

# PMSG vs. DFIG

## KANDIDAATINTYÖ

## SISÄLLYSLUETTELO

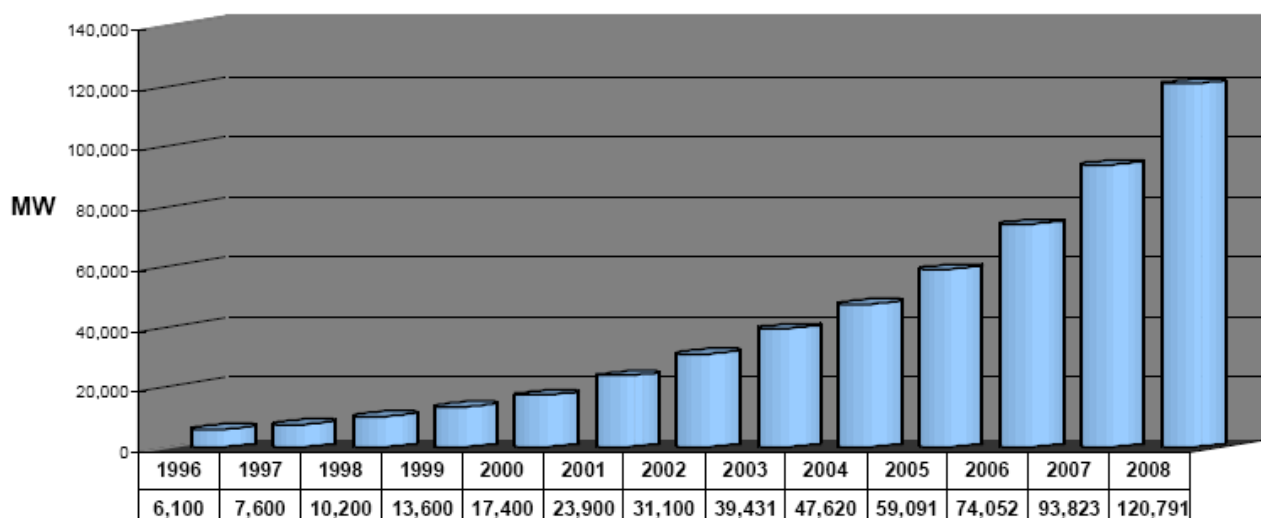
1. JOHDANTO .....	4
2. TUULIVOIMAKÄYTÖT.....	5
2.1 Kaksoissyötetty induktiogeneraattori.....	6
2.2 Kestomagneettigeneraattori .....	7
2.3 4-kvdranttinen täystehokonvertteri .....	8
2.4 Vaihdelaatikko tuulivoimakäytöissä.....	10
3. SUORITUSKYKY.....	11
3.1 Tuulivoimalan energian tuotto .....	15
3.2 Yhteenveto .....	18
4. VERKON VIKATILANTEET JA NIIDEN HALLINTA.....	18
4.1 DFIG verkon vikatilanteissa .....	19
4.1.1 Rautakanki (Crowbar).....	19
4.1.2 Jännitekuoppa DFIG:n käydessä synkronissa.....	20
4.1.3 Jännitekuoppa DFIG:n käydessä yli-synkronissa .....	22
4.1.4 Jännitekuoppa DFIG:n käydessä ali-synkronissa .....	23
4.1.5 Yhteenveto .....	24
4.2 PMSG verkon vikatilanteissa.....	25
4.2.1 Generaattoripuolen konvertterin käyttäytyminen verkon oikosulun aikana .....	25
4.2.2 Verkkopuolen konvertterin käyttäytyminen verkon oikosulun aikana .....	25
4.2.3 Konvertterin käynnistyminen.....	26
4.2.4 Yhteenveto .....	27
5. KUSTANNUKSET JA ENERGIAN HINTA .....	28
5.1 Kustannukset.....	28
5.2 Energian hinta .....	29
6. JOHTOPÄÄTÖKSET.....	32
LÄHTEET .....	33

**KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET**

$c_p$	tehokerroin
$n$	pyörimisnopeus
$r$	tuulivoimalan lapojen pituus
$P$	teho
$v$	nopeus
$\rho$	ilman tiheys
AC	Alternating Current (vaihtovirta)
AEP	Annual Energy Production
AOM	Annual Operation and Maintenance
COE	Cost of Energy
DC	Direct Current (tasavirta)
DDPMSG	Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator
DFIG	Doubly Fed Induction Generator (kaksoissyötetty induktiogeneraattori)
FCR	Fixed Charge Rate
ICC	Initial Capital Cost
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (suuritehoinen puolijohdekomponentti)
MS	Medium Speed
NdFeB	Neodymium-Iron-Boron
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (kestomagneettitahtigeneraattori)
PWM	Pulse-Width Modulation (pulssinleveysmodulaatio)
rpm	round per minute (kierroksia minuutissa)
smv	sähkömotorinen voima

## 1. JOHDANTO

Tuulivoima alkaa olla nopeimmin kasvava energian tuotannon ala. Tuulivoimakapasiteetti kasvoi viime vuonna 28,8 %. Nykypäivän trendi vihreään energiantuotantoon antaa tuulivoiman kehitykselle erinomaisen sysäyksen, kun monet tahot tilaavat tuulivoimaloita. Vuoden 2008 lopussa Euroopassa oli tuulivoimakapasiteettia lähes 66 GW ja koko maailmassa n. 120,8 GW. Yhdysvallat on ylivoimaisesti suurin tuulivoiman rakennuttaja, sillä viime vuonna (2008) se asennutti 31 % maailman uudesta tuulivoimakapasiteetista, joka vastaa n. 8,4 gigawattia. Saksassa ja Tanskassa tuulivoima tuottaa jo 10 % maan sähköstä. Kuvassa 1 on esitetty tuulivoimakapasiteetin kasvu maailmassa vuodesta 1996 vuoteen 2008. Vuonna 2008 asennettiin uutta tuulivoimaa 27 GW, eikä kasvulle näy loppua. Myös Suomen tavoitteena on nostaa tuulivoiman osuutta kokonaissähkötuotannosta – hyvänä esimerkkinä Haminaan rakennettava tuulivoimapuisto. Suomen tuulivoimakapasiteetti vuonna 2008 oli 143 MW yhteensä 118 tuulivoimalassa. Tuulivoima kattaa n. 0,3 % Suomen sähköntuotannosta. [15,23,24]



Kuva 1. Asennettu tuulivoimakapasiteetti maailmassa 1996–2008 [24]

Tuulivoiman hyödyntämiseen on monenlaisia tekniikoita. Tässä kandidaatin työssä tutkitaan tuulivoimakäyttöinä kestopagneettigeneraattoria ns. täystehokonvertereilla varustettuna ja ns. kaksois-syötettyä induktiogeneraattoria. Tuulivoimakäyttöjä vertaillaan suoristuskyvyn, verkon vikatilanteiden hallinnan ja vuositason kustannusten näkökulmista. Kandidaatin työ on toteutettu yhdessä The Switchin ja Lappeenrannan Teknillisen Yliopiston sähkönkäyttötekniikan laboratorion kanssa.

## 2. TUULIVOIMAKÄYTÖT

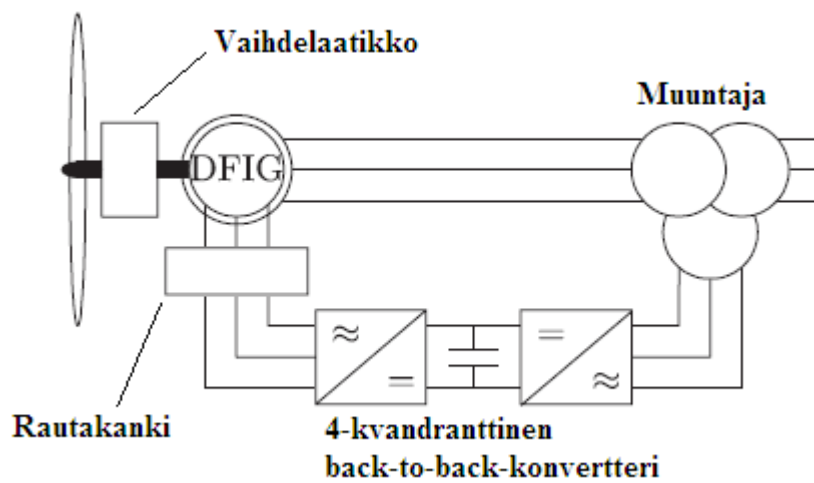
Jotta tuulesta saadaan energiaa ihmisten käyttöön, on tuulienergia yleensä muunnettava sähköenergiaksi. Tuulen mekaaninen energia muunnetaan sähköenergiaksi tuuliturbiinin pyörittämässä generaattorissa, joka sijaitsee korkean tornin päässä (kuva 2). Tuuliturbiinin lapojen pyöriessä välitetään mekaaninen energia mahdollisen vaihteiston läpi sähkökoneen roottorille, joka pyöriessään aiheuttaa generaattorin staattoriin sähkömotorisen voiman (smv). Smv:sta saatava teho kasvaa roottorin pyörimisnopeuden ja vääntömomentin funktiona. Generaattorista saatava teho muokataan taajuusmuuttajalla vastaamaan verkon vakiotajuutta ennen sen syöttämistä muuntajan kautta sähköverkkoon. Verkkoon syötettynä sähkön taajuuden ja jännitteen on vastattava verkon haltijan laadullisia vaatimuksia. Nykyään käytetään generaattoreita, jotka toimivat hyvällä teholla myös vaihtelevalla tuulen nopeudella. Tämä vähentää generaattoreiden mekaanisen rakenteen rasitusta ja melua sekä mahdollistaa päto- ja loistehon säätelyn. [28]



Kuva 2. Kaksi tuulivoimalaa [30]

## 2.1 Kaksoissyötetty induktiogeneraattori

Kaksoissyötetty induktiogeneraattori eli Doubly Fed Induction Generator (DFIG) perustuu käämitellä roottorilla toimivaan liukurengasepäätikoneeseen [18]. DFIG pitää sisällään kolmivaiheisen roottorin ja kolmivaiheiset liukurenkaat. Roottorikäämitykset on kytketty liukurenkaiden, rautakan- gen (crowbar), ns. back-to-back-konvertterin eli AC/DC/AC-konvertterin ja muuntajan kautta verk- koon. Staattori on kytketty muuntajan läpi suoraan verkkoon. Tuuligeneraattorikäytössä lavat jou- dutaan kytkemään vaihteiston kautta DFIG:lle, jotta saavutetaan riittävä roottorin pyörimisnopeus vaihtelevissa tuuliolosuhteissa. Kuvassa 3 on esitetty DFIG:n rakennekuva.



Kuva 3. Tuulivoimakäyttö toteutettuna kaksoissyötetyllä induktiogeneraattorilla [21]

Yleisesti DFIG:n synkroninopeus on 1000 tai 1500 rpm. Koska tuuli pyörittäisi induktiokoneen roottoria liian alhaisella kulmanopeudella, on tuulivoimalan lapojen ja roottorin väliin asennettava vaihteisto, joka kasvattaa induktiokoneen roottorin pyörimisnopeuden riittävän suureksi. Jos rootto- rin pyörimisnopeus kasvaa DFIG:llä staattorin elektronista nopeutta suuremmaksi, sanotaan gene- raattorin käyvän ylisynkronissa. Kun taas roottori pyörii liian hitaasti, käy generaattori alisykronis- sa. Roottorin ja staattorin pyöriessä eri tahdissa syntyy jättämä. Ylisynkronissa jättämä on negatii- vinen ja roottori syöttää jättämää vastaavan tehon AC/DC/AC-konvertterin kautta verkkoon. Alisykronissa, jättämän ollessa positiivinen, roottoria magnetoidaan verkon kautta. Staattori syöt- tää aina mahdollisimman paljon tehoa suoraan verkkoon. [1,10]

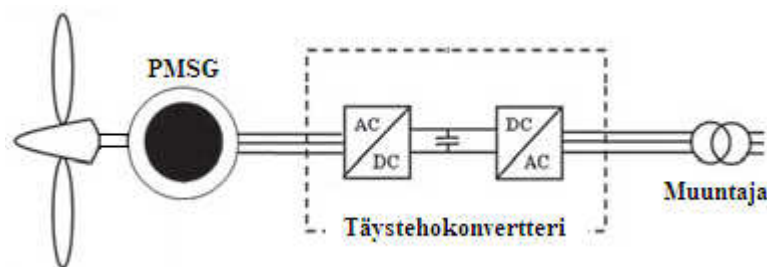
DFIG tuottaa tehoa vakiojännitteellä ja -taajuudella, vaikka roottorin nopeus vaihtelee. Riippuen tuuliolosuhteista DFIG:n pyörimisnopeus on tavallisesti  $\pm 30\%$  synkroninopeudesta, jolloin kon-

vertterin kautta syötetään vain n. 30 % tehosta. Tämä tarkoittaa pienempiä häviöitä konvertterissa ja alhaisempaa konvertterin hankintahintaa verrattuna käyttöihin, jossa kaikki teho syötetään konvertterin kautta. DFIG toimii hyvällä hyötysuhteella synkroninopeudella, mutta varsinkin alhaisilla tuulilla sen tehokkuus laskee huomattavasti. Kappaleessa 3 on tutkittu tarkemmin tuulen vaikutusta tuulivoimakäyttöjen hyötysuhteisiin. [1,3,11]

Suurimmat häviöt DFIG-käytössä synnyttää vaihteisto, josta lisää kappaleessa 2.4. Epätahdissa ajettaessa DFIG:lla kuluu tehoa roottorin rautahäviöihin. Häviötehoa syntyy myös magnetoinnissa, mitä kestopagneettigeneraattoreilla ei tapahdu. PMSG:lla tosin tapahtuu muualla generaattorissa DFIG:a suuremmat häviöt, joita tarkastellaan tarkemmin kappaleessa 3.

## 2.2 Kestomagneettigeneraattori

Kestomagneettigeneraattorin roottorille on koneen nimen mukaisesti asennettu kestopagneettimateriaalia, jolloin generaattorin roottoria ei tarvitse erikseen magnetoida virralla. Kestomagneettiraaka-aineena käytetään tyypillisesti NdFeB:a sen vahvojen ominaisuuksien vuoksi. PMSG:a voidaan käyttää jopa suoravetoisesti, mikä tarkoittaa, että turbiini on yhdistetty suoraan roottorille, eikä erillistä vaihteistoa tarvita. Roottori ja tuuliturbiinin akseli pyörivät silloin samalla nopeudella. Jos halutaan käyttää nopeampaa kestopagneettigeneraattoria, on PMSG:lle kytkettävä vaihdelaatikko. Generaattorin staattori on kytketty täystehokonvertterin ja muuntajan kautta verkkoon. Kuvassa 4 on esitetty rakennekuva vaihteettomasta kestopagneettigeneraattorista tuulivoimakäytössä.



Kuva 4. Rakennekuva vaihteettomasta kestopagneettigeneraattorikäytöstä [16]

Suoravetoinen PMSG kytkettynä verkkoon täystehokonvertterin kautta, toimii hyvin myös alhaisilla 10–25 rpm roottorinopeuksilla. Kestomagneettigeneraattorin on siis tuotettava suuri vääntömomentti, jotta saadaan tarpeeksi tehoa verrattuna generaattoreihin, jotka toimivat suuremmilla nopeuksilla. Saadakseen aikaiseksi suuren vääntömomentin, PMSG:lla on oltava halkaisijaltaan kookas roottori,

jotta saadaan riittävä vääntö, ja suuri määrä napoja, jotta voidaan taata sopiva taajuus. Tämä johtaa PMSG:n suureen kokoon. [6,12,16]

Lähtötaajuus ei yllä yleensä matalanopeuksisissa käytöissä 50 hertsiin ja konvertteria tarvitaan syöttämään teho verkkoon. Kestomagneettikoneita ei yleensä varusteta vaimennuskämeillä, mikä olisi toinen verkkokäytön edellytys sopivan taajuuden lisäksi. Täystehokonvertteri mahdollistaa generaattorin käytön vaihtelevissa tuuliolosuhteissa. Kestomagneettigeneraattorin roottorin nopeus voi vaihdella suhteellisen paljon tuuliolosuhteiden mukaan, mutta generaattori voi tuottaa silti maksimitehon eri tuulen nopeuksilla. Koska PMSG:lla kaikki teho siirretään konvertterin kautta, on käytettävä ns. täystehokonvertteria, jottei liian pienitehoinen konvertteri rajoita tehonsiirtoa verkkoon. [6]

Kestomagneettigeneraattoreissa tehokerrointa voi muuttaa ainoastaan napajännitettä muuttamalla. Koska ylimääräistä energiaa ei tarvita PMSG:n magnetointiin, saavutetaan parempi tehokkuus. Kestomagneettihäviöt ovat hyvin pienet eivätkä ne käytännössä vaikuta hyötysuhteeseen. [5,16]

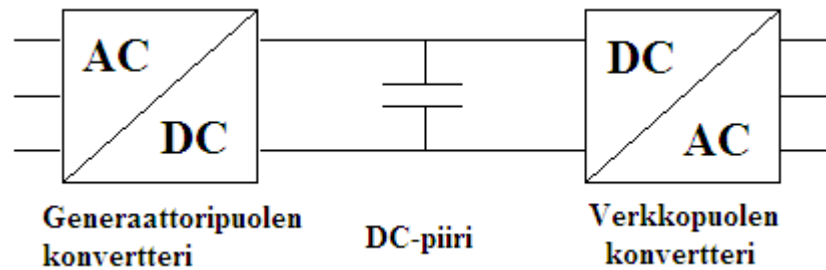
Suoravetoisen kestomagneettigeneraattorin käyttö tuulivoimakäytössä tuo hyvän kokonaistehokkuuden, luotettavuuden ja vähentyneen huollon tarpeen. Vaihteettoman PMSG:n aiheuttama melu on alhaisempi kuin vaihteellisilla koneilla. Liikkuvia eli mahdollisesti vikaantuvia osia on vähemmän. [6]

### **2.3 4-kvadranttinen täystehokonvertteri**

Täystehokonvertteria tarvitaan yleisesti tuulivoimakäytöissä muokkaamaan verkkoon syötettävä taajuus sopivaksi, pitämään generaattorin napajännitteet suositelluissa rajoissa ja huolehtimaan tuulivoimakäyttöjen selviämisestä verkkovioista ns. *ride-through*-kykyä. Täystehokonvertteri pitää vaihtelevissa tuuliolosuhteissa verkkoon syötettävän sähkönsä taajuuden haluttuna. Verkon taajuuden laskiessa liian alas, on tuulivoimalan säilytettävä tehotasonsa kyetäkseen tukemaan verkkoa. Tuuliturbiinin on pysyttävä toiminnassa tilanteissa, joissa verkko ajetaan alas lyhyen vian vuoksi. [7,12]

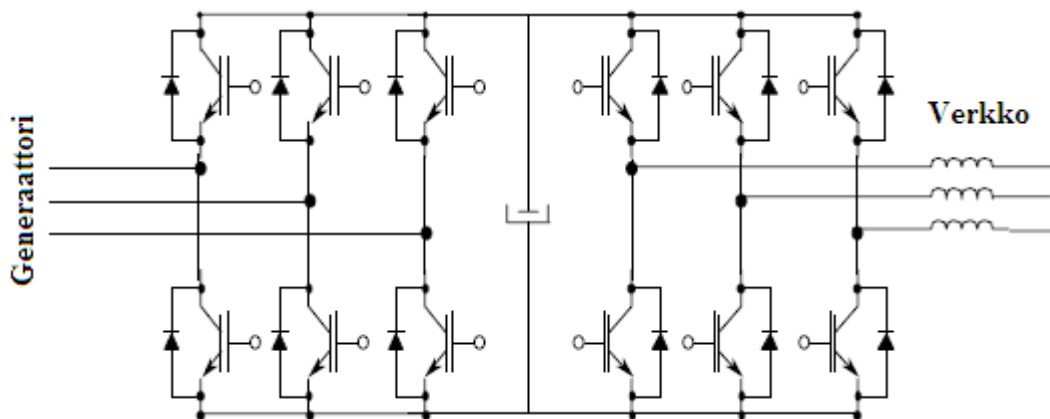
Kuvassa 5 on esitetty rakennekuva AC/DC/AC-konvertterista. Generaattorin roottorin puoleinen konvertteri tasasuuntaa generaattorilta tulevan vaihtojännitteen ja nostaa jännitteen tason välipiirille sopivaksi. DC-piirin kondensaattori pitää DC-jännitteen stabiilina (väreen pienenä) ja toimii energiavarastona. Verkonpuoleinen konvertteri muuntaa tasajännitteen verkkoon syötettäväksi 50 tai 60 Hz:n vaihtojännitteeksi.





Kuva 5. Rakennekuva roottoria ohjaavasta AC/DC/AC-konverterista

Kuvassa 6 on esitetty yleisesti käytetty 4-kvadranttinen jännitevälipiirillinen AC/DC/AC-konvertteri, jonka PWM-modulaatio vähentää virran harmonisia komponentteja järjestelmän tulossa ja lähdössä. Tämän seurauksena vääntömomentin värähtely generaattorissa vähenee ja lähtötehon laatu paranee. [27]



Kuva 6. 4-kvadranttinen jännitevälipiirillinen AC/DC/AC-konvertteri

Tuulivoimala syöttää verkkoon niin paljon tehoa kuin mahdollista, vaikka kysymys olisi vain tuulenpuuskasta. Kun generaattori kytketään verkkoon täystehokonvertterin kautta, syöttää se normaalioloissa verkkoon vain pätötehoa. Pätötehoa siirretään verkkoon DC-piirin kautta ja DC-piirin jännite pidetään vakiona. Kun generaattori on kytketty verkkoon ainoastaan täystehokonvertterin kautta, loistehoa siirtyy tavanomaisesti vain generaattorin ja generaattorikonvertterin välillä. Verkkokonvertterilla voidaan myös säätää verkon loistehoa niin haluttaessa, mutta tietenkin konvertterin virrankäsittelykyvyn puitteissa. On tärkeää, että konvertteri pystyy käsittelemään vähintään yhtä suuren määrän tehoa, kuin generaattori sen kautta syöttää. Jos käytetään liian pienitehoista konvert-

teria, se rajoittaa verkkoon syötettävää tehoa oman maksimitehonsa arvoon. Integroimalla täystehokonvertteri tuulivoimakäyttöön täytetään helposti muuttuvien tuulenopeuksien aiheuttamat vaatimukset, jotka yleensä johtavat mekaanisiin ongelmiin, mutta myös tehon laadun vaatimukset. [7,8,12,16]

Konvertteri säätelee DFIG-käytössä sekä roottori- että verkkovirtoja. Säätelemällä roottorivirtoja konvertterilla on mahdollista vaikuttaa sekä pätö- että loistehon siirtoon generaattorin ja verkon välillä. Lois- ja pätötehon hallinta sallii generaattorin toimia halutulla tehokertoimella ja napajännitteillä, kunhan verkon puoleinen konvertteri pitää DC-piirin jännitteen vakiona. Tällä on tärkeä vaikutus järjestelmän stabiiliuden kannalta ja tämä sallii generaattorin tukea verkkoa rajujen jännitehäiriöiden aikana. Generaattoripuolen konvertterilla on mahdollista säädellä DFIG:n roottorin vääntömomenttia, mitä käytetään ohjearvona säädellessä turbiinin nopeutta. Lähtöteho on tasaista, koska huojunta aerodynaamisessa vääntömomentissa johtaa roottorin pyörimisnopeuden muutokseen enemmän kuin muutoksiin lähtötehossa. [9,18,19,27]

Konvertteri huolehtii PMSG:n liittynästä sähköverkkoon ja säätelee tuulivoimalan optimaalista toimintaa. Täystehokonvertterin kautta verkkoon voidaan syöttää mahdollisimman suuri määrä tehoa. Täystehomuunnoksella on monia etuja: vaihdelaatikkoa voidaan pienentää tai jopa jättää pois, tehohäviöitä voidaan alentaa, erillistä magnetointia ei tarvita, täystehokonvertteri tukee verkon jännitettä verkon oikosulun aikana sekä loistehon kompensointia verkon puolella voidaan vähentää. Verkon ollessa pois päältä, DC-välipiiriä voidaan kuormittaa jarrukatkojalla käyttämällä täystehokonvertteria. [12,25]

Perinteisesti generaattorin puoleista konvertteria käytetään säätelemään verkon ja generaattorin välillä siirtyvää tehoa, kun taas verkon puoleinen konvertteri säätelee tehokerrointa ja pyrkii pitämään DC-piirin jännitteen stabiilina, mikä turvaa tehon siirtymisen navoista verkkoon. Vaihtoehtoisesti generaattorin puoleinen konvertteri voi ylläpitää DC-piirin ja staattorin jännitettä vakiona, kun verkon puoleinen konvertteri huolehtii pätö- ja loistehon siirrosta verkkoon. [12,16]

## **2.4 Vaihdelaatikko tuulivoimakäytöissä**

Haluttaessa käyttää nopeampia kestopagneettigeneraattoreita tai kaksoissyötettyä induktiogeneraattoria, on tuulivoimakäyttöön asennettava vaihteisto, jotta roottori pyörii tarpeeksi nopeasti. Tuulivoimakäytöissä käytetään yleisesti joko yksi- tai kolmiportaisia vaihteistoja. Yksiportainen vaihteis-

to nostaa generaattorin pyörimisnopeuden n. 100 kierrokseen minuutissa ja kolmiportainen vastavasti 1000–2000 rpm. Kaupallisissa vaihdelaatikoissa näyttäisi tulevan halvemmaksi käyttää moniaskelisimpia vaihdelaatikoita korkeampaan välityssuhteeseen. [20]

Vaihteiston lisääminen nostaa kustannuksia, synnyttää lisää ääniä ympäristöön, aiheuttaa lisää häviöitä ja sitä joudutaan huoltamaan määräjain. Vaihdelaatikon ylläpito voi olla hankalaa, koska se sijoitetaan generaattorin kylkeen tuulivoimalan torniin. Ongelmallista voi olla myös oikean materiaalin, voitelun ja laakerien tiivisteiden valinta kylmiin olosuhteisiin. [6]

Vaihdelaatikoiden häviöitä laskettaessa hyväksytään yleensä yhteen hammaskosketukseen häviävän n. yksi prosentti tehosta. Vaihdelaatikon häviöt muuttuvat suhteessa roottorin nopeuteen yhtälön

$$P_v = P_{v2} \frac{n}{n_n} \quad (1)$$

mukaisesti. Yhtälössä  $P_v$  on vaihdelaatikon häviöteho,  $P_{v2}$  häviöteho nimellisnopeudella,  $n$  pyörimisnopeus ja  $n_n$  roottorin nimellisnopeus [20]. Esimerkiksi 3-portaisen DFIG:n pyöriessä ylisynkronissa 1700 rpm vaihdelaatikon häviöksi saadaan

$$P_v = 0,03 \cdot \frac{1700\text{rpm}}{1500\text{rpm}} = 0,034. \quad (2)$$

### 3. SUORITUSKYKY

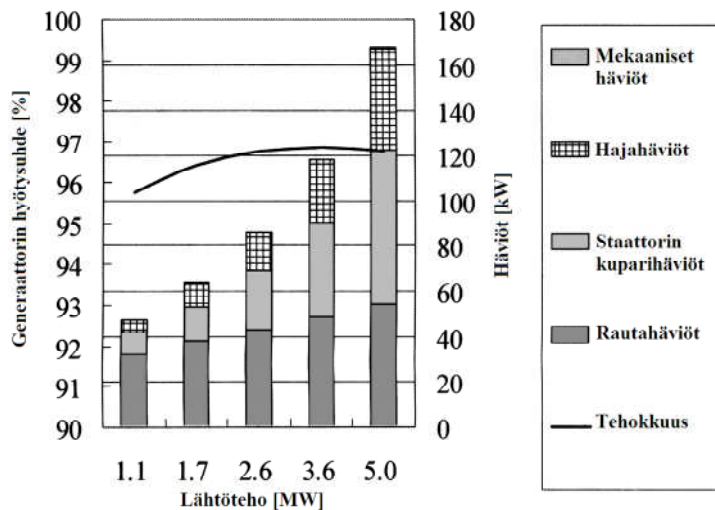
Työssä oli määrä vertailla kahden eri tuulivoimakäytön suorituskykyä, etenkin verkkoliittymän ja hyötysuhteiden kannalta. Tuulivoimakäytöissä parhaaseen kokonaisjärjestelmän nimellishyötysuhteeseen yltää DFIG, jonka hyötysuhde nimellisnopeudella on n. 93 %. DFIG:lla ja nopeammilla kestopagneettigeneraattoreilla täytyy käyttää häviöllistä vaihteistoa nopeamman roottorin pyörimisnopeuden saavuttamiseksi. Matalanopeuksisella suoravetoisella kestopagneettigeneraattorilla roottori pyörii turbiinin akselin kanssa samaa tahtia, joten hyötysuhdetta alentavaa vaihteistoa ei tarvita. Suuren ja hitaan kestopagneettigeneraattorin hyötysuhde jää kuitenkin muista vertailtavista generaattoreista hieman jälkeä. DFIG-käyttö saavuttaa suurta hyötyä, kun vain 20 – 30 % tehosta

kulkee konvertterin kautta. Taulukossa 1 vertaillaan kestopagneettigeneraattoreiden ja kaksoissyötetyn induktiogeneraattorin nimellishyötysuhteita tuulivoimakäytöissä.

Taulukko 1. Tuulivoimakäyttöjen nimellishyötysuhteet eri generaattoriratkaisuilla. DFIG:n tapauksessa konvertterihyötysuhde on laskettu ottaen huomioon, että vain kolmannes tehosta kulkee 97 %:n hyötysuhteisen konvertterin kautta.

	PMSG (1500rpm)	PMSG (150rpm)	PMSG (17,5rpm)	DFIG (1500rpm)
<b>Teho [MW]</b>	0,95	1,65	3,80	3,00
<b>Hyötysuhde</b>	0,980	0,970	0,950	0,982
<b>Vaihteisto</b>	0,956	0,970	1,000	0,956
<b>Konvertteri</b>	0,970	0,970	0,970	0,991
<b>YHT</b>	0,908	0,913	0,922	0,930

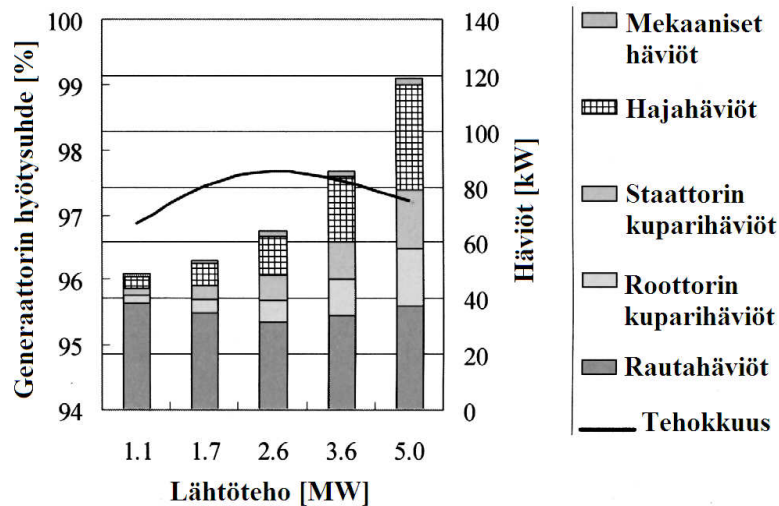
Kuvassa 7 on esitetty vaihteettoman 5 MW:n kestopagneettigeneraattorin hyötysuhteet ja häviöt lähtötehojen mukaan. Diagrammista havaitaan, että rautahäviöt näyttelevät suurta osaa häviöistä alemmilla tehoilla, mutta eivät kasva juurikaan lähtötehon kasvaessa. Staattorin kuparihäviöt ja hajahäviöt kasvavat generaattorin toimiessa suuremmilla tehoilla. PMSG saavuttaa etua kestopagneettirottorillaan, jota ei tarvitse magnetoida, kun taas DFIG:lle aiheutuu roottorissa kuparihäviöitä ja epäsynkronissa rautahäviöitä.



Kuva 7. Vaihteettoman 5 MW:n PMSG:n hyötysuhde ja häviöt lähtötehon funktiona [11]

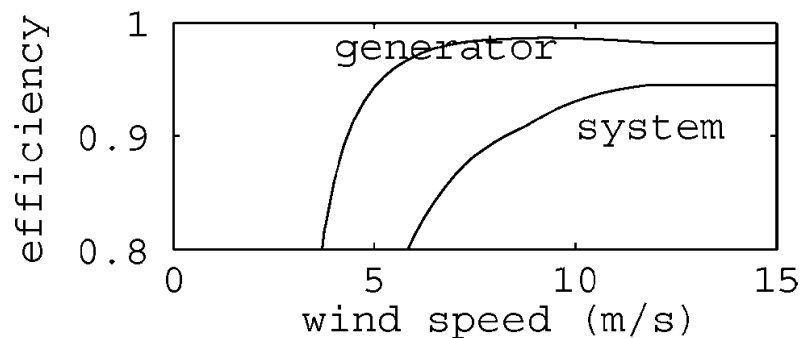
Kuvassa 8 on esitetty 5 MW:n DFIG:n hyötysuhteet ja häviöt lähtötehojen perusteella. Generaattorin toimiessa synkroninopeudella sen tehokkuus on suurimmillaan. Generaattorin toimiessa laajalla nopeusalueella ja jättämän kasvaessa aiheutuu lisää roottorihäviöitä, mikä pudottaa tehokkuutta. DFIG:lla on mahdollista alentaa magnetointihäviöitä kahdella eri tavalla: joko oikosulkemalla staat-

tori alhaisilla tuulen nopeuksilla ja siirtämällä kaikki teho konvertterin kautta (joka taas nostaisi konvertterin häviöitä) tai kytkemällä staattori kolmioon korkeilla tuulen nopeuksilla ja tähteen matalilla tuulen nopeuksilla [10]. DFIG:n huippuhyötysuhteeksi likimäärin puolella teholla saadaan kuvan 8 tehokkuuskäyrästä 97,7 %. [11]



Kuva 8. DFIG:n tehokkuus ja häviöt teholuokkien funktiona [11]

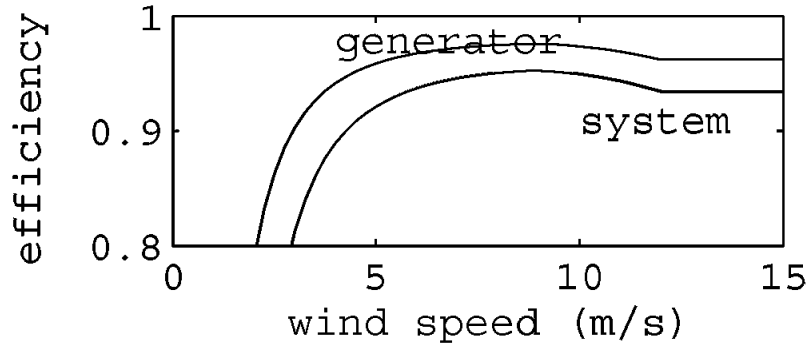
Tuulivoimakäyttöjen hyötysuhteet vaihtelevat hyvinkin paljon tuuliolosuhteiden mukaan. Kuvassa 9 on esitetty 3-portaisella vaihteistolla varustetun 3 MW:n DFIG-käytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona. Kokonaisjärjestelmän hyötysuhde ylittää 90 % vasta tuulen nopeuden ollessa 8 m/s ja hyötysuhde yltää huippuunsa, kun generaattori toimii nimellistehollaan tuulen nopeudella 12 m/s.



Kuva 9. 3-portaisella vaihteistolla varustetun DFIG-käytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona [20]

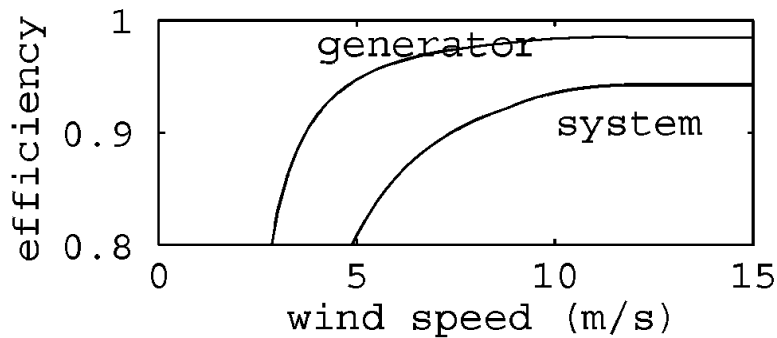
Kuvassa 10 on mallinnettu suoravetoisen kestopagneettigeneraattorikäytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona. PMSG-käytön hyötysuhde nousee yli 90 %:n tuulen nopeuden ollessa jo 4 m/s ja

pysyy korkeana tuulen nopeuden kasvaessa. Tämä on kestopagneettigeneraattorikäytölle todellinen etu verrattuna DFIG-käyttöön. PMSG voitaisiin asentaa myös alueille, jossa tuulen nopeudet pysyvät alhaisina.



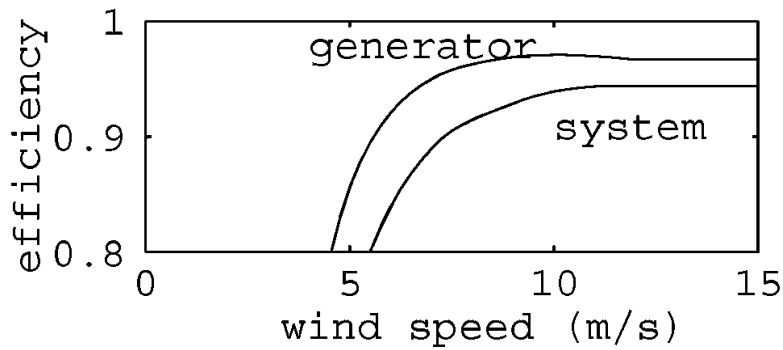
Kuva 10. Suoravetoisen PMSG-käytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona [20]

Kuvassa 11 on simuloitu 1-portaisella vaihteistolla varustetun kestopagneettigeneraattorikäytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona. Kokonaisjärjestelmän hyötysuhdekäyrästä nähdään, että vaihteistolla varustetun PMSG:n hyötysuhde käyttäytyy melkein yhtä heikosti kuin DFIG:lla eikä pärjää alhaisilla tuulen nopeuksilla suoravetoiselle veljelleen.



Kuva 11. 1-askelisella vaihteistolla varustetun PMSG-käytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona [20]

Kuvassa 12 on puolestaan esitetty 1-portaisen DFIG-käytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona. Hyötysuhdekäyrä käyttäytyy aikalailta samalla tavalla kuin 1-portaisella PMSG-käytöllä, mutta kuitenkin paremmalla hyötysuhteella alhaisilla tuulen nopeuksilla kuin 3-portaisella DFIG:lla. Toisin oma lukunsa on tällaisen DFIG:n käytännön toteutus.



Kuva 12. 1-portaisella vaihteistolla varustetun DFIG-käytön hyötysuhde tuulen nopeuden funktiona [20]

Taulukossa 2 on vertailtu 1,5 MW:n tuulivoimakäyttöjen tehokkuutta niiden toimiessa nimellisteho pienemmällä teholla. Kokonaistehokkuuteen vaikuttavat myös vaihteiston ja konverterin häviöt eri tuulen nopeuksilla. Hyötysuhteista havaitaan sama kuin edellä esitetyistä kuvaajista eli kesto-magneettigeneraattorin tehokkuus on todella hyvä sen toimiessa alhaisillakin tuulen nopeuksilla.

Taulukko 2. 1,5 MW:n tuulivoimakäyttöjen hyötysuhteet heikommilla tuulilla [22]

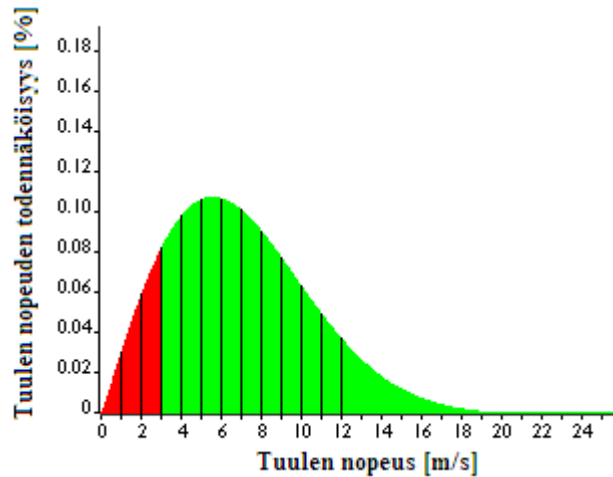
Hyötysuhteet [%]			
% nimellistehosta	DFIG	DDPMSG	MS PMSG
6	70	80,8	73,8
25	84,8	91,7	89,3
50	88,9	92,4	90,8
75	90,3	91,4	90
100	90,2	90,1	88,9

### 3.1 Tuulivoimalan energian tuotto

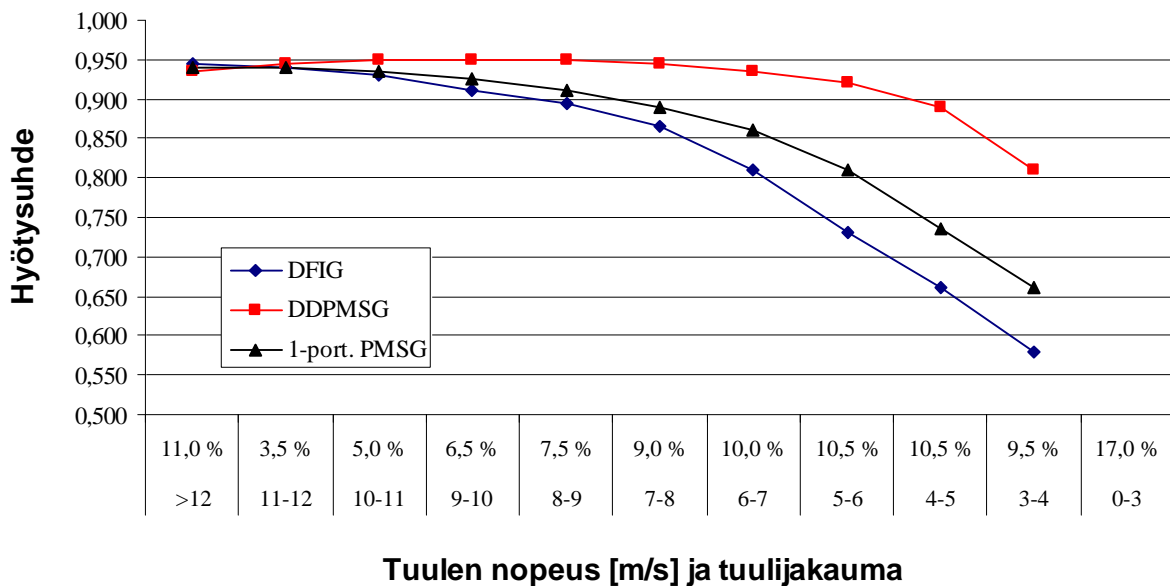
Tässä kappaleessa on laskettu esimerkki tuulivoimalan energian tuotosta tuulen pysyvyyskäyrään perustuen. Kuvasta 13 on esitetty eräs tuulen jakauma perustuen Weibullin jakaumaan, jossa tuulen mediaanina on käytetty 6,6 m/s, joka vastaa mm. Suomen saariston tuulen nopeuden mediaania [32,33]. Kuvassa 14 on esitetty 3 MW:n DFIG:n, suoravetoisen PMSG:n ja 1-portaisella vaihteella varustetun PMSG:n hyötysuhteet tuulen nopeuden funktiona sekä vaaka-akselille on lisätty tuulen nopeuden todennäköisyys.

Tuulivoimalat alkavat usein toimia tuulen nopeuden noustessa noin kolmeen metriin sekunnissa ja lopettavat toimintansa yleensä tuulen puhaltaessa 25 m/s. Kuvassa 14 on hyötysuhteiden kuvaami-

nen lopetettu tuulen nopeuteen 12 m/s, missä kappaleessa 3 käsitellyt tuulivoimakäytöt saavuttavat nimellinopeutensa. Tämän jälkeen generaattorit tuottavat energiaa hyvällä hyötysuhteella. Tosin DFIG:n hyötysuhde laskee sen pyöriessä n. 30 % nimellinopeutta suuremmalla nopeudella eli korkeilla tuulen nopeuksilla.



Kuva 13. Weibullin tuulen jakauma tuulen mediaanilla 6,6 m/s [32]



Kuva 14. Tuulivoimakäyttäjien hyötysuhteet tuulen nopeuden funktiona [20]

Kuvasta 14 havaitaan, kuinka suoravetoinen kestopagneettigeneraattori toimii muita korkeammalla hyötysuhteella juuri hallitsevilla tuuliolosuhteilla 3-8 m/s. Tosin tuulen keskinopeuden noustessa vaihteelliset tuulivoimakäytöt saavuttavat suoravetoisen matalilla tuulen nopeuksilla saavuttamaa etumatkaa. Alhaisilla tuulen nopeuksilla DFIG:n hyötysuhde sukeltaa 1-portaisella vaihteistollakin



varustettua kestromagneettigeneraattoria nopeammin. Taulukossa 3 on laskettu 3 MW:n DFIG:n, suoravetoisen PMSG:n ja yksiportaisen PMSG:n energian tuotto vuositasolla.

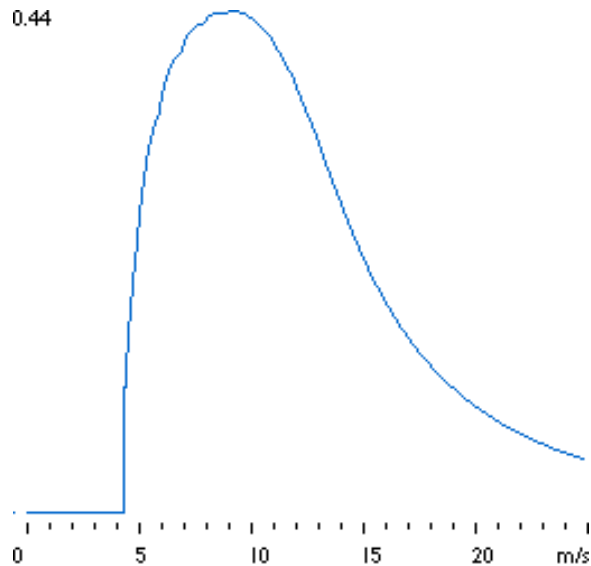
Taulukko 3. Tuulivoimakäyttöjen energian tuotto vuodessa

Tuulen nopeus [m/s]	Tuuli / a [h]	Tuulen teho [W]	Energian tuotto [GWh]		
			DFIG	DDPMSG	1-port. PMSG
>12	964	2763668	2,517	2,490	2,503
11-12	307	2204185	0,635	0,639	0,635
10-11	438	1675519	0,683	0,697	0,686
9-10	569	1249860	0,648	0,676	0,658
8-9	657	857866	0,504	0,535	0,513
7-8	788	534608	0,365	0,398	0,375
6-7	876	294580	0,209	0,241	0,222
5-6	920	121767	0,082	0,103	0,091
4-5	920	2494	0,002	0,002	0,002
3-4	832	1052	0,001	0,001	0,001
0-3	1489	yht. [GWh]	5,644	5,783	5,686

Taulukon 3 tuulesta saatava energia vuodessa on laskettu yhtälön

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 c_p \quad (3)$$

mukaisesti ja tuulen määrä tunteina vuodessa perustuu kuvaan 13. Ilman tiheytenä  $\rho$  on käytetty  $1,225 \text{ kg/m}^3$  ja tuulivoimalan lapojen pituutena  $r = 45 \text{ m}$ . Muuttuja  $v$  on tuulen nopeus ja tehokerroin  $c_p$  kuvaa, kuinka monta prosenttia tuulen tehosta saadaan muutettua roottorin mekaaniseksi energiaksi. Kuvassa 15 on esitetty kolmilapaisen tuuliturbiinin  $c_p$  tuulen nopeuden funktiona, johon vaikuttaa myös tuulivoimalan lapakulma ja lapojen pituus. Saaduista tuloksista täytyy huomata, että tuulivoimaloiden on oletettu saavuttavan nimelliskoiteensa tuulen nopeudella  $12 \text{ m/s}$ , jonka jälkeen ne tuottavat energiaa hyvällä hyötysuhteella. On kuitenkin muistettava, että DFIG:n hyötysuhde laskee myös tuulen nopeuden kasvaessa, varsinkin  $30 \%$  yli nimelliskoiteuden, joten DFIG:n energian tuotto on arvioitu hieman liian korkeaksi.



Kuva 15. Kolmilapaisen tuuliturbiinin tehokerroin tuulen nopeuden funktiona [32]

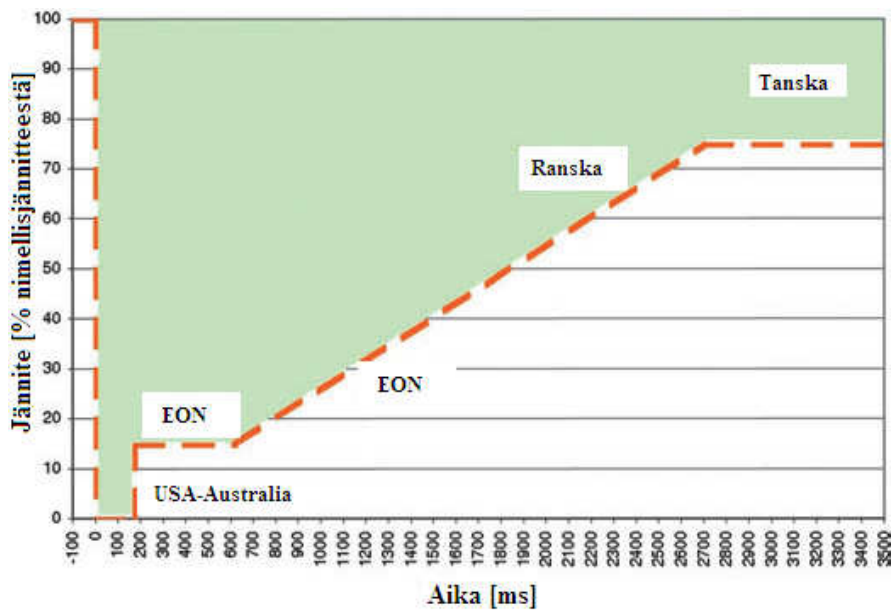
### 3.2 Yhteenveto

DFIG:lla ja nopeammilla vaihteellisilla kestopagneettigeneraattoreilla vaihdelaatikko on suuri häviötekijä. Itse generaattoreiden häviöissä ei ole suuria eroja, vaikkakin DFIG:lla täytyy roottorin kuparikäämitys magnetoida. DFIG saavuttaa etua kaksoissyöttönsä ansiosta, sillä konverterin häviöt saadaan pidettyä alhaisina. DFIG kärsii sekä roottorin rautahäviöistä että kapeasta turbiinin nopeusalueesta ( $\pm 30\%$ ), joten sen hyötysuhde osakuormilla jää helposti heikoksi. Generaattoreista parhaisiin hyötysuhteisiin yltävät nopeimmat generaattorit, mutta niiden käyttö alhaisilla tuulen nopeuksilla ja verkon vikatilanteissa heikentävät niiden tehokkuutta vuositasolla tarkasteltuna.

## 4. VERKON VIKATILANTEET JA NIIDEN HALLINTA

Kansalliset ja kansainväliset säännökset ja luokittelut rajoittavat tuulivoimakäyttäjien suunnittelua. Ne määrittelevät rajat jännitteen, virran ja taajuuden vaihteluille jatkuvuustilan toiminnassa, jännitekuopissa ja vikatilanteissa. Säännösten ja standardien mukaan tuulivoimakäyttäjien on tuettava verkkoa vikatilanteiden aikana syöttämällä loistehoa verkkoon. Tukeminen tulee entistä tärkeämmäksi verkkoon liitettyjen tuulivoimaloiden lisääntyessä. Sähköverkkoyhtiöt asettavat omat vaatimuksensa ja ehtonsa taatakseen hyvän sähkön laadun jakeluverkoissaan. [3,5,12,29]

Kuvassa 16 on esitetty modernit verkkomääräykset sisältäen jännitteen palautumisen vaatimukset. Käyrä on muodostettu useiden kansainvälisten verkkomääräysten perusteella mukaan lukien mm. E.ON Netz (Saksa), REE (Espanja) ja FERC-EEUU (Federal Energy Regulatory Commission). Käyrä kertoo kriittisen ajan, jossa jännitteen on palaututtava, kun generaattori ei sallita irrottautuvan verkosta. Kun verkon jännite on käyrän yläpuolella, on generaattoriin syötettävä verkkoon loistevoimaa tukeakseen verkon jännitteen palautumista. Ainoastaan jännitteen pudotessa käyrän alle, generaattori voi irrottautua verkosta. Lisäksi eri verkon haltijoilla on lisävaatimuksia, joiden sisällä tuulivoimakäytön on selviydyttävä kaksi- ja kolmivaiheisesta oikosulusta verkossa. Suurin haaste jännitteen säätelyssä on säilyttää jännitteen jatkuvuustilan arvo sallituissa rajoissa kaikissa olosuhteissa. Odotettu jännitekuoppien määrä vuodessa on muutamista kymmenistä tuhansiin, joten tuulivoimakäytön selviytyminen jännitteen alenemista on hyvin tärkeää verkon haltijalle ja kuluttajille. [17,18,26,29]



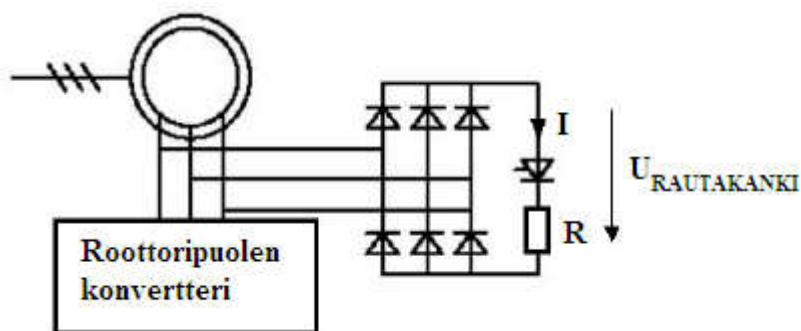
Kuva 16. Kansainväliset verkon jännitteen palautumisen vaatimukset [17]

## 4.1 DFIG verkon vikatilanteissa

### 4.1.1 Rautakanki (Crowbar)

Niin sanottua rautakankea tarvitaan DFIG:ssa verkon vikatilanteiden aikana suojelemaan roottori-puolen konvertteria liian suurilta jännitteiltä ja virroilta, koska staattoria ei voi verkon vikatilantees-

sa irrottaa verkosta. Kuvassa 17 on esitetty passiivinen rautakangi, jossa diodisilta tasasuuntaa roottorin vaihevirratt ja tyristori on vastuksen kanssa sarjassa. Tyristori johtaa, kun konvertterin DC-välipiirin jännite saavuttaa maksimijännitteensä. Yhtaikaa roottoriipiiri irtoaa roottoripuolen konvertterista ja oikosulkeutuu rautakangen kanssa. Roottori pysyy rautakangessa kiinni, kunnes rautakangen vastuksen jännite ja DC-piirin jännite putoavat tarpeeksi alas. Hetken kuluttua, staattorivirtojen heikennettyä, roottorin puoleinen konvertteri kytkeytyy taas roottoriin ja loisvirtaa alkaa virrata generaattorista tukemaan verkkoa. [3,13,14,19]



Kuva 17. Rautakangen esimerkkitoiteutus DFIG-käytössä [3,19]

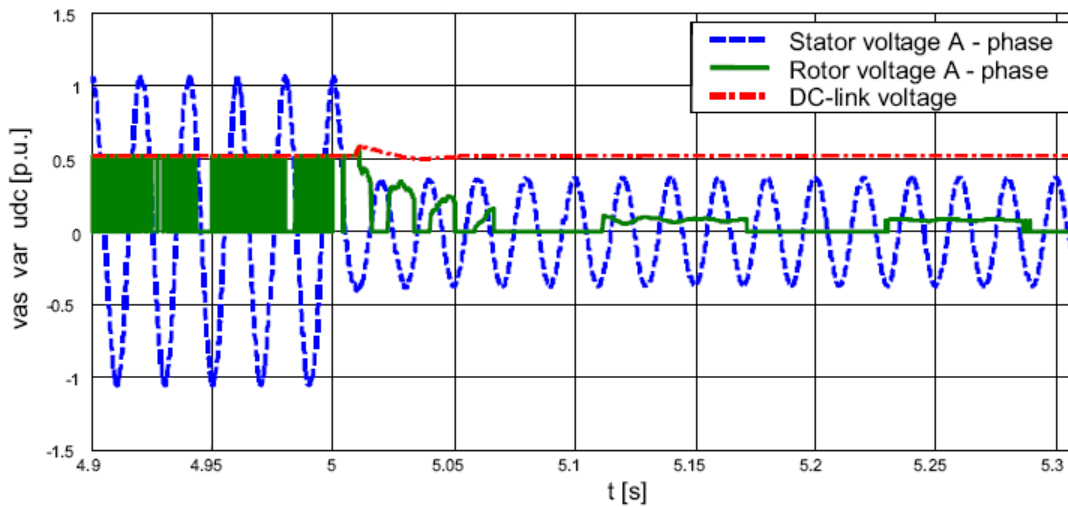
Jos rautakankea ei asenneta, verkkovian aikana DC-piirin jännite nousee korkeaksi ja suoja irrottaa roottorin DC-piiristä. Kaikki konvertterin positiivisen puolen IGBT:t suljetaan ja kaikki negatiivisen puolen IGBT:t alkavat johtaa - näin roottori oikosulkeutuu. [3]

#### 4.1.2 Jännitekuoppa DFIG:n käydessä synkronissa

DFIG:lla roottorin puoleinen konvertteri ja generaattorin mekaaniset osat ovat haavoittuvia verkon häiriötilanteissa. Kokemus osoittaa, että melko pieni epäsymmetrinen jännitteen alenema napajännitteissä voi aiheuttaa generaattorin putoamisen pois käytöstä [18]. Ongelmia syntyy, kun jännite putoaa ja konvertterin läpi kulkeva virta voi nousta hyvin korkeaksi. Roottoripuolen konvertteri on suojattava rautakangella, jotta vältetään sen vauriot. Generaattori irrotetaan väliaikaisesti verkosta. [2,4,19]

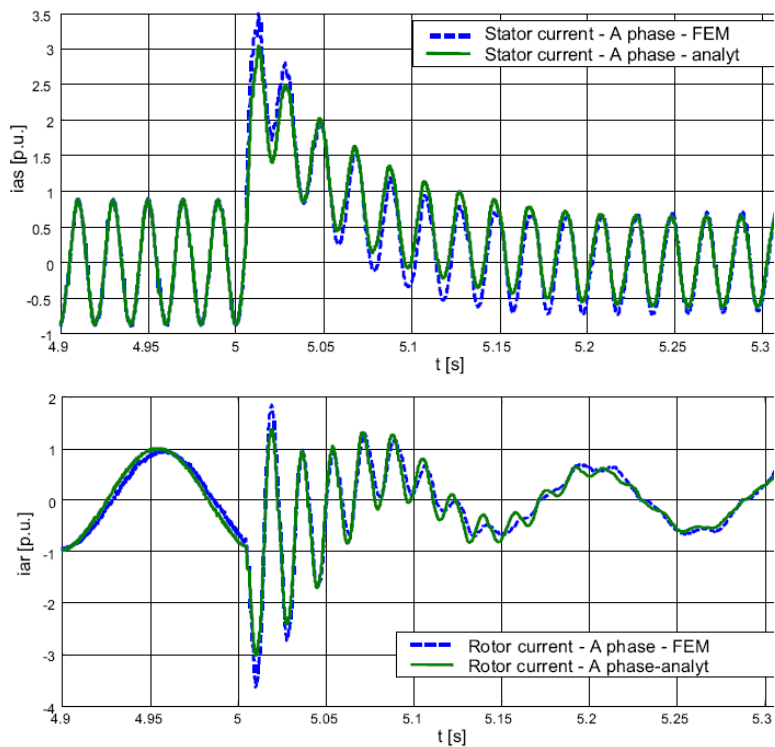
Kuvassa 15 on mallinnettu 1,7 MW:n DFIG:n käyttäytymistä jännitekuopan aikana, joka tapahtuu ajan hetkellä 5,002 s. Korkeat virtapiikit staattorissa ja roottorissa nostavat DC-piirin jännitteen jännitekuopan vaikutuksesta niin korkeaksi, että roottoriipiiri oikosulkeutuu rautakangen kautta.

Roottorijännite muuttuu pulssimoduloidusta aaltomuodosta tasajännitteiseksi ja DC-piirin jännite tasaantuu. Staattorijännitteen amplitudi laskee.



Kuva 18. Jännitekuopan vaikutus DFIG-käytön jännitteisiin [19]

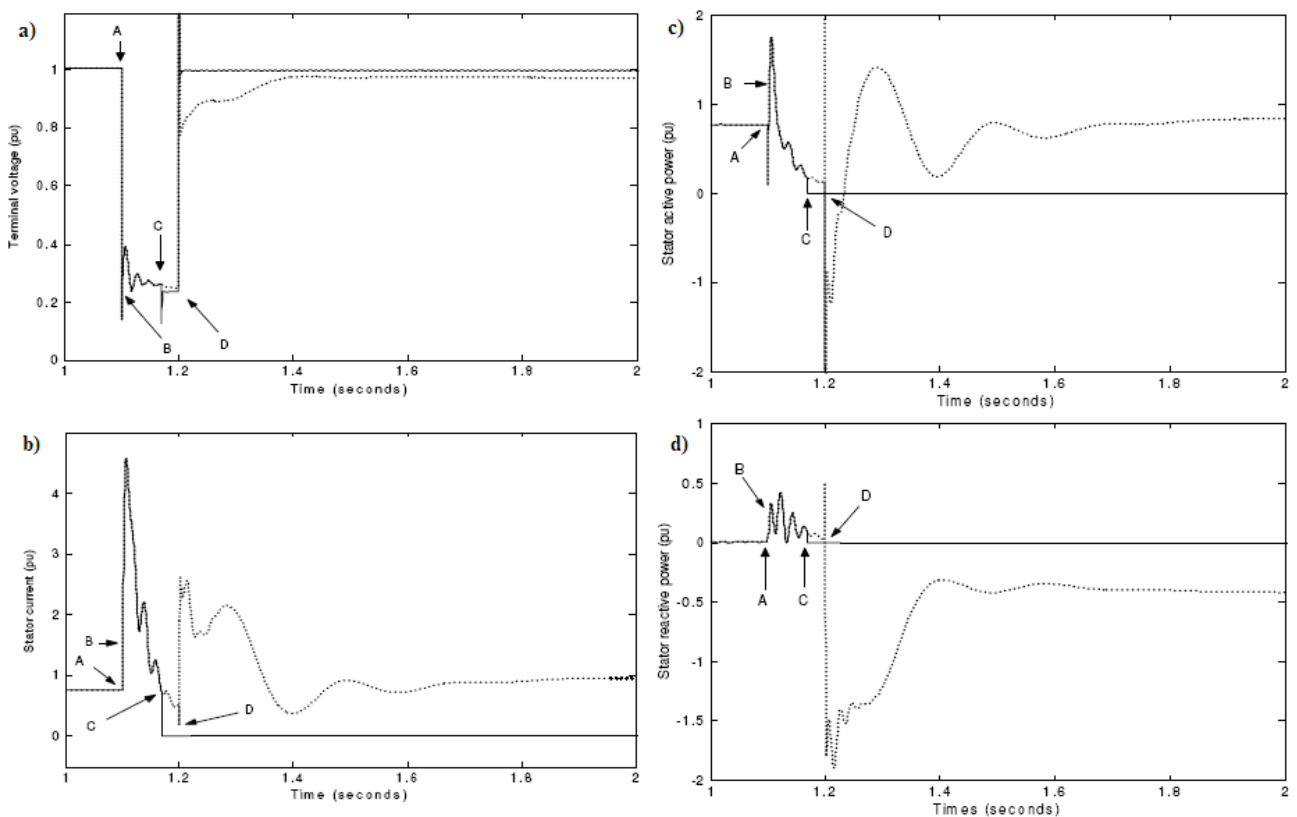
Kuvassa 16 on mallinnettu saman generaattorin staattori- ja roottorivirrat jännitekuopan aikana. Jännitteiden putoaminen ajan hetkellä 5,002 s aiheuttaa staattorissa ja roottorissa valtavan virran nousun, jonka rautakanki pyrkii heti kytkeydyttyään vaimentamaan.



Kuva 19. Jännitekuopan vaikutus DFIG-käytön virtoihin [19]

### 4.1.3 Jännitekuoppa DFIG:n käydessä yli-synkronissa

DFIG:n käydessä ylisynkronissa, verkon oikosulun aikana sen napajännite putoaa. Tästä johtuen staattorivirta nousee nopeasti ja saa rautakangen toimimaan, jolloin konverterti irrottautuu muusta järjestelmästä. Roottoriipiiri oikosulkeutuu rautakangen kanssa ja generaattori toimii hetken oikosulkugeneraattorina. Kuvassa 20 on mallinnettu ylisynkronissa käyvän DFIG:n käyttäytyminen jännitekuopan aikana. Kuvasarjasta nähdään, kuinka tärkeää DFIG:n irrottaminen verkosta jännitekuopan aikana olisi, jos se olisi sallittua. Napajännitteet palautuvat melko nopeasti haluttuun jatkuvuustilan arvoonsa, mutta staattorivirran, pätötehon ja loistehon hallinta tuottaa suuria ongelmia. [2]

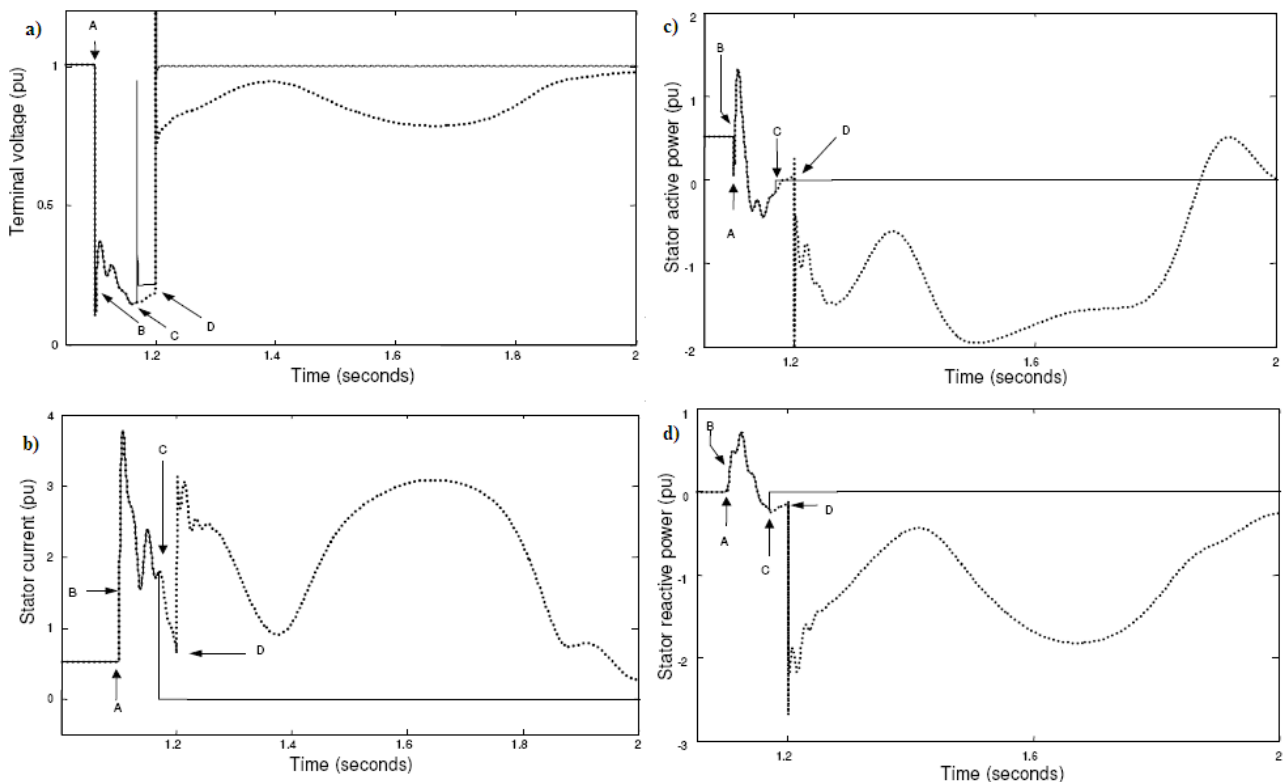


Kuva 20. DFIG:n a) napajännitte b) staattorivirta c) staattorin pätöteho d) staattorin loisteho ajanfunktiona jännitekuopan aikana. Pisteessä A tapahtuu vika, B:ssä rautakangi aktivoituu, C:ssä generaattori kytketään irti verkosta ja D:ssä vika verkossa on ohi. Yhtenäinen viiva kuvaa verkosta irrotettua generaattoria ja pisteviiva verkossa pysyvää generaattoria. [2]

Kun generaattorin sallitaan pysyvän verkossa, sillä on tapana imeä suuri määrä loistehoa. Suuri loistehon määrä voi johtaa epästabiiliuteen linjoissa, erityisesti suurissa tuulipuistoissa. Etenkin verkkovian jälkeen staattorivirta ja pätöteho heilahtelevat. Staattorivirtaa pienennetään nopeammin kytkemällä rautakangi roottoriipiiriin konvertertin irrottauduttua. [2]

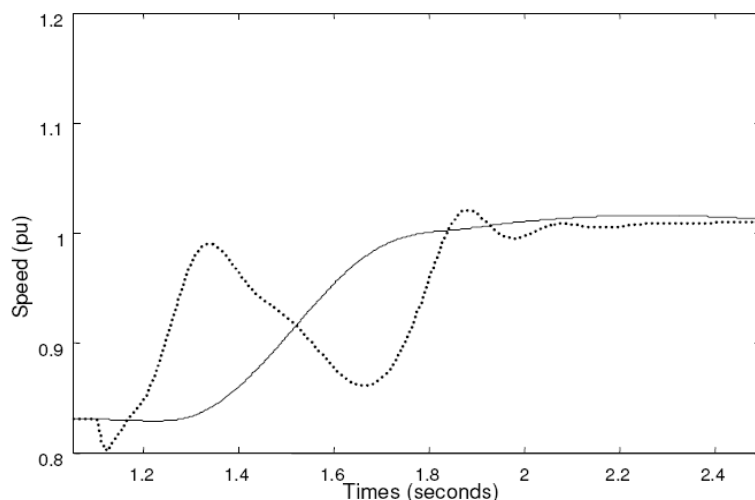
#### 4.1.4 Jännitekuoppa DFIG:n käydessä ali-synkronissa

DFIG:n käydessä alisykronissa se käyttäytyy, kuten sen käydessä ylisynkronissa. Napajännite puuttuu ja rautakanki toimii eli roottoriipiiri oikosulkeutuu. Alisykronissa käyvälle DFIG:lle olisi vielä ylisynkronissakin käyvää DFIG:a tärkeämpää irrottaa se verkosta jännitekuopan jälkeen, kuten kuvasta 21 voidaan nähdä (vrt. kuva 20). Staattorivirran, pätö- ja loistehon heilahtelu on rajua ja napajännite ei stabiloidu yhtä nopeasti kuin generaattorilla, joka käy ylisynkronissa. Kuvasarjassa on mallinnettu alisykronissa käyvän DFIG:n käyttäytyminen jännitekuopan aikana. [2]



Kuva 21. DFIG:n a) napajännite b) staattorivirta c) staattorin pätöteho d) staattorin loisteho ajanfunktiona jännitekuopan aikana. Pisteessä A tapahtuu vika, B:ssä rautakanki aktivoituu, C:ssä generaattori kytketään irti verkosta ja D:ssä vika verkossa on ohi. Yhtenäinen viiva kuvaa verkosta irrotettua generaattoria ja pisteiviiva verkosta irrottautumaton generaattoria. [2]

Jos generaattoria ei irroteta verkosta rautakangen toimittua, jännitekuopan vaikutus generaattorin nopeuteen on yli-synkronissa käyvää DFIG:tä huomattavampaa. Roottorinopeus kiihtyy kohti synkroninopeutta ja voi aiheuttaa roottorin akselilla oskillointia. Tällöin generaattori toimii moottorina ja absorboi suuren määrän pätötehoa, kunnes roottori saavuttaa synkroninopeuden ja toimii taas generaattorina. Generaattorin nopeuden muutos jännitekuopan aikana näkyy kuvasta 22.



Kuva 22. Alisynkronisen DFIG:n nopeuden muutos ajanfunktiona ylivirtasuojan toimittua generaattorin pysyessä verkossa. Yhtenäinen viiva kuvaa turbiinin nopeutta ja pisteviiva generaattorin nopeutta. [2]

#### 4.1.5 Yhteenveto

Verkon oikosulun aikana generaattorin napajännite putoaa ja syntyy virtapiikkejä. Pätötehoa ei enää syötetä konvertterin kautta verkkoon, koska se ei kykene käsittelemään suuria syntyviä virtoja. DC-piirin jännite nousee nopeasti ja rautakangi oikosulkeutuu roottoripiirin kanssa. Rautakangen aktivoituessa virtapiikit tasoittuvat nopeasti ja DC-piirin jännite stabiloituu. DFIG toimii hetken kolmi-vaiheisena oikosulkukoneena ja tuottaa loistehoa magnetointiin. Konvertteri alkaa syöttää loistehoa verkkoon. Loistehoa syötetään, kunnes verkkovika on ohi, ja sen jälkeen loistehon siirto minimoidaan. Nyt verkkoon syötetään ainoastaan pättötehoa ja tilanne vakiintuu. [2,13,14]

Jännitekuopan aikana ja sen jälkeen DFIG:n napajännitteessä, staattorivirrassa ja tehossa tapahtuu nopeita muutoksia riippumatta siitä, käykö se synkroninopeudella, yli- tai alisynkronissa. Alisynkronissa käyvän DFIG:n muutokset ovat rajuimpia ja todennäköisesti aiheuttavat verkkoon eniten häiriöitä. Tämän takia olisi erittäin tärkeää, että DFIG irrotettaisiin verkosta heti rautakangen toimittua. Verkon vikatilanteiden hallinta onkin varsin haastava kysymys DFIG-käytön säädön kannalta.



## 4.2 PMSG verkon vikatilanteissa

Verkkovian aikana voi kestopagneettigeneraattorikäytölle aiheutua vahinkoa konvertterille sekä generaattorin mekaanisiin osiin. Nykyisten verkkosäädösten mukaan tuulivoimakäytön on selviydettävä verkon vikatilanteista ja tuettava verkkojännitteen palautumista. Pienillä jännitteen alenemisilla taajuusmuuttajan on kyettävä jatkamaan katkeamatonta toimintaansa. Suurten jännitekuoppien aikana ei välttämättä voida syöttää tehoa konvertterille, jolloin suoravetoisen generaattorin vääntömomentin ohjearvo ajetaan nolnaan. Nopeamman PMSG:n vääntömomenttia ei voida suoraan ajaa alas vaihteiston rasituksen vuoksi, vaan sitä lasketaan ramppimaisesti. [12]

Kun vääntömomentin ohjearvo ajetaan nolnaan, konvertterille ei siirry sitä rasittavaa tehoa, jota se ei kuitenkaan pystyisi siirtämään lävitseen verkon jännitteen ollessa alhaalla. Konvertterin DC-välipiirin kondensaattoriin varastoituu ylimääräinen energia, kun taas verkon puoleinen konvertteri säätelee loistehon siirtoa ja tukee verkkojännitteen palautumista.

### 4.2.1 Generaattoripuolen konvertterin käyttäytyminen verkon oikosulun aikana

Generaattorin puoleiselle konvertterille ei siirretä enää tehoa, jos verkon puoleisessa konvertterissa esiintyy suuria virtapiikkejä tai DC-välipiirin jännitteet kasvavat liian suuriksi. PMSG kytkeytyy suoraan DC-piiriin kondensaattoriin ja lataa sitä, kunnes DC-piirin jännite ylittää smv:n amplitudin. Generaattorin kestopagneetit on mitoitettava niin, ettei tässä tilanteessa DC-piiriin synny ylijännitettä. Kun DC-piirin jännite ylittää smv:n amplitudin, alkaa kondensaattori purkautua verkkoon verkkopuolen konvertterin kautta. Tällöin napajännitteet putoavat ja voivat aiheuttaa merkittävän suuria virtoja generaattorissa ja vaurioittaa kestopagneetteja. [12]

Generaattoripuolen konvertterin väliaikainen sulkeutuminen on niin lyhyt, että päätötehon putoaminen ei ehdi vaikuttaa juurikaan PMSG:n roottoriin. Roottorin nopeus muuttuu vain muutaman prosentin, johtuen roottorin suuresta hitausmomentista - varsinkin suoravetoisilla kestopagneetti-generaattoreilla. Verkkovian jatkuessa järjestelmää on kuitenkin suojattavasti mekaanisilla jarruilla kiihtymästä liian suureen mekaaniseen nopeuteen. [12]

### 4.2.2 Verkkopuolen konvertterin käyttäytyminen verkon oikosulun aikana

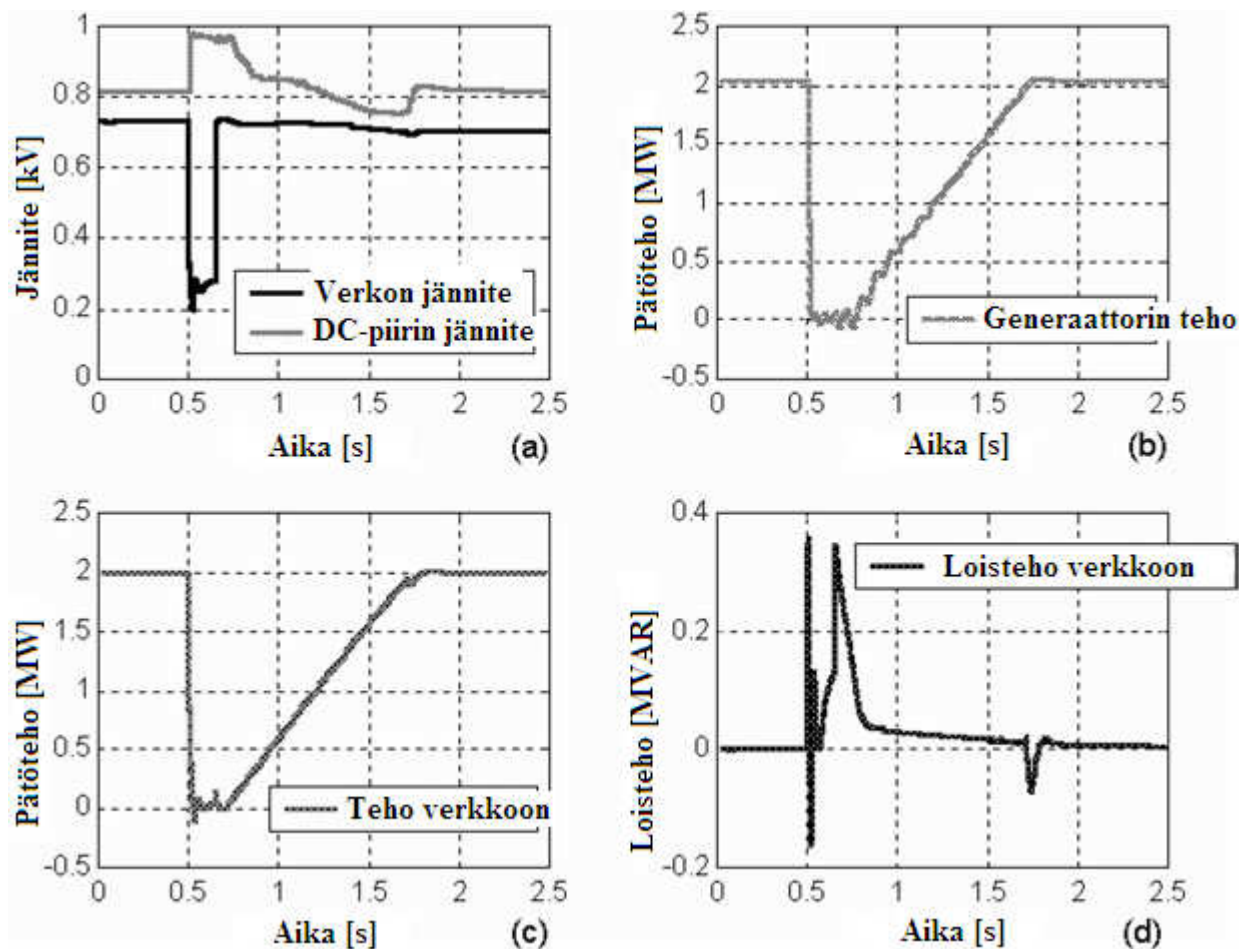
Kun DC-piirin kondensaattorin jännite on latautunut smv:n suuruiseksi, verkon puoleinen konvertteri jatkaa loistehon säätelyä ja tukee verkkojännitteen palautumista oikosulkutilanteessa. Verkon

puoleisen konvertterin säätelemän loistehon vaihteluväli on rajoitettu konvertterin virran arvoon. Loisvirta ei voi termisesti ylikuormittaa verkon puoleisen konvertterin IGBT-transistoreja eikä ylitää releasetuksia. Hyvin suurilla virtapiikeillä verkon puoleinen konvertteri voi sulkeutua lyhyeksi ajaksi, mutta käynnistyy uudelleen jo alhaisilla jännitteillä. [12]

### 4.2.3 Konvertterin käynnistyminen

Verkon oikosulun ollessa ohi ja verkon jännitteen palaututtua, kasvatetaan vääntömomentin ohjearvoa ja PMSG:lta syötetään taas pätötehoa konvertterin kautta verkkoon. Generaattorin vääntömomenttia nostetaan riittävällä tehokertoimella kahden ristiriidan välillä. Generaattorin pätötehon on palaututtava mahdollisimman nopeasti, jotta vältetään roottorin liiallinen kiihtyminen. Samaan aikaan generaattorin tehokerroin ei saisi nousta liikaa, jotta vältetään DC-piirin jännitteen huojunta. DC-piirin jännite nousee taas normaaliksi, generaattorin pätöteho ja verkon puoleisen konvertterin pätövirran referenssiarvo kohoavat tavanomaisiin arvoihinsa. Loistehon siirto järjestelmässä ajetaan minimiin. Tuuliturbiinin toiminta palautuu normaaliksi korkeintaan muutamissa sekunneissa. [12]

Kuvassa 23 on mallinnettu 2 MW:n PMSG:n käyttäytyminen 0,15 sekunnin verkon oikosulun aikana. Kuvasta 23a havaitaan, kuinka DC-piirin kondensaattori latautuu jännitekuopan aikana ja alkaa sen jälkeen purkautua verkkoon. Kuvissa 23b ja 23c nähdään generaattorin ja verkkoon syötettävän pätötehon putoavan nolnaan oikosulun aikana. Oikosulun jälkeen pätöteho lähtee kuitenkin ramppimaisesti kohoamaan riittävällä tehokertoimella. Kuvasta 23d erottuu selkeästi verkon puoleisen konvertterin vaikutus loistehon siirtoon verkon oikosulun aikana. Loistehon siirtyminen järjestelmässä minimoituu oikosulun jälkeen.



Kuva 23. PMSG:n käyttäytyminen verkon oikosulun aikana [12]

#### 4.2.4 Yhteenveto

Verkon oikosulun aikana jännite putoaa, virrat järjestelmässä nousevat ja tehon syöttö verkkokonvertertiin keskeytetään. Verkon puoleiselta konverterilta ja sen säädöltä odotetaan keskeytymätöntä toimintaa verkkovian aikana tuulivoimakäytöissä. Verkkopuolen konverteri säätelee loistehoa ja tukee jännitteen palautumista verkkoon. Kun verkon jännite on palautunut, generaattorilta syötetään taas pätötehoa konverterin kautta verkkoon. Täystehokonverterin käyttäminen vähentää dynaamisen loistehon kompensointia sähköjakoverkossa. [12]

## 5. KUSTANNUKSET JA ENERGIAN HINTA

Tuulivoimaloita rakennetaan, jotta niistä saataisiin ihmisten käyttöön energiaa. Näin ollen, on tärkeää, että saatava sähkö on mahdollisimman edullista. Tuuli sinänsä ei maksa mitään, mutta järjestelmät eivät vielä tällä hetkellä kykene takaamaan edullisinta sähkön hintaa. Ilmastonmuutoksen vahvistuessa on siirryttävä yhteisen hyvän ja tulevien sukupolvien eduksi aiempaa vihreämpään tuotantoon. Eri käyttötekniikoilla tuulivoimasta saadaan hieman erihintaista sähköä ja tässä kappaleessa tutustutaan lähemmin tuulivoimakäyttöjen kustannuksiin.

### 5.1 Kustannukset

Koska suoravetoisten kestopagneettigeneraattoreiden tehot kasvavat ja nopeudet putoavat, tulee niistä kalliita ja kookkaita. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää kestopagneettigeneraattoria yksi- tai kolmeportaisella vaihteistolla (ns. multibrid-järjestelmä), jolloin generaattorin fyysinen koko pienee. Tällöin kuitenkin törmätään DFIG:n haittoihin, kuten vaihdelaatikon häviöihin ja huoltokustannuksiin sekä toimintavarmuuden heikentymiseen. On laskettu, että tuulivoimaloiden voimansiirtoon ja vaihteistoon liittyvät ongelmat aiheuttavat n. 30 % tuulivoimaloiden vikaantumisajasta [15]. Multibrid-järjestelmän hintaan heijastuu toisaalta myös tarve erikoiselle generaattorille ja täystehokonvertterille. Vaihteellisella kestopagneettigeneraattorilla ja täystehokonvertterilla voidaan kuitenkin päästä hieman suoravetoisia järjestelmiä parempaan hyötysuhteeseen ainakin nimellisteholla ja edullisempaan hankintahintaan. [20]

Yksi merkittävä huoltotoimenpide ja ylläpitokustannustekijä DFIG:lla on lisäksi liukurenkaiden uusiminen säännöllisin väliajoin. Mahdollisimman vähäinen huollon tarve voi olla ratkaiseva tekijä ajateltaessa tuulivoimalan rakentamista hankalaan ympäristöön. Suoravetoinen PMSG on varmatoiminen ja sen ylläpitokustannukset pysyvät alhaisina.

Suoravetoinen PMSG voi olla kuitenkin rannikkokäytössä herkkä pölylle ja korroosiolle. Tämä voi heikentää generaattorin jäähdytystä, ja vikatilanteissa, jolloin syntyy suuria virtoja, voi generaattorin lämpötila nousta valtavasti. Vaarana olisi kestopagneettien demagnetoituminen, joiden vaihtamisesta tulisi kallis operaatio. [22]

Konvertterin hinta voi muodostaa suuren osan tuulivoimakäytön kokonaishinnasta. Kestopagneettigeneraattoreilla on käytettävä kallista täystehokonvertteria, kun taas DFIG:lle riittää kolmasosatehoinen 4-kvadranttinen konvertteri. Kuitenkin, kestopagneettigeneraattoreiden koko-

kolmasosatehoinen 4-kvadranttinen konverterti. Kuitenkin, kestopagneettigeneraattoreiden kokonaiskustannusten suurimpien tekijöiden, tehoelektronikan ja kestopagneettien, hinnat ovat laske-  
massa tasaisesti. Vaihteistoon perustuvien tuulivoimakäyttöjen suuret kustannustekijät, kuten vaihteisto sekä raudan ja kuparin hinta, ovat puolestaan kasvussa. [22,26]

Joissain arvioissa tuulivoimakäytön vaihdelaatikko on vaihdettava kuuden vuoden välein. Suurimmat vahingot keskittyvät tuulivoimaloissa vaihteistokäytön hampaisiin, rullalaakereihin ja öljyyn sekä generaattorin laakereihin. Vikaantumisväli hyvin ylläpidetyllä vaihteistolla on 12–15 vuotta ja noin 10 vuotta nopeilla generaattoreilla. Vaihteisto on seisokkien sekä käyttö- ja ylläpitokustannusten suurin edistäjä. [22]

Taulukossa 4 on vertailtu 5 MW:n vaihteettoman ja keskinopeuksisen kestopagneettigeneraattorin sekä DFIG:n fyysistä kokoa. Taulukosta erottuu, kuinka roottorin pyörimisnopeus vaikuttaa generaattorin kokoon. Suoravetoinen PMSG joudutaan rakentamaan suureksi ja painavaksi verrattuna suurella pyörimisnopeudella toimivaan DFIG:iin. Koolla on väliä, sillä kookkaita ja painavia tuulivoimakäyttöjä on haastavampi asentaa korkeisiin olosuhteisiin sekä niiden rahtikustannukset ovat muita korkeammat. Myös rakennuskustannukset kasvavat suuriksi, jos generaattori itsessään painaa yli sata tonnia. [11,22]

Taulukko 4. 5MW:n tuulivoimakäyttöjen koon vertailua [11]

<b>Generaattori</b>	<b>DFIG</b>	<b>PMSG</b>	<b>PMSG</b>
<b>Vaihteet</b>	3-portainen	1-portainen	vaihteeton
<b>Generaattorin teho [MW]</b>	5	5	5
<b>Gen. halkaisija [m]</b>	1,55	3	10
<b>Gen. pituus [m]</b>	0,75	1,5	1,7
<b>Gen. paino [tonnia]</b>	8	30	169

## 5.2 Energian hinta

Taulukossa 5 on vertailtu 3 MW:n tuulivoimakäyttöjen kokonaisjärjestelmän hintaa, vuosittaisia häviöitä, energian tuottoa vuodessa ja, mikä kiinnostavinta, energian tuottoa vuositasolla euroa kohti. Pienimmät vuosittaiset häviöt ovat odotetusti vaihteettomalla PMSG:lla, johtuen häviöttömästä roottorin magnetoinnista ja vaihteiston puuttumisesta. Suoravetoinen PMSG tuottaa myös energiaa vuositasolla hieman muita generaattoriratkaisuja enemmän, mutta on vertailtavista generaattorikäytöistä selvästi kallein. Tuulienergian tuotosta halutaan kuitenkin mahdollisimman suuret voitot, jo-

ten on tarkasteltava energian tuottoa vuositasolla suhteessa sen hintaan. Tässä vertailussa voiton vie 1-portainen DFIG melko selvällä erolla muihin tuulivoimakäyttöihin.

Taulukko 5. 3 MW tuulivoimakäyttöjen energian tuotto vuodessa euroa kohti [20]

Generaattori	DFIG	DFIG	PMSG	PMSG
Vaihteet	3-portainen	1-portainen	1-portainen	vaihteeton
<b>Koko tuulivoimakäytön hinta [k€]</b>	1870	<b>1837</b>	1883	1982
<b>Vuosittaiset häviöt [MWh]</b>	763	701	674	<b>513</b>
<b>Energian tuotto vuodessa [GWh]</b>	7,73	7,8	7,84	<b>8,04</b>
<b>Tuotto/kustannukset[kWh/€]</b>	4,13	<b>4,25</b>	4,16	4,05

Lähteessä 22 on vertailtu 1,5 MW:n ja 3 MW:n DFIG- ja PMSG-käyttöjä. Kyseisen tutkimuksen tulokset on esitetty taulukossa 6 ja ne ovat ristiriidassa taulukon 5 kanssa. Tuloksista tärkeimpänä voidaan pitää saatua *COE*-arvoa, joka on laskettu yhtälön

$$COE = \frac{FCR \cdot ICC + AOM}{AEP} \quad (3)$$

mukaisesti. Yhtälössä *COE* on energian hinta, *FCR* on muokattu hintakerroin, *ICC* on pääkustannus, *AOM* vuosittainen toiminta- ja ylläpitokustannus ja *AEP* on vuosittainen energian tuotanto. Huomattavaa taulukossa 6 on se, että *COE* perustuu 20-vuotiselle turbiinille, joten esim. vaihdelaatikon vaihdotkin on otettu mukaan *AOM*:ssa. *ICC*:ssa on laskettu tuulivoimalan pääkustannukset mm. vaihteisto, generaattori, konvertteri, torni, rahti, kokoonpano ja asennus. *AEP* on saatu tuulen jakaumasta, keskeytyksistä energian tuotannossa, tehokkuudesta ja siirtoverkon häviöistä. DDPMSG tarkoittaa suoravetoista kestopagneettigeneraattoria ja mitta generaattorin halkaisijaa. Vaikka suurempaan generaattoriin menee enemmän materiaalia, on se edullisempi valmistaa. MS PMSG on keskinopeuksinen kestopagneettigeneraattori. [22]

Taulukko 6. *COE* 1,5 MW:n tuulivoimakäytölle (\$ = Yhdysvaltain dollaria) [22]

	DFIG	DDPMSG 4m	DDPMSG 5,3m	MS PMSG
<b>Tuotantokustannukset [\$]</b>	1 056 068	1 106 204	1 093 353	<b>1 047 719</b>
<b>Voittomarginaali [%]</b>	15	15	15	15
<b>Hankintahinta [\$]</b>	1 214 478	1 272 135	1 257 357	<b>1 204 877</b>
<b>Balance of Station [\$]</b>	247 500	247 500	247 500	247 500
<b>ICC [\$]</b>	1 461 978	1 519 635	1 504 857	<b>1 452 377</b>
<b>FCR [%]</b>	10,56	10,56	10,56	10,56
<b>AOM [\$]</b>	25 226	<b>20 315</b>	<b>20 315</b>	23 805
<b>AEP [kWh]</b>	4 769 243	<b>4 872 746</b>	<b>4 872 746</b>	4 812 485
<b>COE [cents/kWh]</b>	3,77	3,71	<b>3,68</b>	<b>3,68</b>

1,5 MW:n luokassa pienimmällä energian kustannuksella pääsevät keskinopeuksinen ja suoravetoisen 5,3 metrin PMSG. Vaikka DFIG on keskinopeuksisen PMSG:n kanssa suoravetoisia kestopagneettigeneraattoreita halvempi, se häviää rutkasti toiminta- ja ylläpitokustannuksissa sekä vuosittaisen energian tuotossa. Taulukossa 7 on vertailtu samalla tavalla 3 MW:n tuulivoimakäyttöjä.

Taulukko 7. COE 3 MW:n tuulivoimakäyttöille (\$ = Yhdysvaltain dollaria) [22]

	<b>DFIG</b>	<b>DDPMSG 5,3m</b>	<b>MS PMSG</b>
<b>Tuotantokustannukset [\$]</b>	<b>1 932 264</b>	2 029 018	1 937 357
<b>Voittomarginaali [%]</b>	15	15	15
<b>Hankintahinta [\$]</b>	<b>2 222 104</b>	2 333 371	2 227 961
<b>Balance of Station [\$]</b>	495 000	495 000	495 000
<b>ICC [\$]</b>	<b>2 717 104</b>	2 828 371	2 722 961
<b>FCR [%]</b>	10,56	10,56	10,56
<b>AOM [\$]</b>	46 872	<b>41 485</b>	46 255
<b>AEP [kWh]</b>	9 765 952	<b>9 950 531</b>	9 841 388
<b>COE [cents/kWh]</b>	3,42	3,42	<b>3,39</b>

Myös 3 MW:n luokassa voiton vie keskinopeuksinen PMSG, mutta erot energian kustannuksissa tasoittuvat DFIG:n ja suoravetoisen PMSG:n välillä. Tärkein seikka taulukossa 7 on se havainto, että kasvattamalla generaattorin nimellistehoa, saadaan energian hintaa lasketuksi. Taulukkojen 5 ja 7 väliset erot voivat johtua hieman erilaisista käytetyistä tuulijakaumista (Weibull/Rayleigh) ja laskentatavoista, mikä muuttaa energian tuotannon suuruutta vuodessa. Myös tuulivoimakäyttöjen hinnat ja vuosittaiset energian tuotot eroavat hieman toisistaan. Yhtäläistä näissä tutkimuksissa on kuitenkin suoravetoisen kestopagneettigeneraattorin muita kalliimpi hankintahinta ja suurin energian vuosituotto.

Kaupallinen menestys on yleensä laskettu keskiarvoisesti tuulen nopeudella 7 m/s, mutta todelliset tulot riippuvat pitkälti siitä, tuottaako tuulivoimala tehoa myös alhaisilla tuulen nopeuksilla. DFIG toimii hyvällä hyötysuhteella vain  $\pm 20 - 30$  % synkroninopeudesta ja sen jälkeen sen hyötysuhde romahtaa huomattavasti. PMSG taas toimii hyvällä hyötysuhteella myös alhaisilla tuulen nopeuksilla. Kun rakennetaan alueelle, jossa keskimääräinen tuulen nopeus on n. 5 m/s, syntyy suurimmat erot tuulivoimakäyttöjen tuottojen välille – kestopagneettigeneraattorin eduksi. [10,11]

## 6. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kandidaatintyössä oli tarkoitus vertailla tuulivoimakäyttöjä eri näkökulmista. Osoittautui, että kestopagneettigeneraattorilla tai DFIG:lla toteutettu tuulivoimala soveltuu tietyille alueille paremmin kuin toinen, eikä tuulivoimakäyttöjen välillä ole selvää ylivoimaa kummankaan eduksi. Tuulivoimala rakennetaan kestäväksi vuosikymmeniä, joten on harkittava tarkkaan mihin ratkaisuun päätyy.

Suoravetoinen kestopagneettigeneraattori on hankintahinnaltaan muita ratkaisuja hieman kalliimpi, mutta tuottaa vuositasolla samoissa teholuokissa eniten energiaa. Sen etuihin kuuluu pitkässä juoksussa varma, vaihteeton ja liukurenkaaton käyttö. Vuositasolla, myös matalilla tuulen nopeuksilla, tehokkuus sekä verkon vikatilanteiden hallinta kuuluu kestopagneettigeneraattorin vahvuuksiin. Keski- ja suurnopeuksisilla kestopagneettigeneraattoreilla edellä mainitut ominaisuudet eivät ole suoravetoisen kestopagneettigeneraattorin luokkaa, mutta päihittävät DFIG:n.

DFIG-käyttö ylittää nimellisuopeudellaan hieman PMSG-käyttöjä parempaan hyötysuhteeseen, mutta tehokkuus putoaa sen pyöriessä 20–30 prosenttia nimellisuopeuden ulkopuolella. Tuulivoimalan sijoituksen valinta nousee tällöin suureen arvoon. Verkon vikatilanteiden hallinta on DFIG:lla kestopagneettigeneraattoreita haastavampaa nykyisten verkkomääräysten pakottamana.

Näiden argumenttien pohjalta olisi tehtävä valinta, kumpi soveltuu energian tuottoon paremmin nykypäivänä ja pari kymmentä vuotta edemmäs. Molemmissa tekniikoissa on hyviä ja huonoja puolia ja pelkkä huippuhyötysuhteeseen tuijottaminen ei ole järkevää. On myös mielenkiintoista nähdä tulevien vuosien kestopagneettigeneraattoreiden suosion suunta, sillä kestopagneettien ja tehoelektronikan (täystehokonvertterien) hinnat ovat laskussa. DFIG on tällä hetkellä markkinoiden ylivoimainen hallitsija ja sen laajaa suosiota selittävät varsin hyvin käytettävät standardikomponentit [20]. Uskon kestopagneettigeneraattoreiden kuitenkin syövänsä lähiaikoina lisää DFIG:n osuutta tuulivoimamarkkinoilla, sillä varsinkin suoravetoisen kestopagneettigeneraattorin ainoaksi peikoksi ostajan näkökulmasta osoittautui muita hieman kalliimpi hankintahinta.



**LÄHTEET**

- [1] R. Melicio, Doubly Fed Induction Generator Systems For Variable Speed Wind Turbine, 2005
- [2] A. Perdana, O. Carlson ja J. Persson, Dynamic Response of Grid-Connected Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator during Disturbances, 2004
- [3] S. Seman, J. Niiranen, S. Kanerva, and A. Arkkio, Analysis of a 1.7 MVA Doubly Fed Wind-Power Induction Generator during Power Systems Disturbances, 2004
- [4] S. Seman, Transient performance analysis of wind-power induction generator, Doctoral Dissertation, 2006
- [5] J. Kinnunen, Direct-On-Line Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Static and Dynamic Performance, 2007
- [6] P. Lampola, Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications, 2000
- [7] J. K. Steinke, O. Apeldoorn, Applying the Experience of Industrial High Power Converter Design to Windpower Conversion, 2002
- [8] K. Tan, S. Islam, Mechanical Sensorless Robust Control of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Synchronous Generator For Maximum Power Operation,
- [9] S. Muller, M. Deicke, R.W. De Doncker, Doubly Fed Induction Generator Systems for Wind Turbines, 2002
- [10] A. Petersson, Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines, 2005
- [11] M. Kimura, K. Ide, K. Nishihama, M. Futami, M. Ichinose, T. Fujigaki, M. Iizuka, K. Imaie, Y. Yagi, J. Tamura, A Study of Generator System Selection for Large Wind Turbine Generator System, 2007
- [12] V. Akhmatov, Modelling and Ride-through Capability of Variable Speed Wind Turbines with Permanent Magnet Generators, 2005
- [13] S. Seman, J. Niiranen, A. Arkkio, Ride-Through Analysis of Doubly Fed Induction Wind-Power Generator Under Unsymmetrical Network Disturbance, 2006

- [14] S. Seman, J. Niiranen, S. Kanerva, A. Arkkio, J. Saitz, Performance Study of Doubly Fed Wind-Power Generator under Network Disturbances, 2005
- [15] Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus (VTT), saatavilla verkossa 3.4.2009 [www.vtt.fi](http://www.vtt.fi)
- [16] A.D. Hansen, G. Michalke, Modelling and Control of Variable-speed Multi-pole Permanent Magnet Synchronous Generator Wind Turbine, 2008
- [17] J.C. Ausin, D. Navarro Gevers, B. Andresen, Fault Ride-through Capability Test Unit for Wind Turbines, 2007
- [18] J. O. G. Tande, Grid Integration of Wind Farms, 2003
- [19] S. Seman, S. Kanerva, J. Niiranen, A. Arkkio, Transient Analysis of Wind Power Doubly Fed Induction Generator Using Coupled Field Circuit Model, 2004
- [20] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G-J de Vilder, P. J. Tavner, Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines, 2006
- [21] A. Petersson, S. Lundberg, T. Thiringer, A DFIG Wind Turbine Ride-through System. Influence on the Energy Production, 2005
- [22] G. Bywaters, V. John, J. Lynch, P. Mattila, G. Norton, and J. Stowell *Northern Power Systems*, M. Salata *General Dynamics Electric Boat*, O. Labath *Gear Consulting Services of Cincinnati*, A. Chertok and D. Hablani *TIAX*, Northern Power Systems WindPACT Drive Train Alternative Design Study Report, 2005
- [23] Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto (LUT), Sähkötekniikan osaston verkkosivut, saatavilla verkossa 3.4.2009 [www.ee.lut.fi](http://www.ee.lut.fi)
- [24] Global Wind Energy Council (GWEC)
- [25] M. Eichler, P. Maibach, A. Faulstich, Full Size Voltage Converters for 5MW Offshore Wind Power Generators, 2008
- [26] H. Li, Z. Chen, Overview of different wind generator systems and their comparisons, 2007
- [27] J. Marques, H. Pinheiro, H. A. Gründling, J. R. Pinheiro, H. L. Hey, A Survey on Variable-Speed Wind Turbine System, 2002

- [28] K. Ghedamsi, D. Aouzellag, E. M. Berkouk, Matrix Converter Based Variable Speed Generator System, 2008
- [29] B. Singh, S. N. Singh, Voltage Stability Assessment of Grid-connected Offshore Wind Farms, 2008
- [30] Energy Saving Network, saatavilla verkossa 18.4.2009  
<http://www.esprojects.net/en/projects/escobalt/substance/>
- [31] Energy Systems Research Unit (ESRU), saatavilla verkossa 28.4.2009  
<http://www.esru.strath.ac.uk/>
- [32] Danish Wind Industry Association, saatavilla verkossa 30.4.2009  
<http://www.windpower.org/en/tour/wres/weibull.htm>
- [33] Jukka Ahokas, Helsingin Yliopisto, Bioenergiaketjut-kurssin luentokalvot, saatavilla verkossa 9.5.2009  
[http://www.mm.helsinki.fi/mmtek/opiskelu/kurssit/y92/Kalvot\\_Aurinko%20ja%20tuuli.pdf](http://www.mm.helsinki.fi/mmtek/opiskelu/kurssit/y92/Kalvot_Aurinko%20ja%20tuuli.pdf)