

Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytössä

Kirjoittajat: Juho Farin, Lasse Peltonen, Marja-Leena Pykälä & Sanna Uski-Joutsenvuo

Luottamuksellisuus: Julkinen

Espoo 2009

Raportin nimi Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä	
Projektiin nimi Taajuusmuuttajien rakenne, mitoitus ja säätö generaattorikäytöissä	
Projektiin numero/lyhytnimi Converter Concepts	
Raportin laatijat Juho Farin, Lasse Peltonen, Marja-Leena Pykälä, Sanna Uski-Joutsenvuo	
Sivujen/liitesivujen lukumäärä 75	
Avainsanat Taajuusmuuttaja, tuulivoima, vektorisäätö, DTC, IGBT	
Raportin numero VTT-R-03623-09	
Tiivistelmä	
<p>Verkkoon liitetyt hajautetun tuotannon yksiköt ja tuulivoimapuistot sisältävät yhä enemmän taajuusmuuttajia. Tämän johdosta taajuusmuuttajan mitoitukseen vaikuttavat tekijät ja ohjausperiaatteiden tuntemisen merkitys kasvavat, kun suunnitellaan ja arvioidaan verkkoon liittämisen seurauksia ja koko käytön ominaisuuksia.</p> <p>Tutkimuksen tavoitteena oli kirjallisuusviitteiden ja haastattelujen pohjalta selvittää taajuusmuuttajien rakenne ja valintaan vaikuttavat tekijät pääasiassa tuulivoimakäytöissä. Tutkimuksessa kartoitettiin myös vaatimukset ja valmiudet taajuusmuuttajakäyttöjen dynaamisten simulointien tekemiseen olemassa olevien simulointimallien pohjalta.</p> <p>Tuulivoimakäytöissä käytetyin rakenne oli kaksitasoinen jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja. Yli 500 kVA ratkaisuihin käytettiin tyypillisesti rinnakkaisia moduuleja, jotta haluttu tehotaso saavutettiin. Käytetyimmät kytkimet olivat IGBT-komponentit. Keskijännitteellä olivat käytössä IGCT-komponentit ja tulevaisuudessa voimalaitosten yksikkökokojen kasvaessa niiden käyttö todennäköisesti kasvaa.</p> <p>Kaksoissyötettyyn liukurengaskoneeseen liitetyn taajuusmuuttajan teho oli noin kolmasosa tämän generaattorin tehosta, kun taas täystehotaajuusmuuttajan mitoitus normaalitilanteessa vastasi käytetyn generaattorin tehoa.</p> <p>Useat taajuusmuuttajavalmistajat käyttivät jotain vektorisäätömenetelmää tuotteissaan. Muutostilanteiden laskentaan tarvitaan tarkat mallit ja riittävä määrä mahdollisimman oikeita parametriarvoja mm. valmistajilta, jotta simulointimallit olisivat käyttökelpoisia. Tärkein edellytys mallien luotettavuuden toteamiseen on niiden validointi.</p>	
Luottamuksellisuus	julkinen
Espoo 10.7.2009 Laatija	Hyväksyjä
Juho Farin, Erikoistutkija	Seppo Hänninen, Teknologiapäällikkö
VTT:n yhteystiedot PL 1000, 02044 VTT, puh. +358 40 5938582	
<p style="text-align: center;"><i>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</i></p>	

Alkusanat

Syksyllä 2008 VTT:n Tutkimus ja kehitys (TK) -toiminnon Energia ja metsäteollisuus (EM) -klusterin Energiajärjestelmät -osaamiskeskuksessa Seppo Hänninen ehdotti selvitettäväksi kirjallisuustutkimuksena taajuusmuuttajien mitoitus ja valintaa lähinnä tuulivoimaloiden generaattorikäytöissä. Tuulivoimaloiden ohella sivuttiin jonkin verran myös hajautetun tuotannon voimaloita. Tuulienergia -tiimin edustajan, Sanna Uski-Joutsenvuo, ohella tutkimukseen osallistui saman Energiajärjestelmät -osaamiskeskuksen Sähkövoimatekniikka-tiimin jäseninä Juho Farin, Lasse Peltonen ja Marja-Leena Pykälä. Tutkimushanke lähti käyntiin VTT:n perusrahoituksella STOR Energian päätöksellä 10.11.2008.

Tutkimushankkeen tukiryhmän työhön osallistuivat Seppo Hänninen Sähkövoimatekniikka-tiimistä ja Esa Peltola VTT:n Asiakastoimialasta Energia, vastuualueenaan tuulienergia, energian siirto ja varastointi sekä energian tehokas käyttö.

Kiitos kaikille hankkeeseen työtä tehneille.

Espoo 10.7.2009

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
Sisällysluettelo.....	3
Merkinnät, termit ja lyhenteet.....	5
1 Johdanto.....	7
2 Tavoite.....	8
3 Katsaus maailmalla käytettyyn tuulivoimalateknologiaan	8
3.1 Yleistä	8
3.2 Tuulivoimalaratkaisuja	9
3.2.1 Kaksoissyötetty tuulivoimala (DFIG)	10
3.2.2 Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala.....	10
3.3 Tuulivoimaloiden ja -puistojen sähkönsiirto.....	11
4 Taajuusmuuttajan mitoitus voimaloissa/tuotantoyksiköissä	12
4.1 Generaattorin asettamat vaatimukset taajuusmuuttajille.....	12
4.1.1 Generaattorivaihtoehdot tuulivoimaloissa	12
4.1.2 Täystehoisen taajuusmuuttajan tehon mitoitus	15
4.1.3 Osatehoisen taajuusmuuttajan mitoitus DFIG-käytössä.....	15
4.1.4 Taajuusmuuttajan liittyminen sähköverkkoon muuntajan kautta	17
4.2 Hajautetun tuotannon yksiköt.....	18
4.2.1 Akkukäyttö	19
4.2.2 Aurinkokennokäyttö	20
4.2.3 Polttokennot.....	20
4.2.4 Mikroturbiinit, polttomootorit, Stirling	20
4.2.5 Pientuulivoimalat.....	21
4.3 Sähköverkkovaatimukset	22
4.3.1 Yleistä	22
4.3.2 Standardit ja muut vaatimukset.....	23
4.3.3 Liittyminen jakeluverkkoon.....	24
4.3.4 Siirtoverkon liittymissäännöt.....	28
4.3.5 Tuotantoyksiköiden sähkön laatuvaatimukset.....	32
4.3.6 Sähkön laatu verkkoon liitetyissä tuulivoimaloissa.....	32
4.4 Ympäristövaatimukset.....	35
4.5 Rajaukset.....	38
5 Taajuusmuuttajan tekniset ominaisuudet	38
5.1 Taajuusmuuttajatyypit, toimintaperiaatteet ja rakenne	38
5.1.1 Taajuusmuuttajatyypit.....	38
5.1.2 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate	40
5.1.3 Taajuusmuuttajien rakenne ja komponentit.....	49
5.2 Säättö- ja ohjausmenetelmät	55
5.2.1 Yleistä säättö- ja ohjausmenetelmistä.....	55

5.2.2	Kaksoissyötetty voimala (DFIG-käyttö)	58
5.2.3	Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala	58
5.2.4	Hajautetun tuotannon yksiköt.....	59
6	Taajuusmuuttajakäyttöjen normaalitilan toiminta	59
6.1	Taajuusmuuttajien käyttäytyminen kytkentätilanteissa.....	59
6.2	Taajuusmuuttajien vaikutus verkkoon	59
7	Taajuusmuuttajakäyttöjen häiriötilan toiminta	60
7.1	Taajuusmuuttajakäyttöjen suojaus.....	60
7.2	Kaksoissyötetyn voimalan toiminta häiriötilanteissa.....	61
7.3	Täystehotaajuusmuuttajalla varustetun voimalan toiminta häiriötilanteissa ..	62
7.4	Häiriömittaukset	62
8	Simulointiedellytykset	63
8.1	Simulointimallit	63
8.2	Simulointitapauksia ja -ehdotuksia.....	63
9	Jatkotutkimustarpeita.....	64
10	Johtopäätökset	65
Liite 1	Taulukko merkittävimpien tuulivoimalavalmistajien voimaloista ja niiden ominaisuuksista	66
Lähdeviitteet	70

Merkinät, termit ja lyhenteet

4Q-taajuusmuuttaja	4 quadrant converter, nelikvadranttinen taajuusmuuttaja toimii jännitevirtatason kaikissa neljässä neljänneksessä
ARU	Active Rectifier Unit, täysin ohjattu tasasuuntausyksikkö
CHP	Combined Heat and Power, yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto
Crowbar	DFIG-koneen taajuusmuuttajan suojaus, jolla roottoriipiiri oikosuljetaan
CSC	Current Source Converter, virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja
Cuk-topologia	tasasuuntaajamalli yksisuuntaiseen tehonsyöttöön (Slobodan Čuk)
DFIG	Double/doubly fed induction generator, kaksoissyötetty epätahtigeneraattori
DFOC	Direct Field Orientated Control, suora vektorisäätö
dq-säätö	dq-koordinaatistoon kiinnitetty säätö
DTC	Direct Torque Control, suora momentinsäätö
EMC	Electro Magnetic Compatibility, sähkömagneettinen yhteensopivuus
EODV	End of Discharge Voltage, tyhjentyminenjännite
FOC	Field Orientated Control, vektorisäätö
FRT	Fault Ride Through, verkkovian sieto, sama kuin LVRT
GB	Gearbox, vaihteisto
GTO	Gate Turn Off thyristor, hilalta sammutettava tyristori
H-silta	Topologia, jossa teho voi kulkea molempiin suuntiin
IFOC	Indirect Field Orientated Control, epäsuora vektorisäätö
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor, eristettyhilainen bipolaaritransistori
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor, ABB:n keskijännitesovelluksiin kehittämä tehokytin
INU	Inverter unit, vaihtosuuntausyksikkö
ISU	Inverter Supply Unit, verkkopuolen suuntaaja
IR-kompensointi	Staattori-resistanssin kompensointi pienillä taajuuksilla
LCI	Load Commutated Inverter, kuormakommutoitu invertteri
LoM	Loss of mains, saarekekäytön esto
LVRT	Low Voltage Ride Through, alhaisten jännitteiden sieto, sama kuin FRT
MOSFET	Metal-oxide Semiconductor Field-effect Transistor, metallioksidikanava-transistori
MPP-säädin	Maximum Power Point- säädin, maksimitehopistesäädin
MPPT	Maximum Power Point Tracker, maksimitehopisteseurain
NPC	Neutral Point Clamped, tähtipistekiinnitetty

PCC	Point of Common Coupling, sähköverkon liityntäpiste
PDS	Power Drive Systems, nopeussäädetyt käytöt
PJK	pikajälleenkytkentä
PLL	Phase-Locked Loop, vaihelukittu silmukka
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator, kestopagneettitahti-generaattori
PROFIBUS	Process Field Bus, avoin kommunikointiprotokolla
PWHD	Partial Weighted Harmonic Distortion, epäharmonisten yliaaltojen painotettu särö
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
ROCOF	Rate of Change of Frequency, taajuuden muutosnopeuteen perustuva rele
SCR	Silicon Controlled Rectifier, tyristori
Sepic-topologia	Single-Ended Primary Inductor Converter, hakkuritopologia joka voi nostaa tai laskea jännitettä
Space Vector Theory	Avaruusvektorteoria
SPWM-modulaatio	Sinusoidal Pulse Width Modulation, sinimuotoinen pulssinleveys-modulaatio
STATCOM	Static Synchronous Compensator, staattinen kompensattori
Suzlon-flexi-slip	Suzlonin käyttämä liukurengaskoneen jättämän säätömenetelmä muuttuvan roottoriresistanssin avulla
SVM	Space Vector Modulation, avaruusvektorimodulointi
THD	Total Harmonic Distortion, harmoninen kokonaissärö
UPS	Uninterruptible Power Supply, keskeytymätön tehonsyöttö
VIENNA-topologia	tasasuuntaajatopologia yksisuuntaiseen tehonsyöttöön
VJV	Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset
VSC	Voltage Source Converter, jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja
YSE	yksinsyötön esto

1 Johdanto

Tässä hankkeessa selvitetään tuulivoimaloissa ja hajautetussa tuotannossa käytettyjä taajuusmuuttajia, joissa suuritehoisimmat tuotantoyksiköt ulottuvat useisiin megawatteihin. Pääpainona projektissa ovat tuulivoimaloissa käytetyt taajuusmuuttajaratkaisut. Kaupallisissa tuulivoimakäytöissä taajuusmuuttajan tulo ja lähtö ovat vaihtojännitettä ja niiden taajuudet voivat olla erilaiset ja ne voivat vaihdella eri tavoin. Taajuusmuuttajan käyttö mahdollistaa esim. tuulivoimalan generaattorin pyörimisen hyvällä hyötysuhteella vaihtelevalla kierrosnopeudella.

Perinteisin ratkaisu tuulivoimakäytöissä on liittää tavallinen häkkikämmitty oikosulkukone suoraan sähköverkkoon ilman taajuusmuuttajia. Uudempi ratkaisu on liityntä taajuusmuuttajan kautta, jolloin taajuusmuuttajaa voidaan kutsua täystehotaajuusmuuttajaksi. Toisessa taajuusmuuttajan käyttötavassa epätahtikoneen roottorikämmitys liitetään liukurenkaiden kautta taajuusmuuttajan välityksellä ja koneen staattoriin suoraan sähköverkkoon. Tässä käytössä taajuusmuuttajan teho on osa koko koneen tehosta. Koneita kutsutaan tällöin kaksoissyötetyksi epätahtigeneraattoriksi (DFIG, Double/doubly Fed Induction Generator).

Tuulivoimalassa käytettävä tahtigeneraattori täytyy liittää täystehotaajuusmuuttajan kautta sähköverkkoon. Täystehotaajuusmuuttajan ansiosta käyttö voi toimia laajalla pyörimisnopeusalueella. Tahtikoneen napapyörän eli roottorin magnetointi voidaan toteuttaa joko erillisellä magnetointipiirillä tai kestopagneeteilla. Erillinen magnetointipiiri saa syöttönsä esim. sähköverkosta tai taajuusmuuttajan välijännitepiiristä ja antaa tasavirtamagnetoinnin tahtikoneen napapyörään.

Generaattorin ominaisuudet ja liityntä sähköverkkoon sanelevat taajuusmuuttajan mitoituksen. Työssä selvitetään myös taajuusmuuttajien erityispiirteet tuulivoimalaympäristössä ja muun hajautetun tuotannon yhteydessä.

Taajuusmuuttajien teknisistä ominaisuuksista kartoitetaan niiden periaatteelliset ratkaisut kuten käytetyt topologiat, puolijohdekytkimet ja niiden muodostamat kytkennät, jännite- ja virtarasitusten hallinta sekä taajuusmuuttajien ohjaus- ja säätötavat.

Käyttäjät odottavat taajuusmuuttajilta varmaa ja luotettavaa toimintaa. Tavanomaisessa käytössä taajuusmuuttajien on pystyttävä selviytymään esim. tuulivoimalan kytkennöistä sähköverkkoon ja siitä irti aiheuttamatta haitallisia ilmiöitä generaattorin tai verkon suuntaan. Tavanomaiseksi käytöksi on tässä katsottava esim. sähköverkon hitaat ja nopeat jännitemuutokset, jännitekuopat, keskeytykset ja mahdolliset taajuusheilahtelut millä tahansa generaattorin kuormituksella ja kierrosnopeudella. Tuulivoimalaympäristöstä pyritään selvittämään eri toimijaosapuolten (taajuusmuuttajan valmistaja, generaattorin valmistaja, tuotantolaitoksen ja sähköverkon haltija) näkemyksiä, joista monet palautuvat poikkeustilanteiden tarkasteluun suojaus- ja häiriövaatimuksineen.

Jatkoa ajatellen esitetään sellaisia vaatimuksia ja tietotarpeita, joita taajuusmuuttajan dynaamiset simulointimallit tarvitsevat. Simulointikohteina voivat olla tuulivoimalan kytkentä- ja verkon vikatilanteet.

2 Tavoite

Tässä projektissa tarkastellaan tuulivoimaloita, joissa on käytetty taajuusmuuttajia. Polttokennot, aurinkosähkökennot ja akustot toimivat tasajännitteellä, jolloin verkkoonliityntä edellyttää vaihtosuuntaajan käyttämistä. Vaatimukset sekä verkkoonliitynnän suojauksen että sähkön laadun kannalta ovat periaatteessa samat tuulivoimaloissa ja muissa hajautetun tuotannon laitteissa. Toistaiseksi pienitehoisten suuntaajien tekniikka ja suojausten toteuttaminen poikkeavat suurista yksiköistä. Verkkoonliitynnän vaatimukset toteutetaan osittain ulkopuolisilla ja erillisillä suojausmenetelmillä ja osittain taajuusmuuttajan sisäänrakennetuilla suojauksilla ja säädöillä.

Ensimmäisessä vaiheessa kerätään olemassa oleva tietämys alueelta. Tutkimuskohteet selvitetään kirjallisuuden, laitespesifikaatioiden, haastattelujen ja käytettävissä olevan mittausaineiston pohjalta. Tavoitteena on saada selkeä käsitys taajuusmuuttajien ominaisuuksista koko alueelle pientuotannosta suuriin voimaloihin. Tavallisimpia kytkentä- ja vikatilanteita varten pyritään luomaan simulointiedellytykset jatkoprojektia ajatellen.

3 Katsaus maailmalla käytettyyn tuulivoimalateknologiaan

3.1 Yleistä

Tuulivoimaloita rakennettiin vuonna 2007 noin 19 GW yksikkömäärän ollessa yli 12 000 kpl. Vuonna 2008 rakennettu kapasiteetti nousi jo noin 27 GW:iin. Rakennettavien tuulivoimaloiden kokoluokka on kasvanut vuosien saatossa muutamista sadoista kilowateista tämän hetken megawattiluokkaan (1 – 3 MW). Kiinan ja Intian vasta herännyt tuulivoimarakentaminen vetää paljon alle 1 MW voimaloita, mikä pitää tämän kokoluokan ”vanhempia” suurimpienkin voimalavalmistajien malleja edelleen markkinoilla [1], [2].

Suurimpina tuulivoimalavalmistajina on viimevuosina vakiinnuttanut asemansa muutama suuri toimija – Vestas, GE, Gamesa, Enercon, Suzlon ja Siemens – joiden yhteinen markkinaosuus on noin 75 % vuosittain rakennettavasta tuulivoimakapasiteetista [1]. Tällä hetkellä 16 suurimman voimalavalmistajan markkinoilla olevista voimaloista valtaosa sisältää taajuusmuuttajia, eli on kaksoissyötetty voimala (DFIG) tai täystehotaajuusmuuttajan kautta verkkoon kytketty voimala. Taajuusmuuttajattomia voimalamalleja löytyy vain muutamia. Kokonaan taajuusmuuttajattomia voimaloita ovat useimmiten valmistajien pienemmät voimalat (yleensä alle 1 MW), mutta esim. Suzlonin voimaloissa ei käytetä lainkaan taajuusmuuttajia, vaan Suzlonin suurempitehoisten voimaloiden muuttuvanopeuksisuuden mahdollistaa ”Suzlon-flexi-slip” säätö, missä epätahtikoneen jättämää – ja siten pyörimisnopeutta – säädetään muuttuvan roottoriresistanssin avulla puolijohdekomponenteilla.

Taajuusmuuttajia ei useinkaan tarkastella erillisenä komponenttiryhmänä käsitellessä tuulivoimalan komponenttien toimitusketjua (supply chain). Erillisiksi komponenteiksi listataan esim. lavat, vaihteisto, voimalan säätöjärjestelmä, generaattori, laakerointi ja torni. Täystehotaajuusmuuttajia käyttävien voimaloiden valmistajien käyttämät taajuusmuuttajatoimittajat eivät siis selviä voimaloiden komponenttitoimittajia käsittelevistä raporteista, esim. [1], [3] vaikka näissä lähteissä

taajuusmuuttaja kyllä listattiinkin erilliseksi pääkomponentiksi. Kaksoissyötetyissä voimaloissa taajuusmuuttaja kuitenkin on integroitu generaattoriin.

Tuulivoimasektorilla suuria taajuusmuuttajakomponenttien toimittajia ovat mm. ABB, Ingeteam (osuus 13,9 %) ja Siemens. Suomessa pienempiä taajuusmuuttajien toimittajia ovat the Switch ja Vacon. Semikron toimittaa pääasiassa puolijohdekomponentteja. Converteam toimittaa mm. Siemensille tuulivoimaloiden taajuusmuuttajia, se sai 1000 kpl rajan 2500 MW kapasiteetilla rikki vuoden 2007 lopulla [4], [5].

Tuulivoimaloissa käytettävissä taajuusmuuttajissa käytetään tällä hetkellä lähes yksinomaan IGBT-komponenttitekniikkaa (Insulated Gate Bipolar Transistor). Toinen käytetty tekniikka on IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) mm. ABB:llä. Säättömenetelmänä monissa taajuusmuuttajissa on pulssinleveysmodulaatio PWM (Pulse Width Modulation) ja ABB:lla sen patentoima suora vääntömomenttisäätö DTC (Direct Torque Control) [6]. Markkinajohtajien voimaloiden tiedoista on koottu tärkeimmät ominaisuudet liitteeseen 1.

Täystechotaajuusmuuttajan kautta syötetyn tuulivoimalan ja kaksoissyötetyn voimalan taajuusmuuttajien kokoero on aika suuri. Nyrkkisääntönä on, että kaksoissyötetyissä voimaloissa taajuusmuuttaja on mitoitettu noin 1/3-osa teholle koko voimalan tehosta. Tämä on ollut merkittävä asia mm. voimaloiden kustannuksissa, mutta viimevuosina taajuusmuuttajien hinnat ovat laskeneet, joten 33 % ja 100 % kapasiteettisten taajuusmuuttajien hintaero on menettänyt merkitystään valittaessa voimalatekniikkaa. Voimalaratkaisusta riippuen taajuusmuuttajan osuus koko voimalan komponenttikustannuksista on luokkaa 2 – 5 % [7].

3.2 Tuulivoimalaratkaisuja

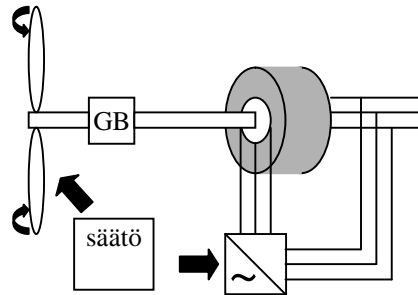
Perinteisesti teollisuussovelluksissa, päti myös tuulivoimaloihin, on ajateltu että pienien tehojen siirto on kustannustehokkainta pienjännitteellä, kun taas suurien siirrettävien tehojen tapauksessa on kustannustehokkainta käyttää keskijännitetasoja. Raja ”pienien” ja ”suurien” tehojen välillä on 1,5 – 2,5 MW välissä [8].

Tuulivoimasovelluksissa useimmiten käytetään pienjännitteitä, ja 690 V on hyvin yleisesti käytetty jännitetaso voimaloissa. Myös taajuusmuuttajat toimivat tällä jännitetasolla. Osassa voimaloita jännitteen nosto tapahtuu tornin alapäässä olevassa muuntajassa, kun taas toisissa taajuusmuuttaja sekä muuntaja on sijoitettu ylös konehuoneeseen (esim. Vestaksen suurimmat voimalat). Ainakin osassa Enerconin voimaloista teho siirretään tornista alas tasasähkönä tasasuuntaajan sijaitessa konehuoneessa ja vaihtosuuntaajan tornin alapäässä. Tehon siirto pienjännitteellä aiheuttaa jännitteen alenemaa ja häviöitä [9]. Häviöiden vuoksi tuulivoimaloissa jännite kannattaa nostaa mahdollisimman aikaisessa vaiheessa sijoittamalla muuntaja jo ylhäälle konehuoneeseen sen sijaan, että teho siirrettäisi tornin pituinen matka, jopa reilu 100 metriä, kaapeleilla alas tornin juurelle sijoitettuun muuntajaan [8]. Pääasiassa tämä toteutuukin suurimpien voimalavalmistajien voimaloissa, ks. liite 1. Esim. Vestaksen sekä Gamesan yli 2 MW voimaloissa (molemmat kaksoissyötettyjä) muuntaja on sijoitettu konehuoneeseen tornin yläpähän ja pienemmissä voimaloissa muuntaja yleensä sijaitsee tornin alapäässä.

3.2.1 Kaksoissyötetty tuulivoimala (DFIG)

Kaksoissyötetyllä generaattorilla varustettu tuulivoimala on muuttuvanopeuksinen, eli generaattorin ja siten voimalan turbiinin on mahdollista toimia erilaisilla pyörimisnopeuksilla. Generaattorikomponenttina DFIG-konseptissa on käämitty epätahtikone eli liukurengaskone, jonka roottori on kytketty taajuusmuuttajan kautta verkkoon staattoriin ollessa suoraan verkkoon kytketty, ks. kuva 1. Kone toimii itse asiassa tahtigeneraattorin tavoin [10], eikä induktikoneen tavoin, vaikka generaattorikomponenttina käytetäänkin induktiokonetta (= epätahti-, asynkroni- eli oikosulkukone).

Osa generaattorin tuottamasta tehosta kulkee verkkoon taajuusmuuttajan kautta, osa staattoriin kautta. Taajuusmuuttajan kautta kulkevan tehon suuruus ja suunta riippuvat koneen jättämästä. Riippuen voimalan toimintapisteestä teho voi kulkea joko verkkoon tai generaattoriin päin, eli generaattori voi toimia ali- tai ylisynkroninopeudella. Taajuusmuuttajan kautta kulkeva teho on maksimissaan noin 1/3-osa voimalan nimellistehosta.



Kuva 1. Periaatekuva kaksoissyötetyllä epätahtikoneella (DFIG-käyttö) varustetusta tuulivoimalasta.

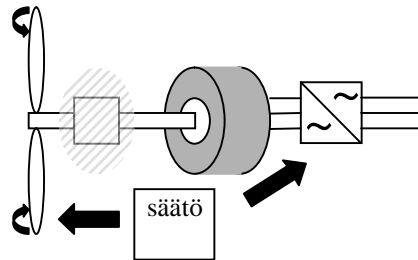
Muuttuvanopeuksiset tuulivoimalat (sekä osa- että täystehotaajuusmuuttajan kautta verkkoon kytketyt) toimivat pyörimisnopeussäädöllä (tuulennopeuden kasvaessa pyörimisnopeus ja teho kasvavat) alle nimellistehon toimintapisteissä. Nimellisen tehon antavan tuulennopeuden saavutettuaan ja tätä suuremmilla tuulennopeuksilla pyörimisnopeus ja voimalan teho pidetään nimellisen suuruisena tuuliturbiinin lapakulmasäädöllä.

Kaksoissyötetyissä voimaloissa on aina vaihteisto. Voimalan pyörimisnopeuden sanelee turbiinin lapojen kärkinopeus, jolle on olemassa maksimi. Suurissa voimaloissa, joissa lavat ovat pidempiä, turbiinien pyörimisnopeus on siten pienempi kuin pienemmissä lyhyempilapaisissa voimaloissa. Generaattorin staattorin taajuus on verkon noin 50 Hz. Generaattorin roottorin pyörimisnopeus, kun otetaan huomioon koneen napaparien lukumäärä ja vaihteiston välityssuhde sekä turbiinin kierrosnopeus, liikkuu jättämän sallimalla alueella noin $\pm 30\%$.

3.2.2 Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala

Täystehotaajuusmuuttajalla varustetussa tuulivoimalassa generaattori on useimmiten tahtikone, mutta jotkut valmistajat käyttävät epätahtikonetta (esim. Siemens). Taajuusmuuttajan erottaessa generaattorin (staattorin) kokonaan verkon taajuudesta

on generaattorin roottorin pyörimisnopeus riippumaton verkon taajuudesta. Generaattori syöttää verkkoa koneen staattorin ja siten taajuusmuuttajan kautta, ja mahdollinen generaattorin magnetointi otetaan taajuusmuuttajan kautta, tai oman suuntaajansa kautta joko verkosta tai taajuusmuuttajasta (esim. tasajännitepiiristä). Täystehotaajuusmuuttajalla varustetuissa voimaloissa useat valmistajat käyttävät kestmagnetoitua tahtikonetta. Kuvassa 2 on esimerkki täystehotaajuusmuuttajan käytöstä, generaattori voi olla tyypiltään kestmagneettitahtigeneraattori, erillismagnetoitu tahtigeneraattori tai epätahtikone.



Kuva 2. Periaatekuva täystehotaajuusmuuttajalla varustetusta tuulivoimalasta.

Staattoripuolen taajuus ei ole verkon taajuuteen kytköksissä, ja suuren napaparamäärän tahtikoneilla varustetuissa voimaloissa generaattorin roottorin pyörimisnopeus saadaan niin pieneksi, että voimalassa ei tarvita vaihteistoa. Suuri napaparamiluku kuitenkin kasvattaa generaattorin roottorin, ja siten koko generaattorin halkaisijaa. Epätahtikonetta ei ole mahdollista rakentaa niin moninapaiseksi, että vaihteiston voisi jättää pois, koska pieni napajako yhdessä suuren ilmavälin kanssa johtaa suureen loistehon tarpeeseen [11].

3.3 Tuulivoimaloiden ja -puistojen sähkönsiirto

Yksittäiset pienet tuulivoimalat kotitalouskäyttöön ovat kooltaan muutamasta kilowatista noin 20 kW:iin. Tällaiset tehot siirtyvät helposti 400/230 V pienjänniteverkossa.

Tällä hetkellä suurin yksittäinen tuulivoimala on noin 5 MW. Tämänsuuruisen tehon siirto keskijännitteellä esim. 20 kV:n kolmivaiheverkossa tehokertoimella yksi vastaa noin 145 A vaihevirtaa. Kyseinen vaihevirta on helposti toteutettavissa 20 kV:n verkossa, mutta tyypillisellä generaattorin pienjännitetasolla (690 V) vaihevirta olisi noin 4180 A, mikä edellyttäisi erittäin suuripoikkipinta-alaisten johtimien käyttöä.

Tuulivoimapuistot, joihin on koottu useita tuulivoimaloita, ovat kokonaisteholtaan kymmeniä jopa satoja megawatteja. Esimerkiksi Kaliforniassa sijaitsevan tuulipuisto Tehachapin tehoksi on ilmoitettu 623,9 MW. Jos 600 MW:n teho on siirrettävä esimerkiksi 110 kV:n kolmivaiheverkossa, on vaihevirta tehokertoimella yksi noin 3150 A. 400 kV:n verkossa vastaava virta olisi noin 870 A. Tasajännitesierrossa 500 kV:n jännitteellä tasavirta olisi noin 1200 A. Tehon siirto mainitun kokoisista tuulivoimapuistoista toteutuisi yksinkertaisimmin kahdella viimeksi mainitulla tavalla. Suurten tehojen siirrossa joudutaan tarkastelemaan siis tekniikan mahdollistamien johtojen luonnollisia tehoja. Suurten tuulivoimapuistojen käsittely ohitetaan tässä selvityksessä vähin maininnoin.

4 Taajuusmuuttajan mitoitus voimaloissa/tuotantoyksiköissä

4.1 Generaattorin asettamat vaatimukset taajuusmuuttajille

Generaattoreiden tehtävänä on muuntaa sen akseliin tuotu mekaaninen energia sähköenergiaksi, joten on tunnettava, miten akselin vääntömomentti vaihtelee kaikissa esiintyvissä tilanteissa. Momentin vaihteluun tuulivoimaloissa vaikuttavat mm. tuulenpuuskat ja turbulenssit sekä tornin varjo.

Ennen generaattorin akselia turbiinista tuleva vääntömomentti voi olla muokkautunut vielä erilaisia hitausmassoja yhdistävistä joustavista akseleista mukaan luettuna vaihdelaatikko. Generaattorin akselin vääntömomentti ei siis ole tasaista vääntöä. Vääntömomentin vaihtelua tapahtuu kaikilla generaattorin akselin pyörimisnopeuksilla. Tuulivoimalan kytkentätilanteissa generaattoriakselin vääntömomentissa voi tapahtua äkillisiä muutoksia. Nämä muutokset tulee tuntea tarkasti, ja muutossuureet voivat olla ilmoitettuna esim. pätötehona kierrosnopeuteen sidottuna tai ne voidaan ilmoittaa muina taajuusmuuttajan tulosuureina. Generaattorin sähköiset lähtösuureet ovat taajuusmuuttajan tulosuureita silloin, kun täystehotaajuusmuuttaja on generaattorin ja sähköverkon välissä.

Generaattorin sähköisiä liityntäsuureita ovat esim. nimellisteho, -jännite, -virta, -taajuus, tehokerroin ($\cos\phi$), suurin käynnistysvirta sekä em. suureiden vaihtelualueet. Erityisesti generaattorin satunnaiset esim. vioista johtuvat ylikuormitustilanteet vaikuttavat suoraan taajuusmuuttajan tulosuureisiin. Myös koneiden magnetoititiedot tarvitaan.

Tuulivoimakäytöissä taajuusmuuttaja muodostuu kahdesta muuttajasta eli suuntaajasta ja niiden välisestä tasajännitepiiristä. Lisäksi taajuusmuuttajaan voi kuulua pääkomponentteina suojalaitteita ja suodattimia ja tasajännitepiirin katkoja. Taajuusmuuttajan kahdella osamuuttajalla voi olla niiden toimintaa kuvaavat nimet kuten tasasuuntaaja generaattoripuolella ja vaihtosuuntaaja sähköverkkopuolella. Edelleen näitä osamuuttajia kutsutaan usein yleisnimellä silta niiden puolijohdekytkinten siltaa muistuttavan kytkennän takia.

Taajuusmuuttajan tärkein mitoituskriteeri on sen läpi kulkeva teho. Teho muodostuu jännitteen ja virran tulosta. Niinpä taajuusmuuttajan (komponenttien) jännite- ja virtakestoisuudet tulevat vastaan komponentteja valittaessa ja niiden suojausta toteutettaessa.

4.1.1 Generaattorivaihtoehdot tuulivoimaloissa

Suurissa tuulivoimalakäytöissä eniten käytetyt generaattorit ovat epätahtikoneista liukurengaskone DFIG-käyttönä ja tahtikoneista sekä erillismagnetoitu että kestmagnetoitu tahtikone. Generaattoreista ilmoitetaan mm. seuraavia nimellistietoja. Esimerkkinä on keskijännitteinen kestmagnetoitu generaattori [12]:

Sähköiset nimellisarvot	1562 kW, 3000 V, 327A, 3–9,25 Hz, $\cos\phi$ 0,92
Nimellinen akseliteho	1670 kW
Nimellisvääntömomentti	862 kNm
Nimelliskierrosnopeus	9–18,5 1/min
Roottorin hitausmomentti	35000 kgm ²
Staattorin massa	25000 kg

Roottorin massa	12500 kg
Napaparien lukumäärä	30 kpl
Oikosulkuvirta	569 A (jatkuva)

Generaattori-taajuusmuuttajan kokonaistoimituksessa voi generaattorin lähdön periaatteessa tilata esimerkiksi 6-vaiheiseksi, jolloin taajuusmuuttajan välijännite saadaan tasaisemmaksi kuin 3-vaiheisessa generaattorilähdössä.

Voimalan kokonaistoimittaja voi järjestää generaattorin jarruttamisen syöttämällä jarrutusenergian sähköverkkoon tai erillisiin vastuksiin, jotka sijaitsevat taajuusmuuttajan jännitevälipiirissä olevan katkojan perässä [13]. Jarrukatkoja on elektroninen kytkin, joka liittää välipiirin tasajännitteen vastukseen, jossa jarrutusenergia muunnetaan lämmöksi. Jarrukatkoja toimii, vaikka vaihtovirran syöttö olisi poikki. Jarrutusta tarvitaan esimerkiksi sähkökatkoksen aikana tai verkon lyhytaikaisissa vikatilanteissa. Koska taajuusmuuttajan puolijohteet eivät kestä kovin suurta ylikuormitusta (ja sitäkin vain lyhytaikaisesti), on generaattorin ylikuormitustilanteet tunnettava tarkoin. Taajuusmuuttajan ylikuormitus on pientä, luokkaa 10 % nimellisvirroista esim. yhden minuutin ajan ylikuormaa 10 minuutin välein. ABB:n käsikirjan [14] luvussa 16 todetaan:

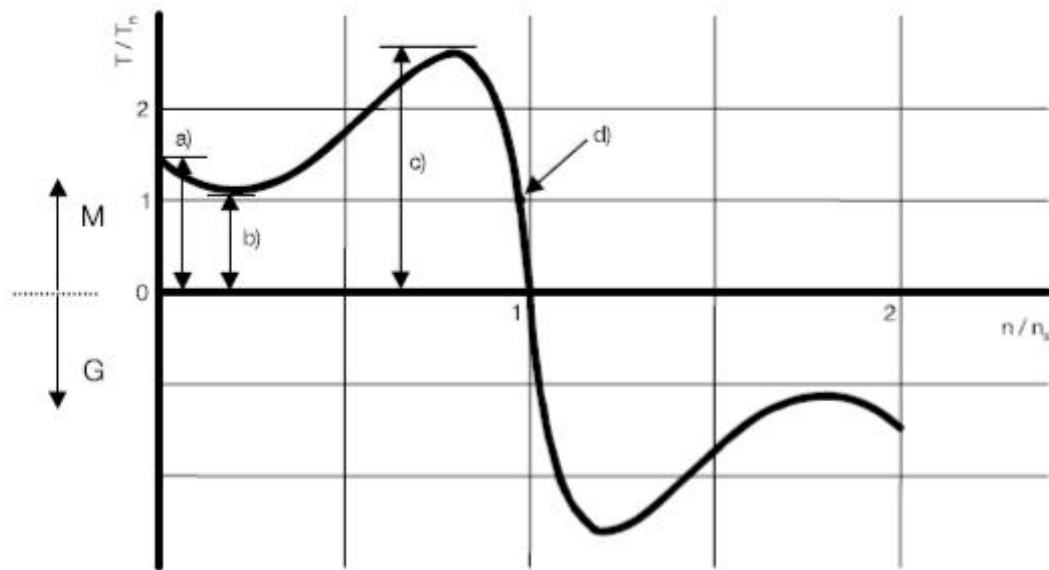
"Ylikuormitustilanteissa sen paremmin kuin jatkuvuustilassakaan puolijohteen liitoslämpötila ei saa nousta suurinta sallittua lämpötilaa, esim. +125°C, suuremmaksi. Ylikuormitettavuus-ominaisuudet ovat voimassa vain määritellyissä olosuhteissa, joihin vaikuttavat mm.

- suuntaajatyypin (jäähdytyslementti)
- jäähdytystapa (ilmamäärä)
- jäähdytysaineen lämpötila
- virran käyrämuoto
- puolijohdetyypin
- syöttöjännitteen taajuus
- esikuormituskerroin, eli suuntaajan lähtövirran (ennen ylikuormitusta) suhde nimellisvirtaan."

Suoraan verkkoon kytketyn epätahtikoneen vääntömomenttikäyrä kierrosnopeuden funktiona on kuvan 3 kaltainen [15]. Kuvassa vääntömomentti ja kierrosnopeus on esitetty suhteellisina: vääntömomentti on jaettu koneen nimellisvääntömomentilla ja kierrosnopeus on jaettu koneen synkronisella pyörimisnopeudella. Vaaka-akselin yläpuolinen osa kuvaa moottorikäyttöä (M) ja alapuolinen osa generaattorikäyttöä (G). Kuvaan on merkitty koneen

- lukittu roottorimomentti eli käynnistysmomentti
- minimimomentti
- moottorin kippimomentti l. maksimimomentti T_{max}
- moottorin nimellispiste nimellismomentti nimellisjättämällä.

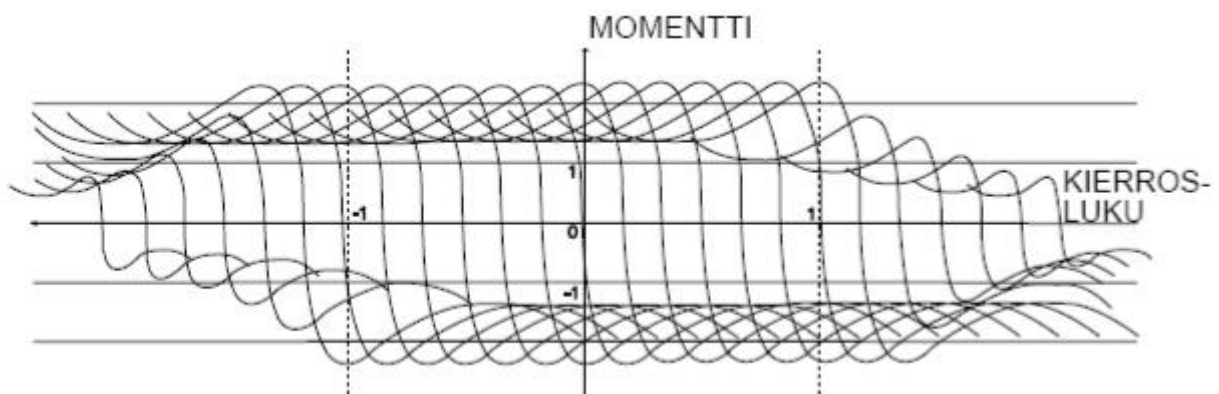
Epätahtikoneen generaattorikäytössä normaalitoiminta-alue on kuvassa 3 vaaka-akselin alapuolella hieman vaaka-akselin arvoa 1,0 suuremmilla arvoilla momenttikäyrän jyrkästi laskevalla osalla.



Kuva 3. Oikosulkumoottorin tyypillinen momentti/kierroslukukäyrä, kun moottori on kytketty syöttöverkkoon. Kuvassa kirjain a) tarkoittaa moottorin lukittua roottorimomenttia, b) minimimomenttia, c) moottorin maksimimomenttia T_{max} ja d) moottorin nimellispistettä [15].

Epätahtikoneiden jättämä on luokkaa 1...4 % ja se riippuu koneen koosta. Suurilla koneilla nimellisjättämä on tyypillisesti < 1 % koneen tahtinopeudesta ja vastaavasti pienillä koneilla jättämä voi olla luokkaa 5 %. Huippuvääntömomentti saavutetaan isoilla koneilla pienemmillä jättämän arvoilla kuin pienillä koneilla. Tämä johtuu koneiden R/X -suhteesta. Pienillä koneilla suhde on suuri, jolloin jättämän kasvusta aiheutuva roottorivirran kasvu kasvattaa myös vääntömomenttia, koska roottorivirta ja käämivuon vaihe-ero on pieni. Suurilla koneilla jättämän kasvaessa kasvaa myös roottorivirta, mutta suhteellisen suuresta reaktiivisesta komponentista johtuen roottorivirta jää yhä enemmän jälkeen sitä indusoivasta käämivuosta. Tämä roottorivirran ja käämivuon välinen vaihe-ero pienentää vääntömomenttia niin paljon, että kuvassa 3 pisteen c) jälkeen vääntömomentti alkaa pienentyä vaikka roottorivirta kasvaakin.

Kuvassa 4 on eri taajuuksilla esitetty koko taajuusmomentti-kierroslukualue eli neljä kvadranttia kierrosliku-momenttitasossa. Kuvan 4 yksi käyrä vastaa yhtä taajuutta, vrt. kuva 3, jossa vaikuttaa vain sähköverkon taajuus.



Kuva 4. Taajuusmuuttajan syöttämät oikosulkumoottorin momenttikäyrät, $T = f(n)$, [15].

4.1.2 Täystehoisen taajuusmuuttajan tehon mitoitus

Täystehoisen taajuusmuuttajan generaattorin puoleisen suuntaajan on kyettävä ottamaan generaattorin antama suurin teho niin kauan kuin generaattori sitä syöttää.

Generaattorin akselitehon P_{gen} käyttö taajuusmuuttajan mitoituksen yhtenä perustana on oikeutettu silloin, kun generaattorin tehokerroin on yksi. Jos generaattori kuluttaa tai tuottaa loistehoa on P_{gen} korvattava generaattorin näennäisteholla S_{gen} . Jos taajuusmuuttaja muodostuu useista suuntaajasilloista, on laskettu teho ositettava käytössä oleville silloille.

Taajuusmuuttajan tasajänniteteho on sama kuin generaattoriteho, kun yksi generaattori syöttää taajuusmuuttajaa ja häviöitä ei ole otettu huomioon. Tasajännitevälipiirissä oleva suuri kondensaattori tasoittaa eli suodattaa välipiirin jännitteen vaihtelua.

Sähköverkkoon syötetään taajuusmuuttajasta sama teho, mikä on tasajännitteisessä välipiirissä vähennettynä mahdollisella katkojan kautta ohitukseen viedyllä teholla, kun häviöt on jätetty huomioon ottamatta.

4.1.3 Osatehoisen taajuusmuuttajan mitoitus DFIG-käytössä

Jatkuvassa tilanteessa roottoripiirissä oleva taajuusmuuttaja saa epätahtigeneraattorin staattorin tehosta P_{stator} seuraavan teho-osan:

$$P_{\text{taajuusmuuttaja}} = -sP_{\text{stator}} \quad (1)$$

missä $P_{\text{taajuusmuuttaja}}$ = generaattorista taajuusmuuttajalle syötetty pätöteho

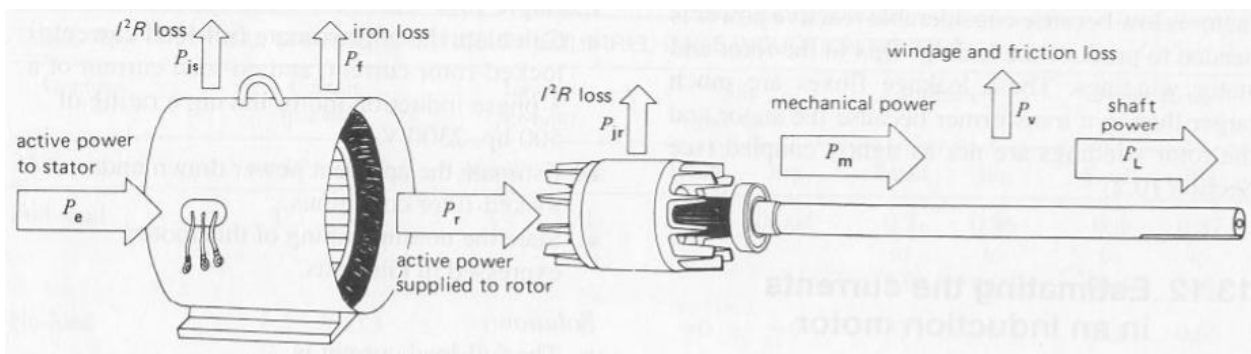
s = epätahtigeneraattorin jättämä

P_{stator} = epätahtigeneraattorin staattorin teho

sP_{stator} = jättämäteho

Tässä on roottorin ja staattorin häviöt jätetty huomioon ottamatta.

Kuvassa 5 on esitetty epätahtikoneen periaatteellinen kaaviokuva, josta näkyvät tehon virtaus ja eri häviöt moottorikäytössä. Staattorin häviöt koostuvat virtalämpö- ja rautahäviöistä. Roottoripiirissä tehohäviöitä aiheuttavat virtalämpö-, tuuletus- ja kitkahäviöt.



Kuva 5. Epätahtikoneen periaatteellinen kaaviokuva tehon jakautumisesta häviöihin ja kuormitukseen menevään tehoon [16].

Jättämä s on kaavan (2) mukaan tahtikierronnopeuden n_{tahti} ja todellisen kierrosnopeuden $n_{\text{todellinen}}$ erotus jaettuna tahtikierronnopeudella

$$s = (n_{\text{tahti}} - n_{\text{todellinen}}) / n_{\text{tahti}} \quad (2)$$

Tahtikierrosnopeus on laskettavissa staattorin vaihtojännitteen taajuudesta f jakamalla se koneen napapariluvulla p :

$$n_{\text{tahti}} = f / p \quad (3)$$

missä s = jättämä

n_{tahti} = tahtikierrosnopeus

$n_{\text{todellinen}}$ = todellinen kierrosnopeus

f = staattorin vaihtojännitteen taajuus

p = koneen napapariluku.

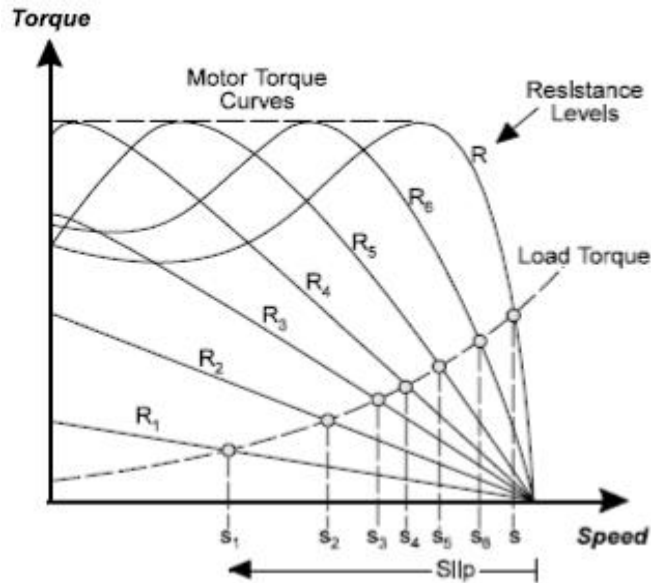
Edellisen mukaan esim. nopeuden poiketessa ± 30 % tahtikierrosnopeudesta on roottoriin taajuusmuuttajan teho noin ± 30 % arvosta P_{stator} .

Liukurengasgeneraattorin magnetointi voi tapahtua joko sähköverkkoon kytketyn staattorikäymyksen kautta, roottoriin taajuusmuuttajan kautta tai molempien. Normaalisissa tiloissa haluttu tilanne on, että koko voimala tuottaisi sähköverkkoon vain pätötehoa loistehon ollessa nolla. Tämä tarkoittaa, että staattoriin konetta ei magnetoitaisi lainkaan ja roottoriin huolehtisi magnetoinnista. Tyypillisesti taajuusmuuttajan verkonpuolinen silta huolehtisi siitä, että välipiirin tasajännite pysyy vakiona ja jättämäteho liikkuisi vapaasti. Koska taajuusmuuttajan roottoriinpuolinen silta osallistuu liukurengaskoneen magnetointiin, on roottorivirrassa pätövirran lisäksi magnetoivaa loisvirtaa. Näin ollen roottoriinpuolisen sillan näennäisteho on edellä mainittua jättämätehoa suurempi. Tämän sillan näennäisteho on jättämätehon $P_{\text{taajuusmuuttaja}}$ ja roottoriin magnetoititehon vektorisumma.

Pätötehon suunta on roottorista taajuusmuuttajan kautta sähköverkkoon silloin, kun epätahtikone pyörii tahtikierrosnopeutta suuremmalla nopeudella. Tällöin jättämä s on negatiivinen. Epätahtikoneen nopeuden ollessa tahtikierrosnopeutta pienempi siirtyy taajuusmuuttajan kautta pätötehoa verkosta roottoriin. Jättämä on tällöin positiivinen. Molemmissa tapauksissa generaattorin staattoriosaa syöttää tehoa sähköverkkoon [17].

Kuvassa 6 on esitetty, miten epätahtikoneen roottoriin resistanssin muutos vaikuttaa koneen kierrosnopeus-vääntömomenttikäyrään. Roottoriin resistansseissa kuluva teho on jättämätehoa, joka muuttuu lämmöksi. Kuvassa 6 tarkastellaan moottorikäyttöä.

Edellä raportin kohdassa 3.1 mainittu tuulivoimalan muuttuvanopeuksinen ”Suzlon-flexi-slip-säätö” noudattaa kuvan 6 periaatetta, joskin generaattorikäyttönä.



Kuva 6. Epätahtikoneen kierrosnopeus-vääntömomenttikäyriä erisuuruusilla roottoriipiirin resistanssiarvoilla ($R < R_6 < R_1$) [18].

4.1.4 Taajuusmuuttajan liittyminen sähköverkkoon muuntajan kautta

Muuntajan tehon $S_{muuntaja}$ määrittäminen voidaan tehdä generaattoritehon, ylikuormitettavuuden ja verkon yliaaltopitoisuuksien perusteella. Yliaaltojen vaikutuksia muuntajan kuormitettavuuteen on esitetty lähteessä [19]. Kun hyötysuhteet otetaan tehon kulkureitiltä huomioon ja ylikuormitettavuutta ja yliaaltoja ei oteta huomioon, saadaan

$$S_{muuntaja} \approx P_{gen} * \eta \quad (4)$$

missä $S_{muuntaja}$ = muuntajan teho

P_{gen} = generaattoriteho

η = taajuusmuuttajan molempien suuntaajaosien ja verkkosuodattimen hyötysuhteiden tulo.

Taajuusmuuttajan molempien suuntaajaosien ja verkkosuodattimen hyötysuhteiden tuloa on merkitty tunnuksella η . Tehokertoimen on oletettu olevan 1,0. Jos muuntajan läpi kulkee pätötehon lisäksi loistehoa, on se lisättävä vektorisummana edellä laskettuun tehoon $S_{muuntaja}$. Muuntaja valitaan lopulta standardikokoisena vähintään lasketun näennäistehon suuruiseksi.

Kaksoissyötetyn liukurengaskoneen tapauksessa kaavalla (1) laskettu teho $P_{taajuusmuuttaja}$ yhdessä oikosulkukoneen staattoriipiirin tehon kanssa muodostavat koko muuntajan tehon. Mahdollisessa kolmikäämitysmuuntajassa (staattoriipiiri, roottoriipiiri ja sähköverkko) osakäämien tehot on tarkistettava erikseen.

Taajuusmuuttajan ja muuntajan väliin mahdollisesti tarvittavien suodattimien mitoittamiseen ei tässä puututa. Suodattimet sisällytetään taajuusmuuttajapakettiin, mutta ne mitoitetään tapauskohtaisesti. Suodattimien tulisi muodostaa sähköverkkoon syötettävistä jännitteistä ja virroista mahdollisimman sinimuotoisia ja estää sähköverkosta päin tulevien ylijännitteiden haittavaikutukset taajuusmuuttajissa.

4.2 Hajautetun tuotannon yksiköt

Hajautetulla tuotannolla tarkoitetaan tässä yhteydessä pien- tai keskijänniteverkkoon liitettyjä tuotantolaitoksia, jotka on kytketty rinnan muun sähköjärjestelmän kanssa. Tehorajana pidetään yleensä 10 MW. Tuulivoimaloiden osalta tässä pidetään kuitenkin pientuotantolaitoksen rajana 100 kVA, mikä vastaa pienen tuulivoimalan rakennestandardissa IEC 64100-2 mainittuja voimaloita, joiden pyyhkäisyala on alle 200 m² ja jännitetaso alle 1000 V tai tehona noin 100 kVA [20], [21].

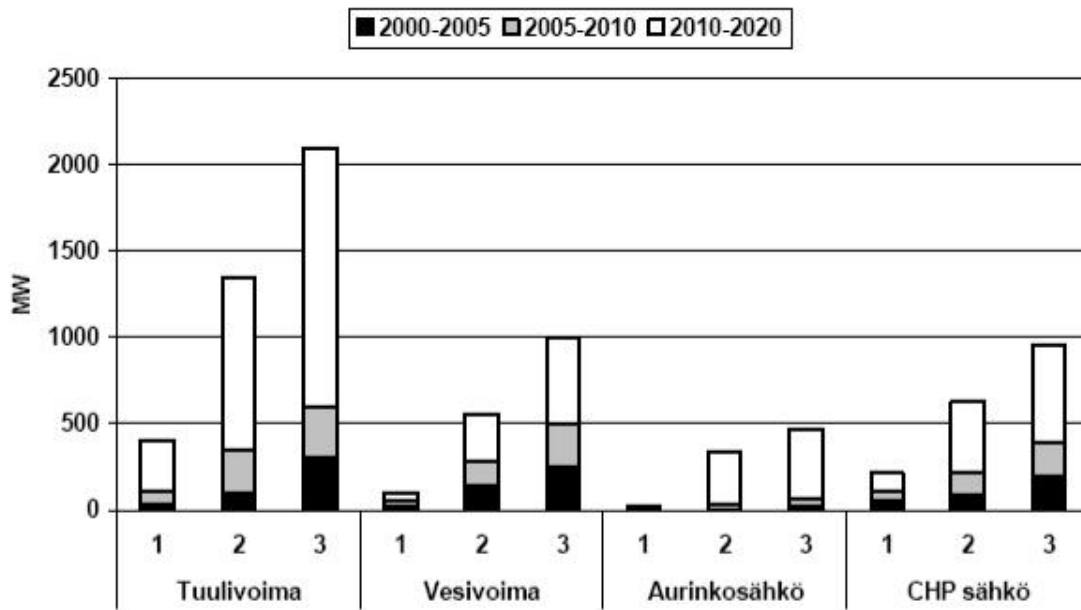
Hajautetut tuotantolaitokset perustuvat uusiutuviin energialähteisiin tai pienimuotoiseen CHP-tuotantoon, kuten tuulivoima, pien- ja minivesivoima, aurinkosähkö ja -lämpö, lämpöpumput, biomassakattilat, kaas- ja dieselmoottorit, mikroturbiinit, Stirling-moottorit, polttokennot, höyryturbiinit ja -koneet. Osa voimaloista tuottaa pelkästään sähköä tai lämpöä, toiset sekä sähköä että lämpöä.

Kuvassa 7 on esitetty uusiutuvien energialähteiden ja pienimuotoisten CHP-teknologioiden sähköntuotannon kumulatiivinen markkinapotentiaali Suomessa vuodesta 2002 vuoteen 2020. Sähköenergian tuotantolaitteistoiksi katsotaan pyörivien generaattoreiden lisäksi myös erilaiset staattiset sähkönjakeluverkkoon sähköä syöttävät laitteistot, kuten suuntaajalaittein sähköverkkoon liitetyt akustot, valosähköiset kennot, polttokennolaitokset jne. Liittymisehdot yleiseen sähkönjakeluverkkoon on kuvattu kohdassa 4.3. Tässä raportissa keskitytään niihin laitoksiin, joissa liityntään käytetään taajuusmuuttajaa tai vaihtosuuntaajaa [22], [23].

Sähköä tuotetaan joko suoraan tai taajuusmuuttajan kautta sähköverkkoon tai kulutuslaitteistoon kytkettävillä generaattoreilla. Generaattori- ja muuttajavaihtoehdot riippuvat paljolti tuotantolaitteiston koosta. Vaihtosuuntaajat tulevat kyseeseen tasasähköä tuottavien tai varastoivien yksiköiden verkkoonliitynnässä kuten aurinkosähkökennot, polttokennot ja akustot.

Esimerkiksi kiinteän asennuksen polttokennojen turvallisuusasioille on standardi [24], ja suorituskyvyn testaukselle on oma standardi [25]. Mahdollinen verkkoon liittyminen noudattaa kuitenkin samoja sääntöjä kuin muukin hajautettu tuotanto ja riippuu sekä tuotantolaitteen tehosta että liitynnän jännitetasosta. Eri maiden vaatimukset poikkeavat näidenkin osalta jossain määrin toisistaan.

Silloin, kun (hajautetussa tuotannossa) sähköenergiaa tuotetaan tasajännitteellä, riittäisi periaatteessa tasajännitelähteen ja sähköverkon väliin sijoitettava vaihtosuuntaaja energian muuttamiseksi sähköverkkokelpoiseksi. Tällöin on edellytettävä, että tasajännite ei vaihtelee kovin paljoa.



Kuva 7. Hajautetun sähköntuotannon kumulatiivinen markkinapotentiaali Suomessa [23], skenaariot 1–3:

Skenaario 1 – nykyinen kehitys

Skenaario 2 – uusiutuvien energialähteiden edistämishjelman ja

Skenaario 3 – taloudellisen potentiaalin mukainen kasvu.

4.2.1 Akkukäyttö

Sähköverkossa akkuenergiavarastoja käytetään parantamaan sähkön laatua; ehkäisemään jännitekuoppia, välkyntää, ylijännitteitä tai taajuusvaihteluja. Akkuja käytetään myös katkeamattoman sähkön järjestelmissä (UPS-laitteissa, Uninterruptible Power Supply). Koska akustot usein sijaitsevat hyvää sähkön laatua tarvitsevien paikkojen lähellä, ne luetaan hajautettuihin energialähteisiin.

Akkujännitteen vaihtelualue voi olla esimerkiksi tavallisille lyijyakuille alueella (0,5–1,25) kertaa akun nimellisjännite. Akkujännitteen alaraja tulee vastaan, kun akkuja puretaan niiden tyhjentymsjännitteeseen (EODV, End of Discharge Voltage) asti ja yläraja täysien akkujen lataustilanteessa. Edellä kuvatuissa akkujen käyttötavoissa (UPS) akkujen lataus-purkauskertojen lukumäärä jää pieneksi ja lukumäärä pyritään pitämään pienenä; tällä varmistetaan akkujen pitkä käyttöikä.

Lyijyakkujen ohella käytössä on nikkeli-kadmium-, natrium-rikki-, sinkki-bromi- ja litium-ilmakkuja sekä ns. virtausakkuja. Virtausakuissa energia ja teho ovat erillisesti määrättävissä. Teho määräytyy kennojen lukumäärän ja elektrodien koon mukaisesti ja energia elektrolyytin konsentraatiosta ja tilavuudesta. Virtausakku siis varastoi ja vapauttaa energiaa palautuvalla sähkökemiallisella reaktiolla, joka tapahtuu esim. kahden pumppukiertoisen virtaavan elektrolyyttiliuoksen välillä [26].

Superkondensaattorit (ultrakondensaattorit) saattavat tulevaisuudessa olla merkittäviäkin energiavarastoja esim. UPS-laitteissa. Etuna superkondensaattoreilla on varaus-purkauskertojen suuri määrä (kymmeniä tuhansia) ja nopeat varaus- ja purkauskyyt verrattuna lyijyakkuihin.

Akkukäytöissä vaihtosuuntaajan tulopuolen tasajännitteen vaihtelualue on siis varsin laaja ja tämä on otettava huomioon vaihtosuuntaajan toteutuksessa, jotta

sähköverkkoon syötettävän vaihtojännitteen suuruus pysyy halutuissa rajoissa. Akkujen tasajännitteen on oltava tarpeeksi suuri, jotta akuista saadaan siirrettyksi ilman erityistoimenpiteitä (esim. jännitteen vakauttamista) tehoa sähköverkkoon vaihtosuuntaajan kautta.

4.2.2 Aurinkokennokäyttö

Aurinkokennokäytössä lisäpiirteenä on aurinkokennon parhaan muunnospisteen valosta sähköenergiaksi haku ja sen ylläpito (MPP, Maximum Power Point). Tässä toimintapisteessä kennon jännitteen ja virran tulo on suurimmillaan.

Aurinkokennon antama sähkövirta riippuu valointensiteetin synnyttämästä virrasta (joka on likimain sama kuin kennon oikosulkuvirta), kennon tyhjäkäyntijännitteestä ja lämpötilasta. Kennon antama sähköenergia on kääntäen verrannollinen kennon lämpötilaan. Kennon jäähdytys siis parantaa saatavan energian hyötysuhdetta.

Aurinkokennojen tehovaihtelut ovat sen verran nopeita ja suuria, että tavanomainen akku kokee lyhyessä ajassa niin monta lataus-purkausjaksoa, että sellaisen akun elinikä jää lyhyeksi. Eliniän so. lataus-purkausjaksojen lukumäärän pienentämiseksi kennojen lähtöjännitettä olisi nyt säädettävä eli vakioitava erillisellä tehoasteella.

Jos aurinkokennoilla ladataan akkuja, MPP-säätimen ja sen ohjaaman tehoasteen tarkoitus on pitää sellainen jännite, jolla akkuihin saadaan suurin mahdollinen virta. Tällöin mm. akkujen lataustilanteella (vastajännitteellä) on vaikutusta akkujen latausvirtaan. Tehoaste on siis akkujen latausvirtaa säättävä hakkuri (tasajännite/tasajännite-muuttaja, DC/DC-muuttaja, DC-chopper). Akuista energia syötetään sähköverkkoon vaihtosuuntaajien kautta kuten akkukäytöissä.

On myös mahdollista syöttää aurinkokennoista saatava energia vaihtosuuntaajan kautta suoraan sähköverkkoon ilman väliin sijoitettuja akkuja. Edellä kuvattu MPP-säädin tehoasteineen on tällöinkin tarpeen tasajännitteen suuren vaihtelualueen takia. Aurinkokennojen hyötykäytön optimointi merkitsee sitä, että kennoista ulossaatava jännitteen vaihtelu vakioidaan tässäkin em. tasajännite/tasajännite muuttajalla. Vakioksi säädetyistä tasajännitteestä muutto sähköverkon vaihtojännitteeksi tapahtuu taas vaihtosuuntaajalla, jonka tehoa pidetään kennojen optimipisteessä (MPP) niin, että säädetään sähköverkkoon siirtyvää tehoa esimerkiksi sinimuotoisella pulssinleveysmodulaatiolla. Pienitehoisissa taajuusmuuttajissa puolijohdekytkiminä voidaan käyttää MOSFET-komponentteja.

4.2.3 Polttokennot

Polttokennot tuottavat tasajännitettä, joka muutetaan vaihtosuuntaajilla sähköverkkokelpoiseksi kuten edellä. Polttokennot toimivat niin kauan kuin vety- ja happipolttoainetta riittää. Vetyä saadaan esim. maakaasusta, alkoholeista ja öljyistä. Polttokennojen koko vaihtelee suuresti: 3 – 250 kW ja jopa MW-luokkaan asti, hyötysuhde on hyvä ja päästöt pieniä. Tehon vaihtelut ovat hitaita johtuen polttoaineen syötöstä.

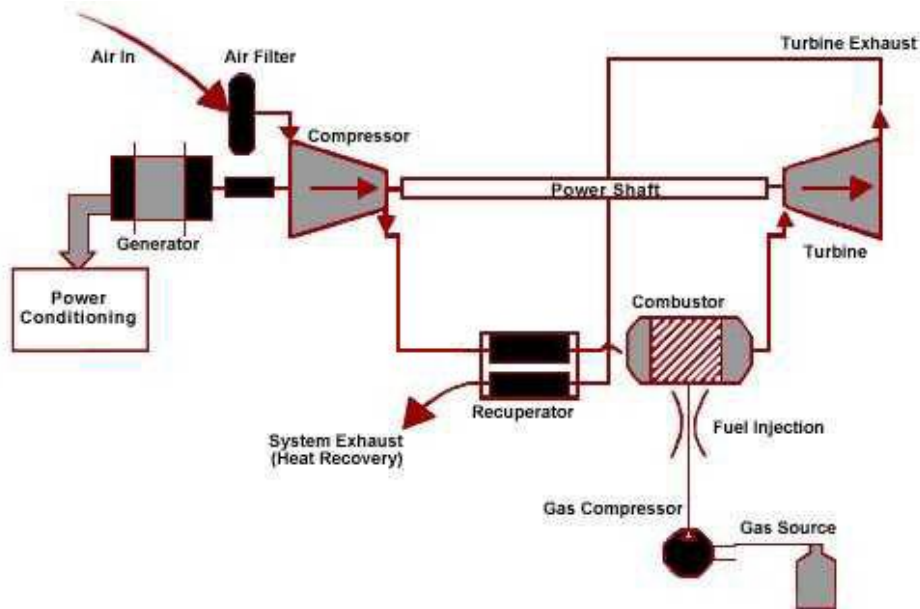
4.2.4 Mikroturbiinit, polttomoottorit, Stirling

Mikroturbiinit ovat pieniä kaasuturbiineja, jotka tuottavat tehoa esim. alueella 25 kW – 500 kW. Näissä käytetään turboahdintekniikkaa, polttoaineena on maakaasu, vety,

propani tai dieselöljy. Hyötysuhde on noin 20 – 30 % (rekuperaatio). Oheistuotteena saadaan 50 – 80 °C vettä. Mikroturbiini on noin jääkaapin kokoinen.

Mikroturbiinin kokoonpano on ahdin eli kompressori, palokammio, turbiini, rekuperaattori eli lämmön talteenotin ja generaattori. Koska generaattorin kierrosnopeus on suuri, sen tuottaman sähkön taajuus on myös suuri, jolloin tarvitaan suurtaajuustaaajuusmuuttajaa. Kun mikroturbiinin lämpö otetaan hyödyksi, nousee hyötysuhde noin 80 %:iin. Kuvassa 8 on esitetty rekuperaattorilla varustetun mikroturbiinin periaatekaavio.

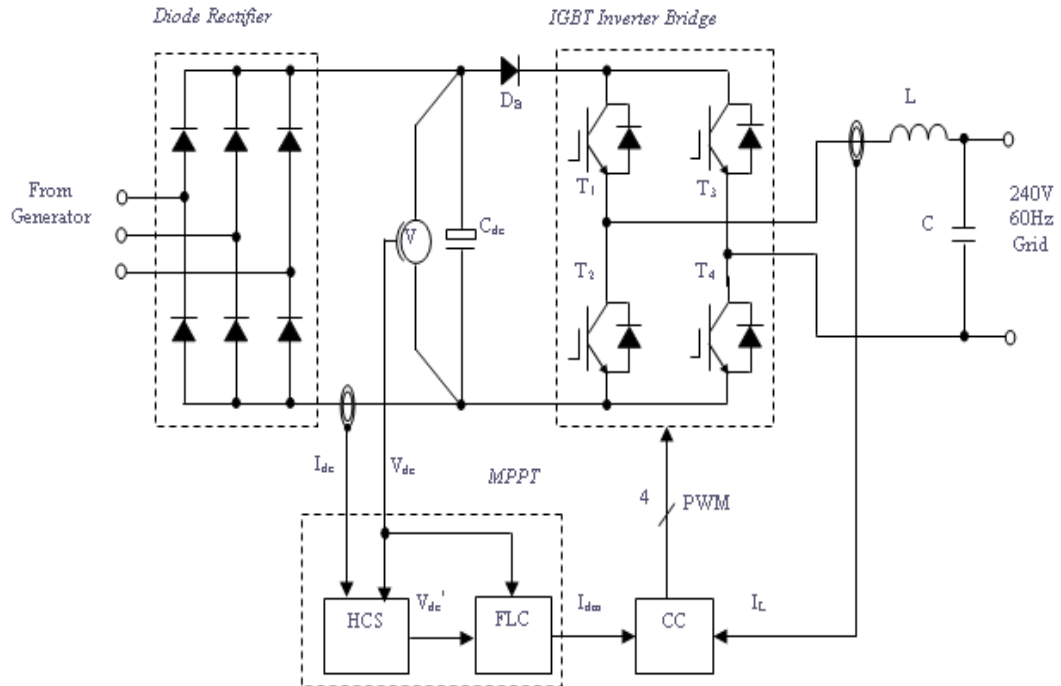
Polttomoottoreita (Otto ja diesel) on saatavilla esim. tehoalueella 5 kW – 7 MW. Polttoaineena käytetään esim. maakaasua, dieselöljyä ja bensiiniä, hyötysuhde on noin 25 – 45 %. Moottorin akseliin liitetty generaattori muuttaa mekaanisen energian sähköksi kuten tuuliturbiineissa. Stirling- ja kuumailmakoneet, voivat periaatteessa käyttää mitä polttoainetta tahansa. Pyörimisliike niissä muutetaan generaattorilla sähköksi.



Kuva 8. Rekuperaattorilla varustetun mikroturbiinin periaatekaavio [27].

4.2.5 Pientuulivoimalat

Kotitalouskäyttöön tarkoitettujen tuulivoimaloiden nimellisteho alkaa tyypillisesti muutamasta sadasta watista päätyen suurimpien yksiköiden noin 20 kW:iin. Pientuulivoimala voidaan kytkeä lämmityskäyttöön, saareke- ja akkujen latauskäyttöön tai sähköverkkoon. Tyypillinen generaattorivaihtoehto on kestopolttimoottori. Pientuulivoimalan kestopolttimoottori on tyypillisesti kolmivaiheinen ja tasasuuntaus on hoidettu usein 6-pulssidiodisillalla. Taajuusmuuttaja on tyypiltään jännitevälipiirillinen. Vaihtosuuntausosassa kytkiminä käytetään IGBT-komponentteja. Pientuulivoimalan verkkoon kytkentä voi olla yksi- tai kolmivaiheinen [28]. Kuvassa 9 on esitetty kolmivaiheisen kestopolttimoottorin periaatteellinen yksivaiheinen verkkoonliityntä.



Kuva 9. Kolmivaiheisen kestomagneettikoneen yksivaiheinen verkkoonliityntä [29].

4.3 Sähköverkkovaatimukset

4.3.1 Yleistä

Taajuusmuuttajan tulisi antaa sähköverkkoon verkon perustaajuista mahdollisimman sinimuotoista jännitettä ja virtaa. Joskus verkon on kyettävä myös syöttämään energiaa taajuusmuuttajan kautta generaattoriin (4-kvadranttikäyttö). Nämä tilanteet on määriteltävä suoritusarvoineen.

Taajuusmuuttajan kannalta sähköverkko ei ole täysin jäykkä verkko, vaan sen jännite vaihtelee ja verkossa esiintyy myös jännite-epäsymmetriaa. Jännitteen vaihtelurajat olisi tunnettava jännitekuoppineen ja keskeytyksineen. Verkonhaltija asettaa ehtoja taajuusmuuttajasta ja koko voimalasta vastaanotettavalle sähköenergialle esim. tehokertoimen $\cos\phi$ on oltava noin yksi eivätkä jännitteen ja virran yliaallot saa ylittää määrättyä suhteellista tasoa. Myös voimalan tavanomaiset ja vioista johtuvat kytkentätilanteet eivät saa vaikuttaa liikaa sähköverkkoon. Silloin kun voimala on kyllin suuri, haluaa verkonhaltija, että voimala tukisi sähköverkon pystyssä pysymistä verkon vikatilanteissa. Edellisessä ajattelussa on taajuusmuuttajaan luettu mukaan tarvittavat yliaalto- ja häiriösuodattimet. Jos sähköverkon ja taajuusmuuttajan välissä tarvitaan muuntaja, sitä ei tässä lueta taajuusmuuttajaan kuuluvaksi, vaan muuntaja on osa verkkoa tai voimalakokonaisuutta.

Taajuusmuuttajan liityntäarvoesimerkkinä on pienjännitteinen taajuusmuuttaja, joka suurilla tehoilla liitetään sähköverkkoon muuntajan kautta [30]:

Malli, tunnus	ACS800-77LC-4060/4400-7	
	<u>Generaattori (INU)</u>	<u>Verkko (ISU)</u>
Jännite		690 V, +10 %/-15 % jatkuvasti
Teho	3300 kW	3686 kW

Virta	3394 A	1030 A
Taajuus		50 Hz
Loistehon tuotto	0,79	
Toimintatapa	4Q	
Kytkinkomponentti	IGCT	

Taajuusmuuttajan muita ominaisuuksia: Uudelleen konfigurointi ilman kuormitusta optiona; E.ON:n (Saksan eräs kantaverkkoyhtiö) tai REE:n (RED Eléctricana de España, Espanjan kantaverkkoyhtiö) verkkovaatimusten mukainen toiminta optiona; nestejäähdytys; DTC-ohjaus; verkkosuuntaajassa teho-ohjaus sekä muutama kenttäohjausvaihtoehto.

Päätö- ja loistehon nopea säätö antaa mahdollisuuden nopeaan reagointiin verkon muutostilanteissa. Suoran tehon ohjauksen avulla saavutetaan pienet ja tasaisesti jakautuneet harmoniset yliaallot, mikä pienentää muiden verkon komponenttien häviöitä ja värähtelyjä. Verkkovaatimusten täyttäminen on tärkeää liitettäessä tuulivoimaa sähköverkkoon.

4.3.2 Standardit ja muut vaatimukset

Suuritehoiset tuulivoimalat liitetään sähkönjakeluverkkoon useimmiten keskijännitteellä. Siirtoverkko saattaa tulla kyseeseen tuulipuistojen yhteydessä. Pienet tuulivoimalat tai muut hajautetun tuotannon laitteistot liitetään yleensä pien- tai keskijännitesähköverkkoon, jos ne yleensä on tarkoitettu verkkoon liitettäväiksi. Sähköjärjestelmät ja vaatimukset vaihtelevat tietyissä rajoissa eri maissa, seuraavassa on esitetty pääsääntöisesti Suomea koskevat vaatimukset. Käytännön tilanteissa noudatetaan kunkin maan verkkovaatimuksia. Seuraavissa standardeissa ja ohjeissa esitetään vaatimukset tuotantolaitosten liittämisestä sähkönjakeluverkkoon:

- Helen Sähköverkko Oy:n ohje
- Standardi EN 50438
- Standardi IEEE 1547
- Fingrid VJV 2007, Liite 2: Nordel-vaatimukset, [35]

Tuulivoiman ja hajautetun energiantuotannon lisääntyessä sähköverkkoyhtiöt ovat uuden tilanteen edessä, koska jakeluverkot on perinteisesti suunniteltu yksisuuntaista tehonsiirtoa varten. Voimaloiden verkkoonliitynnässä yhtenä vaatimuksena on verkon relesuojauksen toiminnan varmistaminen. Verkkoonliitynnän suojauksen suunnittelua varten tulee tuntea voimalaitoksen sähköiset ominaisuudet, jotka riippuvat generaattorin tyypistä. Erityisesti eroja on voimalaitosten kyvyssä syöttää oikosulkuvirtaa. Vaihtosuuntaajaan perustuvissa ratkaisuissa tehoelektronikan komponenttien oikosulkuvirran sietokyky on hyvin rajattu. Käytännössä vaihtosuuntaajan syöttämä oikosulkuvirta rajataan säätäjän avulla 1 – 2 -kertaisen nimellisvirran suuruiseksi. Tällöin suojaus ei voi enää perustua ylivirtaan. Suojausratkaisuja ja havaintoja vika- ja saareketilanteissa on kuvattu viitteessä [31]:

- riittävän suuri oikosulkuteho liityntäpisteessä
- johtolähdön voimalat pienentävät lähdön releen näkemää vikavirtaa, kun vika on johdon lopussa
- johtolähdön suojan laukeaminen, kun viereisessä lähdössä on vika
- tehotasapainotilanne saareketilanteessa

- pikajälleenkytkentä (pjk): vikavalokaari ei sammuu, jos verkkoon syötetään energia pjk:n aikana. Toisaalta pikajälleenkytkennän aikana voi syntyä vaihesiirto verkon ja tuotantolaitteen välille.

4.3.3 Liittyminen jakeluverkkoon

Suomessa useimmat verkkoyhtiöt noudattavat Helen Sähköverkko Oy:n ohjeita tuotannon liittämiseksi sähköjakeluverkkoon [32]. Tuotantolaitteistojen ja niiden syöttämien verkkojen rakenteet automatiikkoineen ja suojausineen tulee laitteiston haltijan toimesta suunnitella ja rakentaa tarkoituksenmukaisiksi siten, että ne täyttävät yleisen jakeluverkon ja asiakasverkon väliset yhteistoimintavaatimukset sekä sähköturvallisuuden asettamat vaatimukset. Jakeluverkon haltijan tietämättä syntyvät takajännitteet ja jakeluverkon eroaminen sähköntuotantolaitosten syöttämiksi saarekkeiksi tulee olla estetty.

Ohjeissa jaetaan tuotantolaitokset neljään luokkaan sen mukaan, käykö laitos verkon rinnalla ja voiko se syöttää energiaa jakeluverkkoon. Taulukko 1 luettelee Helen Sähköverkko Oy:n käyttämän luokituksen. Suuret tuotantolaitokset kuuluvat luokkaan 4. Näiden liityntäpisteiden jäykkyyden eli oikosulkutehon on oltava vähintään 25-kertainen generaattorin nimellistehoon verrattuna. Suuri käynnistysvirtasysäys kasvattaa em. vaatimusta (oikosulkugeneraattori tai kaksoissyötetty epätahtigeneraattori). Saman liityntäpisteen kaikkien generaattoreiden irtikykytyminen saa aiheuttaa jakeluverkoissa enintään 5 % jännitteenmuutoksen.

Taulukko 1. Tuotantolaitosten toimintaperiaatteiden mukainen luokitus [32].

		Luokka	Rinnan- käynnin esto	Tahdistus	Yhteen- sopivuus- ehdot	Yksin- syötön esto	Sopimus- ehdot	
Yleisestä jakelu- verkosta erossa käyvät tuotanto- laitteistot	Rinnankäyttö estetty mekaanisella kytkimellä	Lk 1.	■	-	-	-	LE05 VPE05	
	Rinnankäyttö rajoitettu automaattisella syötön- vaiholla (kork. 5 s)	Lk 2.	■	■	-	-	LE05 VPE05	
Yleisen jakelu- verkon kanssa rinnankäyvät tuotantolaitteistot	Sähkön siirto jakeluverkkoon estetty	Lk 3a.	-	■	■	■	LE05 VPE05	
	Sähkön siirto jakeluverkkoon sallittu	Tuottaja ei saa korvausta verkkoon siirtyneestä sähköstä (vain pienet mikrogeneraattorit)	Lk 3b.	-	■	■	■	LE05 VPE05
		Tuottaja myy sähköä muulle sähkökaupan markkinaosapuolelle	Lk 4.	-	■	■	■	TLE05 TVPE05

LE05 = yleiset liittämisehdot (sähkökäyttäjille) vuodelta 2005

PE05 = yleiset verkkopalveluehdot (sähkökäyttäjille) vuodelta 2005

TLE05 = sähköntuotannon liittämisehdot vuodelta 2005

TVPE05 = sähköntuotannon verkkopalveluehdot vuodelta 2005

Tuotantolaitoksen tulee täyttää sähkön laatuvaatimukset ja olla yhteensopiva muun verkon kanssa. Pienjännite- ja keskijänniteverkon sallitut yliaaltovirrat suhteessa siirtokapasiteettiin on lueteltu taulukossa 2 ja taulukossa 3. Liittymän referenssivirta on sulakepohjaisessa liittymässä pääsulakkeen nimellisvirta ja tehopohjaisessa liittymässä liittymissopimuksen tehosta laskettu virta.

Taulukko 2. Pienjänniteverkkoon liitetyn laitteiston aiheuttamat suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittymispisteessä tarkasteltuna [32].

Referenssivirta	Suositeltava raja	
≤ 25 A	Saa käyttää laitestandardin mukaisia laitteita	
25 A ... 200 A	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 10 % referenssivirrasta	
> 200 A	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Referenssivirran alarajalla sallitaan kuitenkin 20 A. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11 – 16	3,5 %
	17 – 22	2,5 %
	23 – 34	1,0 %
> 34	0,5 %	

Taulukko 3. Keskijänniteverkkoon liitetyn laitteiston aiheuttamat suurimmat sallitut yliaaltovirrat liittymiskohdassa tarkasteltuna [32].

Referenssivirta	Suositeltava raja	
Kaikki	Virran harmoninen kokonaissärö saa olla enintään 8 % referenssivirrasta. Lisäksi yksittäisten yliaaltojen osalta:	
	Järjestysluku n	Sallittu arvo referenssivirrasta
	< 11	7,0 %
	11 – 16	3,5 %
	17 – 22	2,5 %
	23 – 34	1,0 %
> 34	0,5 %	

Rinnankäytön aikana tehokertoimen on oltava yli 0,95 (induktiivinen tai kapasitiivinen), ellei muuta ole sovittu. Häiriötilanteessa generaattori tai sen syöttämä saareke on kytkettävä irti yleisestä verkosta. Yksinsyötön estosuojaus (YSE) voidaan toteuttaa taajuuden muutosnopeusreleellä, myötääljännitereleellä,

impedanssireleellä tai muulla soveltuvalla, jakeluverkon haltijan hyväksymällä menetelmällä.

Tuotantolaitteiston tulee rinnankäyntitilassa sietää yleisen jakeluverkon käyttöhäiriöt, kuten oikosulut, maasulut pikajällekytkentöineen, jännitekuopat ja taajuushäiriöt. Generaattori ei saa kytkeytyä jakeluverkkoon, jos jännite ja taajuus ovat sallittujen rajojen ulkopuolella. Generaattorilaitteisto saa kytkeytyä yleiseen jakeluverkkoon vasta, kun jännite on ollut 10 min normaaliarvossaan. Tuottajan jakelulaitteisto on varustettava lukittavalla erotuskytkimellä, jolla jakeluverkon haltija voi erottaa generaattorilaitteiston esim. verkkotöiden niin edellyttäessä.

Helenin ohjeessa hajautetun tuotannon laitteet, kuten polttokennot, aurinkosähkökennot, pienet tuuligeneraattorit ja akustot voivat periaatteessa kuulua mihin luokkaan hyvänsä. Pienille yksi- tai useampivaiheisille mikrogeneraattoreille, joiden nimellisvirta on alle 16 A/vaihe ja jännite 230/400V (Suomessa ≤ 30 kVA) viitataan standardiin EN 50438. Standardissa EN 50438 luetellaan yhteensä 18 Euroopan maan kansalliset poikkeukset [33]. Vaatimukseen sisältyy sähköasennukset ja liityntäpisteen suojaus, sähkön laatu, toiminta ja turvallisuus sekä vastaanottokoe. Helen Sähköverkko Oy:n ohjeen ja standardin EN 50438 vaatimukset ovat näiltä osin yhteneviä.

Taulukossa 4 luetellaan luokkien 3 ja 4 tuotantolaitteistojen ja yleisen jakeluverkon välisen rajapinnan suojausarvojen asetteluarvot. Generaattoreiden tai generaattorin syöttämän asiakasverkon kytkennässä jakeluverkon jännitteen tulee noudattaa seuraavia tahdistusehtoja:

- Tahtigeneraattori: $\Delta U < \pm 8 \% U_N$, $\Delta f < \pm 0,5$ Hz, $\Delta \varphi < \pm 10^\circ$
- Epätahtigeneraattori: Tahdistamaton verkkoon kytkentä on sallittu, jos kierroslukuero $\Delta n \leq \pm 5 \% n_N$. Muutoin sovelletaan tahtigeneraattoreille annettuja arvoja.
- Vaihtosuuntaajalaitteet: Vaihtosuuntaaja voidaan kytkeä verkkoon ilman erillistä tahdistinta, jos verkko-osa synkronoituu automaattisesti ja kytkeminen ei aiheuta haitallista käynnistysvirtasysäystä. Muutoin sovelletaan tahtigeneraattoreille annettuja arvoja.

Taulukko 4. Luokkien 3 ja 4 tuotantolaitteistojen ja yleisen jakeluverkon välisen rajapinnan suojausarvojen asetteluarvot [32].

PARAMETRI	KOKONAISAIKAHIDASTUS	LAUKAISUN RAJA-ARVOT
	s	
Ylijännite (porras 1)	1,5	$U + 10 \%$
Ylijännite (porras 2)	0,15	$U + 15 \%$
Alijännite (porras 1)	5	$U - 15 \%$
Alijännite (porras 2)	0,15	$U - 50 \%$
Ylitaajuus	0,2	51,0 Hz
Alitaajuus	0,5	48,0 Hz
YSE	0,15	*)
*) Laukaisuraja-asettelut sovitaan jakeluverkon haltijan kanssa riippuen valitusta YSE –suojatyypistä HUOM. Pientuotantolaite on erotettava mekaanisella kytkinlaitteella. Erotuskytkimen tulee olla lukittava		

Taulukon 4 aikahidastus muodostuu releen ja katkaisijan yhteenlasketusta toiminta-ajasta. Releiden tulee olla 3-vaiheiset, paitsi taajuusreleiden, jotka voivat olla yksivaiheisia. Generaattorilaitteistoille, joiden teho on ≥ 1 MVA, edellytetään sähkölaitostyyppisiä releitä. Pienemmille laitteistoille hyväksytään teollisuusreleet. Tuotantolaitteiston omaan sisäiseen suojaukseen liittyvien suojareleiden asetteluarvot määrittelee laitteiston toimittaja. Helen Sähköverkko Oy suosittelee, että yllä olevan taulukon suojareleitä ei integroida tuotantolaitteistoautomaatiikkaan releiden helpon vaihdettavuuden ja koestettavuuden vuoksi.

Teknisen järjestön IEEE laatima standardi 1547TM-2003 esittää vaatimukset hajautetun tuotannon laitteille 10 MVA asti, jotka on tarkoitus liittää verkkoon tyypillisellä jakelumuuntajan ensiö- tai toisiojännitetasolla [34]. Standardissa on oletusarvona 60 Hz taajuus. Standardi määrittelee liityntäpisteen (PCC, Point of Common Coupling) ominaisuuksille seuraavat vaatimukset:

- a) yleiset vaatimukset: jännitteen säätö, maadoitusjärjestelmän integrointi aluesähköverkon järjestelmään, tahdistus, tahaton jännitteensyöttö aluesähköverkkoon, lukittava erotuslaite, liityntäpisteen suojaus sähkömagneettisilta häiriöiltä ja syöksyjännitekestoisuus
- b) toiminta epänormaaleissa olosuhteissa: aluesähköverkon viat, jälleenkytkennän koordinointi, sallittu jännitteen ja taajuuden vaihtelu, tahdistusputoaminen, kytkeytyminen aluesähköverkkoon, enintään viiden minuutin viive siitä, kun jännite ja taajuus ovat palautuneet sallittuihin rajoihin
- c) sähkön laatu: virran tasajännitekomponentti ei saa olla yli 0,5 % nimellisestä, hajautettu tuotantolaitos ei saa aiheuttaa häiritsevää välkyntää eivätkä virran yliaallot liityntäpisteessä saa ylittää taulukon 3 arvoja, kun hajautettu tuotantolaitos syöttää tehoa symmetriseen ja lineaariseen kuormitukseen..
- d) saarekekäyttö: tahaton saarekekäyttö pitää pystyä havaitsemaan ja energian syöttö verkkoon pitää keskeyttää kahden sekunnin kuluessa, harkitun saarekkeen vaatimukset tulevat myöhemmin.

Hajautetun tuotannon laitteistolta vaaditaan seuraavien ominaisuuksien testausta:

- toiminta epänormaaleissa jännite- ja taajuusoloissa
- tahdistus
- liitynnän toiminta
- tahattoman saarekekäytön ehkäisy
- tasajännitekomponentin rajoitus
- harmoniset yliaallot

Standardi EN50438 luettelee testausvaatimukset nimellisvirraltaan ≤ 16 A (Suomessa näennäistehon raja ≤ 30 kVA) tuotantolaitteiden liitynnän suojauksesta. Testeillä tulee osoittaa, että liityntäpisteen suojaus estää sähkönsyötön jakeluverkkoon, kun laukaisurajat ylittyvät tai verkkoyhteys katkeaa. Yli-/alijännitesuojauksen tulee toimia asetetun toiminta-ajan puitteissa [33].

Saarekekäytön eston tai yksinsyötön eston (LoM, YSE) tulee varmistaa, että pientuotantolaitteen sähkönsyöttö jakeluverkkoon katkeaa, siihen asti kun jakeluverkon suojaus on selvittänyt viat ja verkon normaali syöttötilanne on palautunut. Pientuotantolaitteistolle soveltuva LoM-suojaus voi perustua olemassa olevaan tekniikkaan, esimerkiksi taajuuden muutosnopeuteen (ROCOF, Rate of Change of Frequency) tai vaihesiirtoon. Uudelleenkytkentä on sallittu vasta, kun

syöttöpisteen jännite ja taajuus ovat pysyneet sallituissa rajoissa kolme minuuttia generaattoreille ja 20 sekuntia vaihtosuuntaajalaitteistoille.

Virran harmoniset yliaallot testataan standardin IEC61000-3-2 luokan A mukaisesti sekä jännitteen vaihtelu ja välkyntä standardin IEC61000-3-3 mukaisesti. Testaukset ja menetelmät kuvataan yksityiskohtaisesti standardissa EN50438 [33].

4.3.4 Siirtoverkon liittymissäännöt

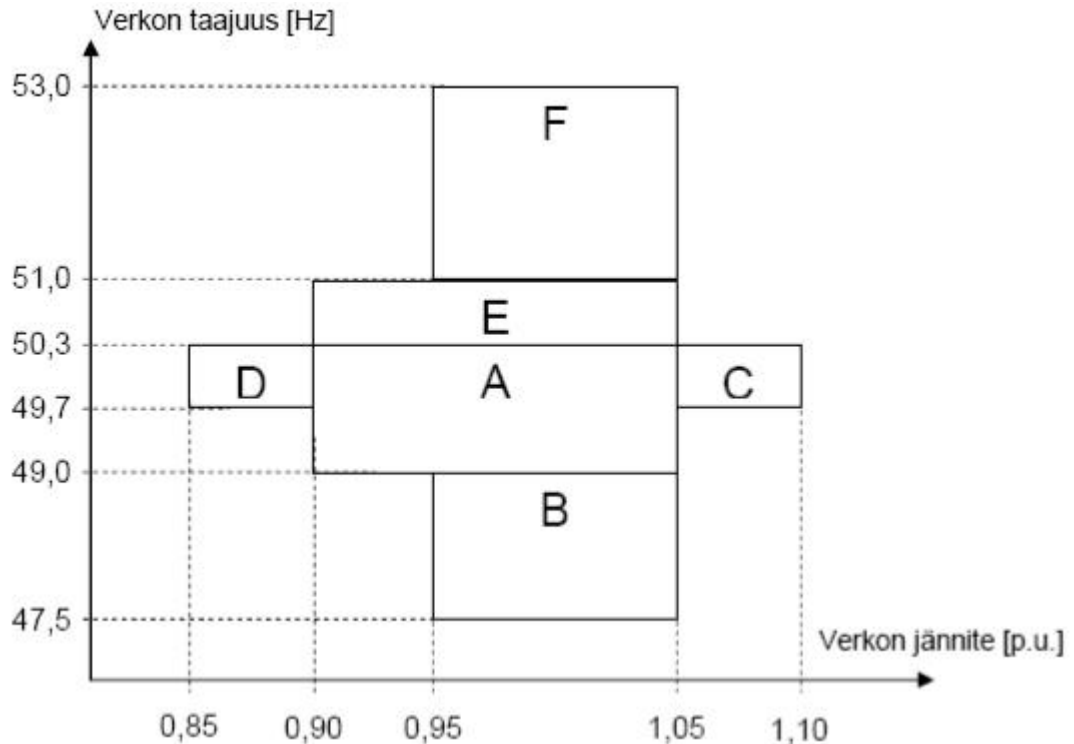
Fingrid Oyj on julkaissut Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset (VJV 2007), jonka liitteessä 2 esitetään Liittymissäännöt tuulivoimaloiden liittämiseksi Nordel-verkkoon [35]. Nämä pohjoismaiset tuulivoimaloiden liittymissäännöt määrittävät tekniset vähimmäisvaatimukset uusille tuulivoimaloille oheislaitteineen. Tavoitteena on varmistaa pohjoismaisen voimajärjestelmän turvallinen käyttö ja luotettavuus. Nordelin liittymissäännöt jättävät mahdollisuuden kansallisille lisävaatimuksille. Liittymissääntöjen vaatimukset ovat voimassa siirtoverkon liittymispisteessä. Tässä kappaleessa käsitellään lähinnä Suomessa voimassa olevia vaatimuksia tuoden esille mitä vaatimukset voivat sisältää, ja havainnollistetaan eri verkkoyhtiöiden vaatimuksien mahdollisia eroavaisuuksia muutamalla kuvalla.

Liittymissäännöissä määritellään liittymispiste, tuulivoimala ja tuulipuisto. Järjestelmävastaava määrittää liittymispisteen. Alle 100 MW:n tuulipuistojen osalta järjestelmävastaava voi tapauskohtaisesti päättää voidaanko kyseinen tuulipuisto vapauttaa joistakin vaatimuksista.

Tuulipuiston pätötehon tuotantoa (10 minuutin keskiarvo) on pystyttävä säätämään seuraavasti: ylärajan säätö alueella 20–100 % nimellistehosta kauko-ohjauksella; pätötehon nousunopeuden rajoittaminen arvoon 10 % nimellistehosta minuutissa; nopea tehon alassäätö 100 %:sta 20 %:iin nimellistehosta viidessä sekunnissa, kuitenkin niin että pätötehon palauttaminen nopeasti on oltava mahdollista. Taajuuden osalta vaaditaan automaattiohjausta järjestelmätaajuuden mukaan. Järjestelmävastaava antaa yksityiskohtaiset asetukset säädölle.

Tuulipuistolla pitää olla riittävä loistehokapasiteetti, jotta voimalaa voidaan käyttää nollaloisteholla verkkoon päin mitattuna ja loistehontuotantoa pystytään automaattisesti säätämään järjestelmävastaavan vaatimusten mukaisesti.

Tuulipuiston on täytettävä mitoitusjännitteen ja -taajuuden osalta järjestelmän vaatimukset. Kuvassa 10 on esitetty Nordelin vaatimukset ja kuvassa 11 on vertailtu muutamien muiden kantaverkkoyhtiöiden vaatimuksia.



Kuva 10. Jännitettä ja taajuutta koskevat vaatimukset. Järjestelmävastaava määrää jännitteen perusarvon [35].

Kun jännite ja taajuus ovat kuvassa esitettyjen suorakulmioiden sisällä, sovelletaan seuraavia vaatimuksia:

A: Normaali jatkuva käyttö. Voimajärjestelmän jännitteen ja taajuuden vuoksi ei sallita pätötehon tai loistehon alenemista.

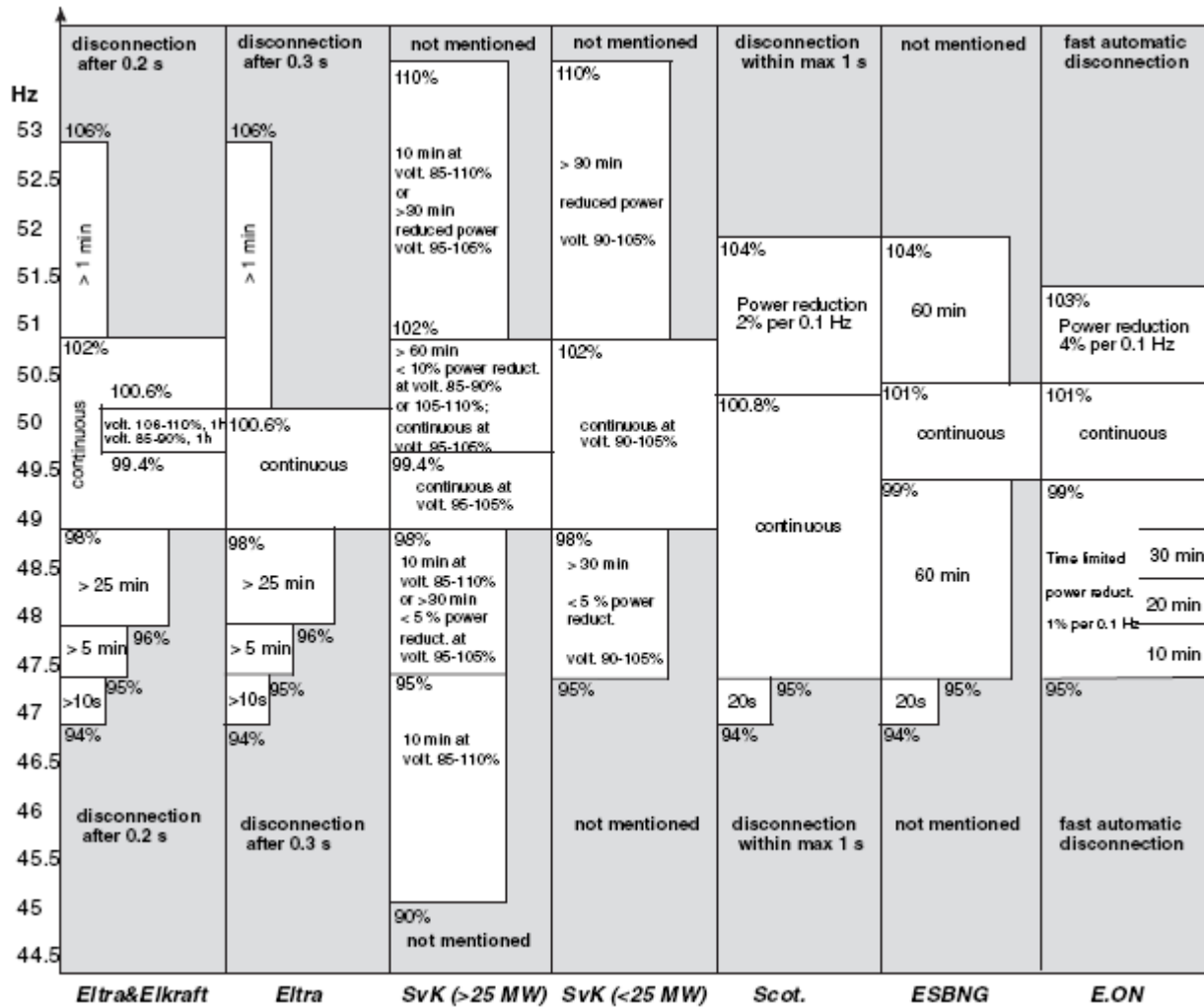
B: Vähintään 30 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon tuotannon sallitaan alenevan taajuuden lineaarisena funktiona 0 % alenemasta taajuudella 49,0 Hz 15 % alenemaan taajuudella 47,5 Hz.

C: Vähintään 60 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon tuotanto voi alentua 10 %.

D: Vähintään 60 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon tuotanto voi alentua 10 %.

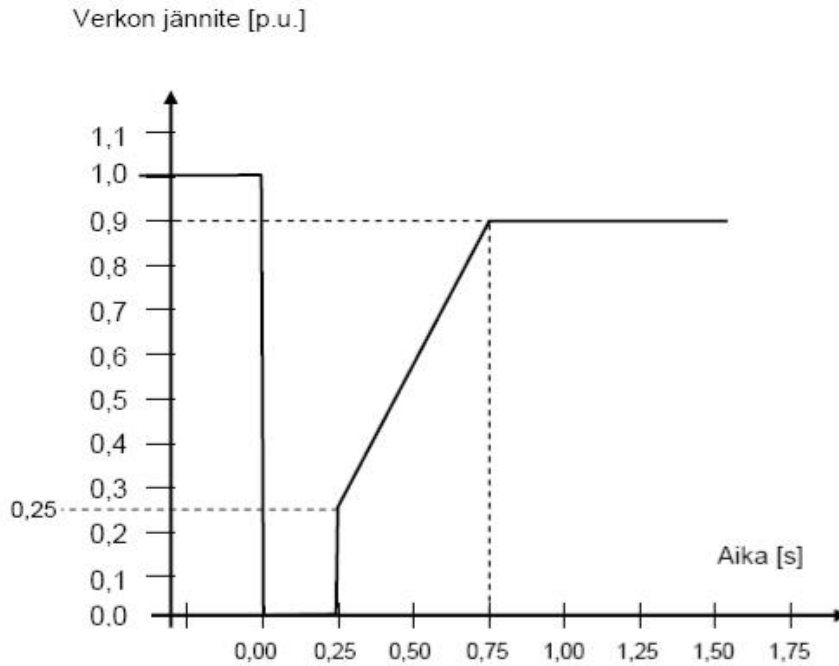
E: Vähintään 30 minuutin keskeytymätön käyttö. Mahdollinen pätötehon tuotanto voi laskea vähän. (Tällaisten käyttöolosuhteiden kokonaiskesto on normaalisti enintään 10 tuntia vuodessa.)

F: Vähintään 3 minuutin keskeytymätön käyttö. Pätötehon tuotanto voi laskea, mutta voimaloiden tulee pysyä kytkettynä voimajärjestelmään.

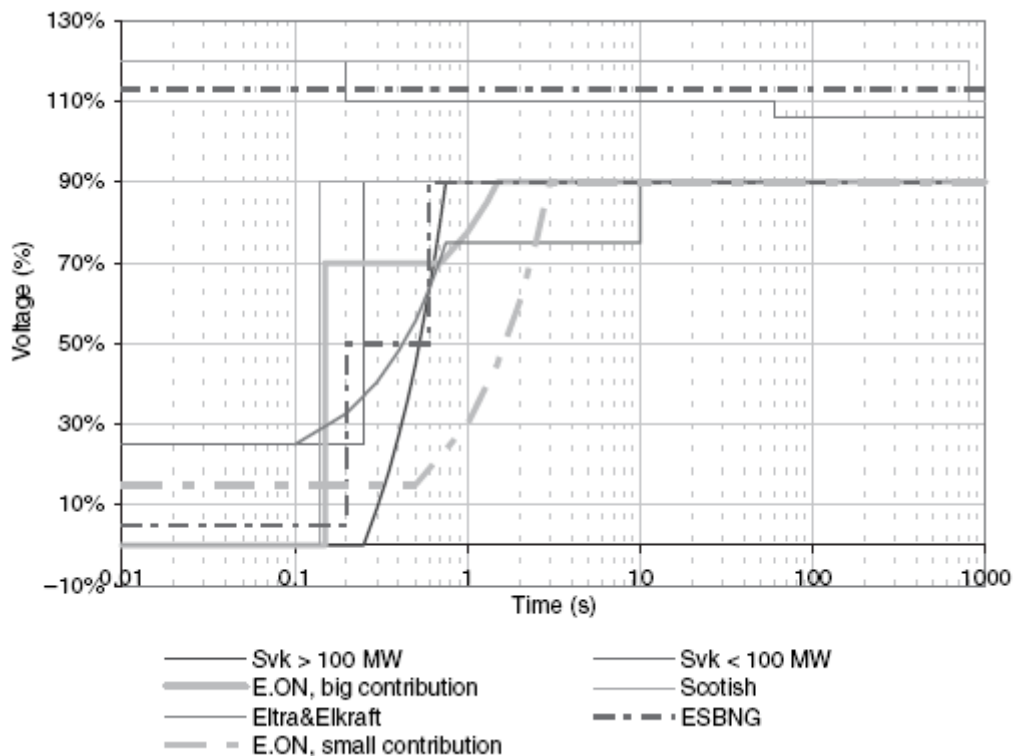


Kuva 11. Taajuutta ja jännitettä koskevia vaatimuksia muutamalla eri kantaverkko-yhtiöllä [36].

Tuulipuiston tulee pystyä jatkamaan toimintaansa siirtoverkon häiriöiden aikana ja niiden jälkeen. Häiriöt ovat yhteispohjoismaisen siirtojärjestelmän mitoitettavia vikoja ja määräytyvät yleensä jännitetason perusteella. Järjestelmävastaava määrittää, mitkä osat sen voimajärjestelmästä kuuluvat yhteispohjoismaiseen siirtojärjestelmään. Tuulipuisto voi irrota voimajärjestelmästä, jos jännite liittymispisteessä häiriön aikana tai sen jälkeen laskee kuvan 12 tai kuvan 13 esitettyjen tasojen alle, jotka esittävät jännitekuopan keskiarvoja Nordel-alueella ja muutamien eri kantaverkkojen alueella. Järjestelmävastaava voi käyttää omalla alueellaan erilaista käyrää paikallisista olosuhteista riippuen.



Kuva 12. Siirtoverkon vian aiheuttaman jännitekuopan yhtenäinen murtokäyrä, tuulipuiston tulee kestää em. murtokäyrän yläpuolelle jäävät viat irtoamatta verkosta. Jännitteen suhteellisarvo 1,0 on jännite ennen häiriötä [35].



Kuva 13. Jännitekuoppien verhoikäyriä muutaman eri kantaverkkoyhtiön vaatimuksissa (grid code) [36].

Tuulipuisto suositellaan suunniteltavaksi siten, että tuulipuiston yksittäiset voimalat eivät pysähdy samanaikaisesti suuren tuulenopeuden vuoksi. Tuulipuiston kauko-ohjaus tulee olla mahdollista tietoliikenneyhteyksien avulla. Ohjaukset ja mittaukset pitää olla järjestelmävastaavan käytettävissä.

Järjestelmävastaavan kanssa sovitaan erillisistä kokeista, jotka on tehtävä ennen tuulivoimalan tai tuulipuiston käyttöönottoa. Koeohjelmassa dokumentoidaan tuulivoimalan tai tuulipuiston kyky täyttää näiden liittymissäntöjen vaatimukset. Tuulivoimalan tai tuulipuiston simulointimalli tulee toimittaa järjestelmävastaavalle osana koeohjelmaa. Mallissa on esitettävä tuulivoimalan tai tuulipuiston ominaisuudet sekä tehonjako- että dynamiikkalaskentaa varten. Mallia käytetään suunnittelussa ennen tuulivoimalan tai tuulipuiston käyttöönottoa, ja mallin oikeellisuus tulee varmentaa tuulivoimalan tai tuulipuiston käyttöönottokokeiden yhteydessä.

4.3.5 Tuotantoyksiköiden sähkön laatuvaatimukset

Seuraaville jakelujännitteen ominaisuuksille pienjännite- ja keskijänniteverkoissa asetetut vaatimukset luetellaan standardissa SFS-EN 50160 [37].

1. verkkotaajuus
2. jakelujännitteen suuruus
3. jännitetason vaihtelut
4. nopeat jännitemuutokset ja välkynnän häiritsevyyssindeksi
5. jännitekuopat
6. lyhyet keskeytykset
7. pitkät keskeytykset
8. johtimen ja maan väliset tilapäiset käyttötaajuiset ylijännitteet
9. johtimen ja maan väliset transienttiylijännitteet
10. jakelujännitteen epäsymmetria
11. harmoninen yliaaltojännite
12. epäharmoninen yliaaltojännite
13. verkon signaalijännitteet liittämiskohdassa

Sähkön laatusuureiden mittaus- ja arviointimenetelmät löytyvät IEC 61000-sarjan standardeista.

4.3.6 Sähkön laatu verkkoon liitetyissä tuulivoimaloissa

Tuulivoimalan sähkön laadun mittaukset ja mittaolosuhteet kuvataan standardissa IEC 61400-21 [38]. Tuulivoimalan laatusuureisiin sisällytetään jännitteen välkyntä ja yliaallot, jännitekuopan vaste, tehon ja loistehon säätö, verkon suojaus ja takaisinkytkentäaika. Tässä standardissa mainitut mittaussuureet, mittaolosuhteet ja mittaustulosten arviointi pätevät vain tuulivoimaloille. Standardi pätee kaikenkokoisille tuulivoimaloille, vaikka tämän osan testivaatimukset on tarkoitettu lähinnä voimaloille, joiden liityntäpiste (PCC) on keski- tai suurjännitteinen. Mittausmenetelmät on suunniteltu mittaustaikasta riippumattomiksi. Menetelmät ovat voimassa jakelu- tai siirtoverkossa, jonka taajuus on kiinteä ± 1 Hz ja jolla on riittävät pätö- ja loistehon säätömahdollisuudet. Tässä standardin osassa määritellään: pienjännite $U_n \leq 1$ kV; keskijännite $1 \text{ kV} < U_n \leq 35$ kV ja suurjännite $U_n > 35$ kV.

4.3.6.1 Tuulivoimalan sähkön laatuun liittyvät parametrit

Normalisointia varten käytetään tuulivoimalan teknisiä arvoja P_n , S_n , U_n ja I_n .

Jännitteen vaihtelu voi olla joko välkyntää tai jännitetason muutoksia. Jatkuvan tilan välkyntään häiritsevyyssindeksi määritetään eri verkkoimpedanssin vaihekulma-arvoilla sekä neljällä eri tuulenopeusjakautumalla. Arvot määritetään loistehon ollessa nolla.

Jännitteen vaihtelut mitataan seuraavanlaisissa kytkentätilanteissa:







- voimalan käynnistys käynnistymistuulenopeudella
- käynnistys nimellisellä tai sitä suuremmalla tuulenopeudella
- pahin generaattoreiden (jos useita) välinen kytkentätilanne.

Näihin kytkentätilanteisiin liittyen määritetään parametrit kytkentöjen maksimimäärälle 10 min ja 2 h aikana sekä kertoimet välkyntälle ja jännitteen muutokselle eri verkkoimpedanssin vaihekulman arvoilla.

Virran harmonisia yliaaltoja mitataan 50. yliaaltoon asti standardin IEC 61000-4-7 mukaisesti [39]. Mittaus tehdään jatkuvassa käyttötilanteessa eri tehoarvoilla, kun loistehon arvo on nolla. Virran harmoniset yliaallot ilmoitetaan prosentteina nimellisvirrasta. Epäharmoniset yliaallot mitataan 2 kHz asti ja myös suuremmilla taajuuksilla välillä 2 kHz ja 9 kHz.

Järjestelmän vaste taulukossa 5 kuvatuille jännitekuopille on määritettävä pätötehon arvoilla a) $0,1 P_n$ ja $0,3 P_n$ välillä and b) yli $0,9 P_n$. Kaksi peräkkäistä testiä tehdään kussakin taulukon tapauksessa.

Taulukko 5. Jännitekuoppien määrittely. Jännitetaso, kuopan kesto ja muoto [38].

Tapaus	Pääjännite (verrattuna jännitearvoon juuri ennen kuopan syntymistä) [pu]	Jännitteen myötäkomponentti (verrattuna jännitearvoon juuri ennen kuopan syntymistä) [pu]	Kesto [s]	Muoto
VD1 – symmetrinen 3-vaiheinen jännitekuoppa	$0,90 \pm 0,05$	$0,90 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$	
VD2 – symmetrinen 3-vaiheinen jännitekuoppa	$0,50 \pm 0,05$	$0,50 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$	
VD3 – 2-vaiheinen jännitekuoppa	$0,20 \pm 0,05$	$0,20 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$	
VD4 – 2-vaiheinen jännitekuoppa	$0,90 \pm 0,05$	$0,95 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$	
VD5 – 2-vaiheinen jännitekuoppa	$0,50 \pm 0,05$	$0,75 \pm 0,05$	$0,5 \pm 0,02$	
VD6 – 2-vaiheinen jännitekuoppa	$0,20 \pm 0,05$	$0,60 \pm 0,05$	$0,2 \pm 0,02$	

HUOM 1. Jännitekuoppa voi pudottaa voimalan verkosta monesta syystä, ei yksin sähköiseen voimansiirtoketjuun liittyen, vaan myös mekaanisten värähtelyjen tai apujärjestelmien alijännitekeston takia. Sen vuoksi on tärkeää tehdä testit täydellisellä voimalalla, kuin luottaa pelkän voimansiirtoketjun testaamiseen.

HUOM 2. Tapausten VD1 ja VD3 perustarkoituksena on testata voimalat, joilla ei ole verkkovian sieto-ominaisuutta (fault ride-through) syvän jännitekuopan tapauksessa. Näillä testeillä on yleensä merkitystä numeeristen simulointimallien validoinnin perustana.

Maksimiteho ilmoitetaan 600, 60 ja 0,2 sekunnin keskiarvoina P_{600} , P_{60} and $P_{0,2}$. Tuulivoimalan kyky seurata muutosnopeuden rajoitusta on osoitettava graafisesti. Graafisessa esityksessä pitää näyttää saatavissa oleva ja mitattu pätöteho 10 min aikana, kun muutosnopeudeksi on asetettu 10 % nimellistehosta minuutissa. Tulokset raportoidaan 0,2 s keskitehoina.

Myös asetusarvosäädön toiminnan testaustulos esitetään graafisesti. Asetusarvoa säädetään 20 % portain kaksi minuuttia kullakin tasolla, ensin portaittain 100 % arvosta 20 % arvoon ja tästä takaisin 100 arvoon.

Tuulivoimalan kyky tuottaa induktiivista ja kapasitiivista loistehoa ilmoitetaan yhden minuutin keskiarvoina tasoilla 0, 10, 20, ... 100 % nimellistehosta

Tuulivoimalan verkkosuojausjärjestelmän toiminta testataan. Tuulivoimalan todelliset yli- ja alijännite- sekä yli- ja alitaajuussuojaustasot sekä erotusajat mitataan annetuilla asetusarvoilla. Verkkovian kestoa 10 s, 1 min ja 10 min vastaavat takaisinkytkentäajat kirjataan testaustuloksiin.

4.3.6.2 Testausmenetelmät

Mittauksilla pyritään määrittämään sähkönlaatusuureet koko toiminta-alueelle, mittauksia ei kuitenkaan vaadita tuulenopeuksille yli 15 m/s. Alla on lueteltu mittauksia, joihin taajuusmuuttajan ominaisuudet lähinnä vaikuttavat.

Standardin [38] vaatimat tuulivoimalan testausehdot ovat:

- suora kytkentä keskijänniteverkkoon standardimuuntajan kautta
- jännitteen THD-arvon sisältäen kaikki yliaallot 50 harmoniseen asti pitää olla alle 5 % mitattuna 10 min keskiarvona tuulivoimalan liittimistä, kun voimala ei tuota energiaa
- verkon taajuuden mitattuna 0,2 s keskiarvona tulee olla nimellistaajuus ± 1 %
- jännitteen (10 min keskiarvo) tulee olla nimellisjännite ± 10 %
- jännitteen epäsymmetrian pitää olla alle 2 % mitattuna 10 min keskiarvona
- ympäristöolosuhteiden pitää olla valmistajan vaatimusten mukaiset.

Nämä mittaukset tehdään tuulivoimalan liittimistä. Mittauksissa tuulen turbulenssille ja sähköverkon oikosulkuteholle ei ole asetettu vaatimuksia, mutta kyseiset arvot on kirjattava. Digitaalisen tiedonkeruujärjestelmän oletetaan keräävän, laskevan ja tallettavan tulokset. Jännitteen ja virran mittauksilta edellytetään kaistanleveyttä 2 kHz pätö- ja loistehon laskentaan. Harmonisten komponenttien mittaus edellyttää vähintään 20 kHz näytteenottotaajuutta kanavaa kohti. Tuulenopeussignaalin näytteenottotaajuuden pitää olla vähintään 1 Hz. Tuulimittarin sijainnin aiheuttama epävarmuus ei saa ylittää ± 1 m/s. Mittamuuntajilta edellytetään tarkkuusluokkaa 1,0 ja suodatin - A/D-muunnin - datankeruu -ketjulta tarkkuusluokkaa 1 % täydestä näyttämästä.

Verkkojännitteen vaihtelu keskijänniteverkossa voi johtua muistakin vaihtelua aiheuttavista kuormista. Lisäksi verkon ominaisuudet saattavat vaikuttaa jännitevaihteluihin. Tässä standardin osassa määritetään menetelmä, jossa käytetään virran ja jännitteen aikasarjoja ja fiktiivistä verkkoa jännitevaihteluiden simuloimiseksi. Standardissa IEC 61000-4-15 [40] on kuvattu välkyntämittausmenetelmä. Mittaukset tehdään sekä jatkuvassa tilassa että kytkentätapauksissa.

Virran harmonisia, epäharmonisia ja suurempia taajuuskomponentteja mitataan jatkuvassa tilassa. 10 min jaksot mitataan eri tehoportaissa. Mittausmenetelmä kuvataan standardissa IEC 61000-4-7 [39]. Alle 0,1 % harmonisia yliaaltoja nimellisvirrasta ei tarvitse raportoida. Virran säröt (THD ja Partial Weighted Harmonic Distortion, PWHd) lasketaan nimellisvirran suhteen. Myös jännitteen harmoniset yliaallot raportoidaan.

Tuulivoimalan vaste jännitekuopille mitataan käyttämällä oikosulkuemulaattoria, jolla voidaan kytkeä vaiheet impedanssin kautta maahan. Näiden impedanssien arvot valitaan niin, että saadaan haluttu taulukon 5 mukainen jännitekuoppa. Jännitekuopan toleranssit annetaan standardissa.

Verkkovikojen kestoajoja 10 s, 1 min ja 10 min vastaavat takaisinkytketymisajat mitataan. Keskimääräisen tuulennopeuden pitää olla takaisinkytketymisaikana yli 10 m/s. Verkko kytketään irti ja takaisin tavallisimmin keskijännitekatkaisijalla. Vika-aika on katkaisijan auki- ja kiinnikytöntöjen väli. Takaisinkytketymisaika mitataan siitä hetkestä, kun verkko on käytettävissä, siihen kun voimala alkaa tuottaa tehoa.

Sähkönlaadun mittaustulokset arvioidaan joko standardeissa mainittujen rajojen, verkonhaltijan tai järjestelmävastaavan vaatimusten mukaisesti. Tuulivoimaloiden erityisvaatimukset kuvataan standardissa IEC 61400-21 [38].

4.4 Ympäristövaatimukset

Asennukset tulee suunnitella ja toteuttaa turvallisuus- ja muiden säädösten mukaisesti. Standardien noudattamisella pyritään varmistamaan, että laite toimii oikein määritellyssä ympäristössä. Standardien täytyminen todetaan testein. Tarkastelukohteita vaatimuslistalla ovat mm.:

- Häiriöiden päästö ja sieto (EMC)
- Harmoniset virrat ja jännitteet
- Pienjännitedirektiivi
- Konedirektiivi
- Kotelointiluokka (IP-luokka)
- FI-, CE-, UL-, C-UL- ja muut hyväksynät

Taajuusmuuttaja vie oman tilansa ja laitteiston massakin on otettava huomioon silloin, kun laitteisto sijoitetaan paikoilleen. Taajuusmuuttaja tarvitsee vielä apusähköjärjestelmiä, joilla laitteiston ohjaus ja tiedonsiirto hoidetaan. Ohjauksen, säädön ja tiedonkeruun on oltava mahdollista sekä paikan päällä että kaukokäyttönä. Koska nämä toiminnot ovat elintärkeitä, asetetaan niille häiriintymismielessä erityisvaatimuksia, joiden varmistamiseksi on olemassa lukuisia ns. häiriötestausstandardeja (avainsanapari on sähkömagneettinen yhteensopivuus, EMC, electromagnetic compatibility).

Viitteessä [41], ABB Tekninen opas nro 2, on esitetty miten erilaiset EU-neuvoston direktiivit vaikuttavat PDS-käyttöjen (Power Drive Systems) hankintaan ja käyttöön. Oppaan nro 2 sisältö perustuu ABB Industry Oy:n marraskuussa 1999 tekemään tilannekatsaukseen. Oppaassa on esitetty mm. PDS-käyttöjen ostoperusteita, standardien ja direktiivien tai muunlaisen teknisen rakennetiedoston vaatimuksia. Lopuksi on tuotu esiin vaatimuksenmukaisia asennustapoja, erityisesti häiriöiden kurissapitämiseksi.

Standardissa SFS-EN/IEC 61800-3 [42] esitetään nopeussäädettyjen käyttöjen EMC-häiriön sieto- ja päästövaatimukset. Vaatimukset määräytyvät käyttöympäristön 1. tai 2. sekä luokituksen C1–C4 mukaisesti. 1. ympäristö tarkoittaa kotitalouksia ja muita kohteita, jotka on liitetty pienjänniteverkkoon. 2. ympäristöön kuuluvat muut kuin suoraan pienjänniteverkkoon liitetyt kohteet, esimerkiksi teollisuus ja tekniset alueet, joita syötetään muuntajan kautta. Sallitut sieto- ja päästörajat sekä niiden mittausmenetelmät on kuvattu luokittain standardissa [42]. Nopeussäädetyt käytöt luokitellaan seuraavasti:

- C1 alle 1000 V laitteistot, 1. ympäristö
- C2 alle 1000 V kiinteät laitteistot, ainoastaan ammattihenkilön kytkettäväksi ja tarkastettaviksi tarkoitetut laitteet, jos käytetään 1. ympäristössä
- C3 alle 1000 V laitteistot, jotka on tarkoitettu käytettäväksi 2. ympäristössä, mutta ei 1. ympäristössä.
- C4 laitteistot, joiden jännite ≥ 1000 V tai virta ≥ 400 A ja joita käytetään monimutkaisissa järjestelmissä 2. ympäristössä.

Kuvassa 14 on esimerkki suuren tuulivoimalan viestinsiirrosta [43].

Kosteutta ja pölyä vastaan voidaan suojautua suuressa tuulivoimalassa esimerkiksi kuivaamalla ja suodattamalla sisään otettu ilma ja pitämällä ohjaus- ja säätökaapit puhtaalla ilmalla jonkin verran ylipaineistettuna ympäristöön nähden.

Seuraavassa on esimerkkinä erään taajuusmuuttajan [44] ympäristöolosuhteiden rajoja ja standarditestien testauskohteita:

- Ympäristölämpötila toiminnassa: 10 – 50 °C tai -10 – 40°C; ei jäätymistä
- Varastointilämpötila: -40 – 70°C
- Suhteellinen kosteus: 0 – 95% RH, ei kondensaatiota, ei korroosiota, ei tippuvaa vettä
- Ilman laatu: kemialliset höyryt ja mekaaniset hiukkaset, menetelmät standardissa IEC 60721-3-3, laite toiminnassa
- Käyttöpaikan korkeus: 100 %:n kuormitettavuus 1000 m asti ja 1 % tehon alennus jokaista 100 m kohti yli 1000 m korkeudessa; enintään 3000 m
- Tärinä: EN50178, EN60068-2-6 mukaiset mittaukset alueella 5 – 150 Hz: värähtelyn amplitudi runkokoon mukaan 1 mm taajuusalueella 5 – 15,8 Hz tai 0,25 mm taajuusalueella 5–31 Hz; vastaavasti maksimikihtyvyyssamplitudi 1 G taajuusalueella 15,8 – 150 Hz ja 1 G taajuusalueella 31 – 150 Hz
- Iskut: EN50178, EN60068-2-27 pudotuskoe sekä varastointi ja kuljetus: maks. 15 G, 11 ms (pakkauksessa)

6 PCS6000 Control system

The PCS6000 power converter controller receives run/stop signals from the turbine controller (masterslave system) through a digital Link via PROFIBUS to the converter. Torque command to the permanent magnet synchronous generator (PMSG) is based on speed measurements with an update rate of at least 10 ms. A serial link connects the standard industrial programmable logic controller (PLC) master controller to the converter controller AC800PEC (see figure 9).

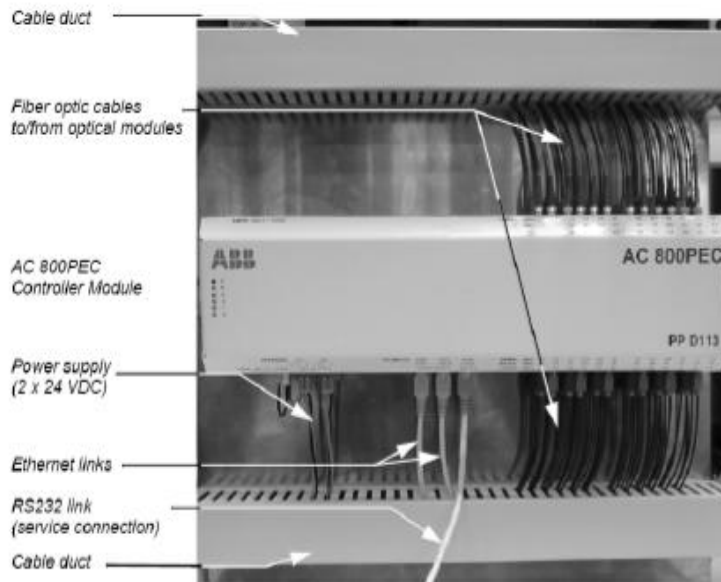


Figure 9: AC800PEC power converter controller with fibre optic links

The active rectifier (ARU) must be able to operate the machine at maximum torque per ampere over the power curve until the terminal voltage of the machine reaches the limit of the active rectifier, when it must limit terminal voltage while the machine continues up the power curve. The inverter (INU) provides real power to the grid while regulating the DC voltage. In order to meet these objectives, a field oriented control strategy is proposed without the use of rotor position sensors. The sensorless algorithm is based on a phase-locked loop (PLL), which synchronizes the internal/back EMF (electro magnetic field) of the generator in proper phase and frequency to the permanent magnet flux. The feedback quantities for control are the generator currents and the control outputs (to the modulator) are three phase references for the stator terminal voltage. The power supply for the control system and all important I/O boards are protected by an uninterruptable DC power supply in case of auxiliary power supply loss. The PCS6000 converter control is prepared for long black outs. The AC800PEC control system detects condensation after a long power loss and starts an anti condensation routine before the turbine will be restarted.

Kuva 14. *Esimerkki tiedonsiirron järjestelyistä suuressa voimalassa, ote artikkelista [43].*

Kun taajuusmuuttajan käyttöympäristö on tunnettu ja taajuusmuuttajan häviöt tiedetään, voidaan jäähdytysjärjestelmä valita. Suuret häviöt merkitsevät taajuusmuuttajan huonoa hyötysuhdetta. Suurilla häviöillä ilmajäähdytteinen järjestelmä ei ehkä riitä ja niin joudutaan valitsemaan nestejäähdytys. Taajuusmuuttajissa syntyvien häviöiden laskemiseksi on esitetty kaavoja viitteissä [45], [46] ja [47].

Standardin IEC 61800-4 liitteissä on esitetty yksittäisten tehopuolijohteitten (tyristori, diodi, GTO/GCT thyristor (Gate Turn-off, Gate Commutated Turn-off) ja IGBT) häviöiden laskentakaavoja. Myös RC-suojapiirin (Thyristor Shunt Snubber) häviöiden laskentakaavat on esitetty. Näitä helpompaa lienee käyttää edellisten viitteiden ja mahdollisesti myös taajuusmuuttajien valmistajien ehdottamia laskentakaavoja.

4.5 Rajaukset

Taajuusmuuttajista tässä raportissa tarkastellaan vain tehoelektronikkaratkaisuja ja ohitetaan pyörievien koneiden avulla saatavat taajuusmuuttajat.

Tehoelektroniikan taajuusmuuttajatarkasteluista mainitaan ns. suorat muuttajat eli matriisimuuttajat mukaan luettuna syklokonvertterit (verkkokommutoivat suorat taajuusmuuttajat). Matriisimuuttaja on suuntaaja, jossa tulo- ja lähtövaiheet yhdistyvät suoraan kytkimien avulla toisiinsa ilman välipiiriä.

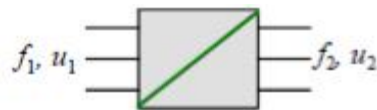
Jäljelle jäävistä tehoelektroniikan ns. epäsuorista taajuusmuuttajista myös virtalähdetaajuusmuuttajat (CSC, Current Source Converter) ohitetaan vähin maininnoin, koska niiden käyttö on erittäin vähäistä tarkastelluissa tapauksissa. Jäljelle jäävät siten enää jännitelähdetaajuusmuuttajat (VSC, Voltage Source Converter), joissa välijännitepiirin tunnusomaisin komponentti on (tasajännite-) kondensaattori.

5 Taajuusmuuttajan tekniset ominaisuudet

5.1 Taajuusmuuttajatyypit, toimintaperiaatteet ja rakenne

5.1.1 Taajuusmuuttajatyypit

Taajuusmuuttajat voidaan jakaa välipiirittömiin ja välipiirillisiin muuttajiin. Välipiirittömissä eli suorissa muuttajissa, joihin kuuluvat syklo- ja matriisikonvertterit, vaihtosähköstä muodostetaan suoraan uutta vaihtosähköä ilman tasasuuntausta. Suorista muuttajista ainoastaan syklokonvertterilla on kaupallisia sovelluksia ja sitä käytetään yli megawatin suuruisilla tehoilla oikosulku- ja tahtikoneiden syöttöön silloin, kun pyörimisnopeus on alle 1000 – 1500 1/min. Kytkiminä syklokonvertterissa käytetään vastarinnankytkettyjä tyrystoreita. Suoria muuttajia ei ole yleisesti käytetty tuulivoima- tai hajautetun tuotannon sovelluksissa, joten jatkossa keskitytään tarkastelemaan välipiirillisten taajuusmuuttajien ominaisuuksia [48],[49]. Kuvasta 15 nähdään suoran muuttajan periaatteellinen rakenne.



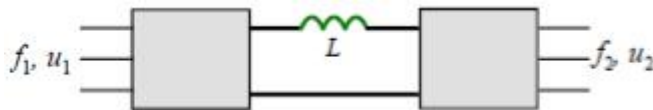
Kuva 15. Suoran taajuusmuuttajan periaate [48].

Välipiirillisissä taajuusmuuttajissa vaihtosähköstä muodostetaan ensin joko tasavirtaa tai tasajännitettä, joka sitten muutetaan halutun suuruiseksi ja taajuiseksi vaihtojännitteeksi. Välipiirilliset muuttajat voidaan jakaa kahteen ryhmään: virta- ja jännitevälipiirillisiin muuttajiin.

Virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasa- ja vaihtosuuntausyksiköstä sekä välipiirin kuristimesta. Kuristimen tarkoitus on toimia energiavarastona pitäen välipiirin virta tasaisena. Jos kuristin on mitoitettu riittävän suureksi, niin

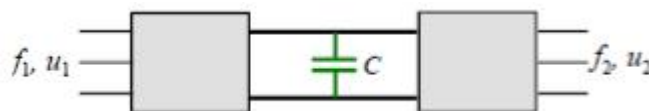
virtavälipiirillinen taajuusmuuttaja käyttäytyy syöttöverkon suuntaan vakiovirtalähteen tavoin.

Virtavälipiirillisiä muuttajia käytetään usein nopeakäyntisten tahtimoottoreiden ohjaukseen, jolloin kyseessä on kuormakommutoitu taajuusmuuttaja (LCI, Load Commutated Inverter). Kytkinkomponentteina kuormakommutoidussa taajuusmuuttajassa käytetään tasa- ja vaihtosuuntauspuolella tyypillisesti tyristöreita (SCR, Silicon Controlled Rectifier). Tyristöreilta tarvitsee ohjausloistehoa ja epätahtikone tarvitsee loistehoa magnetointiin sekä moottori- että generaattorikäytössä. Tämän takia tyristöreita ei voida käyttää epätahtikoneen puoleisen sillan kytkinkomponentteina. Oikosulkukoneelle mahdollistava käyttö saadaan, kun koneen puoleinen silta korvataan pakko-ohjatuilla kytkimillä (esim. IGBT), jotka pystyvät tuottamaan koneen tarvitseman loistehon. Tuuli- tai muussa hajautetussa tuotannossa virtavälipiirillisten taajuusmuuttajien käyttö ei ole yleistä [48],[49]. Kuvassa 16 on virtavälipiirillisen muuttajan periaatteellinen rakenne.



Kuva 16. Virtavälipiirillisen taajuusmuuttajan periaate [48].

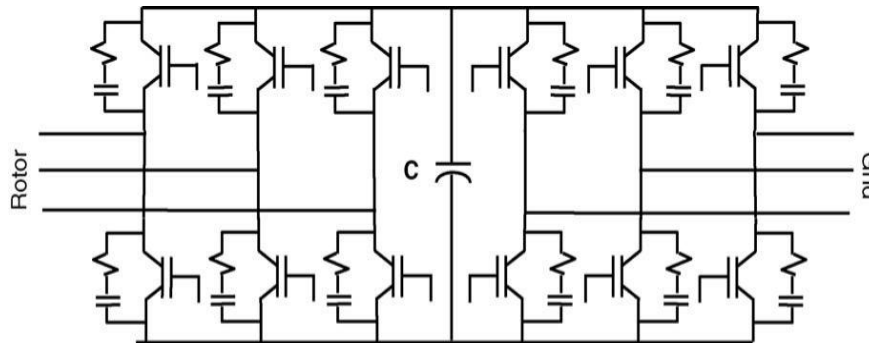
Jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja koostuu tasa- ja vaihtosuuntausyksiköstä, välipiirin kondensaattorista ja mahdollisesti myös suodatinkuristimesta, jarrukatkojasta ja siihen liittyvästä vastuksesta. Välipiirin kondensaattorin tarkoitus on toimia hetkellisenä energiavarastona pitäen tasajännitteen suuruus vakaana. Jos jännitevälipiirin kondensaattori on mitoitettu riittävän suureksi, niin muuttaja käyttäytyy syöttöverkon suuntaan vakiojännitelähteen tavoin. Kuvasta 17 nähdään jännitevälipiirillisen muuttajan periaatteellinen rakenne.



Kuva 17. Jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan periaate [48].

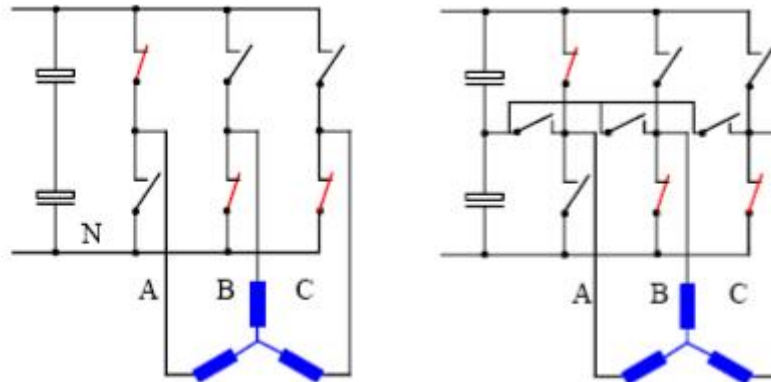
Jännitevälipiirilliset taajuusmuuttajat voidaan jakaa käytettyjen tasajännitteiden lukumäärän mukaan. Kaksitasoinen topologia on tyypillinen ratkaisu pienjännitteellä ja se on yleinen ratkaisu sekä kaksoissyötetyssä DFIG-käytössä että täystehotaajuusmuuttajalla varustetussa tuulivoimalassa. Täystehotaajuusmuuttajan takana olevissa tuulivoimaloissa, joiden nimellisteho on yli 500 kVA, yleensä käytetään rinnakkaisia taajuusmuuttajamoduuleja täyttämään tekniset vaatimukset. Kaksoissyötetyissä tuulivoimaloissa riittää nykyisillä tehotasoilla (1 – 5 MW) yksi kaksitasoinen taajuusmuuttajamoduuli. Kaksitasoisia taajuusmuuttajia käyttävät käytännössä kaikki suuret tuulivoimavalmistajat. Molemmissa tuulivoimasovelluskohteissa kytkiminä vaihtosuuntauspuolella käytetään tyypillisesti IGBT-komponentteja. Tasasuuntauspuolella käytetyt kytkimet ovat pääasiassa IGBT-komponentteja, mutta esimerkiksi joissakin Enerconin täystehotaajuusmuuttajalla varustetuissa voimaloissa käytetään myös diodeja. ABB:n pienjännitetaajuusmuuttajien eräs jännitetaso on 690 V ja tehoalue ulottuu vakiomalleissa 3300 kilowattiin. Myös hajautetussa tuotannossa jännitevälipiirillinen taajuusmuuttaja on laajasti käytetty vaihtoehto. Kuvassa 18 on generaattori- tai

verkkoon jarrutusenergian syöttävän moottorikäyttöön tarkoitetun kaksitasoisen 4-kvadranttisen (4Q) jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan peruskyskentä [50].



Kuva 18. 4Q-käytön mahdollistava kaksitasoisen jännitevälipiirillisen taajuusmuuttajan peruskyskentä [50].

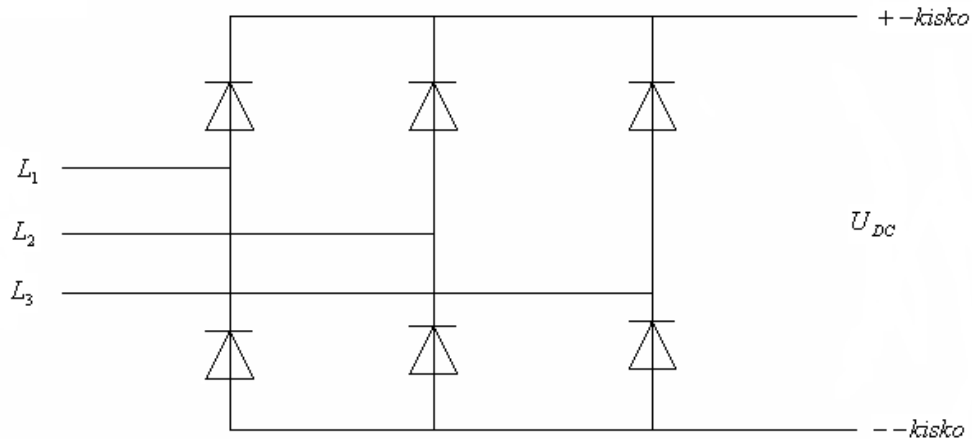
Kolmi- tai useampitasoisia topologioita käytetään pääasiassa keskijännitteellä ja näissä kytkinkomponentteina tuulivoimasovelluksissa käytetään ABB:llä tyypillisesti IGCT-komponentteja. Tuulivoimasovelluksissa keskijännitealue alkaa ABB:n määritelmässä 1 kV:sta päättyen 5 kV:iin. Tehoalue ABB:n keskijännitetaajuusmuuttaja-yksikössä ulottuu 7 MVA:iin [48], [8]. Kuvasta 19 nähdään kaksi- ja kolmetasoisen jännitevälipiirillisten taajuusmuuttajien vaihtosuuntausosien periaatekytkennät. Kuvassa 19 on oikeiden puolijohdekomponenttien sijaan piirretty mekaaniset kytkimet.



Kuva 19. Kaksi- ja kolmetasoisen taajuusmuuttajien periaatekytkennät [48].

5.1.2 Taajuusmuuttajan toimintaperiaate

Taajuusmuuttajan toiminta perustuu puolijohdekomponenttien kytkentätilan ohjaukseen virran johto- ja estotilan välillä. Verkkokommutoivien (external commutation, line-commutation, AC line commutation, natural commutation, phase commutation, load-commutation) puolijohdeiden, esimerkiksi diodien, kytkentätila määräytyy verkon jännitteistä. Diodeilla toteutetun tasasuuntaajan ylemmän haaran johtovuorossa on kytkin, jonka vaihejännite on suurin ja alemman haaran kytkimistä johtaa vastaavasti se, jonka vaihejännite on pienin. Kyseistä siltaa kutsutaan 6-pulssisillaksi, koska se synnyttää tasajännitepiiriin kuusinkertaisella verkkotaajuudella sykkivän vaihtojännitekomponentin. Kuvassa 20 on diodeilla toteutettu 6-pulssisilta.



Kuva 20. Kolmivaiheisen dioditasasuuntaajan peruskytkenä.

Tasajännitteen keskiarvoksi saadaan ideaalisessa tapauksessa kaavan 5 mukaan:

$$U_{DC} = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} U = 1,35U \quad (5)$$

missä U = verkon pääjännitteen tehollisarvo.

Kommutointi tarkoittaa virran siirtymistä kytkimeltä toiselle. Käytännössä tasajännitteen suuruutta pienentää kommutointikulman u suuruus (kommutoinnin kesto), joka riippuu kaavasta (6):

$$\cos u = 1 - \frac{2\omega L_s I_d}{\sqrt{2} V_{LL}} \quad (6)$$

missä ω = verkon kulmataajuus,

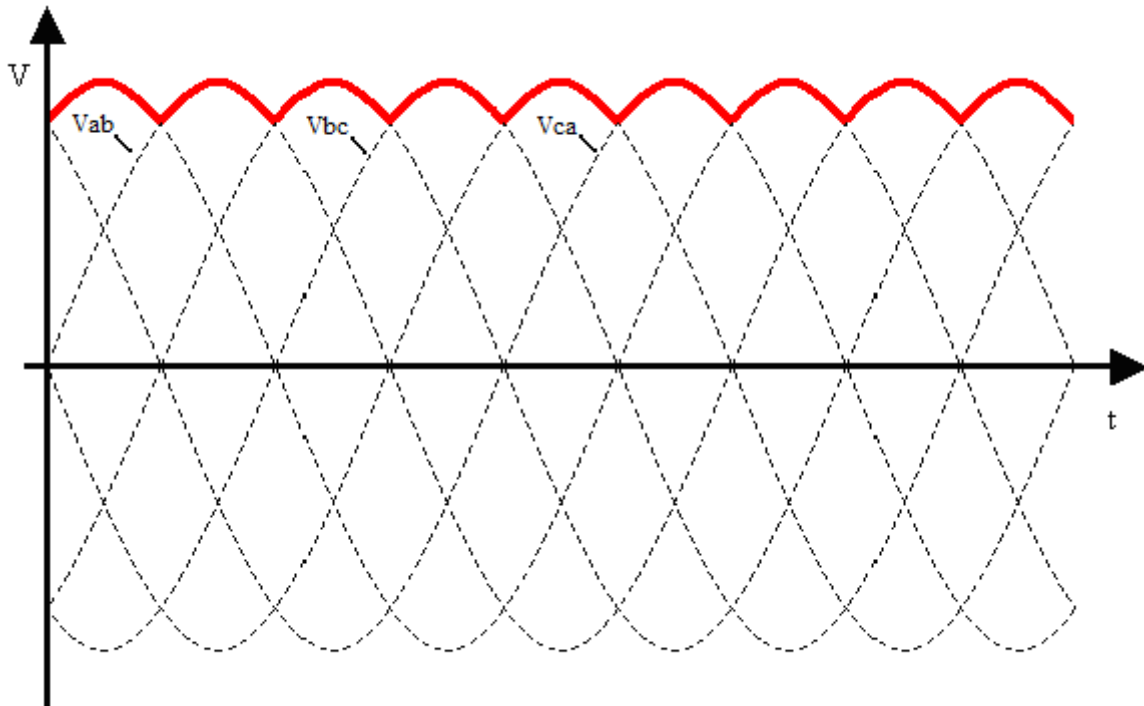
$2L_s$ = kommutointipiirin induktanssi

I_d = suuntaajan tasavirta ja

V_{LL} = verkon pääjännite.

Kuvaan 21 on merkitty katkoviivoilla verkon pääjännitteet ja punaisella yhtenäisellä viivalla on merkitty edellä mainitun 6-pulssisillan muodostama välipiirin DC-jännite, kun kommutointikulma on nolla.

Diodisilta on verkkokommutoiva eli se mukautuu automaattisesti esimerkiksi generaattorin pyörimisnopeusmuutoksiin. Diodisillalla ei voida säätää tasajännitteen suuruutta ja virta voi kulkea ainoastaan yhteen suuntaan, jolloin silta toimii yhdessä virta-jännite-tason neljänneksessä. Tällöin puhutaan diodisillan osalta 1-kvadranttikäytöstä. Diodisilta ei kuluta ohjausloistehoa, mutta kuluttaa kommutointiloistehoa [8].



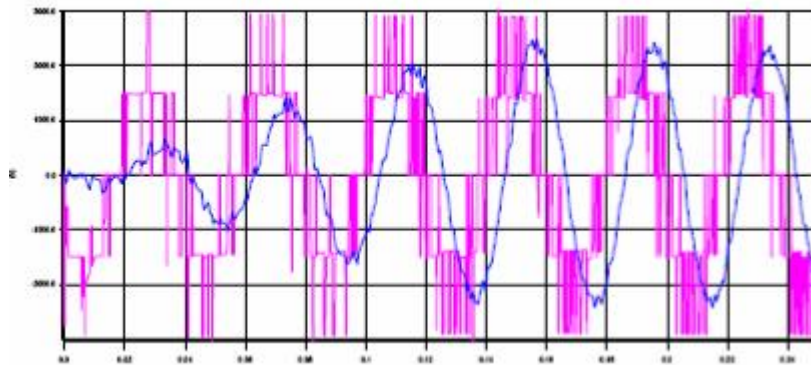
Kuva 21. Kolmivaiheisen dioditasasuuntaajan muodostama välipiirin jännite punaisella ja verkon pääjännitteet katkoviivoilla, kun kommutointikulma on nolla.

Pakko-ohjattujen puolijohteiden kytkentätila määräytyy hilalle annettavasta virta- tai jännitepulsseista (self-commutation: fully-controlled devices, self-commutated devices). GTO-komponentteja ohjataan hilalle tuotavalla virtapulsilla ja IGBT-, MOSFET- sekä IGCT-komponentteja hilalle tuotavalla jännitepulsilla. Pakko-ohjatut komponentit voidaan sytyttää ja sammuttaa verkon vaihejännitteistä tai muista verkon hetkellisistä ominaisuuksista riippumatta. Pakko-ohjattuja kytkimiä käyttämällä silta on siis täysin ohjattavissa, mikä tarkoittaa, että jännitteen ja virran suuruutta ja suuntaa sekä jännitteen ja virran välistä vaihekulmaa voidaan ohjata muuttamalla puolijohdekytkinten sytytys- ja sammutusajankohtia. Tällöin pätö- ja loistehon suuruutta ja suuntaa voidaan ohjata vapaasti, jos muu käyttö sen sallii. Silta toimii neljässä virta-jännite-kvadrantissa, jolloin kyseessä on 4-kvadranttikäyttö.

Kvadranttien akseleita voivat muodostaa myös koneen vääntömomentti ja kierrosnopeus, katso esim. kuva 4 sivulla 14. Pakko-ohjatuilla kytkimillä varustettu silta ei tarvitse kommutointi- tai ohjausloistehoa. Kytkinkomponenttien kytkentäajankohdat täytyy mukauttaa vaihtojännitepuolen taajuusvaihteluihin. Pakko-ohjattujen kytkimien rinnalle asennetaan vastarinnankytketyt diodit, jotka mahdollistavat osaltaan virran kulun toimittaessa ykkösestä poikkeavalla tehokertoimella. Pakko-ohjatuilla komponenteilla ei esiinny kommutoinnista johtuvaa tasajännitteen pienenemistä [8].

Kun suuntaajasilta toimii neljässä kvadrantissa, silta voi tasasuuntauksen lisäksi toimia vaihtosuuntaajana (invertterinä) kumpaankin tehon virtaussuuntaan. Seuraavassa tarkastellaan 2-tasoisien vaihtosuuntaajien lisäksi 3-tasoisia vaihtosuuntaajaa. Tasot viittaavat tässä taajuusmuuttajan välipiirin tasajännitteen potentiaalien lukumäärään. Kaksitasoisessa jännitevälipiirillisessä taajuusmuuttajassa vaiheen lähtöjännite voidaan kytkeä tasajännitepiiriin $+U_{dc}$ - tai $-U_{dc}$ -kiskoon. Kolmitasoisessa taajuusmuuttajassa vaihtoehtoja on kolme: tasajännitepiiriin $+U_{dc}$ - tai $-U_{dc}$ -kiskoon sekä ns. nollassoon, viisitasoisia vaihtoehtoja on viisi jne.

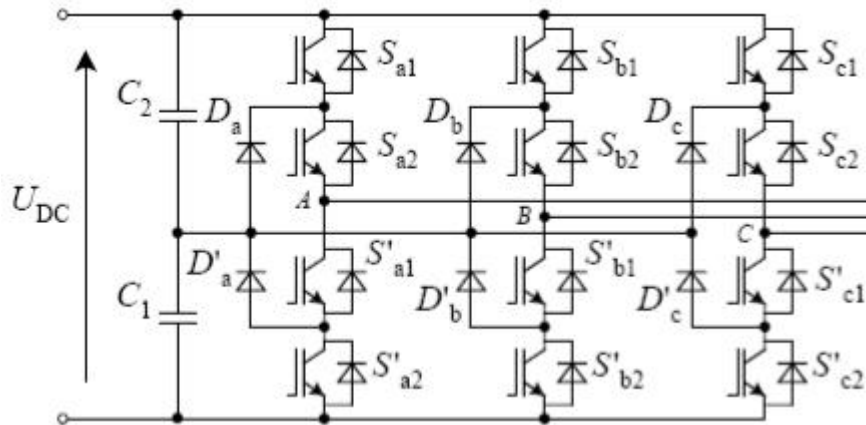
KytKentä tasajännitepiirin $+U_{dc}$ -, $-U_{dc}$ -kiskoon ja nollasson välillä tapahtuu kytKinkomponentista riippuen usein noin 500–2000 Hz taajuudella. KytKentätaajuus ei ole vakio, vaan se mitoitetaan täyttämään vaatimukset häviöiden sekä sähkön laadun suhteen. Kuvassa 22 on esitetty vaihejännitteen ja -virran periaatteelliset käyrämuodot kolmitasoinvertterin ($+U_{dc}$, 0 ja $-U_{dc}$) tapauksessa vaihtosuuntaajan käynnistyshetkellä. Pulssimaisesta vaihejännitteestä huolimatta vaihevirta käyttäytyy melko rauhallisesti.



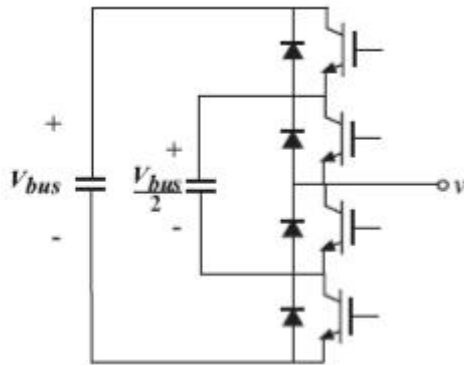
Kuva 22. Kolmitasoisien vaihtosuuntaajan yhden vaiheen ulostulon virran ja jännitteiden periaatteelliset käyrämuodot vaihtosuuntaajan käynnistyshetkellä [51].

Monitasoisessa vaihtosuuntaajassa jaetaan, kuten edellä on mainittu välipiirin tasajännite vähintään kahteen yhtä suureen osaan (osajännitteeseen). Tällä menettelyllä vaihtosuuntaajan antojännitteen laatua voidaan parantaa, koska käytettävissä on nyt pulssinleveysmodulaation (PWM) lisäksi amplitudimodulaation (AM, Amplitude Modulation) mahdollisuus. SarjakytKentöjen avulla lähdön kokonaisjännite saadaan hyvin suureksi, vaikka yksittäisten puolijohdekomponenttien jänniterasitus jää osajännitteen suuruusluokkaan.

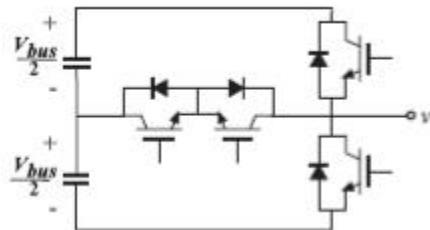
Monitasoinverttereiden tasajännitteen jako yksisuuntaisessa tehonsyötössä voidaan suorittaa mm. NPC- (Neutral Point Clamped), VIENNA-, Sepic- tai Cuk-topologioilla. Kaksisuuntaisessa tehonsyötössä käytettyjä topologioita ovat diodi- ja kondensaattorikytketyt topologiat, kaksisuuntainen kytKentä (Bi-directional switch interconnection) sekä H-silta -topologiat. Kuvassa 23 on kolmitasoinen diodikiinnitetty topologia, kuvassa 24 yksi vaihe kolmitasoisesta kondensaattorikiinnitetystä topologiasta, kuvassa 25 yksi vaihe kolmitasoisesta kaksisuuntaisen kytkimen topologiasta ja kuvassa 26 yksi vaihe seitsemäntasoisesta H-siltakytkennän topologiasta.



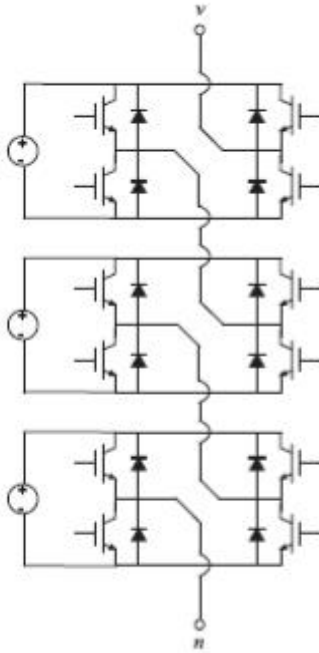
Kuva 23. Kolmitasoinen diodikiinnitetty topologia [52].



Kuva 24. Yksi vaihe kolmitasoisesta kondensaattoriikiinnitetystä topologiasta [55].



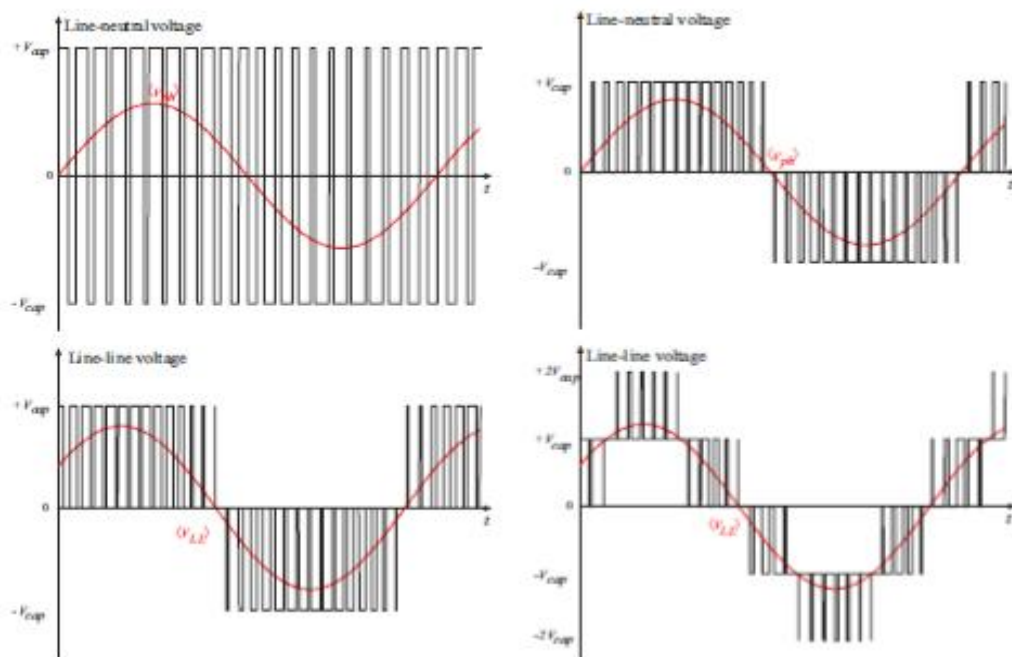
Kuva 25. Yksi vaihe kolmitasoisien kaksisuuntaisen kytkennän topologiasta [55].



Kuva 26. Yksi vaihe seitsemäntasoisesta H-silta –topologiasta [55].

Vertailuna kolmesta erilaisesta toteutustavasta: diodikytkentäiset (Diode Clamped), kelluvakondensaattoriset (Flying Capacitor) ja kaskadikytkentäiset H-sillat (Cascaded H-bridge) todettakoon, että diodikytkentäinen laji vaatii monta diodia, kelluvien kondensaattoreiden laji monia erillisiä kondensattoreita ja kaskadikytkentäiset H-sillat vaativat monta toisistaan eristettyä tasajännitelähdettä.

Lähteen [53] mukaan paras monitasoinvertteri tuulivoimasovelluksiin on diodikytketty topologia [54], [55]. Kuvassa 27 on vertailtu kaksi- ja kolmitasoisien vaihtosuuntaajan vaihe- ja pääjännitteiden periaatteellista muodostumista. Yhtenäinen käyrä kuvaa vastaavia vaihe- ja pääjännitteiden perusaaltoa.



Kuva 27. Kaksi- ja kolmitasoisien vaihtosuuntaajan vaihe- ja pääjännitteen muodostuminen. Yhtenäinen käyrä kuvaa jännitteiden perusaaltoa [55].

Monitasoinverttereillä voidaan saavuttaa pienempien jännitemuutosten johdosta pienemmät jännitteen muutosnopeudet (du/dt), pienemmät kytkentähäviöt, pienemmät yliaallot ja pienemmät suodatinkomponentit kuin kaksitasoinvertterissä. Huonoina puolina monitasoinverttereissä ovat ohjauksen ja tasajännitepuolen kytkentöjen monimutkaisuus sekä ongelmat tasajännitteen tasaisesta jakamisesta komponenttien yli. Monitasoisissa inverttereissä tarvitaan enemmän kytkinkomponentteja, mutta kytkinkomponenttien kokonaiskustannukset eivät nouse suuremmaksi kuin kaksitasoinvertterissä, koska yksittäiset kytkinkomponentit voidaan mitoittaa pienemmälle jännitekestoisuudelle [55].

Samalla kytkentätaajuudella kolmitasoinvertterillä voidaan saavuttaa pienemmät yliaallot ja vähintään sama hyötysuhde kuin kaksitasoinvertterillä, vaikka tarvittava kytkinkomponenttien määrä on suurempi. Tämä johtuu siitä, että kolmitasoinvertterissä tarvittava kytkimien jännitekestoisuus on pienempi sarjaan kytkennän johdosta, mikä puolestaan tekee kytkimistä nopeampia ja pienihäviöisempiä kuin saman jännitetason omaavien kaksitasoinvertterien, jännitekestoisuudeltaan suurempien, kytkimien [48].

Taajuusmuuttajan syöttämä pätö- ja loisteho pääosin induktiivisessa verkossa ($X \gg R$) perustuu vastaaviin tahtikoneiden tehoyhtälöihin (7) ja (8).

$$P = \frac{V_i V_b}{X} \sin \delta \quad (7)$$

$$Q = \frac{V_i^2}{X} - \frac{V_i V_b}{X} \cos \delta \quad (8)$$

missä P = verkkoon syötetty pätöteho

Q = verkkoon syötetty loisteho

V_i = solmupisteen 1 jännite

V_b = solmupisteen 2 jännite

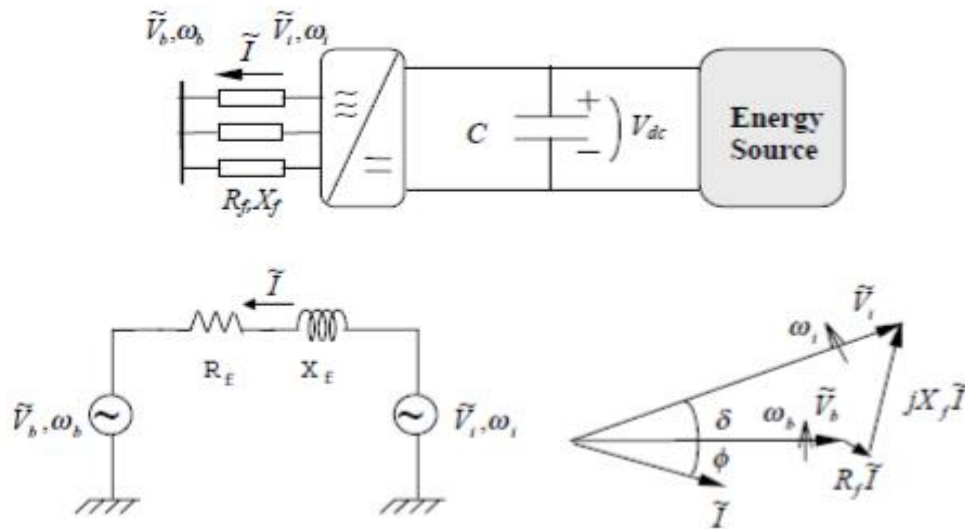
X = verkon reaktanssi

R = verkon resistanssi

δ = solmupisteiden välinen tehokulma.

Kuvassa 28 on periaatekuva vaihtosuuntaajasta, sijaiskytkennästä ja sitä vastaavasta osoitinpiirroksesta.

Yhtälöt (7) ja (8) ja kuvan 28 sijaiskytkentä pätevät jatkuvassa tilanteessa, nopeissa muutostilanteissa pysyvän tilan osoittimiin perustuvat tehoyhtälöt eivät ole voimassa.



Kuva 28. Vaihtosuuntaajan periaatekuva, sijaiskytkentä ja osoitinpiirros [56].

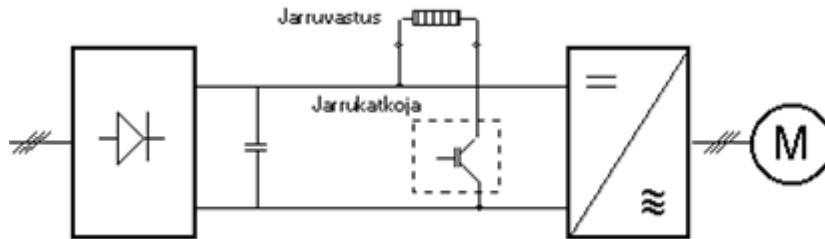
5.1.2.1 Kaksoissyötetty voimala

Kaksoissyötetyn voimalan generaattorin ja verkon puoleisen taajuusmuuttajan kytkinkomponentit on oltava pakko-ohjattuja, jotta epätahtikone pystyy toimimaan ali- ja ylisynkronisella pyörimisnopeudella generaattorina sekä säätämään verkkoon syötettyä pätö- ja loistehoa toisistaan riippumatta.

Loistehon suuruutta ja suuntaa voidaan säätää voimalan toimintapisteestä riippumatta, kunhan taajuusmuuttajan näennäisteho ei ylitetä. Taajuusmuuttajan näennäisteho on mitoituskysymys ja se riippuu osaltaan verkkoyhtiön vaatimuksista paljonko voimalalta edellytetään jännitteen tukemista esimerkiksi verkon vikatilanteissa. ABB:n taajuusmuuttajien nimellisen tehokertoimen arvo mitoitetaan usein välille 0,9 ind – 0,9 kap [57].

5.1.2.2 Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala

Generaattorin puoleisessa sillassa voidaan käyttää ohjaamattomia tai ohjattuja puolijohdekomponentteja. Verkkosuuntaajassa voidaan periaatteessa käyttää tyristoreita, mutta käytännössä IGBT-komponentit ovat käytetyin vaihtoehto. Taajuusmuuttajan läpi syötetään koko generaattorin tuottama teho. Häviöttömässä tilanteessa välipiirin jännite nousee, jos generaattorilta tasajännitepuolen välipiiriin syötetään enemmän tehoa kuin vaihtosuuntausyksikkö syöttää verkkoon päin. Päinvastaisessa tilanteessa välipiirin jännite laskee. Jarrukatkojan toiminnalla estetään välipiirin jännitettä nousemasta liian korkeaksi ohjaamalla ylimääräinen teho välijännitepiirissä sijaitsevaan vastukseen esimerkiksi verkon vikatilanteissa. Jarruvastuksen käyttö on eräs dynaaminen sähkökoneen jarrutusmuoto. Kuvassa 29 on esitetty jarrukatkojan sijainti moottorikäytössä. Periaate generaattorikäytössä on sama.



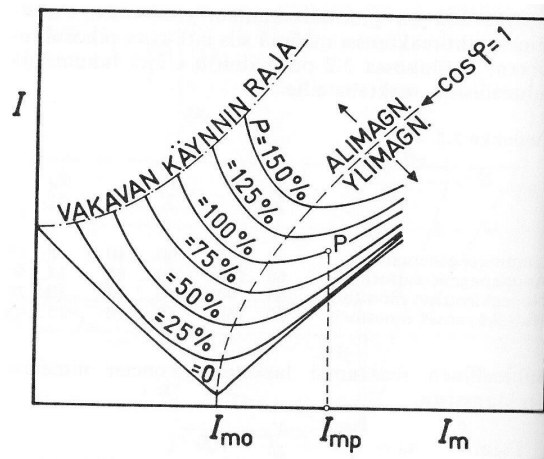
Kuva 29. Jarrukatkojan sijainti moottorikäytössä [58].

Loistehon suunta ja suurus on ohjattavissa, jolloin silta voi toimia sekä kapasitiivisella että induktiivisella tehokertoimella sähköverkon suuntaan. Syötettävän loistehon suuruutta rajoittaa välipiirin tasajännitteen suuruus verrattuna verkon puoleiseen jännitteeseen sekä kytkimien sallitut virtarajat yhdessä tuotetun pätötehon kanssa. Loistehon syötön rajoitukseksi pienentämiseksi tasajännitepiiriin voidaan lisätä jännitettä nostava hakkuri, jos generaattorin puolella on käytössä diodisilta. IGBT-komponenteilla tasajännitteen suuruutta voidaan ohjata halutuksi pyörimisnopeudesta riippumatta. ABB:n taajuusmuuttajien nimellisen tehokertoimen arvo mitoitetaan taajuusmuuttajan tyypistä ja tehosta riippuen välille 0,7 – 0,97 ind./kap. [57], [59].

Kestomagneettimagnetoidun tahtikoneen ja täystehotaajuusmuuttajan yhdistelmässä voidaan generaattoripuolen muuttajana käyttää diodisiltaa. Kestomagneeteilla magnetoitu generaattori ei vaadi magnetointia muuttajalta, joten ohjaamaton ja edullisempi diodisilta soveltuu suuntaajaksi. Generaattorin puoleisen diodisillan ja verkon puoleisen IGBT-sillan yhdistelmää kutsutaan lähteen [8] mukaan 2-kvadrantiseksi muuttajaksi. Tätä konseptia käytettiin täystehotaajuusmuuttajavoimaloiden alkuaikoina.

Verkon puoleisen invertterin, kuten epätahtikonesovelluksessa generaattoripuolen muuttajankin, tulee olla pakko-ohjattuja (eli kyseessä on tällöin 4-kvandanttinen muuttaja). 4-kvandanttisella taajuusmuuttajalla kuitenkin toteutuu koko järjestelmän optimi, myös kestomagneettigeneraattorin tapauksessa, koska kone voidaan suunnitella alimagnetoiduksi ylimagnetoidun sijaan, mikä pienentää koneen kokoa ja vähentää magneettisen materiaalin tarvetta. 4Q-taajuusmuuttajalla saavutetaan lisäksi pienemmät virran ja vääntömomentin yliaallot generaattorin suuntaan kuin 2Q-taajuusmuuttajalla [8].

Magnetointia pienennettäessä tahtigeneraattori ottaa puuttuvan magnetointitehon verkosta. Verkosta otettava magnetoimisteho vastaa generaattorissa kapasitiivista loisvirtaa. Koska generaattorin pätöteho komponentti pysyy vakiona magnetointia muutettaessa, voidaan magnetointia pienentää vain määrättyyn rajaan asti, jonka jälkeen kone ei enää kykene kehittämään akseliväännön edellyttämää sähkövääntömomenttia. Rajan ylitys merkitsee tahtikäynnin häiriintymistä ja koneen rinnankäytöstä putoamista. Tahtigeneraattorin ylimagnetoinnissa kone antaa verkkoon induktiivista loisvirtaa. Kuvaan 30 on piirretty tahtikoneen staattorivirta erilaisilla pätötehoilla magnetoimisvirran funktiona, jolloin saadaan tahtikoneen ns. V-käyrät. V-käyrät kuvaavat, miten magnetoimisvirtaa I_m on muutettava, jos tahtikoneen pätötehon kasvaessa halutaan säilyttää tietty tehokerroin.



Kuva 30. Tahtikoneen V-käyrät [60].

V-käyrästä nähdään, että nimellispätötehon lähellä toimittaessa, koneen magnetointia I_m ei ole juuri varaa pienentää nimellismagnetointia I_{m0} pienemmäksi, ettei jouduta koneen vakavan käynnin rajan yli. Koneen jokaista kuormitustilaa vastaa määrätty magnetoimisvirta I_m . Alimagnetointi heikentää tahtigeneraattorin stabiilisuutta, koska generaattorin magnetoinnin pienentäminen kasvattaa vastaavasti napakulmaa pätötehon ollessa vakiona. Tällöin verkon vikatilanteissa generaattorin napakulman heilahteluvara on pieni. Stabiilein toiminta-alue tältä osin on, kun generaattori on ylimagnetoitu. Magnetointia ei voida kuitenkaan kasvattaa liian suureksi johtuen roottoriin lämpenemisestä.

5.1.2.3 Hajautetun tuotannon yksiköt

Polttokennojen, aurinkokennojen ja akkujen tasajännitteet muutetaan vaihtojännitteiksi vaihtosuuntaajan avulla. Vaihtosuuntaajien perusratkaisut on esitetty edellä. Joissakin tapauksissa saatetaan tarvita tasajännitteen vakauttamiseksi hakkuri ennen vaihtosuuntausta.

Mikroturbiinit ja muut pyörivät koneet liitetään generaattoreihin liike-energian muuttamiseksi sähköksi. Mikroturbiineihin liitettyjen generaattoreiden suuri kierrosnopeus merkitsee sitä, että generaattorin ja verkon väliin tarvitaan taajuusmuuttaja, jos teho halutaan syöttää verkkoon.

5.1.3 Taajuusmuuttajien rakenne ja komponentit

Tuulivoimasovelluksiin käytetyt taajuusmuuttajat poikkeavat standardikokoisista taajuusmuuttajista johtuen käyttökohteen tilan ahtaudesta. Taajuusmuuttajat suunnitellaankin voimalakohtaisesti, jotta tekniset, turvallisuus- ym. määräykset täyttyvät. Taajuusmuuttaja rakennetaan tyypillisesti yhtenäiseen kaappirivistöön, jotka koostuvat yksittäisistä, toisiinsa liitettyistä moduuleista. Kuvasta 31 nähdään ABB:n kolmitasoisien 2 MW:n taajuusmuuttaja tuulivoimasovelluksiin etupuolelta kuvattuna. Taajuusmuuttajan ulkomitat ovat 2,35 m x 3,4 m x 1 m (korkeus x pituus x syvyys).



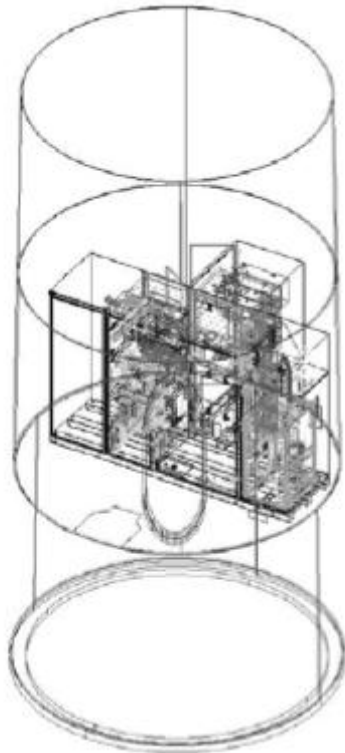
Kuva 31. ABB:n 2 MW:n taajuusmuuttajayksikkö [8].

Kuva 31 taajuusmuuttaja sisältää vasemman puoleisesta moduulista lähtien ohjausyksikön, tasasähkölinkin yhdessä dv/dt-suodattimien kanssa ja generaattorin kaapelipäätteet, tasa- ja vaihtosuuntaajan sekä vesijäähdytysyksikön. Kuvasta 32 nähdään tasa- ja vaihtosuuntausyksikön moduuli avattuna. Kytinkomponentteina ovat IGCT:t.



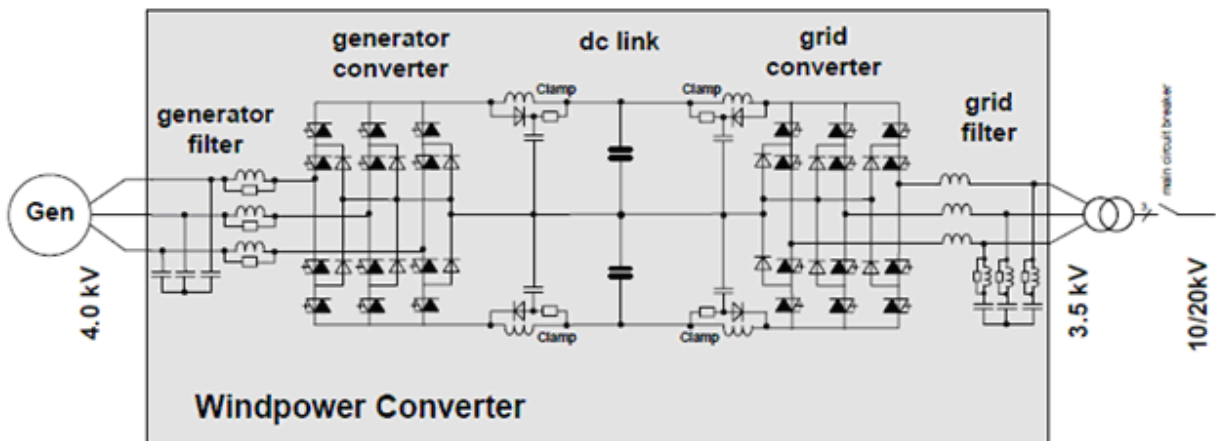
Kuva 32. Kuvan 31 taajuusmuuttajayksikön tasa- ja vaihtosuuntausosa [8].

Kuvasta 33 nähdään esimerkki miten ABB:n taajuusmuuttajayksikkö voi olla sijoitettu tuulivoimalan torniin.



Kuva 33. Taajuusmuuttajayksikön sijainti tuulivoimalan tornissa [8].

Kuvassa 34 on esitetty kuvan 31 kolmitasoisien IGCT-komponenteilla varustetun taajuusmuuttajan piirikaavio. Generaattorin ja tasasuuntaajan välissä ovat du/dt-suodattimet. Tasajännitteen jako on toteutettu diodeilla ja kahdella kondensaattorilla. Kyseessä on siis diodikiinnitetty topologia. Vaihtosuuntaajan ja muuntajan välillä on LC-suodattimet.



Kuva 34. Kolmitasoisien taajuusmuuttajan peruskyskentä [8].

Kuvassa 35 on ABB:n ACS1000-sarjan 4,16 kV ja 1,2 MW taajuusmuuttaja.



Kuva 35. ABB:n 1,2 MW:n taajuusmuuttaja [61].

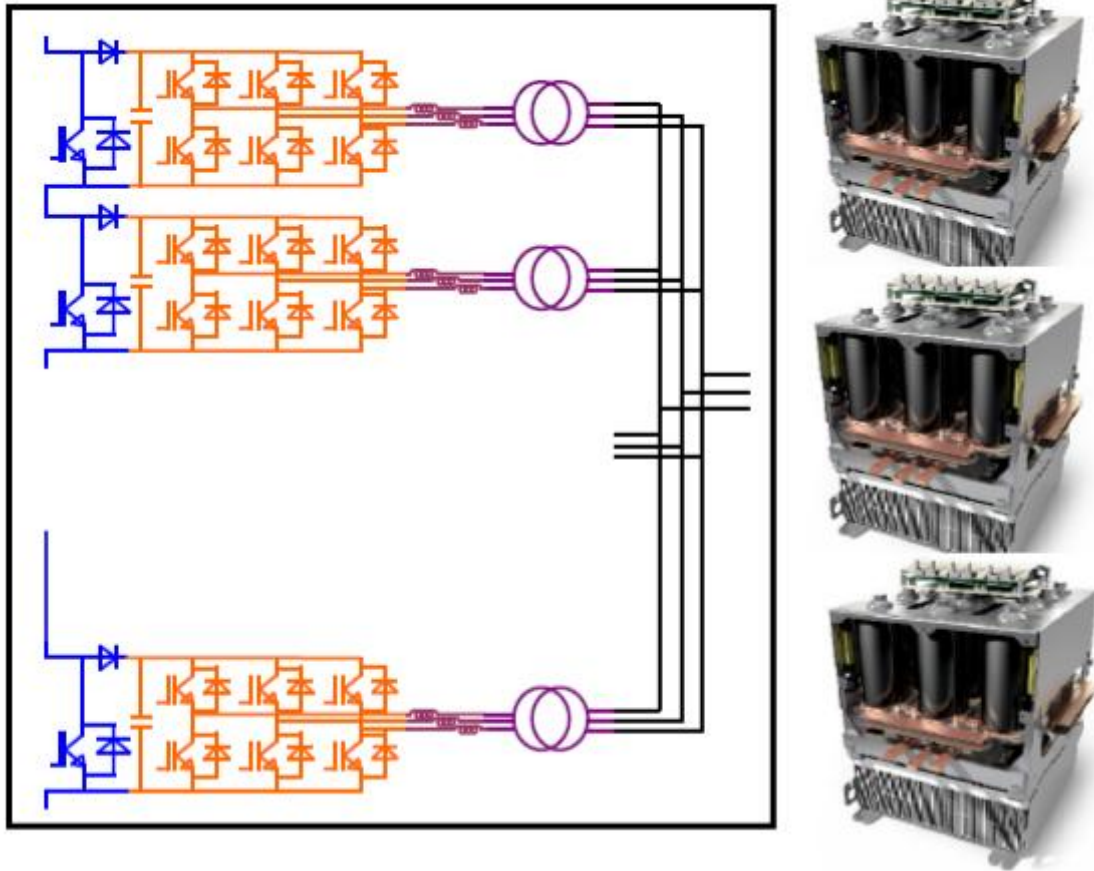
Kuvassa 36 on puolijohdevalmistajan Semikronin 1,5 MVA 4Q-taajuusmuuttaja.



Kuva 36. Semikronin 1,5 MVA 4Q-taajuusmuuttaja [62].

Dioditasasuuntaajalla ja IGBT-vaihtosuuntaajalla varustetussa täysteho-taajuusmuuttajan takana olevassa voimalassa riittää tyypillisesti yksi tasasuuntausmoduuli ja sitten tarvitaan useita rinnakkaisia vaihtosuuntausmoduuleja.

Kuvassa 37 esitetään tällainen periaatteellinen konsepti ja fyysiset vaihtosuuntausyksiköt Semikron-puolijohdevalmistajalta.



Kuva 37. Semikronin vaihtosuuntaajamoduulien periaatteellinen kytkentä ja fyysiset vaihtosuuntausyksiköt [62].

Tyypillisesti kaksitasoisissa yksittäisissä moduuleissa ei tarvita useamman puolijohdekomponentin sarjaan- tai rinnankytkentöjä jännite- tai virtakestoisuuden turvaamiseksi. Kuvassa 38 on ABB:n IGBT-komponentti, jonka mitoitusarvot ovat 1,7 kV ja 800 A.



Kuva 38. ABB:n 1,7 kV ja 800 A IGBT-komponentti [63].

Jännitteeltään 600 V IGBT-komponenttien suurin kytkentätaajuus on noin 30 kHz ja 1200 V komponenttien suurin kytkentätaajuus on noin 20 kHz.. Tyypillisen IGBT:n toiminta-arvot ovat 1200 V ja 400 A. ABB:n tuotteissa jännitealue ulottuu 6,5 kV

asti standardiluokissa. Sytytysaika on $0,4 \mu\text{s}$, sammutusaika $0,8 \mu\text{s}$ ja jännitehäviö johtotilassa 4 V. IGBT-komponenttien tarvitsema ohjausteho on pieni. Kuvassa 39 on esitetty ABB:n 3,3 kV ja 1,2 kA IGBT-komponentin anodijännitteen ja -virran sekä hilajännitteen käyrämuotoja ajan funktiona, kun komponentti ohjataan johtamattomaan tilaan. Käytetyimmät kytkimet kaksoissyötettyjen voimaloiden kaksitasosovelluksissa ovat IGBT:t.

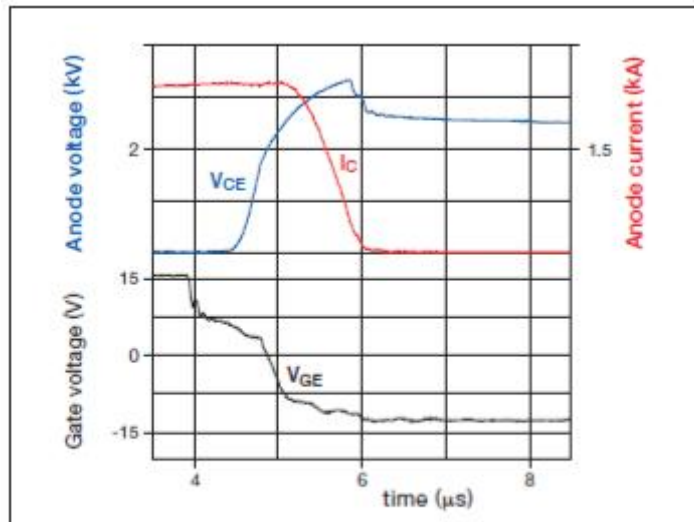
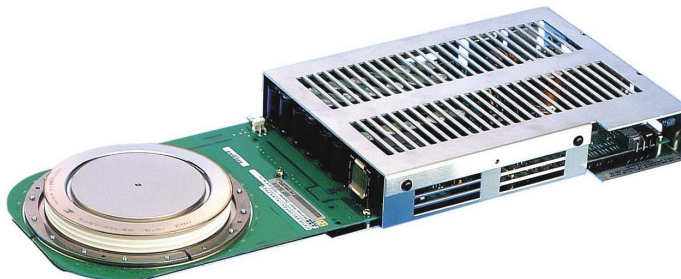


Fig.1 3300V/1200A HiPak IGBT RBSOA switching characteristics during turn-off at $V_{CC} = 2500\text{V}$, $I_C = 2400\text{A}$, $R_{G\text{ OFF}} = 1.5\Omega$, $L_G = 170\text{nH}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$, no clamps

Kuva 39. IGBT:n virta- ja jännitekäyriä komponentin sammutushetkessä [63].

IGCT-komponenttien kytkentätaajuus on tyypillisesti 500 Hz, jopa 1000 Hz. Kytkentätaajuutta on tästä mahdollista nostaa merkittävästi, jopa 40 kHz:iin, kunhan häviöteho saadaan johdetuksi ulos ja komponentin lämpötila pystytään pitämään sallitussa rajoissa. IGCT-komponenttien ohjausteho vaihtelee 10 – 100 W välillä. Keskikokoisilla GTO-komponenteilla maksimikytkentätaajuus on 3 kHz ja suurilla 1 kHz. Maksimijännitealue GTO-kytkimillä ulottuu 6 kV ja asti ja virta-alue 3 kA asti. Kuvassa 40 on ABB:n 4,5 kV ja 2,2 kA IGCT-komponentti.



Kuva 40. ABB:n 4,5 kV ja 2,2 kA IGCT-komponentti [64].

Generaattorin puoleisen sillan kytkiminä käytetään tyypillisimmin IGBT-komponentteja, mutta esimerkiksi joissakin Enerconin taajuusmuuttajissa käytetään diodeja. Vaihtosuuntausyksikössä käytetään tällä hetkellä lähinnä IGBT-kytkimiä. Myös tyristori- ja GTO-kytkimet ovat mahdollisia, mutta niitä ei ole yleisesti käytetty.

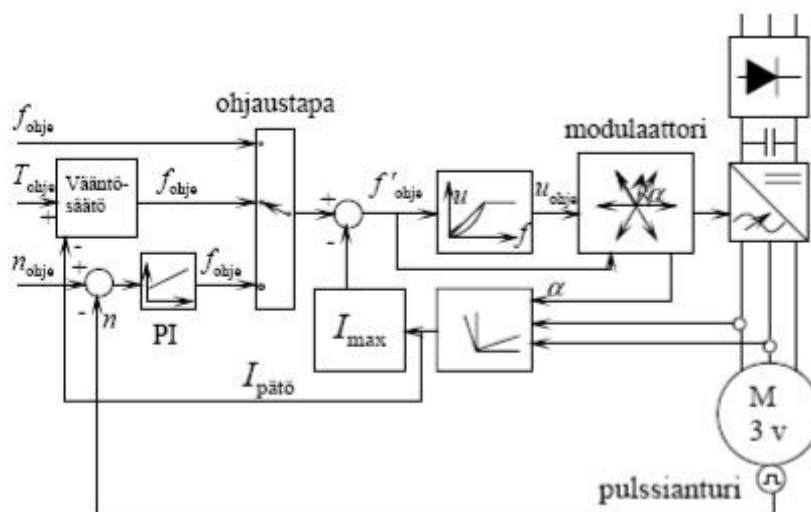
5.2 Sääto- ja ohjausmenetelmät

5.2.1 Yleistä sääto- ja ohjausmenetelmistä

Taajuusmuuttajien ohjaukseen, eli puolijohdekomponenttien sytytyksen ja sammutuksen ohjaukseen, soveltuvia menetelmiä ovat skalaari-, vektori-, ja suora vääntömomenttisääto. Skalaari- ja vektorisäädössä käytetään tyypillisesti pulssinleveysmodulointitekniikkaa, jolloin tarvitaan modulaattoria. Parhailla vektorisäädöillä päästään nykyään tasasähkökäyttöjen suoritusarvoihin, jolloin vasteaika on noin 10 - 20 ms. Suora vääntömomenttisääto perustuu osaltaan hystereesisäätöön, jolloin muutostilanteissa pyritään mahdollisimman nopeisiin vasteaikoihin. Suorassa vääntömomenttisäädössä ei tarvita modulaattoria, mikä tekee säädöstä erittäin nopean. Käytön vasteaika suorassa vääntömomenttisäädössä on noin 1-2 ms, eli kymmenesosa parhaista vektorisäädöistä [65].

Skalaariohjauksessa (Scalar Control) muutetaan koneelle syötettyä jännitteen amplitudia taajuuteen verrannollisena ja mitataan tyypillisesti kaksi moottorin vaihevirtaa. Ohjaus perustuu moottorin staattisen tilan tuntemiseen. Skalaariohjauksessa käytetään tyypillisesti perinteistä SPWM-modulaatiomenetelmää (Sinusoidal Pulse Width Modulation), jossa 3-vaihesovelluksissa modulaattori vertailee yhteistä suuritaajuista kolmioaaltoa kolmeen, keskenään 120 asteen vaihesiirrossa olevaan siniaaltoon ja muodostaa näistä ohjeet kytkimille. Skalaariohjausta ja sen eri sovelluksia (esimerkiksi IR-kompensoitu käyttö) käytetään lähinnä oikosulkumoottorikäytöissä, joissa käytön dynamiikalta ei vaadita korkeita suoritusarvoja. Sellaisia ovat esimerkiksi pumppu- ja puhallinkäytöt.

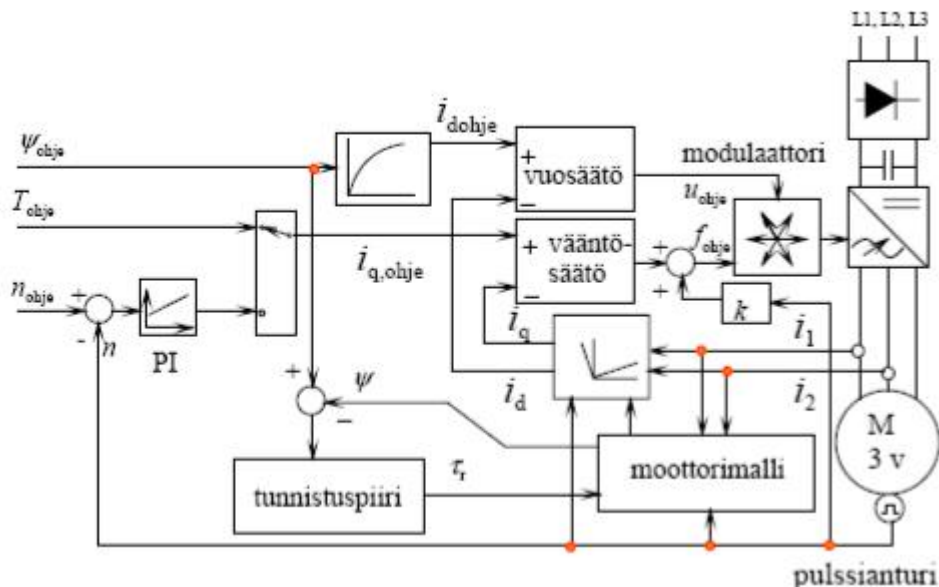
Skalaarisääto saadaan, kun käyttöön lisätään takaisinkytkentä koneen nopeudesta, jolloin koneen pyörimisnopeutta tai vääntömomenttia voidaan säätää. Skalaariohjausta tai -säätoa ei käytetä tuulivoima- tai muussa hajautetussa tuotannossa. Kuvassa 41 on skalaarisäätöisen moottorin lohkokaavioesimerkki.



Kuva 41. Skalaarisäätöisen moottorin lohkokaavio [48].

Vektorisäädössä (FOC, Field Orientated Control) pyritään erottamaan koneen käämivuota ja vääntömomenttia muodostavat staattorin virtakomponentit ja säätämään näitä erikseen, jolloin päästään parempaan dynaamiseen vasteeseen kuin

skalaarisäädössä. Toisin kuin skalaarisäädössä, niin vektorisäädössä konetta pyritään ohjaamaan oikein myös muutostilanteissa. Vektorisäädössä tarvitaan koneen staattorin puolen vaihevirtojen ja usein tarvitaan myös koneen asennon tarkkaa mittausta, jolloin takometrin käyttö tai muu tieto koneen nopeudesta on välttämätöntä. Sovelluksia on myös ilman nopeuden tai asennon takaisinkytkentää, jolloin pyörimisnopeus estimoidaan muista mitatuista suureista [48]. Kolmas vaihevirta lasketaan kahden muun vaihevirran avulla. Myös välipiirin jännitteen mittausta tarvitaan sekä tiedot kytkinkomponenttien tilasta. Mitatut staattorin vaihevirrat muunnetaan kaksivaihetasoon ja käytetään koneesta muodostettua kaksiakselimallia avaruusvektoriteorian (Space Vector Theory) mukaisesti, jossa virran pitkittäinen komponentti (d-komponentti) määrää käämivuon oloarvon ja poikittainen virtakomponentti (q-komponentti) määrää puolestaan vääntömomentin oloarvon. Skalaariohjauksen tavoin vektorisäätö tarvitsee kytkinkomponenttien ohjaukseen modulaattoria. Modulointimenetelmänä käytetään tyypillisesti avaruusvektorimodulointia (SVM, Space Vector Modulation), missä kytkinkomponentteja ohjaava vektori pyörii kaksivaihetasossa kiinnitettynä johonkin valittuun käämivuohon tai roottorin nopeuteen. Kuvassa 42 on vektorisäätöisen moottorin lohkokaavioesimerkki.



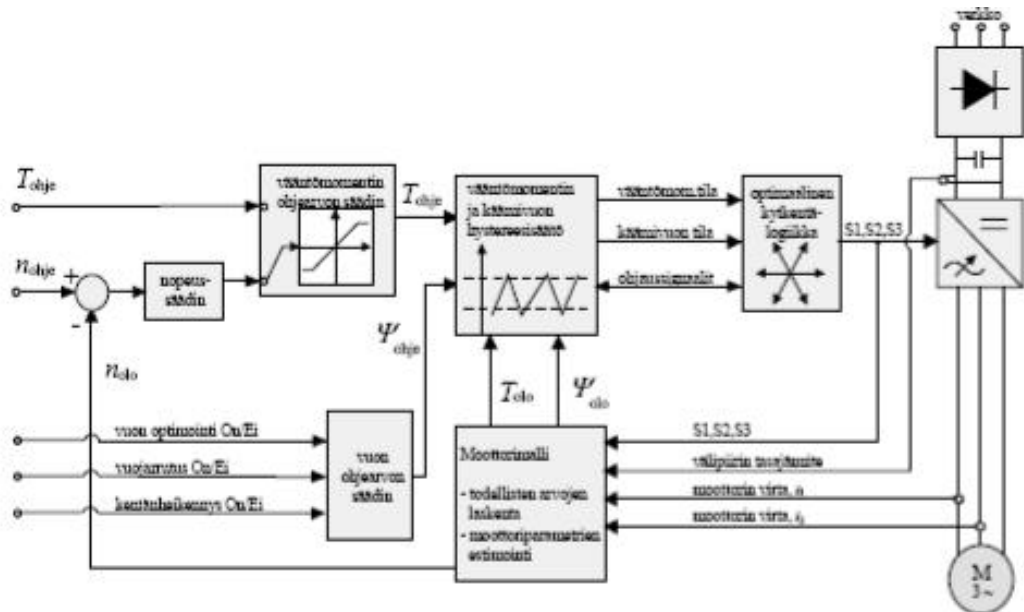
Kuva 42. Vektorisäätöisen moottorin lohkokaavioesimerkki [48].

Vektorisäätö on tyypillinen säätö kaksoissyötetyissä ja täysehotaajuusmuuttajalla varustetuissa tuulivoimasovelluksissa. Useat taajuusmuuttajavalmistajat käyttävät jotain vektorisäätömenetelmää tuotteissaan [48]. Vektorisäätöä tuotteissaan käyttävät ainakin seuraavat tuulivoimavalmistajat: GE Energy, Repower, Nordex, Gamesa.

Saksalainen Manfred Debenbrock ja japanilaiset Takahashi ja Noguchi esittivät 1980-luvun puolivälissä Faradayn induktiolakiin perustuvan säätömenetelmän, jossa integroidaan staattorijännitettä staattorikäämivuon määrittämiseksi. ABB on siitä edelleen kehittänyt tätä säätömenetelmää ja patentoinut sen **suoraksi vääntömomenttisäädöksi** (Direct Torque Control) [6]. ABB siis käyttää ainoana taajuusmuuttajavalmistajana DTC-säätöä. Siinä käämivuota ja vääntömomenttia ohjataan suoraan ilman modulaattoria, jolloin säädön dynamiikka on erittäin nopea ja tarkka. Käämivuon ja vääntömomentin oloarvot saadaan moottorimallin avulla laskemalla ja näitä verrataan ohjarvoihin. Erosuuret viedään hystereesisäätäjälle, jonka perusteella optimaalinen kytkentälogiikka valitsee kulloiseenkin toimintatilaan

sopivimmat kytkentävektorit. Suorassa vääntömomenttisäädössä ei tarvita koneen asento- tai nopeusmittausta, vaan tyypillisesti mitataan koneen kaksi vaihevirtaa ja välipiirin jännite. Koneen nopeus lasketaan roottorikämmivuon derivaatasta, mutta säätö voidaan suorittaa kiinnittämällä koordinaatisto staattorisuureisiin. Käyttöön voidaan lisätä takaisinkytkentä koneen nopeudesta, jolloin säädön dynamiikka paranee entisestään [65]. Kuvassa 43 on DTC-säätöisen moottorin lohkokaavio-esimerkki.

Vektorisäätö on mahdollista toteuttaa staattorijännitteeseen, staattorikämmivuohon, roottorikämmivuohon tai roottorikoordinaatistoon kiinnitettynä. Roottorivirtoja on käytännössä mahdoton mitata ja roottorikämmivuon suora mittaaminen esim. Hallantureita käyttäen on usein hankalaa ja epävarmaa, minkä takia roottorivuota pyritään estimoimaan helpommin mitattavien suureiden avulla. Roottorikämmivuon estimointi voi perustua staattorin (jännitemalli) tai roottorin (virtamalli) jänniteyhtälöihin. Jos kämmivuon estimointi suoritetaan staattorikoordinaatistossa, niin puhutaan suorasta vuo-orientoinnista (DFOC, Direct Field Orientated Control). Jos estimointi suoritetaan vuon omassa koordinaatistossa, puhutaan epäsuorasta vuo-orientoinnista (IFOC, Indirect Field Orientated Control). Epätahtikoneen vektorisäätö toteutetaan tyypillisesti staattori- tai roottorikämmivuohon sidotussa koordinaatistossa. Tahtikoneen tapauksessa vektorisäätö toteutetaan useimmiten roottorikoordinaatistossa. [48], [66], [67]



Kuva 11.35 Suoran vääntömomenttisäädön (DTC) lohkokaavio. /5/

Kuva 43. DTC-säätöisen moottorin lohkokaavio [48].

Koneiden ja taajuusmuuttajien hetkellisiä päto- ja loistevoja mallinnettaessa tarvitaan koneiden sijaiskytkentöjen lisäksi useita koordinaattimuunnoksia. Pysyvässä kiinteässä koordinaatistossa tehtävä koordinaattimuunnos on 3-vaiheverkon suureiden a, b ja c muunnos esim. $\alpha\beta$ -koordinaatistoon (Clarke).

Malleja muodostettaessa tarpeellisia koordinaattimuunnoksia ovat:

- Clarken muunnos paikallaan pysyvässä koordinaatistossa ($abc \implies \alpha, \beta, 0$)
- Parkin muunnos paikallaan pysyvästä koordinaatistosta johonkin tahdistettuna pyörivään koordinaatistoon ($\alpha, \beta, 0 \implies d, q, 0$)
- edellisten muunnosten yhdistelmät ja näiden kaikkien käänteismuunnokset.

5.2.2 Kaksoissyötetty voimala (DFIG-käyttö)

Kaksoissyötetyllä generaattorilla varustetun voimalan säätö voidaan jakaa kahteen, toisistaan riippuvaan osaan. Nopeampi sähköinen säätö huolehtii taajuusmuuttajan syöttämästä pätö- ja loistehosta toisistaan riippumatta. Hitaampi tuuliturbiinin säätö pitää sisällään lapakulmasäädön ja taajuusmuuttajalle syötettävän pätötehon ohjearvon. Säädön peruserätyksinä normaalitilanteessa on maksimoida tuulesta saatava teho, rajoittamalla tehon tuotanto nimelliseen arvoon toimittaessa yli nimellistuulenopeuksilla ja säätää taajuusmuuttajan ja verkon välistä loistehon suuntaa ja suuruutta. Taajuusmuuttajan säätö on usein kaskadisäätö, jossa sisempi säätö on nopea virtasäätäjä ja ulompi säätö hitaampi pätö- ja loistehosäätö tai välijännitepiirin säätö.

Hitaampi tuuliturbiinin säätö antaa ohjekulma-arvon lapakulmasäädön toimielimelle sekä ohjepätötehon taajuusmuuttajan generaattorin puoleiselle sillalle. Ohjepätötehon arvo generaattorin puoleiselle sillalle saadaan ns. maximum power point trackerista (MPPT), jossa generaattorin pyörimisnopeudesta saadaan suoraan arvo pätöteholle. Taajuusmuuttajan roottorin puoleisen sillan ohjaus pyrkii pitämään roottorin pyörimisnopeuden ohjetehoa vastaavan suuruisena säätämällä roottorin vääntömomenttia vastaavaa virtakomponenttia. Loisteho puolestaan voidaan valita halutun suuruiseksi riippuen siitä, halutaanko taajuusmuuttajan syöttävän osan generaattorin tarvitsemasta loistehosta. Verkon puoleisen sillan ohjauksen tavoitteena useimmiten on pitää tasajännitteen suuruus ohjearvossaan riippumatta generaattorin toimintapisteestä sekä säätää taajuusmuuttajan ja verkon välinen loisteho nollassi. Tällöin loistehoa siirtyy ainoastaan staattorin ja verkon välillä. Generaattorin puoleisella sillalla magnetoidaan epätahtikone. Koko voimala voi toimia verkkoon päin kapasitiivisella tai induktiivisella tehokertoimella, jolloin siis loistehoa on mahdollista syöttää verkkoon tai ottaa verkosta staattoripiirin kautta.

Taajuusmuuttajan molempien siltojen säätö voidaan toteuttaa vektori- tai DTC-säätönä. Lähteessä [68] mainitaan, että vektorisäätö toteutetaan usein staattorijännite- tai staattorikäänmivuokoordinaatistossa. Verkon puoleisen sillan DTC-säädössä suodinkuristimet tai muuntajan hajainduktanssit muodostavat ns. paikallaan pysyvät virtuaaliset käänmitykset.

Säädössä on huomioitava epätahtikoneen poikkeava käyttäytyminen verrattuna suoraan verkkoon kytkettyyn epätahtikoneeseen. Kaksoissyötetyn epätahtikoneen vääntömomentti riippuu tahtikulmasta ja jättämästä s , ja koneen toiminta vastaa usealla tavalla erillismagnetoitua tahtikonetta. Taajuusmuuttaja syöttää liukurenkaiden kautta roottoripiiriin virtoja, joiden taajuus riippuu jättämästä s . Kaksoissyötetyn koneen yksityiskohtaista toimintaa ja vääntömomenttien muodostumista on selitetty tarkemmin lähteessä [10].

5.2.3 Täystehotaajuusmuuttajalla varustettu tuulivoimala

Täystehotaajuusmuuttajalla varustetun tuulivoimalan säätö voidaan jakaa kaksoissyötetyn voimalan tapaan kahteen osaan: nopeampaan taajuusmuuttajan sähköiseen säätöön ja hitaampaan tuuliturbiinin säätöön. Generaattorin puoleista siltaa kestopagneettitahtikoneen tapauksessa voidaan ohjata usealla eri tavalla [11]. Lähteessä [11] mainitaan, että generaattorin puoleista suuntaajaa voidaan ohjata maksimivääntö-, vakiotehokerroin- tai vakiojänniteohjauksella. Näistä vakiojänniteohjauksella arvioidaan päästävän kokonaisuudessaan parhaisiin

ohjausvasteisiin. Tällöin generaattorisillan kytkinkomponenttien tulee luonnollisesti olla pakkokommutoivia.

Kestomagneetikoneen tai perinteisen tahtikoneen tapauksessa vektorisäätö kiinnitetään useimmiten roottorin käämivuon koordinaatistoon, joka on sama kuin roottorin asento. Epätahtikoneen tapauksessa vektorisäätö kiinnitetään tyypillisesti staattori- tai roottorikämmivuohon. Verkon puoleisella sillalla ohjataan verkkoon syötettyä pätö- ja loistehoa. Tyypillisesti tasajännite pyritään pitämään vakioarvossaan ohjaamalla vaihtosuuntaajan syöttämä pätöteho generaattorilta tulevan tehon suuruiseksi. Loistehon tuoton rajoituksena nimellisteholla toimittaessa on taajuusmuuttajan näennäisteho, joka mitoitetaan vastaamaan haluttua $\cos\phi$ -arvoa.

5.2.4 Hajautetun tuotannon yksiköt

Silloin kun hajautetun tuotannon käytöissä on taajuusmuuttajia, niiden tehoyksiköiden ohjaus- ja säätöpiireissä käytetään samoja tapoja kuin mitä edellä tuulivoimaloita koskien on esitetty.

6 Taajuusmuuttajakäyttöjen normaalitilan toiminta

6.1 Taajuusmuuttajien käyttäytyminen kytkentätilanteissa

Kaksoissyötetyn voimalan verkkoon kytkentä tapahtuu lähteen [69] mukaan siten, että voimala kiihdytetään lapakulmasäädön avulla. Kiihdytysvaiheen aikana taajuusmuuttajan välipiirin kondensaattori varataan erillisellä dioditasasuuntaajalla. Käynnistyksen aikana myös verkkosuodattimien yli olevat jännitteet ohjataan ennen turbiinin kiihdytyksen aloittamista lasketuilla virtaohjeilla niin, että niiden yli on verkon jännite. Tämän jälkeen verkkosuodattimien ja verkon välillä oleva kytkin suljetaan ja kun virtatransientit ovat pienentyneet, niin vektorisäätöön perustuva dq-säätö huolehtii tasajännitteen suuruudesta ja loistehosta säätäen vastaavasti virran d- ja q-komponentteja. Tasajännite säädetään nimellisarvoon ja roottoripuolen suuntaajan virtasäätäjä ohjaa staattorijännitteen haluttuun arvoon. Viimeiseksi staattorin ja verkon väliset jännitteet tahdistetaan ja staattori kytketään verkkoon. Esitetty käynnistysmenetelmä sopii lähteen [69] mukaan nopeaan verkkoon kytkentään millä tahansa nimellispyörimisnopeudella.

Voimalan irtikytkentä tapahtuu lähteen [69] mukaan vastaavasti, mutta esitetyt vaiheet suoritetaan päinvastaisessa järjestyksessä.

Täystehotaajuusmuuttajan takana oleva voimala kytketään lähteen [62] mukaan verkkoon ns. nollavirralla, josta teho ajetaan ylös ennalta määrätyn ohjeen mukaan. Lähteen [62] mukaan merkittäviä kytkentävirtasäyksiä ei tapahdu. Lähteen [70] mukaan voimalan pysäytys tapahtuu aerodynaamisesti lapoja kääntämällä ja vaihtosuuntaajan verkkoon syöttämä teho ajetaan nolnaan.

6.2 Taajuusmuuttajien vaikutus verkkoon

Taajuusmuuttajan nopeat kytkennät aiheuttavat verkkoon virran ja jännitteen yliaaltoja, joita pienennetään asettamalla vaihtosuuntaajan ja verkon välille suodattimia. Suodattimet yhdessä käytetyn säätömenetelmän ja käytetyn kytkentätaajuuden kanssa mitoitetaan niin, että ne täyttävät olemassa olevat

verkkovaatimukset. Suodattimien ja verkon välisiä resonanssitilanteita on tutkittu lähteessä [71]. Siinä sanotaan, että yksi LC-suodin aiheuttaa verkkoon yhden resonanssitaajuuden, yksi LCL-suodin aiheuttaa verkkoon kaksi resonanssitaajuutta. Jos verkossa on yksi LC- ja LCL-suodin ne aiheuttavat verkkoon kolme resonanssitaajuutta.

Taajuusmuuttajakäytöillä pystytään pienentämään välkyntää verrattuna suoraan verkkoon kytkettyihin tuulivoimaloihin. Pääasiallisesti tämä johtuu siitä, että äkilliset tehovaihtelut johtuen tuulenoisuuden vaihteluista voidaan varastoida roottorin pyörimisnopeuden vaihteluihin. Taajuusmuuttajan säätö on myös toteutettu siten, että pätö- ja loistehoa voidaan ohjata toisistaan riippumatta, jolloin loistehosäädöllä voidaan vaikuttaa verkon jännitevaihteluihin [72].

7 Taajuusmuuttajakäyttöjen häiriötilan toiminta

7.1 Taajuusmuuttajakäyttöjen suojaus

Taajuusmuuttajan yksittäisten komponenttien suojauksessa on luovuttu esim. suuntaajasillan haarojen sulakesuojauksesta. Aikaisemmin sillan puolijohdekomponentit suojattiin oikosulkuja vastaan sillan haaroihin sijoitetuilla erittäin nopeilla sulakkeilla. Sulakkeen toimiessa oli seurauksena käyttökeskeytys ja jos voimala siltoineen sijaitsi hankalan matkan päässä, saattoi keskeytys venyä käyttäjän kannalta liian pitkäksi.

Käytännöksi halutaan kauko-ohjattava suojaus, jolloin vikapaikalla käynniltä välttyttäisiin. Tähän voidaan ajatella päästävän niin kauan kuin käytössä ovat erittäin nopeasti sytytettävät ja sammutettavat puolijohdekytkimet, jotka eivät (kaikki) vikatilanteessa tuhoudu, vaan jäljellejääneet kytkimet halutusti ja oikeassa järjestyksessä voidaan ohjata estotilaan tai johtavaan tilaan riippuen suojaustavasta. Tällaiseen ihanteelliseen olotilaan voidaan tuudittautua silloin, kun koko ajan on huolehdittu puolijohdekytkinten jännite- ja virtakestoisuudesta mukaan lukien jännite- ja virtasuureiden muutosnopeuden hallinta. Edellä oleva vikaselvittely edellyttää luotettavaa ja kyllin tarkkaa siltojen tilan tuntemista (mittaustiedot, paikalliset oikosulkutiedot ym.). Edellistä hitaammasta taajuusmuuttajien suojauksesta huolehtivat taajuusmuuttajan tulo- ja lähtöpiirissä olevat katkaisijat.

DFIG-käytössä taajuusmuuttajan ylivirtasuojauksia voidaan toteuttaa liukurengaskoneen roottoriin ennen taajuusmuuttajaa sijoitetulla rinnakkaispiirillä ns. crowbar-suojalla, joka oikosulkee liukurenkaat pienen impedanssin kautta. Kun tämä suoja lopettaa liukurenkaiden oikosulun (suoja ”aukeaa” ohjatusti), hallitaan esim. verkon lyhytaikainen vika niin, että voimala voi jatkaa toimintaansa.

Aikaisemmin vaadittiin, että tuulivoimala irtoaa verkosta verkon häiriötilanteessa, koska tuulivoimaa oli vähän. Kun tuulivoimaa alkaa yhä useammissa paikoissa olla enemmän ja tuulivoiman määrä joissakin järjestelmissä on jo merkittävä, tuulivoiman irtikykyminen häiriötilanteessa voi jopa pahentaa tilannetta. Tästä syystä tuulivoimaloille on asetettu monissa maissa ns. LVRT (Low Voltage Ride Through) tai FRT (Fault Ride Through) vaatimus. Tämä tarkoittaa sitä että jännitteen pudotessa voimalan tai puiston verkkoon liityntäpisteessä, voimalan tai puiston voimaloiden tulee edelleen pysyä kytkettyneenä verkkoon ja olla valmiina syöttämään tehoa verkkoon vian poistuttuakin. Myös Suomessa kantaverkkoyhtiö Fingrid on ottanut käyttöön Nordelin Grid Coden mukaiset vaatimukset [35]. Eri

maissa ja eri verkkoyhtiöiden FRT-vaatimukset eroavat toisistaan. Vaatimuksista kerrottiin hieman tarkemmin kappaleessa 4.3.4.

Taajuusmuuttajien käyttöjen yhteydessä on havaittu haitallisia laakerivirtoja. Laakerivirtoja voi symmetristen jännitteiden vallitessa aiheutua esim. koneen magneettisesta epäsymmetriasta (käämitys ja roottorin epäkeskisyyttä). Monet laakerivauriot on selitetty nopeasti avautuvien ja sulkeutuvien puolijohdekytkinten toiminnasta:

1) Nämä kytkintoiminnat ilmenevät suurina jännitteenmuutosarvoina du/dt . Muutosilmiö vastaa suurtaajuista jännitepulssia, joka saa virtapiirissään aikaan virran, jonka kulkutiellä oleva hajakapasitanssi muodostaa sitä pienemmän impedanssin mitä suurempi taajuus jännitepulssilla on. Jännitepulssin taajuus on tyypillisesti suurempi kuin 1 MHz ja jännitepulssin suuruus on samaa suuruusluokkaa kuin välipiirin tasajännite. Jännitepulssi saattaa pitkähköissä kaapeleissa kasvaa (kaksinkertaistua) heijastuksen takia, kun jännitepulssi kohtaa etenemistiellään sovitamattoman impedanssin esim. kaapelin ja koneen käänin liitoskohdassa.

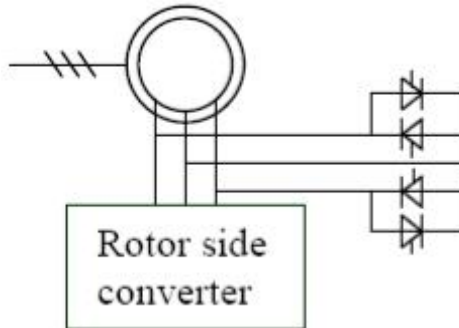
2) Tasajännitevälipiirissä tapahtuvat kytkintoiminnat aiheuttavat yhteismuotoista jännitettä. Yhteismuotoista jännitettä kutsutaan myös nimillä pitkittäinen jännite ja epäsymmetrinen jännite. Tämän yhteismuotoisen jännitteen määrää lähinnä kytkentätaajuus, ei niinkään pulssin reunoista johtuva suurtaajuinen muutostaajuus, jota edellä on kuvattu. Kytkentätaajuus on luokkaa 1 kHz ja jo yhden voltin luokkaa olevat yhteismuotoinen jännite voi aiheuttaa tarkoituksettomia haitallisia virtoja koneessa.

Haitallisten laakerivirtojen suojaus perustuu niiden kulkureittien tiedostamiseen ja sopivien esteiden rakentamiseen kulkureiteille tai muodostamalla oikeisiin kohtiin maadoituksilla näille pieni-impedanssinen tie. Ihannetapauksessahan käytettäville nopeille puolijohdekytkimille halutaan äärimmäisen nopeat avaus- ja sulkutoiminnat, jotta vältettäisiin näiden kytkinten kytkentähäviöt.

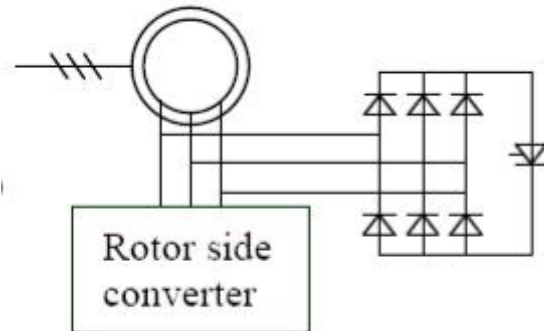
7.2 Kaksoissyötetyn voimalan toiminta häiriötilanteissa

Kaksoissyötetyissä voimaloissa generaattori on yhteydessä verkkoon sekä roottoripiirin taajuusmuuttajan että staattoripiirin kautta. Verkon häiriötilanteessa, ja varsinkin FRT:n aikana, staattoriin syntyy suuria virtoja, jotka indusoivat myös roottoriin suuria virtoja. Ilman suojausta suuret roottorivirrat aiheuttaisivat taajuusmuuttajaan ylivirtoja, jotka rikkoisivat sen. Tästä syystä taajuusmuuttaja erotetaan aina verkkovikojen aikana oikosulkemalla generaattorin roottoripiiri. Oikosulku tehdään ns. crowbar:illa. Passiivinen crowbar voidaan toteuttaa eri tavoin, esim. oikosulkemalla vaiheet vastakkaissuuntaan kytketyillä tyristoripareilla tai tasasuuntaavalla diodisillalla käyttäen yhtä tyristoria oikosulkemaan diodisillan [73]. Kuvassa 44 ja kuvassa 45 on periaatekuvat crowbar-kytkennästä, jossa on vastarinnankytketyt tyristoriparit sekä diodisillalla ja sytytystyristorilla varustetusta crowbar-kytkennästä. Tyristorit (kuva 44) tai tyristori (kuva 45) syytetään, kun välijännitteen arvo nousee ennalta asetettua kynnysjännitettä suuremmaksi ja samalla roottorin puoleisen taajuusmuuttajan IGBT:t ohjataan johtamattomaan tilaan. Crowbar:in ohjattavuus saadaan vasta, kun voimala on irrotettu verkosta ja roottorissa ei enää kierrä virtaa, joten voimalalla ei ole FRT-ominaisuutta. Kun vika on poistunut ja crowbar:in ohjattavuus on palautunut, niin voimala voidaan käynnistää normaalisti ja kytkeä se automaattisesti verkkoon. Jos voimala on varustettu aktiivisella crowbar:illa, voimala voi itse palauttaa normaalin kaksoissyötetyn toimintatilansa vian mentyä ohi ja jatkaa toimintaa normaalisti,

jolloin voimala on tehnyt FRT:n. Aktiivinen crowbar edellyttää, että tyristorien sijaan kytkiminä käytetään esim. IGBT tai GTO-komponentteja [74]. Sekä aktiivisella että passiivisella crowbarilla varustettu voimala on vian aikana ja crowbar:in ollessa oikosuljettuna periaatteeltaan siis vastaava kuin ilman taajuusmuuttajaa toimiva vakionopeuksinen voimala.



Kuva 44. Crowbar-kytkentä kahdella vastarinnankytketyllä tyristoriparilla [73].



Kuva 45. Crowbar-kytkentä diodisillalla ja yhdellä sytytystyristorilla [73].

Jotkut tuulivoimavalmistajat (esim. Vestas) käyttävät välipiiriin sijoitettua hakkuria ja vastusta crowbar-kytkennän sijaan, johon roottoriin teho ajatetaan verkon vikatilanteissa.

7.3 Täystehotaajuusmuuttajalla varustetun voimalan toiminta häiriötilanteissa

Verkon vikatilanteissa täystehotaajuusmuuttajan takana oleva voimala pysyy kytkettynä verkkoon ja mahdollisuutena on myös, että voimala syöttää vikavirtaa tukeakseen verkon jännitettä. Lähteessä [62] mainitaan, että voimalan täytyy pysyä verkkoon kytkettynä 3s verkon vikatilanteissa. Voimalan toiminta verkon vikatilanteissa riippuu maakohtaisista vaatimuksista, mitään yleispätevää sääntöä ei ole. Jos turbiinin tuottamaa tehoa ei pystytä syöttämään verkkoon, niin ylimääräinen teho ajetaan jarruvastukseen jarrukatkojan ohjaamana.

7.4 Häiriömittaukset

Taajuusmuuttajalla varustettuja voimalakohtaisia vikatilanteiden aikaisia mittauksia ei vielä ole suoritettu VTT:n projekteissa. Mittauksia on suoritettu lähinnä suoraan kytkettyjen tuulivoimaloiden tapauksessa.

VTT on ollut mukana projektissa (Tuuliverkko), jossa tehtiin maasulkukokeita ja mittauksia näistä verkossa, jossa oli tuulivoimaloita. Mittaukset tehtiin verkon pisteessä jonka takana ensinnäkin on kuormia ja toisekseen useamman tyyppin ja kokoluokan voimaloita. Kolmanneksi voimaloiden tehon tuotanto oli hyvin alhaisella tasolla mittaushetkillä huonojen tuuliolosuhteiden vuoksi. Mittausdataa ei voitu täten hyödyntää tässä projektissa.

VTT on myös mukana projektissa, jossa suoritetaan häiriömittauksia täystehotaajuusmuuttajilla varustetuista tuulivoimaloista. Mittaukset tehdään yhden voimalan pienjännitepuolelta ennen voimalan muuntajaa, sekä koko puistosta voimaloiden kokoamiskiskosta 20 kV verkossa. Näistä mittauksista ei ole vielä saatu mittausdataa.

8 Simulointiedellytykset

8.1 Simulointimallit

Transienttilaskentaan tarvittavien mallien on kuvattava realistisella tavalla nopeita ilmiöitä. Yhtenä ongelmana on parametrien oikeiden arvojen saaminen, koska erilaisin mittauksin suoritettavat arvot harvoin soveltuvat suoraan koneiden sijaiskytkentöihin ja näistä muodostettuihin simulointimalleihin. Eri parametrit, esim. induktanssit, pätevät usein myös vain määrättyissä tilanteissa, esim. staattisessa tilassa tai transienttitilassa. Mallien luotettavuus voidaan varmistaa vain validoinnin avulla ja näin on tehty harvoin tai sitten tarkat mallit ja suoritettavat mittaukset pidetään salassa. Ongelmana on myös etenkin säätö- ja ohjauspiirien oikeiden parametriarvojen saaminen luotettavien simulointimallien tekemiseksi. Periaatteessa aiemmin esitettyihin vektori- ja DTC-säätöihin VTT:llä on käytössään malleja, mutta ilman mittausdataa mallien luotettava arviointi on mahdotonta. Taajuusmuuttajissa käytetty suuri kytkentätaajuus saattaa tuoda mallinnushaasteita passiivisten komponenttien taajuusriippuvuuden johdosta, mikä saattaa muuttaa erityisesti suurtaajuisten virtakomponenttien kulkureittiä.

8.2 Simulointitapauksia ja -ehtoja

Jatkoprojektissa simuloitavia tapauksia voisivat olla verkon tavalliset kytkentätilanteet voimalan käynnistyessä ja irrotessa verkosta. Vikatilanteiden osalta simuloitavia tapauksia voisivat olla verkossa tapahtuvat erityyppiset viat ja näiden aiheuttamat vikavirrat ja jännitteet taajuusmuuttajaan ja generaattoriin. Periaatetasolla tutkittavia ja simuloitavia asioita voisivat olla myös vikojen seurauksina muodostuneet vääntömomenttivärähtelyt generaattoriin ja vaihteistoon. Vikatilanteiden osalta tärkeitä simuloiteja ovat voimaloiden FRT-ominaisuudet ja niihin vaikuttavat suojaus- ja asetusarvot. Mahdollinen simulointitapaus voisi olla myös yksittäisen voimalan tai tuulipuiston osallistuminen pätötehonsäätöön niin, että tarvittava tehonlisäys otetaan voimalan pyörimisenergiasta. Eri suodintopologioiden, taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden ja säätötavan vaikutuksia syntyviin yliaaltoihin voitaisiin myös tutkia simuloimalla. Osa kappaleessa 4.3 esitetyistä tuulivoimalan vaatimuksista on helpommin simuloitavissa kuin täydellisesti testattavissa. Mallin validointi edellyttää kuitenkin määrättyjä testauksia ja yksityiskohtaista komponenttitietoa.

9 Jatkotutkimustarpeita

Tässä projektissa luotiin katsaus taajuusmuuttajien nykyiseen tekniikkaan sekä järjestelmien ja ympäristön asettamiin vaatimuksiin. Jatkotarpeita ovat tekniikan osalta uusiin ratkaisuihin ja nykyistä suurempiin yksikkökokoihin perehtyminen eri taajuusmuuttajien osalta erilaisissa tuotantokohteissa. Tärkeää on myös käyttää saatua tietämystä hyväksi nykyisissä ja tulevilla projekteissa.

VTT:n käynnissä olevista tai juuri päättyneistä projekteista monet sivuavat taajuusmuuttajien ominaisuuksia, tuulivoimaloita ja hajautettua tuotantoa. Suunnitteilla on laajapohjainen hanke uuden sukupolven käytöstä 'Next generation electrical drives'. Lähiaikoina alkavan hajautettuun tuotantoon liittyvän projektin yksi tutkimusaiheista on "Large-scale RES inverters".

Esille on tullut tarpeita nykyisten ratkaisujen mahdollisimman yksityiskohtaisten simulointimallien luomiseksi ja järjestelmien simuloimiseksi mm. verkon häiriötilanteissa. Simulointimallien mittauksiin perustuva validointi on oleellinen osa mallien luomisessa. Verkkoonliittymän vaatimukset toteutetaan osittain ulkopuolisilla ja erillisillä suojausmenetelmillä sekä osittain taajuusmuuttajan ohjauksella ja sisäänrakennetuilla suojauksilla. Suojauksen toteutuminen on todennettavissa mittauksilla ja tietyin edellytyksin myös simuloimalla. Julkisen mittaustiedon tarve esimerkiksi verkkovioista toipumisesta (esim. FRT tai LVRT) on oleellinen.

Tämän projektin jatkotarpeita ovat lisäksi

- a. suunnitelma akkreditoinnin hakemisesta standardin IEC61400-21 (tuulivoimalan sähkönlaatusuureiden mittaaminen ja evaluointi) mukaisille mittauksille
- b. tuulivoimalan tehonsiirtoketjun vaihteisto- ja laakerivaurioiden tutkiminen sähköisten syiden pohjalta
- c. tuulivoimajärjestelmän ukkossuojauksen toteutus verkon kautta tulevien indusoituneiden ylijännitteiden ja suorien salamaniskujen johdosta. Tuulivoimalan ukkossuojauksesta on olemassa standardi IEC61400-24, mutta käytännön toteutukset rakenteen, vaihteiston, generaattorin ja taajuusmuuttajan osalta ovat tapauskohtaisia.
- d. verkkoon liittymän osalta hajautettuun tuotantoon liittyvät vaatimukset sähkön laadun ja suojausten suhteen noudattavat samoja periaatteita kuin tuulivoimaloilla
- e. erilaisten suuntaajayhdistelmien ja -topologioiden tarkastelu (6-, 12-, 18-, 24-pulssinen jne. sekä suuntaajien rinnan- ja sarjaankytkennät). Tämä perinteinen pulssisuusjako on jäämässä pois, koska pakko-ohjatut puolijohdekytkimet pulssinleveysmoduloinnin (PWM) kanssa syrjäyttävät diodi- ja tyristorisiltoihin liittyvät pulssiluvut.
- f. raportin lähestymistapaa yksityiskohtaisempi tarkastelu taajuusmuuttajien säätö- ja ohjaustavoista
- g. tuulivoimakäytöissä esiintyvien vikojen tilastointi ja niihin johtaneet syyt ja huoltokirjausten tarkastelu
- h. suurten tuulivoimapuistojen (teho luokkaa 100 MW tai enemmän) tarkastelu

Kaikissa näissä jatkotarpeissa tarkasteltavana on koko järjestelmä ja yhteistyöhön olisi näin ollen pyrittävä lähinnä valmistavan teollisuuden kanssa.

10 Johtopäätökset

Tässä hankkeessa on selvitetty taajuusmuuttajien mitoituksen perusratkaisuja ja tällä hetkellä käytössä olevia ohjaus- ja säätöjärjestelmiä, jotka esiintyvät tuulivoimaloissa. Tuulivoimaloiden mittaustuloksia, joista olisi voinut verrata taajuusmuuttajaratkaisujen sähköverkkovaikutuksia, oli käytettävissä hyvin vähän. Selvityksestä ilmenee seikkaperäisesti tuulivoimaloiden ja hajautetun tuotannon verkkoonliittynnän vaatimukset eri osapuolten kannalta Suomessa.

Työn edetessä ilmeni, että itse taajuusmuuttaja ei ole niin kiinnostava kuin sen ja koko tuulivoimalan simulointi. Simulointi taas ei onnistu, jos ei tunneta tarkasti taajuusmuuttajan toteutusperiaatteita, komponentteja sekä säätö- ja ohjaustapoja. Tarkasteluketju sulkeutuu siis vasta, kun (valmistajien toteuttamat) ratkaisut tunnetaan välillä generaattori – taajuusmuuttaja – suodatus – sähköverkko. Simuloinneilla tavoitellaan yleisimpiä tuulivoimalaympäristön ilmiöitä kuten voimalan kytkentätilanteita erilaisilla tuulennopeuksilla ja sähköverkon vikoja mukaan lukien pika- ja aikajälleenkytkennät.

Raportin laadintaa vaikeutti mm. se, että luottamuksellisiksi ilmeni monia tuulivoimaloihin liittyviä asiakirjoja, joita ei voitu selvitykseen ottaa mukaan.

Liite 1
Taulukko merkittävimpien tuulivoimalavalmistajien voimaloista ja niiden ominaisuuksista

Manufacturer	Model	Capacity	WT concept	Gen. type	Gen voltage	Spd range	Gear ratio	Component locations		
								Freq.conv.	Trafo.	Converter type
Vestas	V90	3.0 MW	DFIG	DFIG	1000 V	9-19 rpm		nacelle?	nacelle	
	V90	1.8-2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	8.2-17.3 rpm		nacelle?	nacelle	
	V80	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	9-19 rpm		nacelle?	nacelle	
	V82	1.65 MW	fixed spd		690 V (gen)					
	V52	0.85 MW								
	V47	0.66 MW								
GE Energy	3.6	3.6 MW	DFIG	DFIG		8.5-15.3 rpm		nacelle?	base?	PWM IGBT
	2.5	2.5 MW	full conv.	PMG				base	base	
	2.3	2.3 MW								
	1.5s	1.5 MW	DFIG	DFIG		11.1-22.2 rpm		nacelle?	base?	PWM IGBT
	1.5sl	1.5 MW	DFIG	DFIG		10.1-20.4 rpm		nacelle?	base?	PWM IGBT
	1.5se/sle/xle	1.5 MW								
Enercon	E-82	2.0 MW	full conv.	SG	400 V / 440 V	6-19.5 rpm		rec. nacelle, inv. base?	base	IGBT
	E-70	2.3 MW	full conv.	SG		6-21.5 rpm		rec. nacelle, inv. base?	base	
	E-66	1.8-2.0 MW						rec. nacelle, inv. base?	base	
	E-58	1.0 MW						rec. nacelle, inv. base?	base	
	E-44	0.9 MW	full conv.	SG		12-34 rpm		rec. nacelle, inv. base?	base	
	E-53	0.8 MW	full conv.	SG		12-29 rpm		rec. nacelle, inv. base?	base	
	E-48	0.8 MW	full conv.	SG		16-30 rpm		rec. nacelle, inv. base?	base	
	E-40	0.6 MW						rec. nacelle, inv. base?	base	
Gamesa	G90	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	9-19 rpm	1:100.5	nacelle?	nacelle	
	G87	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	9-19 rpm	1:100.5	nacelle?	nacelle	
	G83	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	9-19 rpm	1:100.5	nacelle?	nacelle	IGBT-inverter
	G80	2.0 MW	DFIG	DFIG						IGBT-inverter
	G58	0.85 MW	DFIG	DFIG	690 V	14.6-30.8 rpm	1:61.74	nacelle?	base?	
	G58	0.85 MW	DFIG	DFIG	690 V	16.2-30.8 rpm	1:61.74	nacelle?	base?	
	G52	0.85 MW	DFIG	DFIG	690 V	14.6-30.8 rpm	1:61.74	nacelle?	base?	
	G52	0.85 MW	DFIG	DFIG	690 V	16.2-30.8 rpm	1:61.74	nacelle?	base?	
Nordex	N90	2.5 MW	DFIG	DFIG						
	N80	2.5 MW	DFIG	DFIG	660 V	10.9-19.1 rpm	1:68.1	nacelle?		IGBT
	N90	2.3 MW	DFIG	DFIG	660 V	9.6-16.9 rpm	1:77.44	nacelle?		IGBT
	S70	1.5 MW	DFIG	DFIG	690 V	10.6-19.0 rpm	1:94.0	nacelle?		PWM IGBT
	S77	1.5 MW	DFIG	DFIG	690 V	9.9-17.3 rpm	1:104.0	nacelle?		PWM IGBT
	N60	0.25/1.3 MW	fixed 2-spd	SCIG	690 V	12.8/19.2 rpm	1:78.6		base?	

Manufacturer	Model	Capacity	WT concept	Gen. type	Gen voltage	Spd range	Gear ratio	Component locations		Converter type
								Freq.conv.	Trafo.	
Siemens	SWT-3.6-107	3.6 MW	full conv.	WRAS	690 V	3-13 rpm	1:119.0	rec. nacelle, inv. base?		
	SWT-2.3-82 VS	2.3 MW	full conv.?	WRAS		6-18 rpm	1:91.0	base?	base?	
	SWT-2.3-82	2.3 MW	fixed 2-spnd?	WRAS	690 V	17/11 rpm	1:91.0		base?	
	SWT-2.3-93	2.3 MW	full conv.?	WRAS	690 V	6-16 rpm	1:91.0	base?	base?	
	SWT-2.0	2.0 MW								
	SWT-1.3-62	1.3 MW								
	600 kW	0.6 MW								
Repower	5M	5.0 MW	DFIG	DFIG	950 V	6.9-12.1 rpm (+15.0%)	c. 1:97	nacelle	nacelle	pulse-modulated IGBT
	MM92	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	7.8-15.0 rpm (+12.5%)	c. 1:120	nacelle	base?	PWM IGBT
	MM82	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	10.0-20.0 +-12.5% rpm	c. 1:105	nacelle	base?	PWM IGBT
	MM70	2.0 MW	DFIG	DFIG	690 V	10.0-20.0+-12.5% rpm	c. 1:90	nacelle	base?	PWM IGBT
	MD77	1.5 MW	DFIG	DFIG	690 V	9.6-17.3+-10% rpm	c. 1:104	nacelle	base?	PWM IGBT
	MD70	1.5 MW	DFIG	DFIG	690 V	10.6-19.0+-10% rpm	c. 1:94.7	nacelle	base?	PWM IGBT
Suzlon	S.88	2.3 MW								
	S.88	2.1 MW	fixed spd	WRAS	690 V	1511 rpm HSS	1:98.8			
	S.64	1.5 MW								
	S.66	1.25 MW	fixed 2-spnd	WRAS	690 V	20.7/13.8 rpm	1:74.917			
	S.64	1.25 MW	fixed 2-spnd	WRAS	690 V	20.7/13.8 rpm	1:74.917			
	S.64	0.95 MW	fixed 2-spnd	WRAS	690 V	20.7/13.8 rpm	1:74.917			
	S600	0.6 MW								
Mitsubishi	MWT92/2.4	2.4 MW								
	MWT1000	1.0 MW		AS	690 V	21 rpm/19.8 rpm				
Ecotecnia	ECO 100	3.0 MW		WRAS	690 V	7.5-14.25 rpm	1:126.319			
	ECO 80	2.0 MW			690 V	9.7-19.89 rpm	1:100.6			IGBT
	ECO 80	1.67 MW			690 V	9.7-18.4 rpm	1:98.07			750/400 kVA IGBT
	ECO 74	1.67 MW	DFIG?	DFIG?	690 V	10-19 rpm	1:94.63			750/400 kVA IGBT
	ECO 62	1.3 MW	fixed 2-spnd?	AS	690 V	18.5 rpm	1:81.82			
Acciona Windpower	IT 77/1500 Clase II	1.5 MW	DFIG							
	IT 77/1500 Clase III	1.5 MW	DFIG							
	AW-70/1500	1.5 MW	DFIG		12 kV	770-1300 rpm (50 Hz)	1:59		base ?	
	AW-77/1500	1.5 MW	DFIG		12 kV	770-1300 rpm (50 Hz)	1:65		base ?	
	AW-82/1500	1.5 MW	DFIG		12 kV	770-1200 rpm (50 Hz)	1:65		base ?	
	AW-100/3000	3.0 MW	DFIG		12 kV	770-1320 rpm (50 Hz)	1:77	nacelle?	base ?	
	AW-100/3000	3.0 MW	DFIG		12 kV	770-1320 rpm (50 Hz)	1:83	nacelle?	base ?	
	AW-119/3000	3.0 MW	DFIG		12 kV	770-1320 rpm (50 Hz)	1:89	nacelle?	base ?	

Manufacturer	Model	Capacity	WT concept	Gen. type	Gen voltage	Spd range	Gear ratio	Component locations		Converter type
								Freq.conv.	Trafo.	
Goldwind	GW82	1.5 MW		PMG						
	GW77	1.5 MW		PMG						
	GW70	1.5 MW		PMG						
	62	1.5 MW	full conv.	PMG	690 V	9-19 rpm				
	62	1.2 MW	full conv.	PMG		11-20 rpm		base		
	S50	0.75 MW	fixed spd	AS	690 V	21.7 rpm	1:70.022			
	S48	0.75 MW	fixed spd	AS	690 V	22.5 rpm	1:67.4			
	S43	0.6/0.125 MW	fixed 2-spd	2-spd AS	690 V	17.9/26.8 rpm	1:56.56			
WinWinD	WWD-3	3.0 MW	full conv.	PMG	690 V			nacelle	nacelle	IGBT both sides
	WWD-1	1.0 MW	full conv.	PMG	690 V	7.7-25.6 rpm		nacelle?		IGBT
Clipper Windpower	Liberty	2.5 MW	full conv.?	PMG 4x660 kW	690 V	9.6-15.5 rpm		base?	base	4X, Voltage Sourced, IGBT based 6 pulse
Sinovel	77	1.5 MW								
	70	1.5 MW								
MTorres	TWT	1.5 MW	full conv.?	SG						

Lähdeviitteet

- [1] Global Wind Turbine Markets and Strategies, 2008-2020 – Section 4, Competitive Trends in Wind Turbine Supply. June 2008.
- [2] Global wind energy council. Global wind 2008 report. 60 s. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.gwec.net/fileadmin/documents/Global%20Wind%202008%20Report.pdf>
- [3] Wind turbine manufacturers; here comes pricing power. Industry Overview, Merrill Lynch. 10 August 2007. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.ohiowind.org/InsideOWWG/ActionTeams/..%5C..%5Cpdfs%5CMerrill%20Lynch%20Wind%20Power%20Report1.pdf>
- [4] Ingeteam Power Converters-brochure, Saatavilla 29.6.2009; [http://www.ingeteam.com/castellano/Contenido/referencias%5Cnueva%5CPower%20Converters\(1\).pdf](http://www.ingeteam.com/castellano/Contenido/referencias%5Cnueva%5CPower%20Converters(1).pdf)
- [5] Converteam Celebrates 1000th Wind Turbine Converter. 2007. Saatavilla: <http://www.controlengueurope.com/article.aspx?ArticleID=13729>
- [6] Menetelmä verkkovaihtosuuntaajan kautta siirrettävän tehon säätämiseksi. ABB. Patenti, 1996.
- [7] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G-J. de Vilder, P. Tavner. Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines, 2005 IEEE, pp. 543-550. Saatavilla 29.6.2009; <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=01531394>
- [8] Jürgen K. Steinke, Oscar Apeldoorn. Applying the experience of industrial high power converter design to wind power conversion, 4 s. Saatavilla 29.6.2009; [http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/c7af8740ec786f4bc1256e200037d63e/\\$File/Paper%20PD%204-2.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/c7af8740ec786f4bc1256e200037d63e/$File/Paper%20PD%204-2.pdf)
- [9] Philippe Maibach, Alexander Faulstich, Markus Eichler, Stephen Dewar. Full-Scale Medium-Voltage Converters for Wind Power Generators up to 7 MVA. Saatavilla 29.6.2009; [http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/9847712acf892432c125740f003c3d65/\\$File/Full-Scale%20Medium-Voltage%20Converters.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/9847712acf892432c125740f003c3d65/$File/Full-Scale%20Medium-Voltage%20Converters.pdf)
- [10] Lianwei Jiao, Boon-Teck Ooi, Geza Joos, Fengquan Zhou. Double Fed Induction Generator as a Hybrid of Asynchronous and Synchronous machine, 2005. Electric Power Systems Research 76 (2005) 33–37.
- [11] Gabriele Michalke, Anca Hansen, Thomas Harktopf. Control strategy of variable speed wind turbine with multipole permanent magnet synchronous generator. Saatavilla 29.6.2009; http://www.risoe.dk/rispubl/art/2007_152_paper.pdf
- [12] C. J. A. Versteegh. Design of the Zephyros Z72 wind turbine with emphasis on the direct drive PM generator. NORPIE 2004, 7 s. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.elkraft.ntnu.no/norpie/10956873/Final%20Papers/068%20-%20Norpie%20paper.pdf>
- [13] ABB, Tekninen opas nro 8: Sähköinen jarrutus, 2001, 32 s. Saatavilla 29.6.2009; [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/\\$File/Tekninen_opasnro8.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/2e30f9c0e2d07b9ac1256d28004152df/$File/Tekninen_opasnro8.pdf)

-
- [14] ABB, Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja, 2000-07. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.abb.fi/cawp/fiabb255/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B.aspx?/>
- [15] ABB, Tekninen opas nro 7 - Sähkökäytön mitoitus, 2001, 40 s. Saatavilla 29.6.2009; [http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/\\$File/Tekninen_opasnro7.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/b11d4fe92973be93c1256d2800415027/$File/Tekninen_opasnro7.pdf)
- [16] Design & selection of mining equipment – Electrical component, Induction motors. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.itee.uq.edu.au/~mmme2104/Lecture%20%20-%20Induction%20Motors.pdf>
- [17] A.D. Hansen, F. Iov, P. Sørensen, F. Blaabjerg. Operation and Control of Large Wind Turbines and Wind Farms. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.risoe.dk/vea/projects/windfarmcontrol/>
- [18] Barnes, M.. Practical Variable Speed Drives and Power Electronics. ISBN 978-0-7506-5808-9. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.science-direct.com/science/book/9780750658089>
- [19] ABB. Tehomuuntajat. Saatavilla 29.6.2009; [http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/\\$file/110_0007.pdf](http://www02.abb.com/global/fiabb/fiabb255.nsf/viewunid/C46D5509D325D21AC225695B002FB07B/$file/110_0007.pdf)
- [20] IEC 61400-2 (2006) Wind turbines – Part 2: Design requirements for small wind turbines, 94 s.
- [21] AWEA Small Wind Turbine Global Market Study 2007, 14 s.
- [22] B. Lemström, H. Holttinen, M. Jussila. Hajautettujen tuotantolaitosten tiedonsiirtotarpeet ja -valmiudet, Espoo 2005. VTT Tiedotteita 2283, 62 s. + liitteet 10 s. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2283.pdf>
- [23] E. Vartiainen, P. Luoma, J. Hiltunen, J. Vanhanen. Hajautettu energiantuotanto: teknologia, polttoaineet, markkinat ja CO₂-päästöt, 2002, 90s. Saatavilla 29.6.2009; http://www.energia.fi/content/root%20content/energiateollisuus/fi/julkaisut%20ja%20utkimukset/ymp%C3%A4rist%C3%B6pooli/liitekirjasto/hajautettuenergiantuotanto_loppuraportti.pdf?SectionUri=%2Ffi%2Fjulkaisut%2Fymparistopooli%2Ftutkimusaineisto
- [24] IEC 62282-3-1 (2007-04) Fuel cell technologies – Part 3-2: Stationary fuel cell power systems – Safety, 156 s.
- [25] IEC 62282-3-2 (2006-03) Fuel cell technologies – Part 3-2: Stationary fuel cell power systems – Performance test methods, 151 s.
- [26] The California Energy Commission, Distributed Energy Resource guide, DER Equipment. Saatavilla 29.6.2009; http://www.energy.ca.gov/distgen/equipment/energy_storage/energy_storage.html
- [27] Microturbines by Barney L. Capehart, PhD, CEM. College of Engineering, University of Florida. Last updated: 05-16-2008.
- [28] Surface Power, esite. Saatavilla 29.6.2009; http://www.surfacepower.com/pdf/windy_boy.pdf
- [29] Gene Z. Guo. Small wind turbine PMSG generation system. University of New Brunswick. 2006. Saatavilla 29.6.2009; http://www.ece.unb.ca/powereng/Presentations/12_PPS.pps

-
- [30] ABB drives, Low voltage AC drives for wind power, Liquid cooled wind turbine drive. 2008, 12 p. Saatavilla 29.6.2009;
[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/95d5ffa284793253c12573fb002b8c93/\\$File/LowvoltageACdrivesforwindpower_EN_REVC.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/95d5ffa284793253c12573fb002b8c93/$File/LowvoltageACdrivesforwindpower_EN_REVC.pdf)
- [31] Kimmo Kauhaniemi. Tuulivoimaloiden verkkoonliittynän suositukset 2009, 5 s.
- [32] Ohjeet sähköä tuottavan laitteiston liittämiseksi Helen Sähköverkko Oy:n sähkönjakeluverkkoon, Helen Sähköverkko Oy, 2009, 14s. + liitteet. Saatavilla 29.6.2009;
<http://www.helen.fi/urakoitsijat/urakointiohjeet/SU40309.pdf>
liite 1: <http://www.helen.fi/urakoitsijat/urakointiohjeet/SU40309L1.pdf>
liite 2: <http://www.helen.fi/urakoitsijat/urakointiohjeet/SU40309L2.pdf>
liite 3: http://www.helen.fi/urakoitsijat/urakointiohjeet/EN271_taytettava.pdf
liite 4: http://www.helen.fi/urakoitsijat/urakointiohjeet/EN265_taytettava.pdf
liite 5: http://www.helen.fi/pdf/Sahkontuotannon_liittymisehdot.pdf
liite 6: http://www.helen.fi/pdf/Sahkontuotannon_verkkopalveluehdot.pdf
- [33] EN 50438. 2007. Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage networks, 53 s.
- [34] IEEE 1547-2003. IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems. IEEE, The Institute of Electrical and Electronics Engineering, 16 s.
- [35] Fingrid Oyj. Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV 2007), 15 s. Saatavilla 29.6.2009;
http://www.fingrid.fi/attachments/fi/palvelut/kantaverkkopalvelut/liittyminen/vjv2007yhdistetty_200308_suo.pdf
- [36] C. Jauch, J. Matevosyan, T. Ackermann, S. Bolik. International Comparison of Requirements for Connection of Wind Turbines to Power Systems. Wind Energy, Vol.8, No.3, July 2005, p.295-306.
- [37] SFS-EN 50160 (2000). Yleisen jakeluverkon jakelujännitteen ominaisuudet. Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, 27 s.
- [38] IEC 61400-21 (2008-08) Wind turbines - Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines, 58 s.
- [39] IEC 61000-4-7: 2002, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 71 s.
- [40] IEC 61000-4-15: 2003, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4: Testing and measurement techniques – Section 15: Flickermeter – Functional and design specifications, 47 s.
- [41] ABB Tekninen opas nro 2, EU-direktiivit ja nopeussäädetyt PDS-käytöt, 2001, 64 s. Saatavilla 29.6.2009;
[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/d96afde4afa92507c125738d003702a9/\\$File/Tg2_EUcouncildirectives_61253980_RevD.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/d96afde4afa92507c125738d003702a9/$File/Tg2_EUcouncildirectives_61253980_RevD.pdf)
- [42] IEC 61800-3 (2004-08) Adjustable speed electrical power drive systems – Part 3: EMC requirements and specific test methods, 238 s.

-
- [43] Markus Eichler, Philippe Maibach, Alexander Faulstich. Full size voltage converters for 5 MW offshore wind power generators. EWEC, 2008, 10 s. Saatavilla 29.6.2009; http://www.ewec2008proceedings.info/ewec2008/allfiles2/451_EWEC2008fullpaper.pdf
- [44] Vacon NXP tekniset tiedot. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.vacon.fi/Default.aspx?id=461938>
- [45] H. Polinder, F. F. A. van der Pijl, G. vilder and P. J. Tavner. Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines, IEEE Trans. on Energy Conversion, vol. 21, no. 3, Sept. 2006, sivut. 725-732.
- [46] A. Grauers. Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines, Ph.D dissertation, Chalmers University of Technology, Goteburg, 1996.
- [47] M.R. Dubois. Optimized permanent magnet generator topologies for direct-drive wind turbines, Ph.D. dissertation, Delft Univ. Technol., Delft, The Netherlands, 2004.
- [48] Juha Pyrhönen. Sähkökäytöt 2005-2006, luentomateriaalia. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.
- [49] Jouko Niiranen. Sähkömoottorikäytön digitaalinen ohjaus. s.381. 1999.
- [50] Badrul Chowdhury, Shrinivas Chellapilla. Double fed induction generator control for variable speed generation. 2005. Electric Power Systems Research 76 (2006) ss. 786–800.
- [51] M. Lafoz, I.J. Iglesias, C.Veganzones. Three-level voltage source converter with hysteresis band current control. Saatavilla 29.6.2009; http://www.cedex.es/ceta/cetaweb/info_fisicas/convertidor3n_epe01.pdf
- [52] T. Biskup, C. Bühler, B. Grzesik, J. Krijgsman, J. Michlak, S. Pasko, M. Zygmanski. Multilevel converter for power conditioning systems with SMES. Saatavilla 29.6.2009; http://www.ime.uz.zgora.pl/konf/epn04/art_12.pdf
- [53] M. Ikonen, O. Laakkonen, M. Kettunen. Two- and three level converter comparison in wind power applications. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.elkraft.ntnu.no/smola2005/Topics/15.pdf>
- [54] A. Panday, B. Singh, B.N. Singh, A. Chandra, K. Al-Haddad, D.P. Kothari. A Review of multilevel power converters. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.ieindia.org/pdf/86/elp86a163.pdf>
- [55] R. Erickson, S. Angkitrakul, K. Almazeedi. A New Family of Multilevel Matrix Converters for Wind Power Applications: Final Report. July2002 – March 2006. 2006. National Renewable Energy Laboratory. Saatavilla 29.6.2009; http://ecee.colorado.edu/~pwrelect/Paper_archives/40051.pdf
- [56] N. Hatziargyriou et al. Modeling new forms of generation and storage. Cigre technical brochure, TF38.01.10, November 2000. Saatavilla 29.6.2009; <http://www.fglongatt.org.ve/Archivos/Archivos/SistGD/CIGRE-TF-380110.pdf>
- [57] ABB Drives. Low Voltage AC Drives for Wind Power Converters. Saatavilla 29.6.2009; <http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AFE68756031&LanguageCode=en&DocumentPartID=1&Action=Launch&IncludeExternalPublicLimited=True>

-
- [58] Vacon – Jarrukatkojat ja -vastukset. Saatavilla 29.6.2009;
<http://www.vacon.com/File.aspx?id=457124&ext=pdf&routing=396771&name=Ud218C>
- [59] Alexander Faulstich, Jürgen K. Steinke, Fritz Wittwer. ABB. Medium Voltage converter for permanent magnet wind power generator up to 5 MW. EPE, 2005, 9 s. Saatavilla 29.6.2009;
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1665467>
- [60] Otso W. Pöyhönen. Sähkötekniikan käsikirja 1. Tammi, Helsinki 1975.
- [61] ABB, Horst Gruning, IGCT – A Quantum leap for high power converters. Saatavilla: [http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/32022bee38c588d0c1256dd4002115e8/\\$File/IGCT.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/32022bee38c588d0c1256dd4002115e8/$File/IGCT.pdf)
- [62] Dejan Schreiber, Semikron, Power Electronics for wind turbines. 2006. Saatavilla 29.6.2009;
http://www.psemr.vojvodina.sr.gov.yu/aktuelno/Power_Electronics_for_Wind_Turbines.pdf
- [63] ABB. HiPak™ IGBT Modules with SPT & SPT+ chips: Setting new standards for SOA. Saatavilla 29.6.2009;
[http://library.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/cc7df42d3d443a1dc12575a20024e012/\\$File/HiPak-Flyer_0409_Web.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot256.nsf/veritydisplay/cc7df42d3d443a1dc12575a20024e012/$File/HiPak-Flyer_0409_Web.pdf)
- [64] ABB. Applying IGCT Gate Units. Saatavilla 29.6.2009;
http://www.milimsys.com/igbt/IGCT_Red/5SYA%202031_FINAL%20VERSION.pdf
- [65] ABB, Tekninen opas nro 1, Suora momentinsäätö. Saatavilla 29.6.2009;
[http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/\\$File/Tekninenopasnro1.pdf](http://library.abb.com/global/scot/scot201.nsf/veritydisplay/fdba0b31a34b89d1c1256d280040b4ae/$File/Tekninenopasnro1.pdf)
- [66] Sensor Field Orientated Control (IFOC) of three-phase AC induction motors using ST10F276. AN2388 Application note. Saatavilla 29.6.2009;
<http://www.st.com/stonline/books/pdf/docs/12471.pdf>
- [67] Anca Hansen, Florin Iov, Poul Sorensen Frede Blaabjerg. Overall control strategy of variable speed double fed induction generator wind turbine. Nordic Wind Power Conference, 1-2 March, 2004, Gothenburg, Sweden.
- [68] Lie Xu, Yi Wang. Dynamic modeling and control of DFIG-based wind turbines under unbalanced network conditions. IEEE Transaction on power systems, Vol. 22, No. 1, February 2007, pp. 314-323. Saatavilla 29.6.2009;
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=04077149>
- [69] J. L. Da Silva, R. G. de Oliveira, B. Rabelo, W. Hofmann. A Discussion about start-up procedure of a double-fed induction generator system. Nordic Workshop on power and industrial electronics, june 9-11, 2008.
- [70] Enercon, Enercon-E82 –voimala. Saatavilla 29.6.2009;
http://www.enercon.de/en/_home.htm
- [71] Pekka Saari. Invertteriliitännäisten sähköntuotantoyksiköiden verkkovaikutuksia. VTT, 2005.

-
- [72] Tao Sun, Zhe Zhen, Frede Blaabjerg. Flicker study on variable speed wind turbines with doubly fed induction generators. IEEE Transaction on energy conversion, vol. 20, NO. 4, December 2005
 - [73] Jouko Niiranen. Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar. Nordic Wind Power Conference, 1-2 March, 2004, Gothenburg, Sweden.
 - [74] Miguel Rodriguez, Gonzalo Abad, Izaskun Sarasola, Alex Gilabert. Crowbar control algorithms for doubly fed induction generator during voltage dips. Escuela Politecnica Superior, Universidad de Mondragon. 2005.