yleisesti 2. (Suomen tuuliatlas)

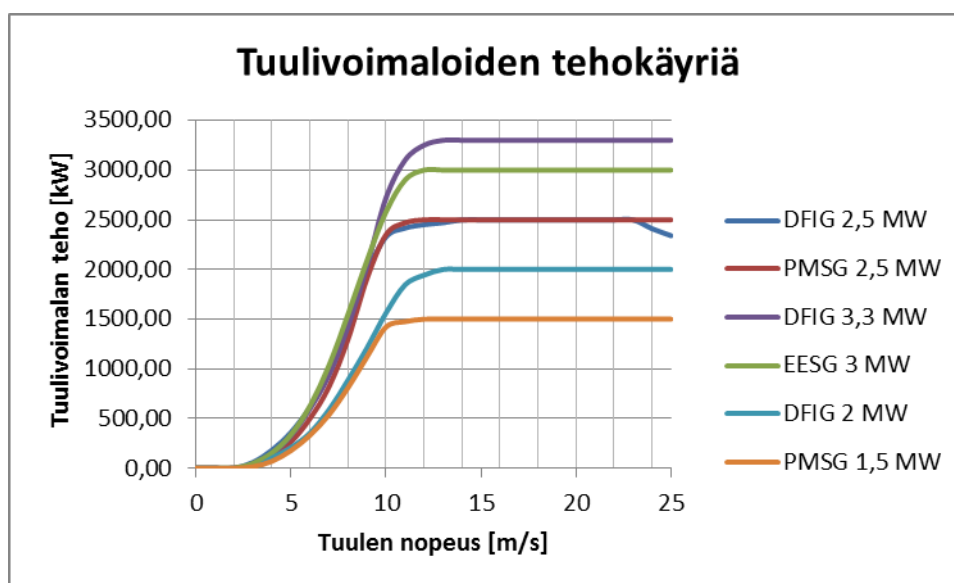
Tässä vertailussa tuulien keskinopeuksiksi on valittu 4 m/s ja 8 m/s sekä skaalausparametri k :n arvoksi 2. Lisäksi tuntien määrä vuodessa on 8760 tuntia, jonka Weibull-jakaumassa esitettyjen tuulien esiintymistodennäköisyys prosentit tarkoittavat. Weibull-jakaumien, tehokäyrien sekä vuosittaisten energiatuotantojen laskelmat ja kuvaajat on tehty Excel-taulukkolaskentaohjelmalla. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 20) on esitettyinä vertailuun muodostetut tuulisuuden Weibull-jakaumat tuulen nopeuksilla 4 m/s ja 8 m/s.



Kuvio 20. Tuulen esiintymistodennäköisyys tuulen nopeuden funktiona.

Kuviosta (Kuvio 20) nähdään, että valitut keskituulen nopeudet eivät ole se yleisin valitseva tuulen nopeus prosentuaalisesti. Lisäksi nähdään, että 8 m/s olevalla Weibull-jakaumalla tuulivoimala pystyy toimimaan ajallisesti merkittävästi enemmän sen nimellisellä tuulen nopeudellaan esimerkiksi tuulivoimalan nimellisen tuulen nopeuden ollessa 12 m/s. Tämä taas edelleen vaikuttaa siihen, että tuulivoimala pystyy toimimaan enemmän sen nimellistehollaan, joka mahdollistaa suuremman energiantuoton.

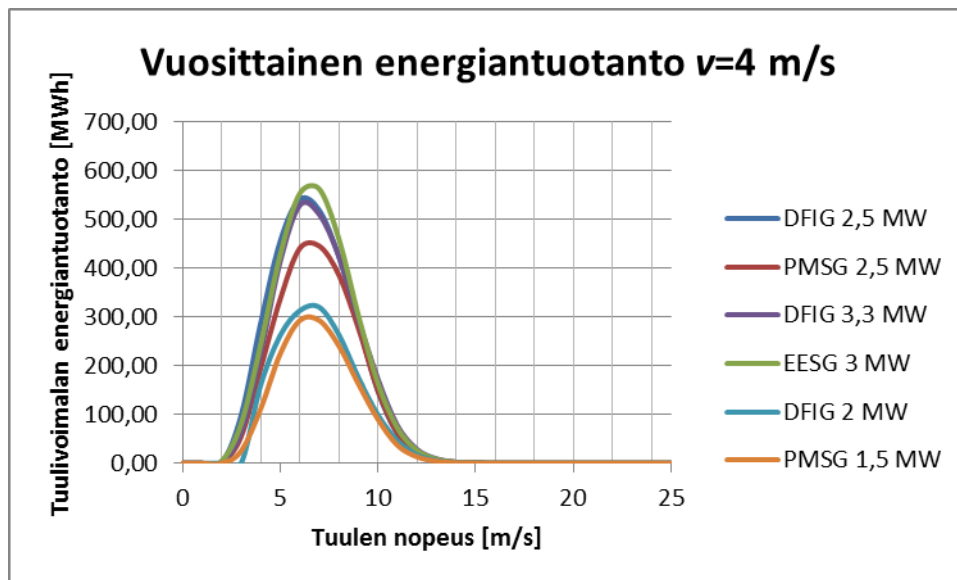
Seuraavaksi tutkitaan kuuden eri tuulivoimalan tehokäyriä, jotka siis kuvaavat tuulivoimalan tehon tuottoa eri tuulen nopeuksilla. Lisäksi tutkitaan niiden vuosittaista energiantuottoa luotujen Weibull-jakaumien pohjalta. Tuulivoimaloiden tehokäyrät on esitettyä kuviossa (Kuvio 21).



Kuvio 21. Tuulivoimalan teho tuulen nopeuden funktiona.

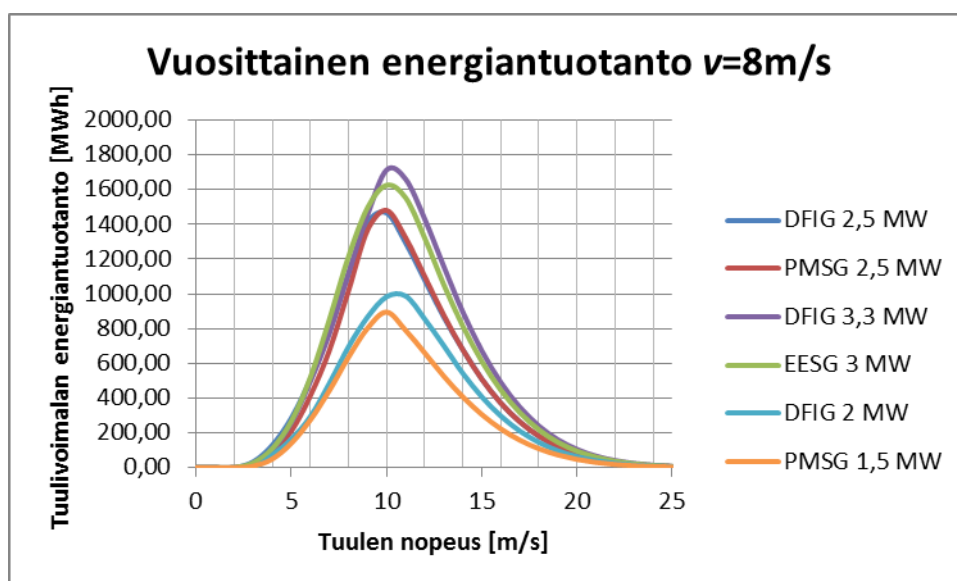
Kuviosta (Kuvio 21) nähdään, että 1,5 MW:n PMSG-tuulivoimala ja 3 MW:n EESG-tuulivoimala alkavat tuottamaan tehoa hyvin jo alhaisemmillä tuulen nopeuksilla hieman niitä suurempiin 2 MW:n ja 3,3 MW:n DFIG-tuulivoimaloihin verrattaessa. 2,5 MW:n luokassa vertailuun valittu PMSG-tuulivoimala ei tuota alhaisillakaan tuulen nopeuksilla vastaavaa DFIG-tuulivoimalaa paremmin, vaikka yleisesti ottaen PMSG-tuulivoimaloiden vahvuuksiin kuuluu nimenomaan niiden hyvä suorituskyky alhaisilla tuulen nopeuksilla, kuten jo aiemmin tässä luvussa tarkasteltiin. Mentäessä kohti tuulivoimaloiden nimellisiä tuulen nopeuksia, 2 MW:n ja 3,3 MW:n DFIG-tuulivoimalat menevät luonnollisesti ohi hieman niitä pienemmistä 1,5 MW:n PMSG-tuulivoimalasta ja 3 MW:n EESG-tuulivoimalasta. Eri nimellistehoisten tuulivoimaloiden suorituskyky tulee paremmin ilmi tarkasteltaessa tuulivoimaloiden vuosittaisia energiantuotanto-odotuksia, jossa huomataan asian olevan mutkikkaampi, mitä alkuun näyttää.

Seuraavaksi tutkitaan tuulivoimaloiden energiantuotanto-odotuksia. Vuosittaiset energiantuotannot molempien luotujen Weibull-jakaumien pohjalta ovat esitettyinä seuraavissa kuvioissa (Kuvio 22 ja 23).



Kuvio 22. Tuulivoimalan energiantuotanto tuulen nopeuden funktiona tuulen keskinopeudella 4 m/s.

Kuviosta (Kuvio 22) nähdään energiantuotanto tapauksessa, jossa tuulen keskinopeus on 4 m/s. Tuulivoimaloiden energiantuotanto eri tuulen nopeuksilla on kohtuullisen tasaista lukuun ottamatta 2,5 MW:n PMSG-tuulivoimalaa, joka hieman yllättäen häviää vertailussa vastaavan kokoiselle DFIG-tuulivoimalalle. 3 MW:n EESG-tuulivoimala tuottaa tehoa hieman paremmin suurempitehoiseen 3,3 MW:n DFIG-tuulivoimalaan verrattuna. 2 MW:n DFIG-tuulivoimalan energiantuotanto on melko tasaisesti edellä 1,5 MW:n PMSG-tuulivoimalaa, mutta ottaen huomioon 0,5 MW:n kokoluokkaeron, erot energiantuotannossa ovat hyvin maltilliset.



Kuvio 23. Tuulivoimalan energiantuotanto tuulen nopeuden funktiona tuulen keskinopeudella 8 m/s.

Kuviosta (Kuvio 23) nähdään energiantuotanto tapauksessa, jossa tuulen keskinopeus on 8 m/s. 2,5 MW:n tuulivoimaloissa PMSG-tuulivoimala tuottaa hyvin tasaisesti DFIG-tuulivoimalaan verrattaessa. 3 MW:n EESG-tuulivoimalan ja 3,3 MW:n DFIG-tuulivoimalan vertailussa voimasuhteet kääntyvät toisinpäin ja tällaisilla tuuliolosuhteilla DFIG-tuulivoimala alkaa tuottaa energiaa paremmin, koska tuulivoimala pystyy toimimaan pitempiä aikoja lähellä sen nimellistä tuulen nopeutta. 2 MW:n DFIG-tuulivoimalan ja 1,5 MW:n PMSG-tuulivoimalan vertailussa DFIG-tuulivoimala luonnollisesti kasvattaa johtoaan PMSG-tuulivoimalaan tuuliolosuhteiden parantuessa samasta syystä, kuin 3 MW:n luokassakin.

Tarkastellaan vuosittaisia energiantuotantoja vielä taulukon muodossa kokonaistuotantojen osalta, jossa on esitettyä kokonaisenergiantuotannot molempien Weibull-jakaumien osalta. Tulokset ovat esitettyä taulukossa (Taulukko 1), jossa parempi energiantuotanto merkitty tummennetulla.

Taulukko 1. Tuulivoimaloiden vuosittainen energiantuotanto tuulen keskinopeuksilla 4 m/s ja 8 m/s.

Tuulivoimalan vuosittainen energiantuotanto [GWh]						
	DFIG 2,5 MW	PMSG 2,5 MW	DFIG 3,3 MW	EESG 3 MW	DFIG 2 MW	PMSG 1,5 MW
Weibull k=2 v=4	2,85	2,38	2,75	2,91	1,66	1,50
Weibull k=2 v=8	11,31	10,90	13,27	12,84	7,97	6,63

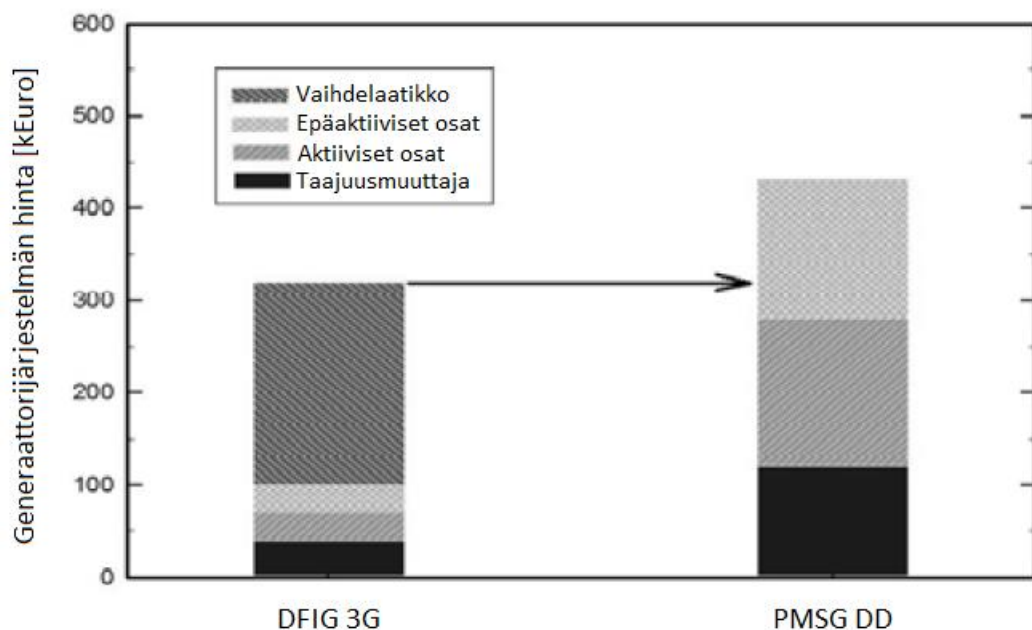
Taulukon (Taulukko 1) tuloksista nähdään, että 2,5 MW:n tuulivoimaloissa DFIG-tuulivoimala vie hieman yllättäen voiton vastaavasta PMSG-tuulivoimalasta. 3,3 MW:n DFIG-tuulivoimalan huonompi energiantuotanto verrattaessa 3 MW:n EESG-tuulivoimalaan keskituulen nopeuden ollessa 4 m/s ja parempi energiantuotanto keskituulen nopeuden ollessa 8 m/s, kuvaa parhaiten sitä, mikä yleensä vaikuttaa positiivisesti DFIG-tuulivoimaloiden suorituskykyyn, eli siihen että se pystyy toimimaan pitempiä aikoja lähellä nimellistä tuulen nopeuttaan. 2 MW:n DFIG-tuulivoimalan ja 1,5 MW:n PMSG-tuulivoimalan vertailussa huomataan, että 0,5 MW pienempi PMSG-tuulivoimala tuottaa melkein yhtä hyvin tuulen keskinopeuden ollessa 4 m/s. Kun tuulen keskinopeus kasvaa arvoon 8 m/s, silloin DFIG-tuulivoimalan energiantuotanto paranee samasta syystä, joka mainittiin jo 3,3 MW:n DFIG-tuulivoimalan tapauksessa.

Yhteenvedona suorituskykyvertailujen pohjalta voidaan todeta, että tuulivoimalan valinnan kanssa sekä sen sijoituspaikan kanssa pitää olla erityisen tarkkana ja tarkasti mitat-

tujen tuuliolosuhteiden pohjalta on tehtävä lopullinen valinta tuulivoimalan suhteen. Kuten huomattiin, kahden eri tuulivoimalan energiantuotanto vuositasolla voi muuttua päinvastaiseksi tuuliolosuhteiden vaihtuessa. Lisäksi esimerkiksi heikosti tuulisilla alueille on mietittävä, että tuulivoimala, joka tuottaa parhaiten alhaisilla tuulen nopeuksilla, muodostuu luultavasti parhaaksi valinnaksi tällöin.

6.4 Generaattorijärjestelmän hinta

Seuraavassa kuviossa (Kuvio 24) on esitettyä eräiden kolmiportaisella vaihdelaatikolla varustetun DFIG-tuulivoimalan sekä suoravetoisen PMSG-tuulivoimalan generaattorijärjestelmän kulurakenne ja kokonaishinta.



Kuvio 24. Tuulivoimaloiden generaattorijärjestelmän hinnan rakenne. (Comparison of direct-drive and geared generator systems, 2, muokattu)

Kuten kuvioista (Kuvio 24) huomataan, tässä tapauksessa DFIG-tyyppisen tuulivoimalan generaattorijärjestelmä on noin 100 000 € halvempi, kuin PMSG-tyyppisen. DFIG:llä suurimman osan tuulivoimalan generaattorijärjestelmän hinnasta muodostaa vaihdelaatikko noin 2/3 osuudella, taajuusmuuttajan, aktiivisten osien ja epäaktiivisten osuuksien ollessa noin 1/9 kullakin. PMSG:llä kulut jakautuvat tasaisemmin, kun taajuusmuuttajan, aktiivisten osien ja epäaktiivisten osien osuudet ovat noin 1/3 kullakin tuulivoimalan generaattorijärjestelmän kokonaishinnasta. Koska PMSG on suoravetoinen tuulivoimala, siinä ei ole vaihdelaatikkoa. Taajuusmuuttajien hintaa verrattaessa on tärkeää

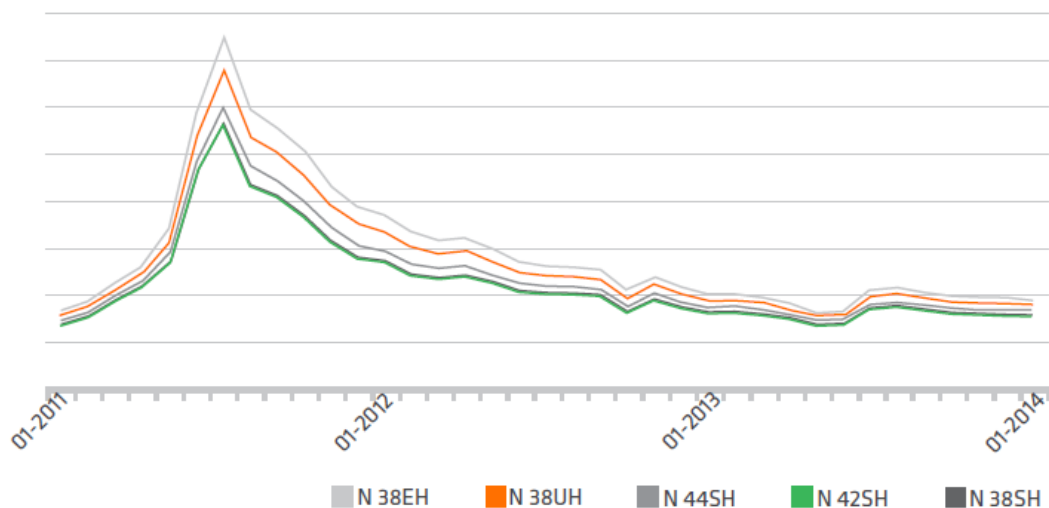
huomata, että DFIG:n taajuusmuuttajan hinta on noin 1/3 PMSG:n taajuusmuuttajan hinnasta. Aiemmin luvussa 5.2 kerrottiin, että DFIG-tuulivoimalan taajuusmuuttaja on mitoitettu noin 1/3 tuulivoimalan nimellistehosta, kun taas PMSG:llä käytetään täysmitoitettua taajuusmuuttajaa. Taajuusmuuttajien hinnan voidaan todeta nousevan samassa suhteesta sen tehon kanssa.

6.5 Muita asioita

Tärkein asia tuulivoimaloiden kehityksessä on minimoida energian tuottamisen hinta, jotta sähköä saadaan tuotettua sähköverkkoon mahdollisimman edullisesti. Generaattorijärjestelmän osuus tätä tavoitetta saavutettaessa on se, että se pystyy muuttamaan mekaanisen energian tuulivoimalan roottorista sähköiseksi energiaksi, joka edelleen mahdollistaa energian tuottamiseen kuluneiden kustannuksien pienentämistä. Generaattorijärjestelmän valinnalla on lukuisia vaikutuksia kustannuksien pienentämiseen. (Abrahamsen ym. 2013, 1)

Tuulivoimalan kulut esimerkiksi valmistuksessa, kuljetuksessa ja asennuksessa ovat tärkeitä, mutteivät ratkaisevia tekijöitä. Näiden lisäksi toiminnanaikaiset kulut tulee ottaa huomioon kuten korjaus ja kunnossapito. (Abrahamsen ym. 2013, 1)

Mikä on paras generaattorijärjestelmä tuulivoimaloissa, vaihtelee aikojen kuluessa johdettujen materiaalien ja komponenttien hintojen vaihtelusta. Esimerkkinä voidaan ottaa PMSG-tuulivoimaloissa käytettävät kestopagneetit, jotka tekivät vuoden 2011 aikana valtavan harppauksen hinnan suhteen, mutta ovat palautuneet samalle hintatasolle, mikä oli ennen hintojen nousua. Seuraavassa kuviossa (Kuvio 25) on esitetty kestopagneettien hintojen käyttäytyminen vuosina 2011- 2013. (Abrahamsen ym. 2013, 1)



Kuvio 25. Kestomagneettien hintojen käyttäytyminen vuosina 2011-2013. (The Switch 2014, 4)

Kuten kuvio 25:stä huomataan, kestomagneettien hinnat olivat vuonna 2011 n. 2-3 -kertaiset lähtö- ja lopputilanteisiin nähden. Epävarmuus kestomagneettien hintojen kehityksessä vaikuttaa päätöksiin tuulivoimalan generaattorijärjestelmää valittaessa. (Abrahamsen ym. 2013, 1)

Olellainen osa tuulivoimalan generaattorijärjestelmän valintaa on se, että mihin tuulivoimala sijoitetaan. Tuulivoimalan generaattorijärjestelmän hyötysuhde on tärkeä asia, muttei ratkaiseva sekään. Generaattorijärjestelmä pienemmällä hyötysuhteella, joka tuottaa energiaa alemmilla kustannuksilla, on parempi vaihtoehto. (Abrahamsen ym. 2013, 1)

Mahdollistaakseen suuren mittakaavan tuulivoimatoiminnan ilman kompromisseja sähköjärjestelmän vakaudessa, sähköverkkoyhtiöillä ovat omat liittymisvaatimuksensa sähkön laadulle ja sille, missä muodossa teho siirretään järjestelmään. Tuulivoimaloilta vaaditaan useissa maissa LVRT (low-voltage ride-through) tai FRT (fault ride through) -ominaisuus. Tällä tarkoitetaan sitä, että tuulivoimalan tai tuulivoimapuiston pitää pysyä kytkettynä sähköverkkoon myös häiriötilanteissa, kuten jännitekuopan sattuessa ja tuettava sähköverkkoa häiriön poistuttua eli oltava valmiudessa syöttämään tehoa sähköverkkoon. (Abrahamsen ym. 2013, 1; Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä 2009, 60)

Erityisesti merelle sijoitettavissa tuulivoimaloissa, toiminnanaikaiset kulut saattavat muodostaa merkittävän osan n. 30 % energian tuottamisen hinnasta. Tämän vuoksi vaatimukset luotettavuudessa, käytettävyydessä sekä kunnossapidettävyydessä ovat saamassa enemmän huomiota ja lisää tutkimuksia näiden asioiden suhteen on tarpeen. Esimerkiksi oikeanlainen suojaus tuulivoimalalle kosteassa ja suolaisessa meriympäristössä on erittäin tärkeää. (Abrahamsen ym. 2013, 2)

Mietittäessä syitä suoravetoisten tuulivoimaloiden käyttöön, luotettavuuden lisääminen ja kunnossapitotarpeen vähentäminen on yksi pääsyistä niiden käyttöön liittyen. Vaihteettomia tuulivoimaloita käytettäessä esimerkiksi vaihdelaatikosta johtuvat viat ja tuulivoimalan osien määrä saadaan pienemmäksi, tosin ei ole täysin todistettu vielä, että vaihteettomat suoravetoiset tuulivoimalat olisivat luotettavampia, kuin vaihteelliset tuulivoimalat. Suoravetoisten generaattorien pääongelmana on se, että ne ovat isoja, raskaita ja kalliita. (Abrahamsen ym. 2013, 4)

7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteena oli perehtyä teollisen kokoluokan tuulivoimaloihin ja niissä käytettäviin generaattoriratkaisuihin. Pää tavoitteena oli selvittää nykyisin suosituimman tuulivoimalakonseptin eli DFIG-tuulivoimalan toimintaa teknisesti helposti ymmärrettävällä tasolla. Lisäksi tehtiin teknis-taloudellista vertailua yleisellä tasolla pääasiassa PMSG-tyyppiseen tuulivoimalaan ja etsittiin syitä DFIG-tuulivoimalan suurelle suosiolle.

DFIG-tuulivoimalan tekninen selvitys saatiin onnistumaan ennen työn aloitusta määriteltyjen tavoitteiden pohjalta hyvin. Sen toiminnassa askarruttavia asioita saatiin selvitettyä ja ennen kaikkea purettua esimerkkien avulla helposti ymmärrettävään muotoon.

Teknis-taloudellisessa vertailussa läpikäytyjen asioiden perusteella voidaan pitää DFIG-tuulivoimalaa hankintahinnaltaan edullisempänä ratkaisuna PMSG-tuulivoimalaan verrattuna, mutta mahdollisesti pidemmällä aikavälillä tarkasteltuna esimerkiksi sen kunnossapidon tarve voi muodostua asiaksi, joka tekee siitä huonomman ratkaisun. DFIG-tuulivoimaloissa käytettävät standardikomponentit ja sen osatehoinen taajuusmuuttaja tekevät siitä houkuttelevan vaihtoehdon taloudelliselta kannalta. Lisäksi tuulivoimalan sijoituksella ja hyvien tuuliolosuhteiden valinnalla voidaan vaikuttaa merkittävästi energiantuottamiseen kuluviin kustannuksiin.

Oman mielipiteeni mukaan DFIG-tuulivoimala jatkaa suosittuna tuulivoimalakonseptinä jatkossakin, johon monet suuret tuulivoimalavalmistajat luottavat. PMSG-tuulivoimala varmaankin kasvattaa osuuttaan tuulivoimamarkkinoista, mutta sen suuren suosion nousuun se vaatii mielestäni pääasiassa sen, että tuulivoiman rakentajat haluavat vähemmän huoltoa vaativia tuulivoimaloita, sekä sen, että siinä käytettävien kestopagneettien hinnat laskevat ja stabiloituvat. Lisäksi osan suurista tuulivoimaloista valmistavista yrityksistä tulisi ottaa PMSG-tyyppiset tuulivoimalat tuotantoon.

Opinnäytetyö toimi itselleni erinomaisena tutustumisena tuulivoimaan liittyen, sillä aiempaa kokemusta tuulivoimasta en omannut juuri lainkaan. Lisäksi se antaa hyvät peruslähötiedot tulevaisuutta ajatellen tuulivoimaloissa käytettäviin generaattoriratkaisuihin.

LÄHTEET

- Abrahamsen, A., Atallah, K., Ferreira, J., Jensen, B., McMahon, A. & Polinder, H. 2013. Trends in Wind Turbine Generator System. Julkaistu 5.9.2013. Luettu 19.2.2015. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6588570>
- Ackermann, T. 2005. Wind Power in Power Systems. 1. painos. Chichester. John Wiley & Sons, Ltd.
- Ackermann, T. 2012. Wind Power in Power Systems. 2. painos. Chichester. John Wiley & Sons, Ltd.
- Anaya-Lara, O., Jenkins, N., Ekanayake, J., Cartwright, P. & Hughes, M. 2009. Wind Energy Generation. Modelling and Control. 1.painos. United Kingdom, Chichester. John Wiley & Sons, Ltd.
- Aura, L. & Tonteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet. 3.-6. painos. Helsinki. WSOYpro Oy.
- Broadwind energy, Inc. 2010. Wind turbine Components. Julkaistu 12.3.2010. Luettu 12.1.2015. http://www.getfilings.com/sec-filings/100312/BROADWIND-ENERGY-INC_10-K/
- Chen, Z. & Li, H. 2007. Overview of different wind generator systems and their comparisons. Luettu 19.2.2015. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=4469298&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fiel5%2F4159946%2F4469293%2F04469298.pdf%3Farnumber%3D4464469>
- Comparison of direct-drive and geared generator systems. Luettu 9.2.2015 https://docs.google.com/document/d/1zhmTk_SQjWz6FUu-E__a2W4yXtP9g7YJVdE1YfwpJrM/edit
- Energiateollisuus ry. Tuulivoima. Luettu 19.2.2015. <http://energia.fi/energia-jaymparisto/energialahteet/tuulivoima>
- Festo Didactic Ltd. 2011. Electricity and New Energy. Principles of Doubly-Fed Induction Generators (DFIG). Luettu 1.12.2015. https://www.labvolt.com/downloads/86376_F0.pdf
- Fletcher, J. & Yang, J. 2010. Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications. . Julkaistu 30.12.2010. Luettu 10.1.2015. <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/12519.pdf>
- Fox, B., Flynn, D., Bryans, L., Jenkins, N., Milborrow, D., O'Malley, M., Watson, R. & Anaya-Lara, O. 2007. Wind Power Integration. Connection and system operational aspects. Luettu 10.1.2015. http://cee.nit.ac.ir/file_part/master_doc/201442116214828745219611.pdf

Freris, L. & Infield, D. 2008. Renewable Energy in Power Systems. 1. painos. United Kingdom, Chichester. John Wiley & Sons, Ltd.

Global Wind Energy Council. 2014. Global wind report. Annual market update 2013. Julkaistu 9.4.2014. Luettu 12.1.2015. http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/GWEC-Global-Wind-Report_9-April-2014.pdf

Global Wind Energy Council. Wind in numbers. Luettu 19.2.2015. <http://www.gwec.net/global-figures/wind-in-numbers/>

Hau, E. 2006. Wind turbines. Fundamentals, technologies, Application, Economics. 2. painos. Berlin. Springer.

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1. painos. Tampere. Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

Jain, P. 2011. Wind Energy Engineering. 1. painos. USA. The McGraw-Hill Companies.

Korpela, A. 2014. Tuulivoiman perusteet. tuulivoima1415.pdf. Luettu 19.2.2015.

Korpinen, L. 1998a. Sähkökoneet, osa 1. Julkaistu 14.10.1998. Luettu 2.12.2014. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf

Korpinen, L. 1998b. Sähkökoneet, osa 2. Julkaistu 14.10.1998. Luettu 2.12.2014. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

Metropolia. 2011. Tuulivoimalan rakenne. Julkaistu 31.10.2011. Luettu 3.3.2015. <http://users.metropolia.fi/~siirih/tuulivoima2/tuulivoimalanrakenne.html>

Patel, M. 2006. Wind and Solar Power Systems. Design, Analysis, and Operation. 2. painos. USA, Florida. Taylor & Francis Group, LLC.

Pijl, F., Polinder, H., Tavner, P. & Vilder, G. 2006. Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines. Luettu 10.2.2015. <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?tp=&arnumber=1677663&queryText%3DComparison+of+Direct-Drive+and+Geared+Generator+Concepts+for+Wind+Turbines>

Suomen tuuliatlas. Weibull. Luettu 3.4.2015. http://www.tuuliatlas.fi/mallinnus/mallinnus_2_1.html

Suomen tuulivoimayhdistys ry. Tuulivoimatekniikka. Luettu 19.2.2015. <http://www.tuulivoimatieto.fi/tuulivoimatekniikka>

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2009. Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä. Julkaistu 10.7.2009. Luettu 11.1.2015. <http://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2009/TAMU-loppuraportti.pdf>

Teknologian tutkimuskeskus VTT Oy. 2014. Suomen tuulivoimatuotanto vuosi- ja kuukausitasolla. Luettu 19.2.2015. <http://www2.vtt.fi/proj/windenergystatistics/index.jsp>

The European Wind Energy Association. 2013. Wind in power. 2012 European statistics. Luettu 12.1.2015.
http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_annual_statistics_2012.pdf

The European Wind Energy Association. 2014. Wind in power. 2013 European statistics. Luettu 12.1.2015.
http://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/Wind_in_power_annual_statistics_2012.pdf

The Switch. 2014. PMG vs. DFIG - the big generator technology debate. Julkaistu 6.3.2015. Luettu 30.3.2015. http://www.theswitch.com/wp/wp-content/uploads/2014/03/Technology_Point-_PMG_DFIG_06032014.pdf

Twidell, J. & Gaudiosi, G. 2009. Offshore Wind Power. 1. painos. United Kingdom, Brentwood. Multi-Science Publishing Co. Ltd.

U.S. Department of Energy. The inside of a wind turbine. Luettu 12.1.2015.
<http://energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine-0>

Ympäristöministeriö. 2013. Voimaa tuulesta. Tuulivoiman rakentaminen osaksi elinympäristöä. Luettu 1.12.2014. <http://www.ymp.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Julkaisut/Esitteet>