



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

VILMA HANHELA
MUUTTUVANOPEUKSISEN TUULIVOIMALAN TEHOELEKTRO-
NIikka JA VIKAANTUMINEN

Kandidaatintyö

Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

TIIVISTELMÄ

Tampereen teknillinen yliopisto
Kandidaatintyö, 35 sivua, 0 liitesivua
Huhtikuu 2015
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Pääaine: Tehoelektroniikka
Tarkastaja: professori Teuvo Suntio

Avainsanat: kandidaatintyö, sähkötekniikka, muuttuvanopeuksinen tuulivoimala, tehoelektroniikka, vaihdelaatikko

Työssä käsitellään tuulivoimalan yleistä toimintaa ja sen tehoelektroniikka. Tuulivoimalatyypin, jota työssä käsitellään, on muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. Työssä käydään läpi tuuliturbiinin rakennetta ja sen komponenttien toimintaa sekä tuulivoimateollisuuden tulevaisuudennäkymiä. Tuulivoimalan rakennetta käydään läpi. Vikaantumisessa keskitytään kaikista vioittuvimpaan osaan eli vaihdelaatikkoon.

ALKUSANAT

Haluan kiittää kaikkia kandidaatintyöhöni panoksen antaneita henkilöitä ja tahoja. Kiitos erityisesti Riikalle ja Aleksille.

Tampereella, 22.4.2015

Vilma Hanhela

SISÄLLYSLUETTELO

1.	TUULIVOIMALAN RAKENNE.....	3
1.1	Ilmavirtauksen teoriaa	3
1.2	Tuulivoimalan yleinen rakenne	5
1.3	Tahti- ja epätahtigeneraattorit	7
1.4	Tuulivoimaloissa käytettävät generaattorit	8
2.	MUUTTUVANOPEUKSINEN TUULIVOIMALA.....	11
2.1	Vakionopeuksisen ja muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan vertailua	11
2.2	Muuttuva nopeus osatehoisella suuntaajakäytöllä	12
2.3	Muuttuva nopeus täyden tehon suuntaajakäytöllä	13
2.4	Rajoitettu muuttuva nopeus.....	14
3.	MUUTTUVANOPEUKSISEN TUULIVOIMALAN TEHOELEKTRONIIKKA	15
3.1	Tuulivoimalan tehoelektroniikan kehitys 80-luvulta nykypäivään.....	15
3.2	Tehomuuntimen toimintaperiaate	16
3.3	Muut tehoelektroniikkalaitteet tuulivoimaloissa.....	17
4.	TUULIVOIMALOIDEN VIKAANTUMINEN	19
4.1	Tuulivoimaloiden vaihdelaatikat.....	19
4.2	Vaihdelaatikon vikaantuminen.....	20
4.3	Viat tehoelektroniikassa	24
4.4	Muut vikaantuvat osat ja vikaantumista aiheuttavat ympäristötekijät	25
5.	TEKNINEN KEHITYS JA TULEVAISUUDENNÄKYMÄT	26
6.	YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET.....	30

LYHENTEET JA MERKINNÄT

A	(lavan pyyhkäisemä) pinta-ala
C_p	tehokerroin
ε	sähkömotorinen voima
f	taajuus
KE	kineettinen energia
n	pyörimisnopeus
n_s	synkorinen pyörimisnopeus
P	teho
ρ	(ilman) tiheys
s	jättämä
t	aika
u	(ilmavirtauksen) nopeus
V	(ilman) tilavuus
ϕ	magneettivuo
AC	Alternating Current (vaihtovirta)
BTB	Back-to-Back Converter (kaksiasteinen tehomuunin)
DC	Direct Current (tasavirta)
DFIG	Dolby fed induction generator (kaksoissyötetty liukurengasgeneraattori)
GRC	Gearbox Reliability Collaborative -yhteistyöprojekti
GTO	Gate Turnoff Thyristor
HTS	High-Temperature Superconductivity (korkean lämpötilan suprajohde)
HVDC	High Voltage Direct Current (suurjännitetasavirta)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (suurtehoinen bipolaaritransistori)
IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor
NREL	National Renewable Energy Laboratory

PMSG	Permanent Magnet Synchronous generator (kestomagneettigeneraattori)
RPM	Revolutions per Minute (kierrosta minuutissa)
SCIG	Squirrel-Cage Induction Generator (häkkikäämitetty induktiogeneraattori)
THD	Total Harmonic Distortion (harmoninen kokonaissärö)
VSC	Voltage Source Converter (jännitelähde-muunnin)
WECS	Wind Energy Conversion System (Tuulen energian muunto mekaaniseksi energiaksi)

JOHDANTO

Tässä työssä käsitellään ensisijaisesti muuttuvanopeuksisia tuulivoimaloita (variable speed wind turbine) ja niiden toimintaa. Toiminnassa paneudutaan tuuliturbiinin tehoelektroniikkaa ja vikaantumiseen vaihdelaatikkojen ja muiden komponenttien osalta. Vaihdelaatikoiden toiminnassa keskitytään vikaantumiseen sekä vikaantumisen syihin ja seurauksiin ja sen ehkäisyyn. Vaihteettomien, ns. suoravetoisten voimaloiden toiminnassa keskitytään niiden potentiaaliin korvata vaihteellisia tuulivoimaloita. Luvussa yksi käydään läpi tuulivoimalan yleistä rakennetta ja sähkökoneiden, kuten generaattoreiden, toimintaperiaate tuulivoimaloiden toiminnan ymmärtämiseksi. Lisäksi kerrotaan yleisimmistä tuulivoimaan tarkoitetuista generaattoreista.

Fossiilisten polttoaineiden eheytyminen ja hiilidioksidipäästöistä aiheutuva kasvihuoneilmiö lisäävät uusiutuvan energian kysyntää. Tuulivoima on päästöttömyytensä vuoksi tulevaisuudessa yleistyvä energian tuotantomuoto. Tuulivoimalan kustannukset koostuvat pääasiassa investointikustannuksista, sillä polttoainetta ei luonnollisesti tarvita, kun energia saadaan vangittua tuulen tehosta. Tuulisähkön hinta on tuulivoimalan rakentamiseksi tarvittavien investointikustannusten vuoksi vielä korkea verrattuna muulla tavalla tuotetun sähkön hintaan. Innovointia uusissa voimaloissa ja voimaloiden tekniikassa tarvitaan tuulisähkön hinnan hilaamiseksi fossiilisilla polttoaineilla ja ydinvoimala tuotetun sähkön hinnan tasolle. Työssä käsitellään innovaatioita tehoelektroniikassa, sillä muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan toiminta ja kehittyminen on pitkälti riippuvainen tehoelektroniikan kehittämisestä. Innovaatioita tehoelektroniikassa tarvitaan erityisesti, jotta voimaloiden tuottaminen olisi halvempaa ja niistä saataisiin luotettavampia.

Uudet tuulivoimalat ovat useimmiten muuttuvanopeuksisia, sillä niiden aerodynaaminen hyötysuhde on parempi, kuin vakionopeuksisten tuulivoimaloiden (fixed speed wind turbine). Eri tuulennopeuksista saatavaa tehoa pystytään käyttämään paremmin energian tuotantoon, kuin vakionopeuksisten voimaloiden tapauksessa. Luvussa kolme keskitytäänkin muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden tehoelektroniikkaan, toimintaan ja muihin erityispiirteisiin. Muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden toiminnan ymmärtämiseksi on keskityttävä niiden tehoelektroniikkaan. Luvussa kolme selvitetään tehomuuntimen toimintaperiaate ja käydään läpi joitain tehoelektroniikkakomponentteja. Vakionopeuksisten voimaloiden toimintaan ei työssä niin tarkasti paneuduta.

Muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa voidaan käyttää vaihdelaatikkoa, tai niistä voidaan tehdä suoravetoisia. Vaihdelaatikoiden käytölle on olemassa perusteita, sillä tuulivoimalan roottorin pyörimisnopeus halutaan muuntaa generaattorille sopivaksi pyörimisnopeudeksi. Työni kannalta on tärkeää tiedostaa, että vaihdelaatikoiden vikaantuminen on yleisin syy koko tuulivoimalan vikaantumiselle. Niiden vaihtaminen ja korjaaminen on kallista, aikaa vievää ja hankalaa, sillä vaihdelaatikot sijaitsevat jopa yli sadan metrin korkeudessa. Vaihdelaatikkojen vikaantuminen on suurin suunnittelema-

ton kustannus tuulivoimateollisuudessa. Tuulivoimala ei korjauskustannusten lisäksi voi luonnollisesti olla käytössä ennen korjausta, joten suunniteltu energiantuotanto ei toteudu. Vaihdelaatikoiden luotettavuuden parantaminen on yksi tärkeimmistä kehityskohdeista tuulivoiman yleistyessä. Vaihdelaatikoiden mekaanista rakennetta ja teknistä toimintaa eritellään kokonaiskuvan hahmottamiseksi. Luvussa neljä käsitellään vaihdelaatikkojen ja muiden tuuliturbiinin komponenttien vikaantumista.

Niin kauan kuin tuulivoimateollisuutta on ollut olemassa, on vaihdelaatikoiden vikaantuminen ollut suhteellisen suuri ongelma. Esimerkiksi ensimmäisten tuulivoimaloiden käyttökuormat arvioitiin täysin väärin jo suunnitteluvaiheessa. Tuulivoimateollisuus on oppinut näistä virheistä ja tuulivoimaloiden luotettavuuden parantamiseen on panostettu paljon. Vaihdelaatikoiden vikaantumiselle on olemassa monia mahdollisia syitä, mutta laakeroinnin pettäminen on yleisin syy vaihdelaatikkojen vikaantumiselle. Vikaantumista aiheuttaa ennen kaikkea rasitus, jolle vaihdelaatikko altistuu tuulivoimalan pyörimisestä johtuvan suure vääntömomentin vaikutuksesta. Myös ympäristö ja olosuhteet, joissa vaihdelaatikon on toimittava, lisäävät vikaantumisten todennäköisyyttä.

Tulevaisuuden trendinä on rakentaa yhä suurempia tuulivoimaloita. Tuulipuistoja rakennetaan merelle enenevässä määrin. Tuulivoimateollisuus on jatkuvassa kehityksessä, eikä kehitykselle näy loppua. Tuulen avulla tuotetun energian osuus maapallon kokonaisenergiantuotannosta kasvaa enemmän, kuin millään muulla tavalla tuotetun energian osuus. Tuulivoima on myös potentiaalisin energianmuoto. Euroopassa ja USA:ssa on kunnianhimoisia tavoitteita uusiutuvien energianlähteiden avulla tuotetun kokonaisenergiamäärän lisäämiseksi. Jotta tuulivoiman avulla pystyttäisiin täyttämään näitä tavoitteita, on siitä tultava tulevaisuudessa tehokkaampaa ja halvempaa. Luvussa viisi keskitytään tulevaisuuden näkymiin tuulivoimateollisuudessa. Myös tulevaisuuden innovaatiot ja projekteja käsitellään kokonaisvaltaisesti.

1. TUULIVOIMALAN RAKENNE

Tuuliturbiini on yleinen nimi koneelle, joka muuttaa ilmavirtauksen kineettistä energiaa tuuliturbiinin roottorin pyörivien lapojen mekaaniseksi energiaksi. Tuulen energian muuntamiselle mekaaniseksi energiaksi on tuulivoimateollisuudessa vakiintunut nimitys WECS (Wind Energy Conversion System). Tuuliturbiinin on myös muutettava tämä mekaaninen energia sähköverkkoon sopivaksi sähköenergiaksi.

1.1 Ilmavirtauksen teoriaa

Tuulivoimalan toimintaperiaatteen ymmärtämiseksi on hyvä tietää muutama peruskäsite, joka liittyy tuulen energian potentiaaliseen hyödyntämiseen tai hyödyntämisen rajoituksiin. Betzin laki määrittelee teoreettisen ylärajan teholle, jonka tuulivoimalan roottorin siivet voivat vangita tuulen tehosta. Kun turbiinin läpi kulkee ilmavirtaus, turbiini pystyy ottamana ilmavirtauksen kineettisestä energiasta talteen korkeintaan $16/27$ eli noin 59 %. Tämä luku on siis teoreettinen yläraja sille, kuinka paljon tuulen kineettisestä energiasta saadaan muutettua roottorin pyörimisen kineettiseksi energiaksi. Turbiinin läpi virrannut ilma luovuttaa siis enintään noin 59 % energiastaan roottorin lapojen pyörimisenergiasta. [1, 2, s. 45–46]

Turbiinin lapojen pyyhkäisykehän läpi virrannut ilma hidastuu sitä enemmän, mitä suuremman kineettisen energian se luovuttaa roottorille. Käytännössä talteen otettu energiamäärä on paljon pienempi, sillä esimerkiksi ilman kokoonpuristuvuutta, turbulenssia tai kitkaa ei ole siinä otettu huomioon. Kineettinen energia saadaan kaavasta

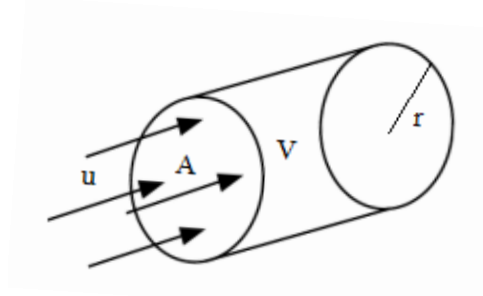
$$KE = \frac{1}{2}\rho V u^2, \quad (1)$$

jossa ρ on ilman tiheys, V on Ilman tilavuus ja u on ilmavirtauksen nopeus (kuva 2). Jos ilmavirtaus kulkee matkan dx roottorin lapojen pyyhkäisypinta-alan $\pi \cdot r^2$ lävitse, on vastaava ilman tilavuus $V = dx \cdot \pi \cdot r^2$. Roottorin lavan pituus on r . [2, s. 45–46]

Kun kineettinen energia derivoidaan ajan suhteen, saadaan teho. Teho on siis talteen otetun energian määrä aikayksikössä. Jokainen tuuliturbiini kerää yksilöllisesti tuulesta tietyn energiamäärän tietyssä ajassa. Jokainen tuuliturbiini kerää siis lapoljensa avulla talteen tuulen liike-energiaa muuttaen sitä roottorin pyörimisenergiaksi eli tehoksi. Teho riippuu kaavasta

$$P = \frac{1}{2}\rho A C_p u^3 A, \quad (2)$$

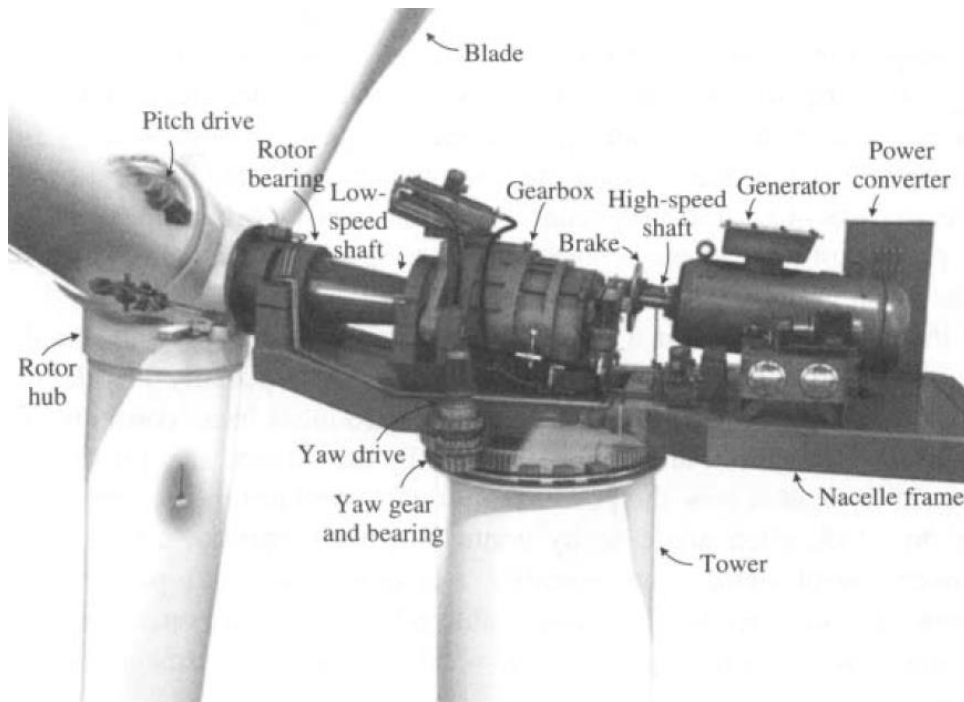
jossa P on turbiinin teho, ρ on ilman tiheys, A on turbiinin pyyhkäisyypinta-ala, C_p on jokaiselle tuulivoimalalle yksilöllinen tehokerroin ja u on ilmavirtauksen nopeus. Tämä on teho, joka siirtyy lopulta sähköverkkoon. Osa energiasta kuluu luonnollisesti hukkaan kunkin komponentin hyötysuhteesta riippuen.



Kuva 2. Ilmavirtaus roottorin pyyhkäisyypinta-alan A lävitse. [3]

Kaavasta 2 havaitaan, että tuulivoimalan tuottama teho riippuu erityisesti tuulen nopeudesta, sillä teho riippuu ilmavirtauksen kolmannesta potenssista. Tuulen nopeus kasvaa sitä suuremmaksi mitä korkeammalle maanpinnasta nouseaan. Tämä johtuu siitä, että korkealla ilmavirtaus pääsee liikkumaan esteettömämmin. Nopeamman ilmavirtauksen vuoksi torneista pyritään tekemään korkeita. Jokainen tuulivoimala on yksilöllinen kokonaisuus ja sen keräämä energia riippuu paitsi voimalan rakenteesta myös tuulisuusolosuhteista sekä voimalan sijainnista riippuvista ympäristötekijöistä. [1]

1.2 Tuulivoimalan yleinen rakenne



Kuva 1. Tuuliturbiinin rakenne. [20]

Jotta tuulivoimalan kykyä muuntaa energiaa muodosta toiseen pystyisi ymmärtämään, on ymmärrettävä tuulivoimalan toimintaperiaate. Toiminnan ymmärtämiseksi on kuitenkin ensin tiedettävä komponentit, joista se rakentuu ja niiden tehtävät tuuliturbiinissa (kuva 1). Jos tuulivoimalaa tarkkailee toiminnassaan, näkee siitä heti korkean teräksisen tornin (tower), jonka päässä on konehuone (nacelle). Konehuoneessa on kiinni pyörivä roottori (rotor), jossa on yleensä kolme lapaa (blade). Näiden keskellä on roottorin napa (rotor hub). Roottori tarkoittaa siis tuulivoimalan navasta ja lavoista muodostunutta osaa, joka pyörii, kun tuulivoimala on toiminnassaan. Lapoja voi olla enemmän tai vähemmän kuin kolme, mutta suurin osa tuulivoimaloista on kolmelapaisia. Tämä johtuu kolmelapaisen tuulivoimalan materiaalikustannuksista, hyvistä aerodynaamisista ominaisuuksista ja vähäisestä mekaanisesta pyörimisrasittumisesta. Jatkossa oletetaan lukijan tietävän, että käsiteltäessä tuuliturbiinia tarkoitetaan juuri kolmelapaista tuuliturbiinia. [4, s. 35, 20]

Tuulivoimalan lavat toimivat samalla periaatteella kuin lentokoneen siivet. Ilmavirtauksen eri nopeus lavan ylä- ja alapinnalla synnyttää yläosaan alipaineen ja alipaineesta syntyvä noste saa lavat liikkeeseen. Roottori on kiinnitetty konehuoneessa olevaan pääakseliin (low speed shaft), joka on yleensä kiinnitetty vaihdelaatikkoon (gearbox). Tuulivoimaloista voidaan tehdä myös suoravetoisia, jolloin vaihdelaatikoita ei tarvita. Vaihdelaatikko muuttaa roottorin pyörimisnopeuden generaattorille (generator) suotuisaksi pyörimisnopeudeksi. Generaattori on kone, joka muuttaa roottorin liikeenergian sähköenergiaksi, joka voidaan syöttää verkkoon. Jotta generaattorin kautta

kulkevan energian voisi muuntaa verkkoon sopivaksi tehoksi, tarvitaan uusissa tuulivoimaloissa lisäksi tehomuunnin (power converter). [1]

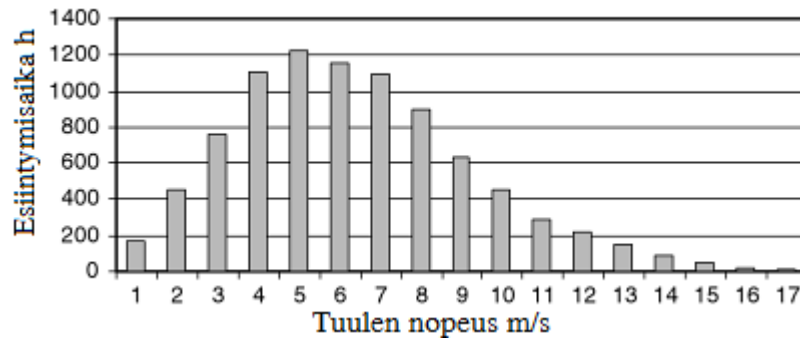
Joissain tuulivoimaloissa on mahdollisuus roottorin kääntämiseksi tuulen suunnan mukaan siten, että tuulesta saadaan irti mahdollisimman suuri hyöty. Roottorin pyyhkäisyala halutaan kääntää suoraan tuulen suuntaan, jotta ilmavirtaus kulkisi mahdollisimman suoraan roottorin lapojen pyyhkäisyalaan lävitse. Tällöin tuulen kineettisestä energiasta saadaan irti mahdollisimman suuri. Konehuoneen kääntämiseen tarvitaan kuitenkin suunnanmuutosmoottori (yaw drive) ja suunnanmuutoslaakeri (yaw gear and bearing). Tuulensuunta-anturi havaitsee, mistä päin tuulee ja kuppianemometrin avulla voidaan tarkkailla tuulen nopeuden muutoksia. Anemometri on yleisnimi laitteelle, joka mittaa ilmavirtauksen nopeutta. Kuppianemometri on laite, joka koostuu neljästä puolipallon muotoisesta kupista, jotka on kiinnitetty yhteiseen varteeseen. Tuuli osuu kuppeihin ja saa varren pyörimään ilmavirtauksen nopeuteen verrattavalla nopeudella. [4, s. 36]

Jarru (brake) pysäyttää tuulivoimalan vikatilanteessa. Jarru on yleensä sijoitettu generaattorin ja vaihdelaatikon väliin. Kontrolleri (controller) ohjaa voimalan päällä oloa tuulennopeudesta riippuen. Liian pienillä tai liian suurilla tuulennopeuksilla ei voimalaa kannata pitää käynnissä. Liian pienillä tuulennopeuksilla saatu energia on liian vähäistä, eikä tuulivoimalaa kannata siksi pitää päällä. Olisi luonnollisesti ideaalia, jos suurilla tuulennopeuksilla voimalaa voitaisiin pitää päällä, mutta tällöin tuulivoimalan mekaaninen kestävyys tulee vastaan. Liian suurilla tuulennopeuksilla, esimerkiksi myrskytuulilla, tuulivoimala voi vahingoittua. Myrskytuulia ja suuria tuulennopeuksia esiintyy lopulta todella harvoin (kuva 3). Vaikka niistä saataisiin paljon tehoa, tuulivoimalan rakentaminen kestäväksi näin suurilla tuulennopeuksilla veisi liikaa materiaaliressursseja. [4, s. 32]

Kun tuulen nopeus käy liian voimakkaaksi, voidaan tuulivoimaloiden tehoa säätää kolmella eri menetelmällä. Yksinkertaisin tapa säätää tuulivoimaloiden tehoa on passiivinen sakkaussäätö (stall control). Tällöin lapoja ei säädetä tuulen nopeuden muuttuessa, vaan ne on pultattu roottorin napaan kiinni. Lavat on muotoiltu aerodynaamisesti siten, että riittävän suuri tuulennopeus ei enää pyöritä roottoria. Tällöin ilmavirtauksen noste, joka pitää roottorin liikkeessä, romahtaa. [4. s. 39, 13, s.15]

Toinen tapa on säätää tuulivoimalan roottorin lapoja ja niiden kohtauskulmaa ilmavirtaukseen nähden menetelmällä, jota kutsutaan lapakulmien säädöksi (pitch control). Kontrolleri ohjaa tällöin tuulivoimalan lapojen kulmia kuppianemometriltä saadun tuulennopeustiedon perusteella. Kun tuulen nopeus käy liian suureksi, lavat käännetään sellaiseen kulmaan, että ilmavirtaus ei tartu niihin. Aktiivisessa sakkaussäädössä (active stall control) on samankaltainen periaate, mutta suurilla tuulennopeuksilla lapakulmaa ohjataan toiseen suuntaan kuin edellisessä. Tällöin suurilla tuulennopeuksilla roottori pyörii vielä, mutta ei rasitu liikaa. Menetelmä on suosittu etenkin suurilla tuulivoimaloilla,

sillä voimaloista saadaan energiaa vielä suurilla tuulennopeuksilla, kun niitä ei tarvitse ajaa alas. [5, 13, s.15]



Kuva 3. Eri tuulen nopeuksien esiintymistodennäköisyyksiä tunneittain.[3]

1.3 Tahti- ja epätahtigeneraattorit

Sähkökoneiksi kutsutaan yleisesti moottoreita tai generaattoreita. Jos kyseessä on moottori, muutetaan sähköenergiaa liike-energiaksi eli mekaaniseksi energiaksi. Kun puhutaan generaattorista, on kyseessä laite, joka muuntaa liike-energian sähköenergiaksi. Laitteiden toiminta on siis toisilleen vastakkaista. Generaattori toimii sähkömagneettisen induktion avulla. Generaattori itse ei tuota energiaa, vaan muuntaa sitä vain muodosta toiseen. Tuulivoimalassa tämä tarkoittaa sitä, että generaattori muuntaa roottorin mekaanisen energian verkkoon syötettäväksi sähköenergiaksi. Kuten edellä todettiin, roottorin pyöriminen saa energiansa ilmavirtaukselta. [1]

Yksinkertaisimmillaan generaattorin toimintaa voidaan mallintaa silmukan muotoisen johtimen avulla. Pyörittämällä johdinta magneettikentässä siihen indusoituu sähkömotorinen voima eli jännitteen potentiaaliero. Indusoitunut jännite riippuu magneettikentän voimakkuudesta. Tätä lakia kutsutaan Faradayn laiksi, ja se merkitään

$$\varepsilon = -\frac{d\phi}{dt}, \quad (3)$$

jossa ε on sähkömotorinen voima, ϕ on magneettivuo ja t aika. [16]

Sähkökoneessa on aina staattori ja roottori. Staattori on koneen paikallaan pysyvä osa ja roottori on osa, joka pyörii koneessa. Niissä molemmissa on sisäänrakennettuna mag-

neettikentän lähde. Niiden toiminnan ymmärtämisessä oleellinen seikka on pyörivä sinimuotoinen magneettikenttä. Sähkökone voi olla tahtikone tai epätahtikone. Kumpi kone on kyseessä, määräytyy koneen roottorin pyörimisestä tämän magneettikentän kanssa samalla nopeudella tai eri nopeudella. Tahtikoneen roottori pyörii samalla nopeudella eli samassa tahdissa ja vastaavasti epätahtikoneen epätahdissa eli eri nopeudella magneettikentän kanssa. Tahtikoneessa roottori pyörii staattorin kanssa samassa nopeudessa eli samassa tahdissa. Tahtikone pyörii siis samalla taajuudella kuin magneettikenttä. Tätä pyörimisnopeutta kuvataan kaavalla

$$n_s = 60 \cdot \frac{f}{p}, \quad (4)$$

jossa n_s on synkroninen pyörimisnopeus (RPM), f on vaihtovirran taajuus ja p on sähkökoneen napaparien lukumäärä. [7, s. 214–215]

Epätahtikoneen roottorin pyörii epätahdissa magneettikenttään nähden ja tästä seuraa jättämä. Jättämä kuvaa paljonko todellinen pyörimisnopeus on jäljessä synkronista nopeutta. Jättämä voidaan laskea kaavalla

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

jossa s on jättämä, n_s on synkroninen pyörimisnopeus ja n on todellinen pyörimisnopeus.

1.4 Tuulivoimaloissa käytettävät generaattorit

Tahti- ja epätahtigeneraattori ovat vaihtosähkökoneita, joita käytetään tuuliturbiineissa. Tehon muuntaminen generaattorilta verkkoon sopivaksi tehoksi vaatii nykypäivänä paljon tehoelektroniikkaa. Generaattorin staattorille tulevaa sähkövirtaa on pystyttävä kontrolloimaan roottorin pyörimisnopeuden mukaan. Tuulivoimaloiden käyttö perustuu pitkälti tietynlaiseen generaattorityyppiin ja sen toimintaan. Oikeanlaisia generaattoria käyttämällä saadaan tuulivoimalasta muuttuvanopeuksinen ja täten voidaan vähentää tuuliturbiinin rasittumista ja ehkäistä häiriöitä vääntömomentissa. Muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa käytetään usein epätahtigeneraattoreita, sillä ne ovat tehokkaita, halpoja ja vaativat suhteellisen vähän huoltoa. Ne voidaan myös kytkeä suoraan verkkoon. Suurimmassa osassa nykypäivänä asennettuja tuulivoimaloita on epätahtigeneraattori. Oikeanlaisen tehoelektroniikan avulla epätahtigeneraattorit voidaan suunnitella toimivaan lähes minkälaisella tahansa kuormalla. [15, 1, s. 82]

Epätahtikoneiden käyttöön tuulivoimateollisuudessa liittyy muutamia ongelmia, kuten mekaanisten häviöiden syntyä sekä häviöiden suuruksien määrittämiseen liittyviä seikoja. Epätahtikoneet voidaan jakaa oikosulkukoneisiin ja liukurengaskoneisiin. Liukurenkaitten huolto ja vaihtaminen on ongelma tuuliturbiineissa. [7, s. 27, 13, s.14]

Generaattorin on oltava nimenomaan tuulivoimalakäyttöön suunniteltu sen takia, että se on suoraan kiinni tehonlähteessä eli roottorissa vain vaihdelaatikon ollessa niiden välissä. Ennen 90-luvun loppua suurin osa asennetuista tuuliturbiineista oli SCIG-tyyppisiä generattoreita. Nämä generaattorit ovat suoraan verkkoon kytkettyjä induktiogeneraattoreita, joissa on häkkikämmetty roottori. Nimi on lyhenne sanoista squirrel-cage induction generator. Generaattorityyppi on kestävä ja halpa sekä helppo yhdistää sähköverkkoon. Tämän generaattorityypin käytössä on kuitenkin ongelmia, joihin paneudutaan myöhemmin vakionopeuksisi ja muuttuvanopeuksisia tuulivoimaloita vertailtaessa. [22, s. 725]

Nykyisin tuulivoimaloissa tyypillisesti käytettäviä generattoreita ovat PMSG, sekä DFIG. Uusissa tuulivoimaloissa käytetään lähes poikkeuksetta jompaakumpaa konseptiä, joten niiden toimintaa avataan lisää seuraavaksi. [6, s. 708, 1, s. 84]

PMSG eli permanent magnet synchronous generator on generaattori, jossa roottorin käämi, joka tuottaa herätämagneettikentän, on korvattu kestopagneetilla. PMSG-tyyppisiä generattoreita käytetään muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa, jotka toimivat täyden tehon suuntaajakäytöllä. Tahtigeneraattorit, kuten PMSG ja muut synkroniset generaattorit, ovat tyypillisiä suoravetoisille tuulivoimaloille, eli niissä ei aina ole vaihdelaatikkoa. PMSG toimii täyden tehon suuntaajakäytöllä. PMSG tyyppistä generaattoria käytetään yleensä pienen kokoluokan tuulivoimaloissa. Täyden tehon tasa- ja vaihtosuuntaajien häviöiden pieneminen on kuitenkin luonut mahdollisuuden käyttää generaattorityyppiä myös suuremman kokoluokan tuulivoimaloissa. PMSG:ssa ei ole paljoa huoltoa tarvitsevia tai vikaantuvia komponentteja muun muassa niiden suoravetoisen rakenteen vuoksi. PMSG:n tuottama energia on halpaa. PMSG:n kytkemiseksi verkkoon tarvitaan kuitenkin tehoelektroniikkalaitteita. [1, 5, s. 4]

Suuri osa nykypäivänä asennetuista tuulivoimaloista sisältää DFIG-tuuligeneraattorin eli kaksoissyötetyn liukurengasgeneraattorin. DFIG eli dolby fet inductor generator on nimensä mukaisesti induktiogeneraattori eli epätahtigeneraattori. DFIG:ita käytetään muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa osatehoisilla suuntaajakäytöllä toimivissa systeemeissä. Tällöin roottorin käämitykset on kytketty liukurenkaitten avulla ulkopuoliseen resistanssiin. Resistanssia muuttamalla saadaan aikaiseksi vääntömomentin tai roottorin nopeuden muutoksia. Tästä kerrotaan lisää muuttuvanopeuksisia tuulivoimaloita käsiteltäessä. [6, s.86, 34]

DFIG on halpa, yksinkertainen ja pienikokoinen generaattori, mutta se vikaantuu suhteellisen helposti. Kaikenlaiset viat aiheuttavat luonnollisesti lisäkustannuksia. Erityi-

sesti vaihdelaatikon vikaantuminen on suuri ongelma DFIG-tuuligeneraattoreilla. Yksin vaihdelaatikon huollosta johtuvat lisäkustannukset ovat vuodessa 20–30 % suuremmat kuin PMSG:lla, vaikka DFIG:n alkuperäinen hinta on sitä 30 % pienempi. Vaihdelaatikko joutuu DFIG:ssa altistumaan kuormille, jotka johtuvat transienteista, kuten jännitepulsseista ja taajuuden vaihtelusta. Tästä aiheutuu vaurioita, kuten vaihdelaatikon pintamateriaalien kulumista ja rappeutumista. Liukurenkaita joudutaan kulumisen takia huoltamaan jopa kuuden kuukauden välein ja niitä saatetaan myös joutuva vaihtamaan. Offshore-tuulivoimaloissa eli merellä sijaitsevilla tuulivoimaloissa huolto- tai vaihtoväli on usein vielä lyhyempi. Alhainen lämpötila vaikuttaa negatiivisesti vaihdelaatikoihin. [5, s. 3-10]

Vääntömomentti on muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa vaihteleva, koska tuulen nopeus on luonnollisesti vaihtelevaa, ja tämä on otettava huomioon tuulivoimalan generaattorin toiminnassa. [3, s. 5] DFIG:n staattori on suoraan kiinni verkossa, ja se toimii tyypillisesti 30 % synkroninopeuden yläpuolella, eli rottori pyörii 30 % nopeammin kuin magneettikenttä. Tämä riittää kattamaan suurimman osan tuulennopeuksista. DFIG:ssa on hyvä hyötysuhde. DFIG-tuuligeneraattorilla on kyky välittää nimellistehoaan enemmän tehoa kuumenematta liikaa. [20, s. 26]

2. MUUTTUVANOPEUKSINEN TUULIVOIMALA

Nykypäivänä asennetuista uusista suuren kokoluokan tuulivoimaloista suurin osa on muuttuvanopeuksisia. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala on tuuliturbiini, jonka roottorin nopeus muuttuu tuulen nopeuden muuttuessa. Muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan energiantuotannosta saadaan halpaa ja energiaa saadaan yleisesti tuotettua enemmän verrattuna vakionopeuksiin tuulivoimaloihin. Muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa voidaan käyttää tahti- tai epätahtikonetta. Muuttuva nopeus saadaan aikaiseksi erilaisia suuntaajia käyttämällä tai lisäresistanssin avulla.

2.1 Vakionopeuksisen ja muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan vertailua

Vakionopeukset tuulivoimala, joissa epätahtigeneraattori on suoraan kytketty verkkoon, olivat ensimmäisiä rakennettuja tuulivoimaloita. Niiden käytössä on kuitenkin suuria haittoja verrattuna muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan toimintaan. Vakionopeuksisilla tuulivoimaloilla tuulen eri nopeuksista ei saada muunnettua kovin paljon tehoa tuulivoimalan tehoksi. Vakionopeuksinen tuulivoimala täytyy nimittäin suunnitella toimimaan tietylle tuulennopeudelle, ja tuulen eri nopeudet ovat vaihtelevia (kuva 3). Hyötysuhde jää tällöin pieneksi suurella osalla tuulen eri nopeuksista. Muita ongelmia vakionopeuksisella tuulivoimalalla on esimerkiksi huono loistehon, ja sitä kautta verkkoon syötetyn jännitteen, kontrollointi. Verkkokytkennän yksinkertaisuus ja yksinkertainen rakenne ovat vakionopeuksisen tuulivoimalan hyviä puolia. [19, s. 435]

Suurin osa vakionopeuksisen tuulivoimalan ongelmista poistuu, jos käytössä on muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. Tuulen nopeus on yleensä hyvin vaihtelevaa, joten muuttuvanopeuksiselle tuulivoimalalle on olemassa luonnollinen tarve. Jotta tuulivoimalan toiminta olisi mahdollisimman optimaalista, roottorin pyörimisnopeuden tulisi muuttua tuulennopeuden muuttuessa. Oleellisin seikka muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan toiminnassa on siis se, että tuuliturbiinissa oleva roottori ei pyöri vakionopeudella, vaan pystyy mukautumaan tuulen nopeuden vaihteluihin. Näin pystytään toimimaan maksimaalisessa tehontuotantopisteessä eli tuulen energiaa saadaan vangittua mahdollisimman tehokkaasti. Tuulivoimateollisuudelle on suuri etu, kun tuulen eri nopeuksien tehosta voidaan saada potentiaalisesti irti mahdollisimman suuri hyöty. [15]

Verrattuna vakionopeuksiseen tuulivoimalaan, maksimaalinen tehonsaanti on tärkein muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan etu. Muita asioita, jotka puoltavat muuttuvano-

peuksisen tuulivoimalan käyttöä, ovat muiden muassa melun vähentyminen ja mekaanisen rasituksen väheneminen. Mekaaninen rasitus vähenee, kun tuulen tehon roottorin lapoihin aiheuttamaa vääntömomenttia pystytään kontrolloimaan. Vääntömomentti pysyy tasaisena, kun roottorin pyörimisnopeus ja sitä kautta kineettinen energia kasvaa tuulen nopeuden ja tuulen kineettisen energian kasvaessa. Näin ilmavirtauksen teho ei aiheuta kohtuuttoman suurta vääntömomenttia millään tuulen nopeudella. Samalla pienenee myös vaihdelaatikon kokema rasitus ja vaihdelaatikon osien kuluminen. Suuren kokoluokan tuulivoimaloissa vääntömomentin hallinta on tärkeää, sillä roottorin vääntömomentti voi olla todella suuri. Myös tuotetun tehon laadusta saadaan parempaa ja jännitevälkyntä vähenee. Uusissa suuren kokoluokan tuulivoimaloissa käytetään myös aktiivista sakkaussäätöä. [19, s. 435]

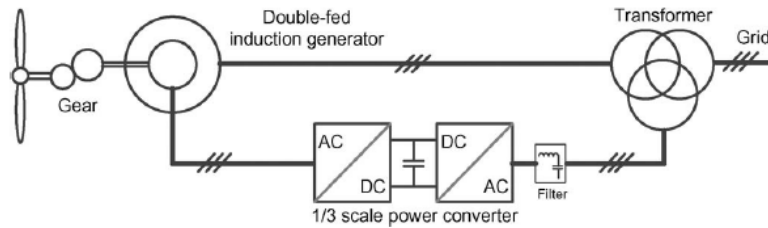
Muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden haittapuolia ovat esimerkiksi kalliimpi hinta sekä monimutkaisempi tehoelektroninen järjestelmä. Tehoelektronikkaa tarvitaan roottorin muuttuvan pyörimisnopeuden toteuttamiseksi. Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat ovat erityisen herkkiä verkossa tapahtuville häiriöille. Esimerkiksi tuulivoimalat, jotka sisältävät DFIG:n, saattavat vaurioitua häiriöiden takia. Pienikin alenema verkkojännitteessä aiheuttaa generaattorin staattorikäilyksessä virran nousun, joka kulkeutuu eteenpäin staattorin ja roottorin magneettisen kytkennän takia. Tällaisten häiriöiden satuttaessa DFIG:t kytketään heti pois verkosta. [19, s. 435, 33, s. 144–151.]

2.2 Muuttuva nopeus osatehoisella suuntaajakäytöllä

Muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan voi toteuttaa yksinkertaisimmillaan kytkemällä tehomuuntimen eli suuntaajan suoraan generaattorin ja verkon välille. Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat ovat yleensä joko osatehoisella suuntaajakäytöllä toimivia tai täystehoisella suuntaajakäytöllä toimivia. Suurin osa nykypäivänä asennetuista tuulivoimaloista toimii osatehoisella suuntaajakäytöllä (kuva 2). Osatehoisella suuntaajakäytöllä toimivan tuulivoimalan generaattori voi olla ainoastaan epätahtigeneraattori. Roottorin nopeutta saadaan muunneltua epätahtigeneraattorin jättämää kasvattamalla. Mitä enemmän jättämää kasvatetaan, sitä suurempi on vaihteluväli, jolla roottori voi pyöriä. Jättämän kasvattamisesta seuraa ylimääräistä tehoa, joka siirretään osatehoisen suuntaajan avulla sähköverkkoon. Tämä teho on yleensä noin 30 % roottorin keräämästä ja generaattorin sähkötehoksi muuntamasta tehosta. Muu teho kulkee staattorin kautta verkkoon. [1, s.85–86]

Osatehoinen suuntaaja on kiinnitettynä roottorin puolelle. Staattori on puolestaan kytketty suoraan verkkoon. Tämä kiinnitys on perustana DFIG:lle eli kaksoissyötetylle liukurengasgeneraattorille. Tehon jakautumista kahteen osaan kutsutaan kaksoissyöttökytkennäksi. Osatehoisella suuntaajakäytöllä toimivat generaattorit ovat siis DFIG-tyyppisiä generaattoreita. Kytkennän ansiosta tehonmuuntimen eli osatehoisen suuntaa-

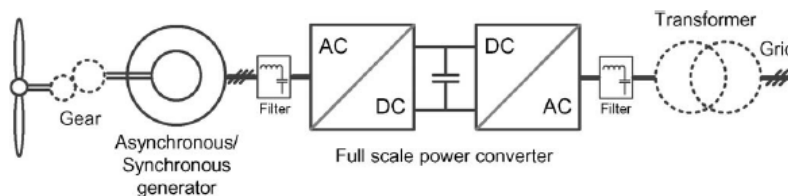
jan pitää prosessoida vain noin kolmasosa koko tehosta. Tämän vuoksi DFIG toimii hyvin suuritehoisissa tuuliturbiineissa ilman suurta ylikuumenemisriskiä. [1, s.85–86]



Kuva 4. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala osatehon suuntaajakäytöllä [6]

2.3 Muuttuva nopeus täyden tehon suuntaajakäytöllä

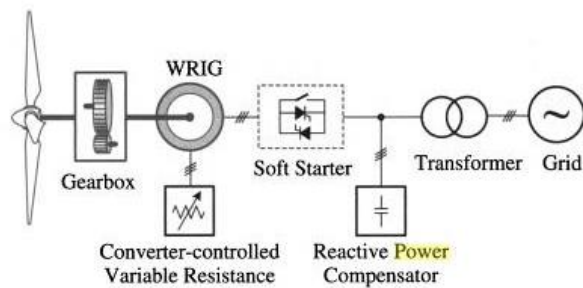
Täyden tehon suuntaajakäytöllä toimivissa muuttuvanopeuksisissa tuulivoimaloissa generaattori on kytketty verkkoon tehonmuuntimen eli suuntaajan välityksellä (kuva 5). Tässä konseptissa suuntaaja on mitoitettu toimimaan generaattorin täydellä nimellisteholla. Tällöin kaikki teho kulkee tehonmuuntimen kautta verkkoon. Tällaisissa tuulivoimaloissa generaattori voi olla tahti- tai epätahtigeneraattori. Kestomagneettigeneraattorit eli PMSG:t toimivat täyden tehon suuntaajakäytöllä. Vaihdelaatikko ei ole täyden tehon suuntaajakäytöllä toimivissa tuulivoimaloissa aina pakollinen. Jos generaattorina on epätahtigeneraattori, tarvitaan vaihdelaatikko. Vaihdelaatikon eliminointi on mahdollista napapareja lisäämällä. Tällaisen tuulivoimageneraattori on oltava suhteellisen hidasnopeuksinen tahtigeneraattori. Täyden tehon suuntaajakäytöllä toimivan tuulivoimalan taajuuden muunnin kompensoi loistehoa ja yhdistää generaattorin verkkoon pehmeästi. [1 s. 84, 6 s. 708–719]



Kuva 5. Muuttuvanopeuksinen tuulivoimala täyden tehon suuntaajakäytöllä [6]

2.4 Rajoitettu muuttuva nopeus

Kun roottorin resistanssia lisätään tehoelektroniikan avulla, voidaan generaattorin roottorin nopeutta säätää siten, että roottorin pyörimisnopeus on noin 4 -10 % suurempi kuin staattorin määrittämä tahtinopeus. Tämä systeemi on luonnollisesti kalliimpi kuin systeemi, jossa roottorin pyörimisnopeutta ei voida säätää.



Kuva 6. Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala. [4]

Tuulen tehosta saadaan vangittua enemmän energiaa jo näin piellä pyörimisnopeuden säädöllä. Rajoitetusti muuttuvanopeuksinen tuulivoimala tulee suuremman energiantuotannon takia lopulta halvemmaksi kuin vakionopeuksinen tuulivoimala. Haittapuolena on, että roottorin resistanssin kasvaessa, teho ei siirry verkkoon, vaan osa energiasta muuttuu lämmöksi. Tämän vuoksi tehomuuntimen eli suuntaajan avulla toteutettu muuttuva nopeus, jossa tehoa ei kulu hukkaan, on huomattavasti parempi ratkaisu. [8, s. 1185]

3. MUUTTUVANOPEUKSISEN TUULIVOIMALAN TEHOELEKTRONIIKKA

Tuulivoimaloiden tehokkuuden parantamisessa tavoitteena on saada pätötehosta mahdollisimman hyvä. Tällöin tuulivoimala tuottaa mahdollisimman suurta tehoa. Myös verkkoon syötettyä tehoa ja loistehoa on pystyttävä valvomaan niin, että muutokset roottorin pyörimisnopeudessa eivät kuormita liikaa sähköverkkoa.

3.1 Tuulivoimalan tehoelektroniikan kehitys 80-luvulta nykypäivään

Tehoelektroniikan kehittymisen vuoksi uusiutuvan energian tuotantokapasiteetti on kasvanut merkittävästi viime vuosina. Tuulivoima on uusiutuvista energian tuotantomuodoista potentiaalisin. Sen avulla tuotettu energia ei ole vielä merkittävä osa koko maailman energiantuotannosta, mutta osuus kasvaa koko ajan. Uusiutuvien energiamuotojen kysyntä on ilmastosyistä yhä suurempaa. Muuttuvanopeuksisessa tuulivoimalassa tehoelektroniikkaa käytetään aina. Nykyisissä vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa on myös todella paljon tehoelektroniikkaa, mutta muuttuvanopeuksista tuulivoimalaa ei voi rakentaa ilman tehoelektroniikka. [1, s. 82]

Tuulivoimaloiden kehityskaari voidaan jakaa voimaloihin, joissa ei ole käytetty tehoelektroniikkaa, voimahoihin, joissa on jonkin verran tehoelektroniikkaa ja voimahoihin, joissa lähes kaikki perustuu tehoelektroniikkaan. Kahdeksankymmentäluvulta lähtien tehoelektroniikan käyttö tuulivoimaloissa on lisääntynyt merkittävästi. Kahdeksankymmentäluvulla tehoelektroniikkaa käytettiin ainoastaan tuulivoimalan käynnistämiseen tyristorisäätöisellä pehmeäkäynnistyksellä, jotta käynnistysvirta saataisiin pienentymään. Tämän jälkeen generaattori oli suoraan kiinni verkossa. Loistehoa kontrolloitiin kondensaattoripankin avulla. Tämä keino on luotettava ja halpa, mutta alkeellinen. Tällöin yhden tuulivoimalan kapasiteetti oli muutaman kymmenen kilowatin luokkaa, kun nykyään suurimpien tuulivoimaloiden kapasiteetti yltää useampaan megawattiin. [8, s. 1185]

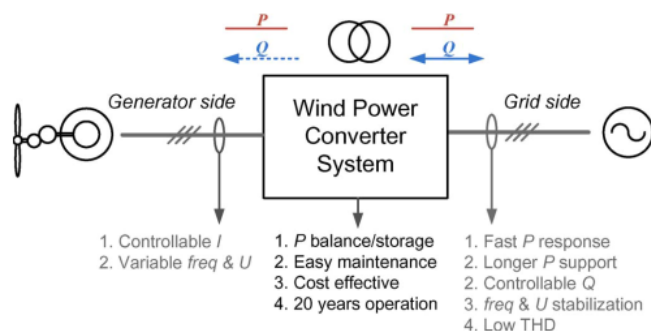
Yhdeksänkymmentäluvun alussa tehoelektroniikkaa käyttö ulottui roottorin resistanssin kontrollointiin diodisiltojen ja tehoelektroniikkakytönten avulla. Tällöin tuulivoimala ei varsinaisesti ole muuttuvanopeuksinen, mutta jonkinlaiseen rajoitettuun muuttuvaan nopeuteen päästiin (kuva 6). Vakionopeuksinen tuulivoimala oli silti yleisin tuulivoima-

latyyppi vielä yhdeksänkymmentäluvun lopulla. Yhdeksänkymmentäluvulla otettiin käyttöön kaksiasteisia tehomuuntimia eli Back-to-back – tehomuuntimia (BTB). [8, s. 1185]

3.2 Tehomuuntimen toimintaperiaate

Kuten aikaisemmin todettiin, tuulivoimalan roottorin nopeuden säätöjärjestelmän parantamiseksi voidaan käyttää tehomuuntajia. Tehomuuntaja on laite, joka toimii tuuliturbiinin generaattorin ja sähköverkon välissä (kuva 7). Tämän takia sen on pystyttävä toteuttamaan vaatimukset, joita tarvitaan sekä sähköverkon, että generaattorin puolella. Generaattoripuolella staattoriin virtaavaa sähkövirtaa tulisi pystyä kontrolloimaan, jotta roottorin pyörimisestä seuraavaa vääntömomenttia voitaisiin säätää. Tämä edesauttaa pätötehotasapainon ylläpitämistä normaaleissa olosuhteissa, kun tuulen tehosta halutaan saada irti mahdollisimman suuri hyöty. Tehomuuntimen pätötehotasapainon kontrolloinnista on myös hyötyä verkon vikatilanteissa. Tehomuuntimen tulisi pystyä kontrolloimaan generaattorin jännitteiden ja taajuuksien amplitudeja. Tehomuunnin on lisäksi pystyttävä toimimaan sähköverkon puolella. [6, s.709,]

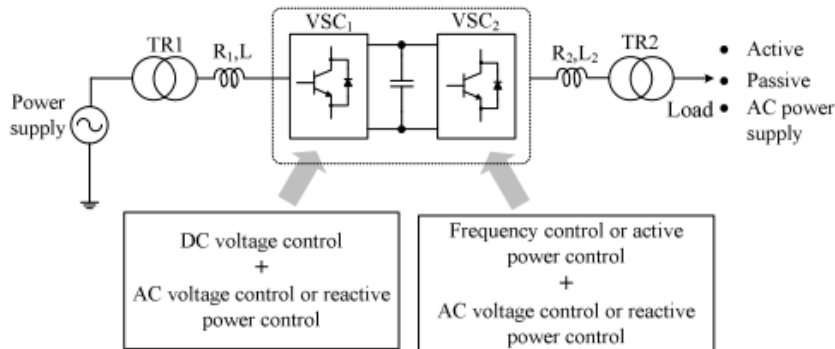
Sähköverkkoon syötetyn energian tulee toteuttaa tietynlaisia laatu- ja standardivaatimuksia. Tehomuuntimen tärkein toiminta verkon puolella on säännellä verkkoon menevää pätö- ja loistehoa. Tehomuuntajan on pystyttävä kontrolloimaan induktiivista ja kapasitiivista loistehoa ja sen pätötehovasteen on oltava nopea. Lisäksi tehomuuntimen tulisi pitää alhaisella tasolla virran THD eli harmoniset säröt. Myös jännitteen ja taajuuden tulisi täyttää verkon vaatimukset ja verkkoon syötetyn tehon tulisi olla kaikin puolin laadukasta. [6, s. 709, 37, s. 247–263.]



Kuva 7. Tehomuuntaja. [6, s.710]

Tyypillinen tuulivoimaloissa käytetty tehomuunnin on kaksiasteinen tehomuunnin. Laitteen toiminnan pohjalla on jännittelähde-muunnin eli Voltage-source coverter (VSC).

Tässä tehomuuntimessa kaksi jännitelähde-muunninta sijaitsevat samassa yksikössä jakaen saman välipiirin eli DC-linkin (kuva 8). Yksi niistä on yhdistetty roottoriin ja toinen verkon puolelle. Näitä järjestelmiä voidaan käyttää hyväksi siis kahden vaihtosähköverkon välillä, jotka halutaan synkronoida yhteen. Kaksiasteinen tehomuunnin toimii kuten ideaali AC/AC – tehomuunnin. Koska tuulen nopeus muuttuu jatkuvasti, välipiirin jännitteessä voi olla välkyntää. Muuntimen on pystyttävä kontrolloimaan muiden muassa välipiirin jännitettä, vaihtojännitettä, taajuutta ja loistehoa. [1, s. 164, 38, s. 807]



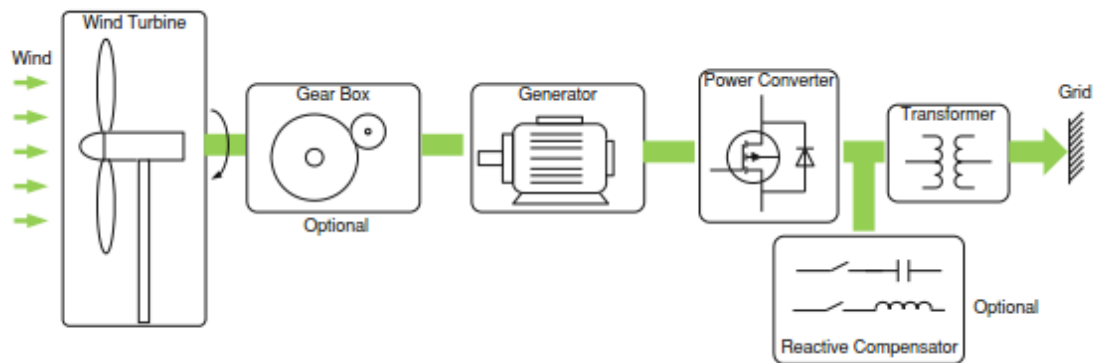
Kuva 8. Kaksiasteisen tehomuuntimen yleinen rakenne. [38]

Kaksiasteisia tehomuuntimia on paljon erilaisia. Ne toimivat kuitenkin suunnilleen samalla periaatteella, vaikka kotrollistrategioissa ja rakenteissa on eroja. Ensin BTB:t otettiin käyttöön DFIG:issa. Nykyään myös PMSG:ssa käytetään täyden tehon suuntaajia, jotka ovat kaksiasteisia tehomuuntimia. Tehomuuntimet generaattorin ja verkon välissä voivat muuntaa tehoa laajalla skaalalla. Tämä aiheuttaa häviöitä, mutta tuulen eri nopeuksista saatu maksimaalinen energia korvaa häviöt taloudellisesti. Nykyiset BTB:t pystyvät kontrolloimaan pätö- ja loistehoa erittäin nopeasti ja toimivasti. Haittapuolena tekniikan kehittymisestä on monimutkainen järjestelmä, jossa on paljon häiriöille altista tehoelektroniikkaa. [6 s. 708–709, 8 s. 1186]

3.3 Muut tehoelektroniikkalaitteet tuulivoimaloissa

Tehoelektroniikan kehittämisellä ja halpenemisellä on keskeinen ja tärkeä merkitys tulevaisuuden tuulivoimateollisuudelle. Nykypäivänä sillä on tärkeä merkitys tehon laadun varmistamisessa, systeemien integroinnissa sekä tuulivoimaloiden luotettavuuden parantamisessa. Ilman tehoelektroniikan nopeaa paranemista, suurten kokoluokan tuulivoimaloiden rakentaminen olisi mahdotonta. Tehoelektroniikan avulla tuulivoimalla tuotetusta energiasta voi jonakin päivänä tulla merkittävä osa koko maailmassa tuotetusta energiasta. Tämä luonnollisesti vähentää hiilidioksidipäästöjä ja ydinvoimalla tuotetun energian osuutta kokonaisenergiantuotannosta. [1, s. 22]

Nykyään loistehoa kontrolloidaan kehittyneillä laitteilla, alkeellisten kondensaattori-pankkien sijasta. Kun tuotetaan suuria tehoja, on jännitteiden amplitudeja ja taajuuksia pidettävä halutulla tasolla. Tähän tarvitaan edistynyttä tehoelektroniikkaa. [6, s. 710, 8 s. 1184–1194]



Kuva 9. Verkkoon kytketyn tuulivoimalan rakenne. [1]

Energian muuntaminen muodosta toiseen nykypäivänä tarkoittaa tehoelektroniikkalaitteiden käyttöä tasa- ja vaihtosuuntaajissa. Tehoelektroniikkalaitteita ovat esimerkiksi diodit, tyristorit, IGBT:t, GTO:t ja joissain tapauksissa IGCT:t. Näitä komponentteja käytetään nykypäivänä lähes kaikissa tuuliturbiinin osissa. IGBT on eniten käytetty tehoelektroniikkakomponentti tuuliturbiinissa. Tehoelektroniikan kehityskohteita tuulivoimaloissa ovat esimerkiksi häviöiden vähentäminen, nopeammat kytkentätaajuuudet, estojännitteiden suurentaminen ja komponenttien saaminen kevyemmiksi ja pienemmiksi. Myös loistehon ja harmonisien yliaaltojen suodatus parantuu jatkuvasti. [1, s. 12–13]

Suodattimilla ja muuntajilla on oleellinen rooli verkkoon syötetyn tehon laadun kannalta. Kaikki tuuliturbiinivalmistajat käyttävät muuntajia generaattorin kytkemiseksi verkkoon (kuva 9). LCL-suodatin on yleisin suodatintyyppi tuulivoimaloissa. [6, s. 709]

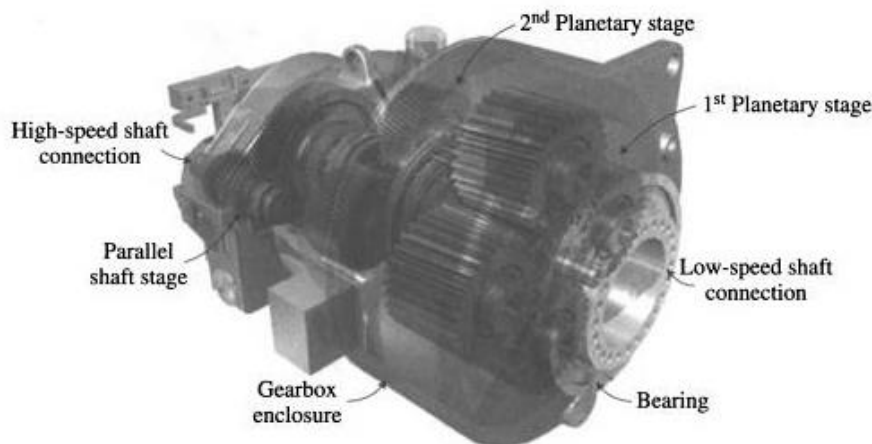
Tuulivoimateollisuus hyötyy tulevaisuudessa tehoelektroniikasta etenkin, koska sähkön laatua voidaan sen avulla parantaa ja koko systeemin stabiiliudesta voidaan tehoelektroniikan avulla saada mahdollisimman hyvä. Tuulivoimalan luotettavuus, suorituskyky ja tehokkuus riippuvat pitkälti tehoelektroniikan saatavuudesta ja sen termisistä sekä sähköisistä ominaisuuksista. Esimerkiksi transistorien, kuten IGBT, tulee kestää suuria jännitteitä ja virtoja. [1, s. 83–84, 23]

4. TUULIVOIMALOIDEN VIKAANTUMINEN

Tuulivoimaloiden vikaantumisesta on suhteellisen vähän tietoa. Viime aikoina uusiutuvan energian kysyntä on kasvanut ja samalla vika-analyysille on tullut kysyntää. Ongelmat tuulivoimaloissa johtuvat usein vaihdelaatikosta, generaattorista, tehoelektronikasta yleisesti tai roottorin vikaantumisesta. Vaihdelaatikat ovat kuitenkin eniten vikaantuva osa tuuliturbiinissa. Vaihdelaatikon tulisi olla mahdollisimman luotettava ja toimia tuuliturbiinissa sen koko käyttöiän eli noin 20 vuotta. Sen vaihtaminen tai korjaaminen on todella kallista.

4.1 Tuulivoimaloiden vaihdelaatikat

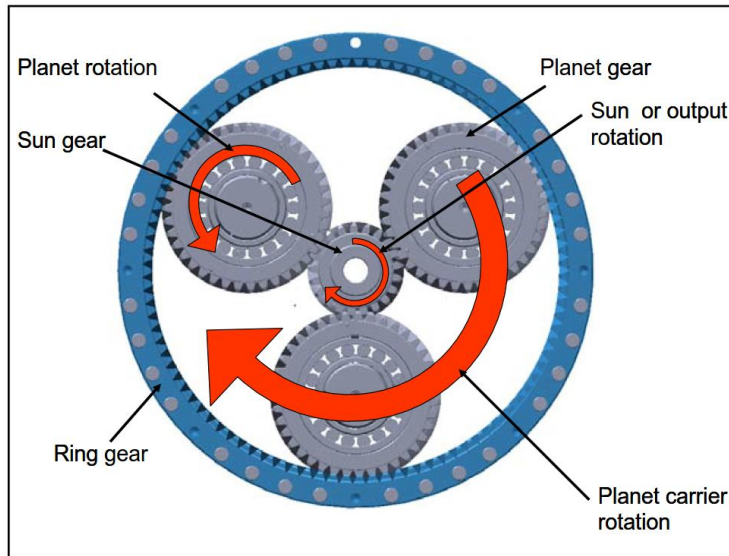
Vaihdelaatikko on mekaaninen laite, jonka avulla siirretään tehoa. Vaihdelaatikossa on hammaspyöriä, jotka pystyvät siirtämään mekaanista energiaa akselilta toiselle. Vaihdelaatikon avulla pystytään muuntamaan vääntömomentin ja pyörimisnopeuden suhdetta. Kolmelapaisissa suurikokoisissa tuulivoimaloissa tämä tarkoittaa roottorin hitaan pyörimisnopeuden, tyypillisesti alle 20 RPM, muuntamista generaattorille suotuisaksi pyörimisnopeudeksi eli 1500–1800 RPM:n. Tuulivoimaloiden koon suurentuessa vaihdelaatikkojen on oltava suurempia ja niiden on kestävä suurempia vääntömomentteja. Vaihdelaatikoiden hyötysuhde on tyypillisesti 95–98 %. [11, 4, s. 30–31]



Kuva 10. Suurikokoisen tuulivoimalan vaihdelaatikko. [4]

Vaihteistot lajitellaan planeettavaihteistoihin (planetary stage) ja rinnakkaisakselivaihteistoihin (parallel shaft stage). Rinnakkaisakselivaihteisto on yksinkertainen vaihteistotyyppi, jossa jokainen vaihde koostuu kahdesta akselista ja hammasrattaasta. Planeettavaihteistossa taas jokainen vaihde koostuu kolmesta liikkuvasta akselista ja hammasrat-

taasta sekä yhdestä niiden keskellä olevasta liikkumattomasta akselistä ja hammasrat-
taasta. Näiden ympärillä on vielä liikkumaton kruunupyörä (kuva 11). Tuulivoimateolli-
suudessa pyritään luonnollisesti siihen, että jokainen tuuliturbiinin konehuoneen kom-
ponentti olisi mahdollisimman kevyt ja pieni. Planeettavaihteiston välityssuhteesta saa-
daan vaihteiston kokoon nähden suurempi, joten se ei ole niin painava tai kookas kuin
rinnakkaisakselivaihteisto. Välityssuhde määritellään käyttävän akselin (high-speed
shaft) pyörimisnopeuden suhteena käytettävän akselin (low-speed shaft) pyörimisno-
peuteen. [13, s. 10–11]



Kuva 11. Planeettavaihteiston toiminta havainnollistettuna. [13]

Planeettavaihteisto kestää lisäksi paremmin suurista vääntömomenteista aiheutuvia kuormia. Tämä johtuu siitä, että se koostuu useammasta rattaasta. Roottorin pyörimisestä aiheutuva kuorma jakaantuu tällöin rattaiden kesken, eikä yksittäinen ratas rasitu liikaa. Suuri välityssuhde tarkoittaa sitä, että vaihteistolla on suuri vääntömomentti ja pieni pyörimisnopeus. Toisaalta häviöt kasvavat välitysmomentin kasvaessa. [13, s. 10–11]

Suuren tuulivoimalan vaihdelaatikossa on yleensä useampi kuin yksi vaihteisto. Kuvassa kymmenen on esimerkki useamman megawatin tuulivoimalan vaihdelaatikosta. Tämän tuuliturbiinin vaihdelaatikossa on kaksi planeettavaihteistoa ja yksi rinnakkaisakselivaihteisto (kuva 10). Välityssuhde on 136:1. [4, s.31]

4.2 Vaihdelaatikon vikaantuminen

Tuulivoimateollisuuden varhaisempina vuosina vaihdelaatikoiden vikoja esiintyi paljon eritoten suunnitteluvaiheessa tapahtuneitten käyttökuormien aliarvioinnista johtuen.

Suurista vääntömomenteista johtuvia tilapäisiä kuormia ja transientteja, jota ilmenee erityisesti käynnistyksen ja pysäytyksen yhteydessä, on vaikea ennustaa. Niitä ei ole otettu tarpeeksi hyvin huomioon tuulivoimaloita suunniteltaessa. Tuulen puhallustehosta aiheutuvasta vääntömomentista saatava teho kuormittaa tuulivoimaloissa olevia komponentteja, kuten vaihdelaatikkoo. Vaihdelaatikkoo valitessa tulee ottaa huomioon, että sille mitoitettuun kuormaan vaikuttaa myös roottorin kuorma, generaattorin kuorma ja jarrutussysteemin kuorma. Suurten tuulivoimaloiden tulee kestää paitsi suurempia vääntömomenteja, myös suurempia välityssuhteita. Vaihdelaatikko on mekaanisesti kaikkein monimutkaisin laite tuuliturbiinissa. [24]

Hammaspyörä eli hammasratas on mekaaninen laite vaihteistossa, jonka avulla siirretään voiman momentti toiselle hammaspyörälle. Sen avulla pyörivä liike voidaan siis siirtää akselilta toiselle. Hammaspyörässä on poikittaisia viistoja eli hampaita, jotka ovat yhteydessä toisiin hampaisiin. [25]

Kulumista tapahtuu kaikkien materiaalien pintarakenteissa. Vaihteistossa tämä tarkoittaa muun muassa hammaspyörien hampaiden kulumista (kuva 11). Hammaspyörien kuluminen on välttämätöntä, sillä hammaspyörät ovat jatkuvassa kontaktissa toisiinsa. Tällöin metalli luonnollisesti kuluu ajan myötä. Voitelu auttaa tähän ongelmaan. Kulumista tapahtuu sitä enemmän mitä suuremmalla vääntömomentilla ja mitä suuremmalla nopeudella rattaat pyörivät. Hammasrattaiden kuluminen on laakeroinnin merkittävin ongelma, joka johtaa tuulivoimaloiden vikaantumiseen. Vaihdelaatikat kulumat eniten, kun tuulennopeus vaihtelee rajusti. Yhtäkkiset tuulenpuuskat ja satunnaiset tuulennopeuden muutokset aiheuttavat sen, että vaihdelaatikolle tulevat kuormat muuttuvat äkillisesti. Kuormien äkilliset muutokset kuluttavat vaihdelaatikkoja. [4, s.31]

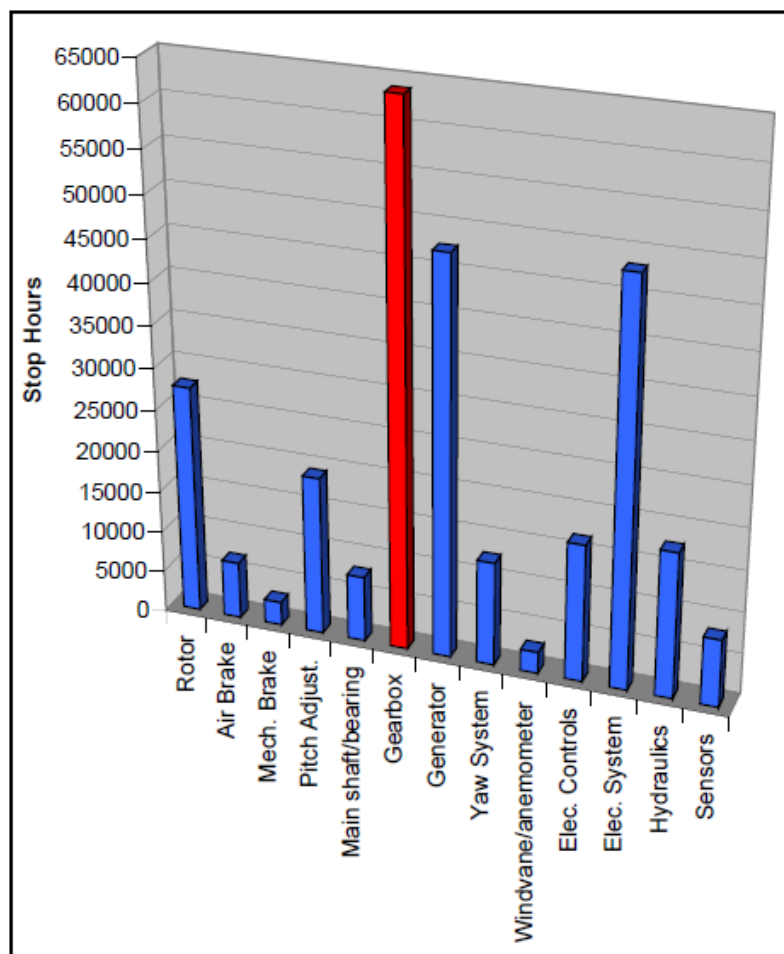


Kuva 11. Hammasrattaiden käytöstä johtuvaa kulumista. [13]

Suurin yksittäinen komponentti, joka aiheuttaa käyttökatkoksen tuulivoimalan toimintaan, on vaihdelaatikko (kuva 12). Pelkästään vikaantuneen vaihdelaatikon korjaaminen tai vaihtaminen voi maksaa todella suuren osan tuulivoimalan alkuperäisen asennuksen hinnasta. Nykyään asennettavien tuulivoimaloiden koon kasvaessa myös niiden lapojen

koot ja painot kasvavat. Tästä seuraa se, että vaihdelaatikkojen pitää kestää yhä suurempia vääntömomenteja. [27]

Vaikka tuulivoimaloiden vaihdelaatikkojen vikaantumiseen on kiinnitetty erittäin paljon huomiota, ovat vikaantumiset edelleen taloudellisesti suurin menetys tuulivoimateollisuudessa. Vikaantumisia tapahtuu edelleen huolimatta siitä, että suunnittelu ja valmistusvirheitä on jo pystytty karsimaan todella paljon. Tuulivoimaloiden huoltaminen ja vaihto vievät taloudellisesti noin 38 % kaikista tuuliturbiiniin liittyvistä kustannuksista. Koska luku on näin suuri, on syitä ja ratkaisuja vikaantumisille yritetty hakea. [23, s. 4]



Kuva 12. Komponentit, jotka ovat aiheuttaneet käyttökatkoksia Saksassa toimivissa tuulivoimaloissa vuosina 2003–2007. [26]

Pienissä noin 500–1000 kilowatin tuulivoimaloissa ja suurissa useamman megawatin tuulivoimaloissa toistuvat samat viat. Jos vikoja pienemmissä tuuliturbiineissa ei saada korjattua, toistuvat viat todennäköisesti myös suuremmissa voimaloissa. Testaamalla pienemmän kokoluokan tuulivoimaloita, voidaan samat potentiaaliset viat saada poistet-

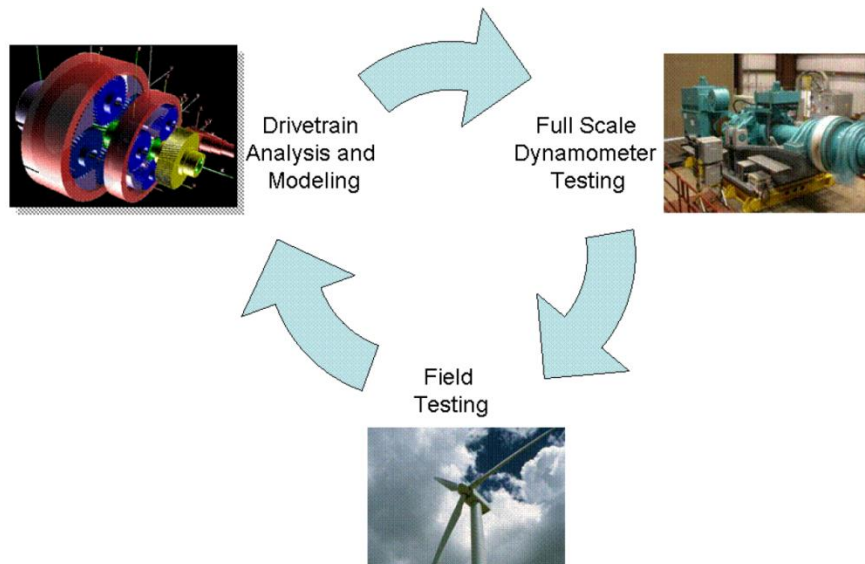
tua tulevaisuudessa asennettavista suuremman kokoluokan voimaloista. Vikoja suuremmissa tuuliturbiinissa voi analysoida soveltamalla pienemmistä tuulivoimaloista saatua tietoa. Tämä on taloudellista, sillä pienempien tuulivoimaloiden testaaminen on halvempaa. [28]

Vaikka on selvää, että vaihdelaatikkojen vikaantumisia tapahtuu todella paljon, ja että vaihdelaatikko on selvästi ongelmallisim ja vioittuvin osa tuuliturbiinissa, ei vikaantumisen syistä ole päästy täyteen yksimielisyyteen. Vaihdelaatikkojen toimintaa on tarkkailtu ja useampia testauksia on tehty, jotta vikoja saataisiin karakterisoitua. [24, s. 14]

Kun vikaantuneita vaihdelaatikkoja on tutkittu, on huomattu, että viat juontavat suunnitteluvaiheesta. Tuulivoimateollisuudessa on paljon kilpailua, joten valmistajat eivät halua jakaa tietoa toistensa kanssa. Useammat tuulivoimalavalmistajat tekevät samoja virheitä vaihdelaatikkojen kanssa. On ymmärrettävää, että jokainen yritys haluaa pitää patenttinsa ja kehitystyönsä salassa. Ongelmaksi muodostuu myös se, että turbiinivalmistajien tulisi ymmärtää paremmin vaihdelaatikkojen toimintaa ja vaihdelaatikkojen valmistajien tulisi ymmärtää paremmin, minkälaisille kuormille tuulivoimaloissa olevat vaihdelaatikat joutuvat altistumaan. Alalla tarvittaisiin kattavampaa yhteistyötä ja avoimuutta eri valmistajien välillä, jotta vaihdelaatikkoviat saataisiin vähentymään jo suunnitteluvaiheessa. [29]

Lisäksi samat vikaantumisiin johtavat ongelmat voidaan yleistää koskemaan kaikkia tuulivoimaloita, valmistajasta ja turbiinimallista riippumatta. Eri valmistajien vaihdelaatikat ovat lopulta samankaltaisia, huolimatta lähes olemattomasta yhteistyöstä. Suurin osa ongelmista ei ole seurausta huonosta työn laadusta asennusvaiheessa tai muista laatuuseikoista, vaikka laatua on aina hyvä kehittää. Jotkin ongelmat johtuvat työn laadusta, mutta valmistajat saavat ne helposti poistettua kiinnittämällä huomiota laatutekijöihin. Jos vaihdelaatikko vikaantuu, todennäköisin vikaantunut osa on laakeri. [28, s. 2]

Vaihdelaatikoiden vikaumisessa ongelmallisim osa-alue onkin nimenomaan laakerointi (bearing). Laakerointivikoja ilmenee paljon, vaikka vaihdelaatikat olisi suunniteltu niin, että laakerointiin käytetyt osat ja komponentit olisivat parhaita mahdollisia saatavilla olevia. Laakerointimenetelmien kehittyminen ja heikkouksien tunnistaminen on tärkeää, jotta vaihdelaatikoista saataisiin tulevaisuudessa kestävämpiä ja luotettavampia. Jotta koko tuulivoimalan toiminnasta saataisiin luotettavampaa, on siis keskityttävä laakeroinnin heikkouksiin ja puutteellisuuksiin. Suunnittelu, laboratoriotestausta ja kenttätutkimus ovat kolme työvaihetta, jotka pitäisi saada sovitettua yhteen, jotta vaihdelaatikoista saataisiin parempia (kuva 13). [28, s. 3]



Kuva 13. Tuuliturbiinin analysointi, dynaaminen testaus ja kenttättestaus. [28]

4.3 Viat tehoelektronikassa

Tuulivoimaloissa generaattorin vikaantuminen aiheutuu yleensä laakeroinnista, staattorista tai roottorista. DFIG:n vioista noin 40 % johtuu laakeroinnista, 38 % staattorista, 10 % roottorista ja 12 % muista tekijöistä. Tekijöitä, jotka aiheuttavat staattorin ja roottorin vikaantumisia ovat piirien avaamis- ja sulkemisongelmat, erilaiset viat käämityksissä tai ilmavälin epänormaalius. [42, s. 1839]

Yksi tapa välttää vaihdelaatikkoviat on tehdä tuulivoimaloista suoravetoisia, eli jättää vaihdelaatikko kokonaan pois. Näin myös vaihdelaatikon huollosta ja vaihtamisesta aiheutuvat kustannukset poistuvat. Tällöin tehomuuntimesta tulee välttämätön ja oleellinen osa tuulivoimalan toimintaa. Kuten edellä on todettu, tätä periaatetta käytetään kestopagneettigeneraattorissa eli PMSG:ssa. Vaikka vaihdelaatikko onkin suurin vikaantuva komponentti tuulivoimaloissa, ei suoravetoisten tuulivoimaloiden vikaantuminen ole sen harvinaisempaa juuri lisääntyneen tehoelektronikan takia. Suuntaajaviat ja viat muussa tehoelektronikassa aiheuttavat vikaantumisia suoravetoisissa tuulivoimaloissa. Tehoelektronikkaviat eivät aiheuta niin pitkää häiriöaikaa kuin vaihdelaatikkoviat, mutta niiden seuraukset ovat dramaattisemmat. [22, s. 725, 41, s. 2]

Suurissa suoravetoisissa tuulivoimaloissa tapahtuu vikaantumisia paljon enemmän kuin pienemmissä vastaavissa. Suoravetoisten tuulivoimaloiden vikaantumisessa on kuitenkin se hyvä puoli, että huoltotyöt päästään usein aloittamaan nopeasti. Tällöin voimala saadaan takaisin käyttöön nopeammin. Tärinä ja värähtely aiheuttavat vikaantumisia myös elektroniikkalaitteisiin. Tehoelektroniset systeemit maksavat vain noin prosentin tuulivoimalan rakennuksen kustannuksista, mutta aiheuttavat 13 % vikaantumisista. Sähkökoneita ei siis ole otettu mukaan tähän laskelmaan. Tehoelektronikkaviat ovat yleisiä tuulivoimaloissa, jotka ovat muuttuvanopeuksisia ja suoravetoisia. [41, s. 4]

Edellä totesimme, että tuulivoimaloiden vikaantumisen analysointi ja vikojen diagnosointitekniikat ovat kehittyneet paljon. Tehoelektroniikkavikojen analysointi on kuitenkin hankalaa, sillä aikaväli vikaantumisen ja vikaantumisesta aiheutuneen katastrofin välillä on todella pieni. Varsinkin puolijohdekomponentit, kuten IGBT, aiheuttavat vikaantumisia. [41, s. 4]

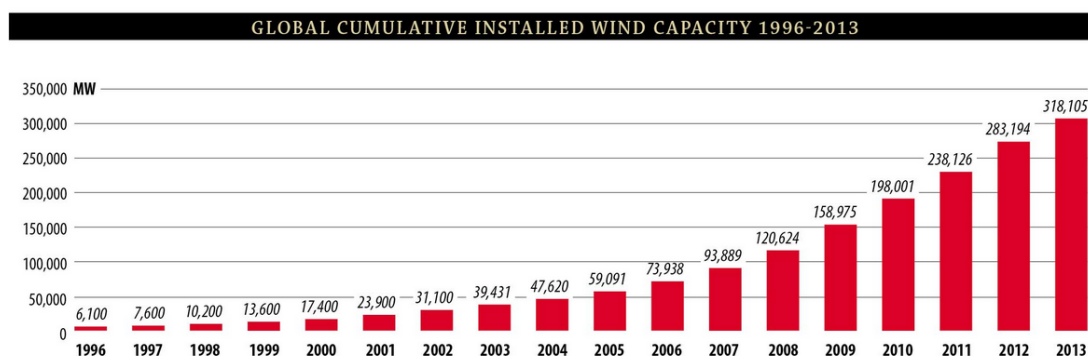
4.4 Muut vikaantuvat osat ja vikaantumista aiheuttavat ympäristötekijät

Uudet tuulivoimalat on suunniteltu toimimaan yli 20 vuotta, joten vaatimukset tuuliturbiinien kestävyydelle ovat korkeat. Nykyiset tuulivoimalat rakennetaan usein merelle, jossa huoltoyhteydet ovat huonot. Tehojen kasvaessa vaihdelaatikon ja roottorien siipien on kestettävä yhä suurempia rasituskuormia. [40, s. 1167]

Oleellisimmat komponentit tuulivoimalan toiminnan kannalta sijaitsevat korkean tornin päässä ja tämän vuoksi ne joutuvat kestävänsä värähtelyä ja hankalia sääolosuhteita. Vaihdelaatikkojen osalta ongelmana on se, että tuulivoimaloiden vaihdelaatikkojen toimintaympäristöt ovat haastavampia kuin useimpien vaihdelaatikkosovellusten toimintaympäristöt yleensä ovat. On monia seikkoja, joita tulee ottaa huomioon, kun tuulivoimalaan valitaan vaihdelaatikko tai jo valittuun vikaantuneeseen vaihdelaatikkoon yritetään etsiä korvaavia osia. Muun muassa huollettavuudesta ja voitelusta tulee vaikeaa, kun vaihdelaatikko sijaitsee kymmenien metrien korkeudessa. Myös generaattorin uudelleenasetus maksaa paljon. Sääolosuhteet saattavat vaikuttaa huoltotöihin ja tuulivoimalan käyttöönottoon vikaantumisen jälkeen. Jos nostokurkia ei voida sään takia käyttää, viivästyvät huoltotyöt. Kylmä ilmasto ja pakkasen vaikuttavat muutenkin kielteisesti tuulivoimalan ja etenkin vaihdelaatikon toimintaan. [28, s. 87–91]

Roottorin siivet ovat yksi helposti vikaantuva osa tuulivoimalassa (kuva 12). Roottorin lavat joutuvat taipumaan suurilla tuulen nopeuksilla ja sietämään tuulennopeuden vaihteluista johtuvia kuormien muutoksia. Lisäksi lavat kärsivät korroosiosta ja värähtelystä. Tuulivoimalan lapojen suunnittelussa tähdätään siihen, että roottorin lavat olisivat kestävämpiä ja materiaalikustannukset alhaisempia. Lapojen vika-analyysissä auttaa se, että viat ovat usein ilmeisiä ja helposti selitettävissä toisin kuin vaihdelaatikkoviat ja viat tehoelektroniikassa. Suomessa tuulivoimalan lavat saattavat jäätyä, jolloin lapakulmien säädöstä tulee haastavaa. Noste ei pysty tarttumaan jään peittämään tai likaiseen lapaan yhtä hyvin kuin puhtaaseen lapaan. Teknologian tutkimuskeskuksen mukaan Suomessa säätömekanismien vikaantuminen on huomattavan suuri syy käyttökatoille tuulivoimaloissa. Vuonna 2011 käyttökatoja lapakulman säätöjärjestelmän vikaantumisen takia oli enemmän kuin käyttökatoja vaihdelaatikkovikojen takia. [39, 41, s. 4-5]

5. TEKNINEN KEHITYS JA TULEVAISUUDEN- NÄKYMÄT



Kuva 14. Tuulivoiman maailmanlaajuinen kapasiteetti eri vuosina. [36]

Tuulivoimalat ovat kehittyneet huimasti viimeisen 30 vuoden aikana. Niistä on tullut huomattavasti luotettavampia, tehokkaampia ja ne tuottavat sähköä paljon halvemmalla kuin ennen. Tuulivoimateollisuus on kehittynyt myös korkean teknologian alaksi. Tuuliturbiinien tuottaminen alkaa olla yhä harvemman valmistajan käsissä. Maailmanlaajuisen tuulivoiman asennettu kapasiteetti on kasvanut eksponentiaalisesti (kuva 14). Kehityksen oletetaan myös jatkuvan. Tätä kehitystä on edesauttanut perinteisten energiamuotojen kustannusten kasvu sekä tuulivoiman kustannusten aleneminen. Myös poliittiset kannustimet, kuten siirtotariffit, lisäävät vähemmän saastuttavien energianlähteiden käyttöä, unohtamatta kuluttajien vaatimuksia. Vuoteen 2020 mennessä tulisi EU:n alueella 20 % tuotetusta energiasta olla uusiutuvaa energiaa. [1]

Kustannusten vähentämiseen kiinnitetään tuulivoimateollisuudessa paljon huomiota. Tuulivoimaloiden hinnat sekä niiden avulla tuotetun sähkön hinta ovat laskeneet tasaisesti 1980-luvulta lähtien. Tämän kehityksen oletetaan jatkuvan. Tuulen nopeuden mittaamisessa käytetyistä sensoreista ja muista kontrollointisysteemeistä ja tuulivoimaloihin sulautetuista järjestelmistä tulee tietotekniikan kehittymisen myötä halvempia. Myös vaikeiden kontrollointialgoritmien hallinta paranee. Tietotekniikan kehittyminen ja tietokoneiden hinnan aleneminen auttaa insinöörejä mallintamaan ja simuloimaan esimerkiksi tuuliturbiinien aeroelastista käyttäytymistä sekä kehittämään tuulivoimaloista yhä tehokkaampia ja luotettavampia. [10, s. 59]

Sähkön hinta kilowattitunnilta saadaan alas, kun tuulen tehoa voidaan käyttää hyväksi mahdollisimman paljon. Nykypäivänä tuulivoiman avulla tuotetun sähkön hinta on kilpailukykyistä hiilen avulla tuotetun sähkön hinnalle. Tuulivoimaloita asennetaan yhä enemmän ja ne pystyvät tuottamaan yhä suurempia tehoja. Myös tuuliturbiinien koot ja kapasiteetit tulevat kasvamaan. Voimaloiden lavat on kuljetettava pystytyspaikalle, mutta logistiikka pystytään kuitenkin järjestämään suhteellisen vaivattomasti. Suuren kokoluokan tuulivoimalat vaikuttavat myös maisemaan, sillä ne näkyvät kauas. Visuaaliset seikat ja estetiikka on yksi asia, johon tuulivoimalavalmistajat huomiota. [9, s. 750–758]

Tulevaisuuden trendi on uusien tuulivoimaloiden rakentaminen merelle offshore-tuulipuistoiksi (kuva 15). Tällöin tuulivoimaloitteiden maisemalliset vaikutukset ovat vähäiset, sillä kohde sijaitsee kaukana asutuksesta. Merelle rakennettavat tuulivoimalat ovat suhteellisen uusi konsepti. Merellä tuulen nopeus on keskimäärin yli 3 m/s suurempi kuin maalla, ja tämä on merkittävä hyöty ottaen huomioon ilmavirtauksen nopeuden vaikutuksen lopulliseen tehonsaantiin. Merelle asennettavat voimalat ovat suuria. Tulevaisuudessa rakennetaan merelle yli 5 MW:n voimaloita. Koska voimalat sijaitsevat kaukana merellä, haasteeksi nousee tekniikka etenkin, jos vesi on syvää rakennuskohdassa. Tehoelektroniikka on jälleen suuressa roolissa. Tekniikkaa tarvitaan, jotta kaukana sijaitsevien kohteiden jännitteiden ja taajuuksien transientteja voitaisiin kontrolloida sekä pätö- ja loistehotasapainoa voitaisiin ylläpitää. [8 s. 1186]



Kuva 15. *Offshore-tuulivoimalan rakennustyömaa. [1]*

Tehon siirrossa mereltä rannikolle on pohdittava myös taloudellista näkökulmaa ja häviöiden minimoimista. Tehonsiirrossa käytetään tyypillisesti vaihtovirtaa. Suurjännite-tasavirta (HVDC) on korkeajännitteistä tasavirtaa, jota voidaan käyttää siirrettäessä sähköä pitkiä matkoja varsinkin merellä. Suurjännitetasavirran käyttö on yksi esimerkki

tulevaisuuden tehonsiirtomahdollisuuksista. Kytkehdäviöiden vähentyminen tehoelektronikassa mahdollistaa paljon uusia innovaatioita ja on pohjana myös suurjännite-tasavirran käytölle. [1, s.12]

Tuulisuus riippuu pitkälti meteorologisista vaihteluista ja tuulen nopeus on erittäin vaihtelevaa jo hyvin pienillä aikaväleillä. Tämän takia tuulivoimaloiden tuottamat energiamäärät ovat hyvin vaihtelevia ja vaihtelut on otettava huomioon verkkoon syötetyn energian kannalta. Suunnittelu, tiedonkeruu ja ennustaminen ovat tärkeitä asioita tuulivoimalayksiköiden luotettavuuden parantamiseksi. Tämän takia myös energian varastointitekniikoiden kehittyminen on suuressa roolissa tulevaisuudessa. [1, s.13–16]

Tuulivoimateollisuudessa seurataan tarkasti kaikenlaista kehitystä tehoelektronikkalaitteissa. Suuri tehonkesto, pienet häviöt sekä nopea kytkentätaajuus, ovat ominaisuuksia, joita tehoelektronikkalaitteilta odotetaan. Piikarbidi (SiC) on piin ja hiilen muodostama keraaminen yhdiste, joka soveltuu hyvin tehoelektronikkakytkimiin. Piikarbidikytkimet ovat tehokkaita, ja niiden kytkentäominaisuudet ovat ylivoimaisia verrattuna muihin materiaaleihin. Materiaalin avulla voidaan pienentää joidenkin komponenttien kokoa ja painoa. Esimerkkinä tehomuuntajan välipiiri eli t dc-linkki. [31, s.1868] Häviöiden vähentäminen on oleellinen tutkimuskohde tehoelektronikassa. Nopeiden ja pienihäviöisten puolijohdekytkinten kehittyminen on paljon seurattu asia siis myös tuulivoimateollisuudessa. Piikarbidi kestää piihin nähden suurempaa läpilyöntijännitettä, sen resistanssi on puhdasta piitä kymmenen kertaa pienempi ja se pystyy toimimaan korkeammassa lämpötilassa. Piikarbidikytkimillä on siis hyvät mahdollisuudet yleistyä varsinkin turbiineissa käytettävissä tasa- ja vaihtosuuntaajissa. [1, 17, s. 324]

Yksi paljon seurattu asia tuulivoimateollisuudessa on korkean lämpötilan suprajohteet (HTS) ja niiden käytön yleistyminen. Resisttiivisyyden häviäminen ja suprajohteen kyky hylkiä ulkoista magneettikenttää edesauttavat monissa tuulivoimasovelluksissa. Suprajohtavien materiaalien käytössä sähkön siirrossa ja suprajohtavissa kytkimissä on paljon potentiaalia. Myös kestopagneettigeneraattoreissa voidaan käyttää hyödyksi suprajohtavuutta. Koska suprajohtavuuden avulla päästään korkeaan virrantiheyteen ja tasavirran resistanssi häviää, voidaan sitä käyttää sähkönsiirrossa. Visioita suprajohtavuuden käytöstä suurjännitetasavirran avulla siirrettävästä sähkötehosta on paljon. [1]

Vaihdelaatikat ovat tulevaisuudessakin eniten vikaantuva osa tuulivoimalassa. Jotta tuulivoimasta saataisiin halvempaa, on niiden luotettavuuden parantamiseen keskitettävä paljon resursseja. Vaihdelaatikoiden luotettavuus on toki parantunut tähän päivään mennessä jo huomasti. Joitain yhteistyöprojekteja on käynnistetty, jotta vaihdelaatikkojen luotettavuutta voitaisiin parantaa. Yksi näistä on esimerkiksi vuonna 2007 NREL:n eli USA:n uusiutuvan energian laboratorion käynnistämä projekti nimeltään Gearbox Reliability Collaborative (GRC). Projekteissa pyritään kokoamaan eri tahoja ja asiantuntijoita, kuten tuulivoimalavalmistajia ja tutkijoita. Vaihdelaatikkoja analysoidaan, sekä testataan, seurataan ja tarkkaillaan kentällä, jotta saataisiin selville paremmin syitä

vaihdelaatikkojen vikaantumisille ja vaihdelaatikoista voitaisiin tehdä kestävämpiä ja luotettavampia. Projektissa on keskitytty erilaisten kuormien vaihteistoon ja laakerointiin aiheuttamien vikojen analysointiin. Yksi testattava vaihdelaatikko asennettiin Ponnequinin tulipuistoon syyskuussa 2009. Projekti jouduttiin keskeyttämään vain kahden kuukauden jälkeen laakeroinnissa tapahtuneen ylikuumenemisen sekä öljyvuotojen takia. Testi jouduttiin keskeyttämään, jotta mahdolliselta suuronnettomuudelta pystyttäisiin välttymään. [30]

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä oli aluksi tarkoitus keskittyä lähinnä tuulivoimaloiden vikaantumiseen ja erityisesti vaihdelaatikkojen vikaantumiseen. Aluksi minulla oli oletus, että vikaantumisten syyt liittyisivät enemmän tuulivoimalan tehoelektroniikkaan. Tai ainakin, että tehoelektroniikka olisi taustatekijänä suuremmassa osassa tuuliturbiinionnettomuuksia. Kuten työssä moneen otteeseen todettiin, vaihdelaatikat ovat yleisin syy voimalaonnettomuuksille, tuulivoimaloiden vikaantumisille ja käyttökatkoksille. Vaihdelaatikkoviat johtuvat kuitenkin yleensä laakeroinnista tai hammasrattaista. Esteeksi tuli siis se, että näiden vikaantumisten syyt ovat lähinnä materiaalien korroosiosta ja kulumisesta johtuvia. Koska kandidaatintyö suoritetaan tehoelektroniikan laitokselle, ei työssä voi käsitellä pelkästään materiaalioppia. Tehoelektroniikan vikaantuminen aiheuttaa toki tuulivoimaloiden vikaantumisia, mutta vaihdelaatikoiden on ylivoimaisesti eniten vikaantuva komponentti tuulivoimaloissa. Tämän vuoksi suuri osa työstäni keskittyy vaihdelaatikoihin. Myös generaattoriviat ovat suurimmaksi osaksi laakeroinnista johtuvia.

Työstä muotoutui yleiskatsaus muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden toimintaan, vikaantumiseen ja tehoelektroniikkaan. Tehoelektroniikka on merkittävä osa muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden toimintaa. Työni keskittyi lopulta suunniteltua enemmän tuulivoimaloiden yleiseen tehoelektroniikkaan vikaantumisen sijasta. Tehoelektronikassa keskityttiin erilaisiin suuntaajakäyttöihin. Suuntaajakäyttöihin ja tehomuuntimen toimintaan olisi voinut keskittyä vielä enemmän, mutta silloin alkuperäinen idea tuulivoimaloiden vikaantumisen analysoinnista olisi jäänyt varjoon. Vaikka tehoelektroniikan tarkastelu tuulivoimaloiden vikaantumisten kannalta ei ollut niin mielekäs tai oleellista kuin aluksi luulin, on tehoelektroniikan kehittyminen tärkeä osa tuulivoimaloiden kehitysprosessissa. Tämän vuoksi se on hyvin mielenkiintoinen aihe. Teknisen kehityksen keskeisyyden merkityksen takia halusin käydä lopuksi läpi innovaatioita ja tulevaisuudennäkymiä tuulivoimateollisuudessa.

Yksi haaste kandidaatintyössäni oli suomenkielisten tehoelektroniikkatermien puuttuminen. Tieteellinen tehoelektroniikkasanasto on lähinnä englanninkielistä ja välillä oli vaikea löytää suomennoksia. Tämän takia työssäni käytetään paljon englanninkielisiä termejä. Monilla tehoelektroniikkakomponentilla on suomenkielinen nimi. Esimerkiksi IGBT on suurtehoinen bipolaaritransistori, mutta nimi on niin pitkä ja vähän suomen kielessä käytetty, että olen suosiolla käyttänyt lyhennettä IGBT.

Koska työni alussa keskityin lähinnä pelkästään vaihdelaatikoihin, on niiden toimintaa eritelty tarkasti. Vaihdelaatikoista tarvitaan paljon enemmän tutkimustietoa. Tehoelektroniikan luotettavuuden parantamiseen on myös käytettävä resursseja. Vaikka generaat-

torien ja etenkin vaihdelaatikkojen vikaantuminen aiheuttaa eniten häiriöaikaa, on teho-elektroniikan vikaantumisella katastrofaalisemmat seuraukset.

LÄHTEET

- [1] Muyeen S. Wind energy conversion systems. : Springer; 2012.
- [2] Gasch R, Twele J. Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation. : Springer Science & Business Media; 2011.
- [3] Manwell JF, McGowan JG, Rogers AL. Wind energy explained: theory, design and application. : John Wiley & Sons; 2010.
- [4] Lang Y, Zargari N, Kouro S. Power conversion and control of wind energy systems. : John Wiley & Sons; 2011.
- [5] Power system architecture: finding the best solution for a 5MW wind turbine. EWEA Offshore Wind Conference, Amsterdam; 2011.
- [6] Blaabjerg F, Liserre M, Ma K. Power electronics converters for wind turbine systems. Industry Applications, IEEE Transactions on 2012;48(2):708–719.
- [7] Aura L, Tonteri AJ. Sähkökoneet ja tehoelektroniikan perusteet. Porvoo: WSOY; 1996.
- [8] Blaabjerg F, Chen Z, Kjaer SB. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems. Power Electronics, IEEE Transactions on 2004;19(5):1184-1194.
- [9] Xu L, Cartwright P. Direct active and reactive power control of DFIG for wind energy generation. Energy Conversion, IEEE Transactions on 2006;21(3):750-758.
- [10] Redlinger RY, Andersen PD, Morthorst PE. Wind energy in the 21st century: Economics, policy, technology, and the changing electricity industry. : Palgrave Macmillan Publishers Ltd; 2002.
- [11] Drago RJ. Fundamentals of gear design. : Butterworth-Heinemann; 1988.
- [12] Gasch R, Twele J. Wind power plants: fundamentals, design, construction and operation. : Springer Science & Business Media; 2011.
- [13] Oyague F. Gearbox modeling and load simulation of a baseline 750-kW wind turbine using state-of-the-art simulation codes. : National Renewable Energy Laboratory; 2009.

- [14] Wind turbine gearbox technologies. Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), 2010 1st International: IEEE; 2010.
- [15] Miller A, Muljadi E, Zinger DS. A variable speed wind turbine power control. IEEE Trans Energy Convers 1997;12(2).
- [16] Barnes S, Maekawa S. Generalization of Faraday's law to include nonconservative spin forces. Phys Rev Lett 2007;98(24):246601.
- [17] Strategic considerations for unipolar SiC switch options: JFET vs. MOSFET. Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE: IEEE; 2007.
- [18] Carrasco JM, Franquelo LG, Bialasiewicz JT, Galván E, Guisado RP, Prats MA, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. Industrial Electronics, IEEE Transactions on 2006;53(4):1002-1016.
- [19] Morren J, De Haan SW. Ridethrough of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. Energy conversion, IEEE transactions on 2005;20(2):435-441.
- [20] Lang Y, Zargari N, Kouro S. Power conversion and control of wind energy systems. : John Wiley & Sons; 2011.
- [21] Baroudi JA, Dinavahi V, Knight AM. A review of power converter topologies for wind generators. Renewable Energy 2007;32(14):2369-2385.
- [22] Polinder H, Van der Pijl, Frank FA, De Vilder G, Tavner PJ. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines. Energy conversion, IEEE transactions on 2006;21(3):725-733.
- [23] Oyague F. Gearbox modeling and load simulation of a baseline 750-kW wind turbine using state-of-the-art simulation codes. : National Renewable Energy Laboratory; 2009.
- [24] McNiff BP, Musial WD, Errichello R. Variations in gear fatigue life for different wind turbine braking strategies 1991.
- [25] Ku P. Gear failure modes—importance of lubrication and mechanics. ASLe Transactions 1976;19(3):239-249.
- [26] Jebaraj S, Iniyar S. A review of energy models. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2006;10(4):281-311.

- [27] Wind turbine gearbox technologies. Nuclear & Renewable Energy Conference (INREC), 2010 1st International: IEEE; 2010.
- [28] Improving wind turbine gearbox reliability. European Wind Energy Conference, Milan, Italy; 2007
- [29] Oyague F. Gearbox modeling and load simulation of a baseline 750-kW wind turbine using state-of-the-art simulation codes. : National Renewable Energy Laboratory; 2009.
- [30] Link H, LaCava W, Van Dam J, McNiff B, Sheng S, Wallen R, et al. Gearbox reliability collaborative project report: findings from phase 1 and phase 2 testing. Contract 2011;303:275-3000.
- [31] Friedli T, Round SD, Hassler D, Kolar JW. Design and performance of a 200-kHz all-sic jfet current dc-link back-to-back converter. Industry Applications, IEEE Transactions on 2009;45(5):1868-1878.
- [32] Errichello R. Buying the Best Gearbox. Mach Des 1988;60(16):87-91.
- [33] Slootweg J, De Haan S, Polinder H, Kling W. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations. Power Systems, IEEE Transactions on 2003;18(1):144-151.
- [34] Xu L, Wang Y. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions. Power Systems, IEEE Transactions on 2007;22(1):314-323.
- [36] Council GWE. Global wind report 2013. Brussels, Belgium 2014.
- [37] Hansen AD, Iov F, Blaabjerg F, Hansen LH. Review of contemporary wind turbine concepts and their market penetration. Wind Eng 2004;28(3):247-263.
- [38] Study of the bidirectional power flow in Back-to-Back converters by using linear and nonlinear control strategies. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011 IEEE: IEEE; 2011.
- [39] Schroeder K, Ecke W, Apitz J, Lembke E, Lenschow G. A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade. Measurement Science and Technology 2006;17(5):1167.
- [40] Schroeder K, Ecke W, Apitz J, Lembke E, Lenschow G. A fibre Bragg grating sensor system monitors operational load in a wind turbine rotor blade. Measurement Science and Technology 2006;17(5):1167.

- [41] A review of recent advances in wind turbine condition monitoring and fault diagnosis. *Power Electronics and Machines in Wind Applications, 2009. PEMWA 2009.* IEEE: IEEE; 2009.
- [42] Condition monitoring of wind generators. *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the: IEEE; 2003.*