

Saimaan ammattikorkeakoulu
Tekniikka Lappeenranta
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kone- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Mikko Hämäläinen

Tuuliturbiineissa käytettävän kestomagneettigeneraattorin asiakastuotespesifikaation kehittäminen

Tiivistelmä

Mikko Hämäläinen

Tuuliturbiineissa käytettävän kestopagneettigeneraattorin asiakastuotespesifikaation kehittäminen, 67 sivua, 1 liitettä

Saimaan ammattikorkeakoulu

Tekniikka, Lappeenranta

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Kone- ja tuotesuunnittelun suuntautumisvaihtoehto

Opinnäytetyö 2012

Ohjaajat: Tuntiopettaja Simo Sinkko, M.Sc., Saimaan ammattikorkeakoulu

Tuotepäällikkö Panu Kurronen, D.Sc., The Switch Drive Systems Oy

Päättötyön aiheena oli tuuliturbiineissa käytettävän kestopagneettigeneraattorin asiakastuotespesifikaation kehittäminen The Switch Drive Systems Oy:lle. Työn tavoitteena oli rakentaa asiakirjapohja, jota tekniset asiakaspäälliköt ja avainasiakaspäälliköt voivat käyttää asiakkaan kanssa määriteltäessä generaattorin teknistä toimitussisältöä ja jota yhtiön omat sisäiset sidosryhmät, kuten suunnittelu, pystyy käyttämään reunaehtoina omassa työssään.

Työssä käytiin läpi kaupallisilla markkinoilla olevat tyypillisimmät tuuliturbiinikonseptit keskittyen isoihin, yli 1 MW turbiineihin. Omana osanaan käsiteltiin pyörivien sähkökoneiden yleinen rakenne ja suunnittelu.

Asiakastuotespesifikaation sisällön määrittämisen yhteydessä käytiin läpi kestopagneettigeneraattoreiden rakenne, käsiteltiin suunnitteluun vaikuttavia reunaehtoja ja prosessi, jota spesifikaation rakentaminen yhdessä suunnittelun kanssa seuraa. Omina osinaan käsiteltiin asiakkaiden vaatimuksia ja sovellettavat standardit. Myös tuotteen valmistaminen, verifioiminen testaamalla ja tuotteen elinkaari toimituksen jälkeen ja näiden vaikutus spesifikaatioon otettiin työssä huomioon.

Työn tuloksena syntyi kattava ja rakenteeltaan selkeä asiakasspesifikaatiopohja yrityksen käyttöön. Asiakirjapohja otettiin ensimmäistä kertaa koekäyttöön aivan työn loppupuolella.

Asiasanat: Kestopagneettigeneraattori, spesifikaatio, tuuliturbiini

Abstract

Mikko Hämäläinen

Development of the customer product specification for permanent magnet generator for wind turbines, 67 of Pages, 1 of Appendices

Saimaa University of Applied Sciences

Technology, Lappeenranta

Mechanical Engineering and Production Technology

Specialization in Machine Design

Bachelor's Thesis 2012

Instructors: Mr. Simo Sinkko, M.Sc., Lecturer, Saimaa University of Applied Sciences

Mr. Panu Kurronen, D.Sc., Product Manager, The Switch Drive Systems Oy

The thesis was made for The Switch Drive Systems Ltd. The subject was to create a customer specific product specification template for permanent magnet generators applied in wind turbines. Target was to make a template which could be used in customer projects when creating a new product and specify its technical scope of supply and characteristics. This created template as a tool for the key account managers and technical account managers when communicating with the customer. It also gives the boundary requirements for internal functions like engineering.

In this work the most common commercial wind turbine concepts were covered. The concentration was turbines over 1 MW. As a separate section the structure and design of rotating electrical machines was dealt with.

When defining the content of the specification the structure of permanent magnet generators were described and the technical boundary requirements for engineering were taken into consideration. The process for creating a specification in development projects was shortly described. Customer requirements and applicable standards have their own sections. Also the manufacturing of the product, verifying it with testing and its lifecycle after delivery were covered and their impact to specification were considered.

As a result a comprehensive and clear specification template was created for the company's use. The template was taken into use at first time when finalizing this thesis.

Key words: Permanent magnet generator, specification, wind turbine

Sisältö

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet.....	6
1 Johdanto	8
1.1 Työn tilaaja	8
1.2 Työn taustaa	8
1.3 Työn tarkoitus ja lyhyt kuvaus	8
2 Tuotespesifikaatio	10
3 Tuuliturbiini.....	11
3.1 Modernin tuuliturbiinin kuvaus ja yleisrakenne.....	14
3.2 Tuuliturbiinien yleisimmät voimansiirtokonseptit	16
3.2.1 Vakionopeuksinen tuuliturbiini	20
3.2.2 Rajoitettu muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini	21
3.2.3 Muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini	22
4 Pyörivät sähkökoneet	26
4.1 Pyörivän sähkökoneen perusrakenne.....	27
4.2 Kestomagneettigeneraattorin suunnittelu.....	28
5 Asiakastuotespesifikaatio	30
5.1 Nykyisten spesifikaatioiden tilanne ja sisältö	30
5.2 Asiakastuotespesifikaation rakentuminen toimitusprojektissa.....	31
5.3 Asiakasvaatimukset	33
5.4 Eri markkina-alueet ja viranomaiset.....	34
5.5 Kestomagneettigeneraattorin suorituskyky	35
5.5.1 Perusmitoitus ja sähköinen suorituskyky.....	36
5.5.2 Jäähdytys	38
5.6 Mekaaninen konfiguraatio.....	45
5.6.1 Peruskonstruktio ja sijoitus tuuliturbiinin.....	46
5.6.2 Roottorikonstruktio	49
5.6.3 Staattorikonstruktio ja käämitys.....	53
5.6.4 Laakerijärjestelmä	56
5.7 Apulaitteet ja instrumentointi.....	58
5.8 Tuotteen valmistaminen ja laatu	58
5.9 Testaus ja tuotteen verifioiminen	59
5.10 Spesifikaation jaottelu eri osa-alueisiin	61
5.10.1 Dokumentin esittely.....	61
5.10.2 Yleinen toimituskuvaus	62
5.10.3 Sovellettavat dokumentit ja standardit	62
5.10.4 Sovelluksen asettamat vaatimukset ja rajoitukset.....	62
5.10.5 Tuoteominaisuudet	62
5.10.6 Tuotteen elinkaari	63
5.10.7 Laadunvarmistus ja tuotteen verifioiminen	63
5.10.8 Toimitukseen valmistelu.....	63
5.10.9 Asiakasdokumentaatio	63

6 Yhteenveto ja pohdinta.....	64
Kuvat.....	65
Kuviot.....	65
Taulukot	66
Lähteet.....	66

Liitteet

Liite 1. The Switch teknisen spesifikaation malli

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

AC	Vaihtovirta (Alternating Current)
DC	Tasavirta (Direct Current)
DD	Suoravetoinen kestopagneettigeneraattori (Direct Drive)
DFIG	Kaksoissyötetty induktiogeneraattori (Doubly Fed Induction Generator)
ETD	Upotettu lämpötila-anturi (Embedded Thermal Detector)
F.S.	Vakionopeuksinen (Fixed Speed)
FAT	Tehdashyväksyntätestaus (Factory Acceptance Test)
FEM	Elementtimenetelmä (Finite Element Method)
HAWT	Vaaka-akselinen tuuliturbiini (Horizontal Axis Wind Turbine)
HS	Nopea kestopagneettigeneraattori (High Speed)
L.V.S.	Rajoitettu muuttuvanopeuksinen (Limited Variable Speed)
MS	Keskinopea kestopagneettigeneraattori (Medium Speed)
MTBF	Keskimääräinen vikaantumisväli (Mean Time Between Failure)
MTTR	Keskimääräinen korjausaika (Mean Time To Repair)
PMSG	Kestopagneettigeneraattori (Permanent Magnet Synchronous Generator)
SCIG	Oikosulkugeneraattori (Squirrel Cage Induction Generator)
TSDS	The Switch Drive Systems
V.S.	Muuttuvanopeuksinen (Variable Speed)
VAWT	Pystyakselinen tuuliturbiini (Vertical Axis Wind Turbine)
VPI	Tyhjiöhartsaus (Vacuum Pressure Impregnation)
WRIG	Liukurengas induktiogeneraattori (Wound Rotor Induction Generator)

A_{gap}	Ilmavälin aktiivinen pinta-ala
a	Kiihtyvyys
f	Taajuus
F_{tan}	Akselitehon aiheuttama voima ilmavälissä
D_{gap}	Ilmavälinhalkaisija
I	Virta
l	Magneettipiirin aksiaalinen pituus ilmavälissä
m	Vaihemassa
n	Pyörimisnopeus
p	Napapariluku
P_{in}	Sisään syötettävä akseliteho
P_{out}	Ulos saatu sähköteho
P_{cu}	Kuparihäviöt (resistiiviset häviöt)
P_{Iron}	Rautahäviöt
P_{Add}	Lisähäviöt
P_{Fric}	Kitkahäviöt (mekaaniset häviöt)
R_{AC}	AC resistanssi vaihekäämissä
s	Siirtymä
T_a	Akselimomentti
v	Nopeus
σ_{tan}	Tangentiaalinen jännitys

1 Johdanto

1.1 Työn tilaaja

Työn tilaaja, The Switch Drive Systems Oy (TSDS), on marraskuussa 2006 perustettu teknologiayhtiö, jonka päätoimialana on tuulivoimateollisuus. The Switch (TS) valmistaa kestromagneettigeneraattoreita ja tehonmuokkaimia käytettäväksi tuuliturbiineissa. Tuulivoiman lisäksi yhtiö valmistaa tuotteitaan myös aurinkovoimasovelluksiin ja energiaa säästäviin teollisuussovelluksiin. The Switch –konsernin liikevaihto vuonna 2010 oli 134,6 Meur ja yhtiö työllisti yli 270 henkilöä 13 eri maasta. (The Switch 2010.)

1.2 Työn taustaa

Generaattoriliiketoiminnassa yrityksen toimintastrategiana on räätälöidä tuotteensa asiakkaan vaatimusten mukaisesti. Tästä johtuen tuotespesifikaatiot ovat usein asiakaskohtaisia. Uuden tuotteen spesifikaatio syntyy asiakasprojektin yhteydessä, kun asiakkaalle räätälöidään juuri hänen sovellukseensa sopivaa kestromagneettigeneraattoria. Spesifikaatio toimii täten erittäin tärkeänä dokumenttina asiakkaan ja yrityksen välisessä kommunikoinnissa sekä määrittelee suunnittelutyön minimivaatimukset ja reunaehdot. Spesifikaatio usein myös määrittelee sopimuksen teknisen ja laadullisen toimituslaajuuden.

Usein asiakkaalla saattaa olla myös oma spesifikaationsa, jonka vaatimukset toimittajan generaattorin tulee täyttää. Tämä spesifikaatio on kuitenkin siten geneerinen, että sitä käytetään useiden eri toimittajavaihtoehtojen kanssa. Yleensä aina tarjottu tuote sisältää joitakin poikkeamia asiakkaan vaatimuksiin. Siten TSDS:n lopullisen spesifikaation rakentaminen projektin aikana on hyvin interaktiivinen prosessi, jossa pitää pystyä ottamaan huomioon alkuperäinen tarjoama, joka perustuu myynnin aikaisiin alustaviin tarkasteluihin, asiakkaan mahdolliset omat vaatimukset sekä projektin aikana eteen tulevat muutokset.

1.3 Työn tarkoitus ja lyhyt kuvaus

Työssä keskitytään kehittämään TSDS Oy:n asiakastuotespesifikaation rakennetta vastaamaan paremmin niitä vaatimuksia, joita asiakas sekä sisäiset

sidosryhmät edellyttävät. Työn painopisteenä on saada aikaan spesifikaatiopohja, jota yrityksen tekniset asiakaspäälliköt ja avainasiakaspäälliköt voivat käyttää tarjous- ja projektityössä, suunnitteluosasto suunnittelutyön minimivaatimuksina ja yhtiön muut sidosryhmät, kuten operaatiot ja testaus pyrkiessään täyttämään asiakkaan niille asettamia vaatimuksia. Tarkoituksena on myös selkiyttää myynnin aikaisen, projektin ulkoisen ja TSDS:n sisäisten spesifikaatioiden eroja. Työssä pyritään ottamaan huomioon myös eri ulkoisten sidosryhmien, kuten viranomaisten vaatimukset.

2 Tuotespesifikaatio

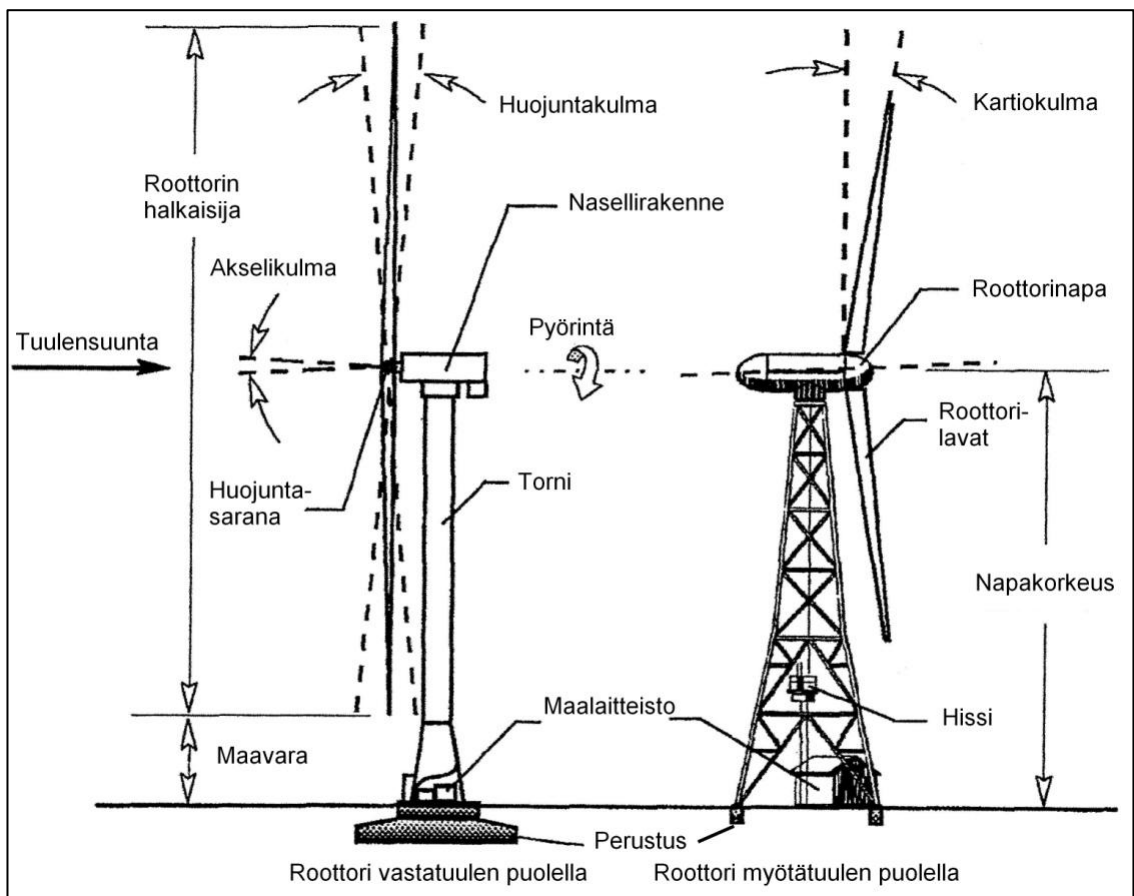
Määritelmän mukaan spesifikaatio on täsmällinen, vaatimuksia asettava kuvaus varsinkin jostakin teknisestä aiheesta. Esimerkiksi järjestelmälle asetetut yksityiskohtaiset vaatimukset, jotka usein ovat osa jotain normistoa. Puhekielessä myös lyhentyneenä muotoon "speksi". Suomalaisempina vastineina on käytetty sanoja "määrittely" ja "määrittäminen", mutta niillä on jo melko vakiintuneesti muita merkityksiä. Myös vastineita erittely ja eritelmä on käytetty. (Korpela 2012.)

Erilaisille tuotteille löytyy lukemattomia erilaisia tuotespesifikaatioita eikä voidakaan sanoa, että tuotespesifikaatioilla olisi mitään selkeää yksiselitteistä rakennetta. Yhteistä näille kuitenkin on, että yleensä ne kuvaavat jollakin tasolla tuotteen ominaisuuksia. Teknisellä tuotespesifikaatioilla pyritään myös kuvaamaan tuotteen ominaisuuksien lisäksi sille asetettuja rajoituksia ja olosuhteita joihin se on tarkoitettu. Kaupallisen sopimuksen liitteenä spesifikaatio rajaa usein myös toimituslaajuuden ja antaa selkeän kuvan sekä ostajalle että myyjälle toimituksen sisällöstä.

3 Tuuliturbiini

Tuuliturbiinilla tarkoitetaan laitetta, jonka avulla tuulen kineettinen energia muutetaan roottorin ja siihen liitetyn voimansiirtolaitteiston avulla sähköenergiaksi. Kuten kaikki sähköä tuottavat generaattorit, myös tuuliturbiinit on kytketty jonkinlaiseen sähköverkkoon, kuten akkua lataavaan sähköpiiriin, asuintalokokoluokan sähköverkkoon, eristettyyn saarisähköverkkoon tai julkiseen sähköverkkoon. Tuuliturbiinit jaotellaan voimansiirtoakselinsa suunnan mukaisesti joko vaaka-akselityyppisiin (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) tai pystyakselityyppisiin (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine) turbiineihin. (Manwell et al 2009, s. 2–3.)

Vaaka-akselityyppisten tuuliturbiinien roottorit voivat olla joko kaksi- tai useampi lapaisia. Roottori voi olla asennettu vastatuulen tai myötätuulen puolelle kuvan 1 mukaisesti.



Kuva 1. Vastatuuleen ja myötätuuleen asennettu HAWT-turbiini (Spera 2009)

HAWT-roottoreita kuvataan usein potkurityyppisiksi, lentokonepotkureissa olevien samojen roottorin aerodynaamiikan ja rakennedynamiikan periaatteiden vuoksi. Erona kuitenkin, että lentokonepotkureissa ilman nopeus kiihtyy, kun taas tuuliturbiinin roottorissa ilman nopeus hidastuu kehänopeuden ollessa huomattavasti pienempi kuin lentokonepotkureissa. (Spera 2009, s. 52.)

Kuten kaikilla tekniikoilla, myös HAWT-turbiineilla on niille tyypillisiä heikkouksia ja vahvuuksia. NTNU 2012 mukaiset vaaka-akselisen tuuliturbiinien vahvuudet ja heikkoudet on kuvattu alla.

Vaaka-akselisen tuuliturbiinin vahvuudet:

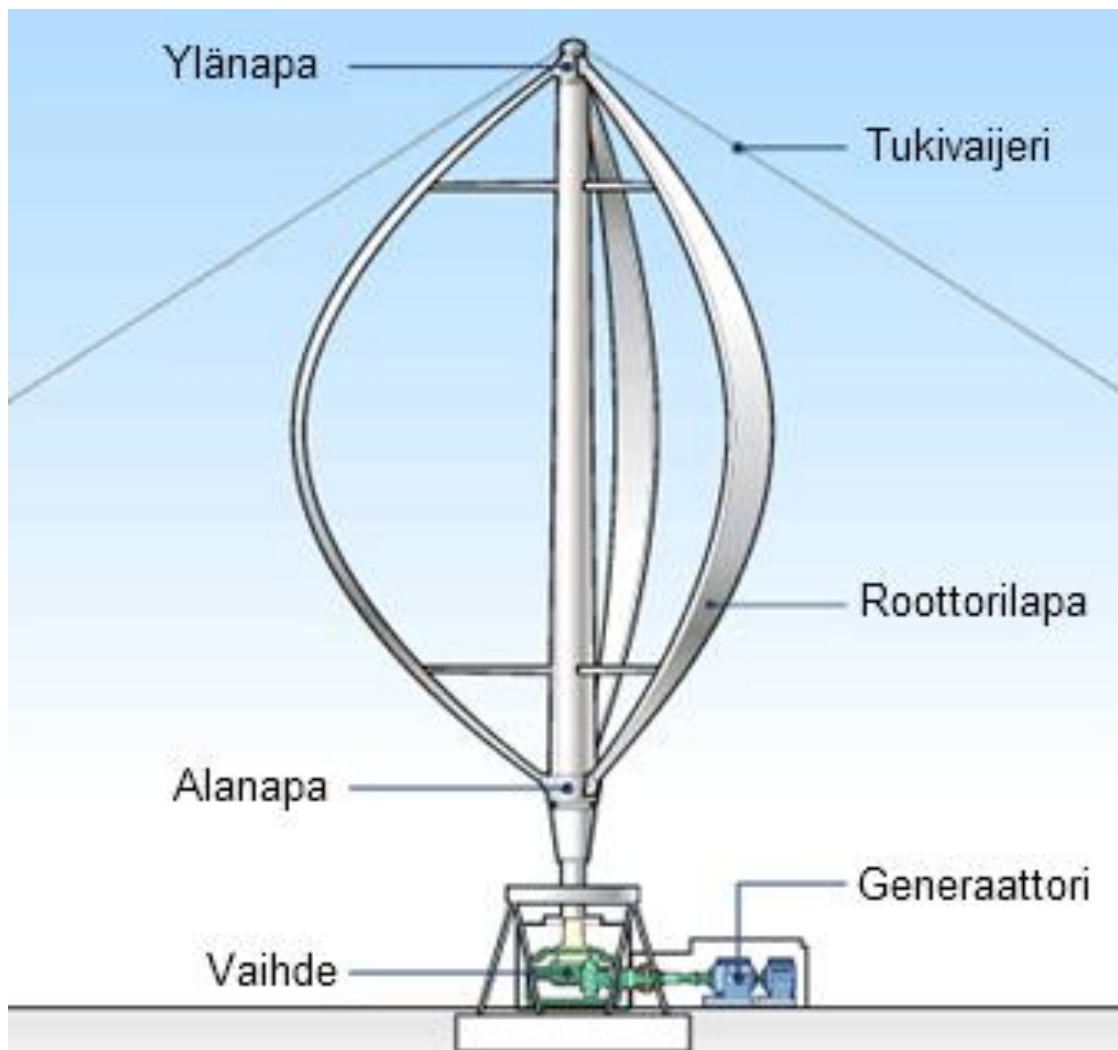
- Turbiinin roottorilavat on asennettu symmetrisesti turbiinin painopisteakseliin nähden, mikä parantaa koko systeemin vakautta.
- Turbiinin roottorilavan asentoa kauko-ohjauksella säätämällä voidaan tuulen kohtauskulmaa muuttaa lapaan nähden. Tämä mahdollistaa maksimaalisen energian keräämisen.
- Myrskyssä ja tuulen puuskissa, turbiinin lapakulmaa säätämällä voidaan minimoida myrskyvauriot.
- Turbiinin asentaminen korkean tornin päälle mahdollistaa paremman pääsyn korkeisiin tuulenopeuksiin, joita esiintyy korkeissa yläilmoissa. Näin saavutetaan parempi energiantuotto samalla turbiinin halkaisijalla.
- Useimmat HAWT-turbiinit ovat itsekseen käynnistyviä.
- HAWT-turbiinit voivat olla halvempia suurien valmistusvolyymien johdosta.

Vaaka-akselisen tuuliturbiinin heikkoudet:

- HAWT-turbiineilla on vaikeuksia toimia lähellä maata ja turbulentsissa tuulessa, koska kääntökehä ja lapalaakerit tarvitsevat tasaisen, mahdollisimman laminaarisen virtauksen.
- Turbiinien korkeat tornit ja pitkät lavat on vaikea kuljettaa ja asentaa. Maantiekuljetuksiin tarvitaan usein erikoislupia. Asentamiseen tarvitaan erikoisnosturia, jotta naselli sekä lavat yksitellen voidaan nostaa yli sadan metrin korkeuteen.

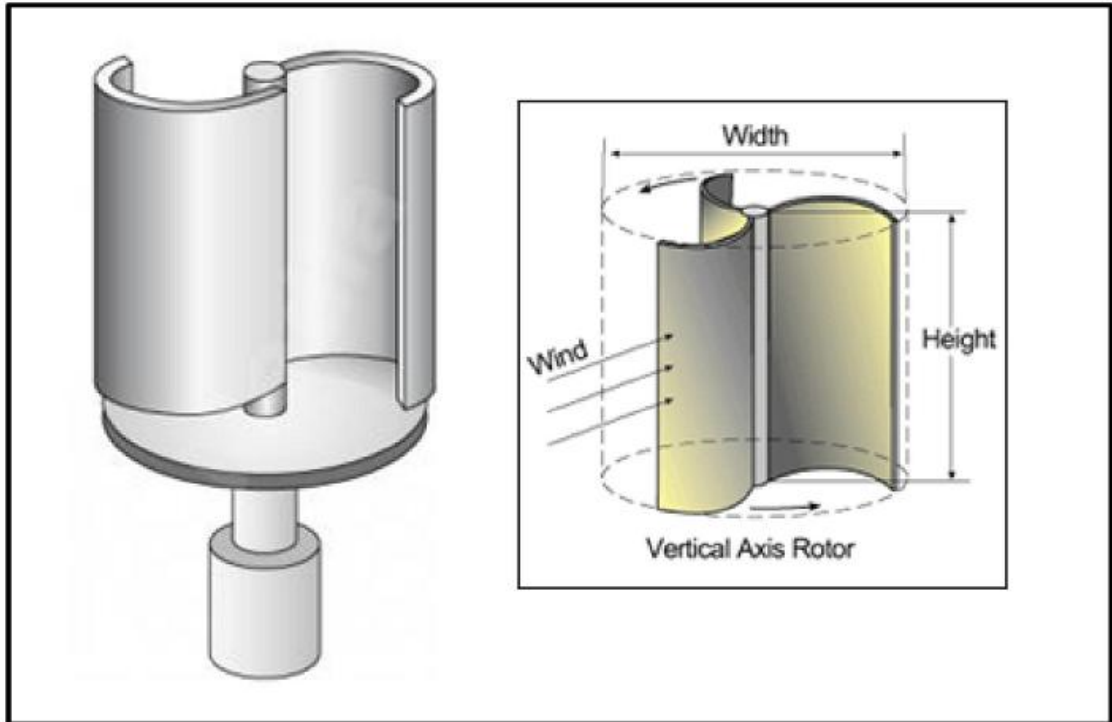
- Merelle asennettuina voivat HAWT-turbiinit aiheuttaa navigointiongelmia.

VAWT-tuuliturbiinit eivät juurikaan menestyneet kaupallisilla markkinoilla 1980-luvulla ja 1990-luvulla niitä ei käytännössä rakennettu ollenkaan. Nykypäivänä niiden käyttö on kuitenkin taas lisääntynyt etenkin rakennuksien lähelle rakennettavissa sovelluksissa. VAWT-tuuliturbiinit jaotellaan usein kahteen eri tyyppiin, nostetyyppisiin (lift based) ja vetotyyppisiin (drag based). Jaottelu perustuu lappoihin kohdistuvan aerodynaamisen voiman suunnasta. Nostetyyppisistä VAWT-turbiineista tärkein ja oikeastaan ainoa kaupallinen on ns. Darrieus-turbiini, joka on nimetty keksijänsä Georges Jean Marie Darrieus (1888–1979) mukaan. Kuvassa 2 on esitetty tyypillisen Darrieus turbiinin kuva. (Spera 2009, s. 234.)



Kuva 2. Darrieus-tyyppinen pysty akselinen tuuliturbiini (NTNU 2012)

Joitakin kaupallisia vetotyyppisiä VAWT-turbiineita on saatavana, perustuen ns. Savonius-rakenteeseen. Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen Savonius-turbiini. Näiden turbiinien hyötysuhde on kuitenkin selkeästi huonompi verrattuna Darrieus-turbiineihin tai HAWT-turbiineihin, vain 15 % luokkaa.



Kuva 3. Savonius-turbiinin roottori ja periaate (NTNU 2012)

Käytännössä VAWT-tyyppisiä tuuliturbiineita ei rakenneta kuin pienille tehoille, alle 1 MW luokkaan ja ne ovat harvoin yhdistetty julkisiin sähköverkkoihin. Tässä työssä keskitytäänkin HAWT-tyyppisiin tuuliturbiineihin ja niiden sovelluksiin.

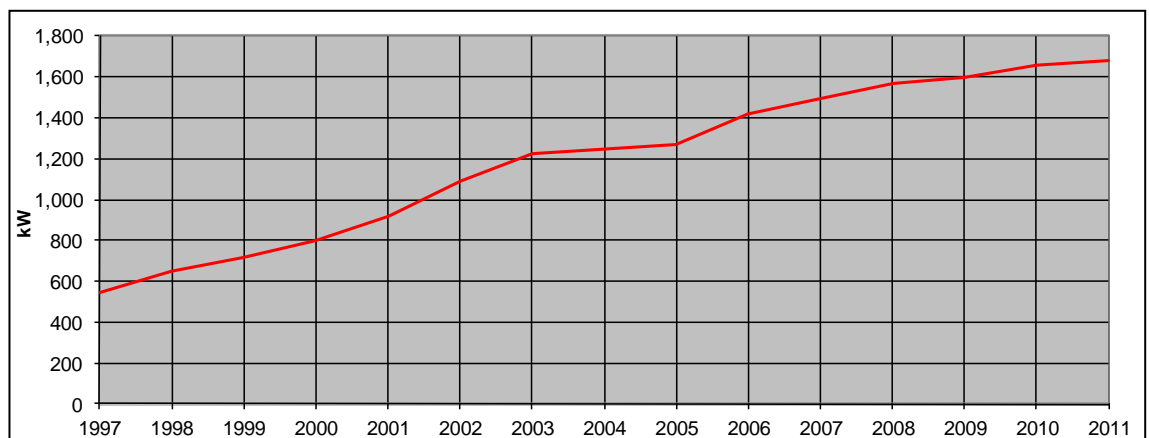
3.1 Modernin tuuliturbiinin kuvaus ja yleisrakenne

Tyypillinen, nykypäivänä kaupallisessa käytössä oleva ja julkiseen sähköverkkoon liitetty tuuliturbiini on vaaka-akselinen, kolmella roottorilavalla varustettu turbiini, jonka roottorin halkaisija on 70–80 m. Turbiini on asennettu vastatuuleen noin 60–80 m korkean tornin päälle ja se on nimellisteholtaan noin 1,5 MW. Turbiini on asennettu tuulipuistoon, jonka yhteenlaskettu maksimiteho on 50 MW tai enemmän. Kuvassa 4 on esitetty tällainen tyypillinen tuuliturbiini. (Spera 2009.)



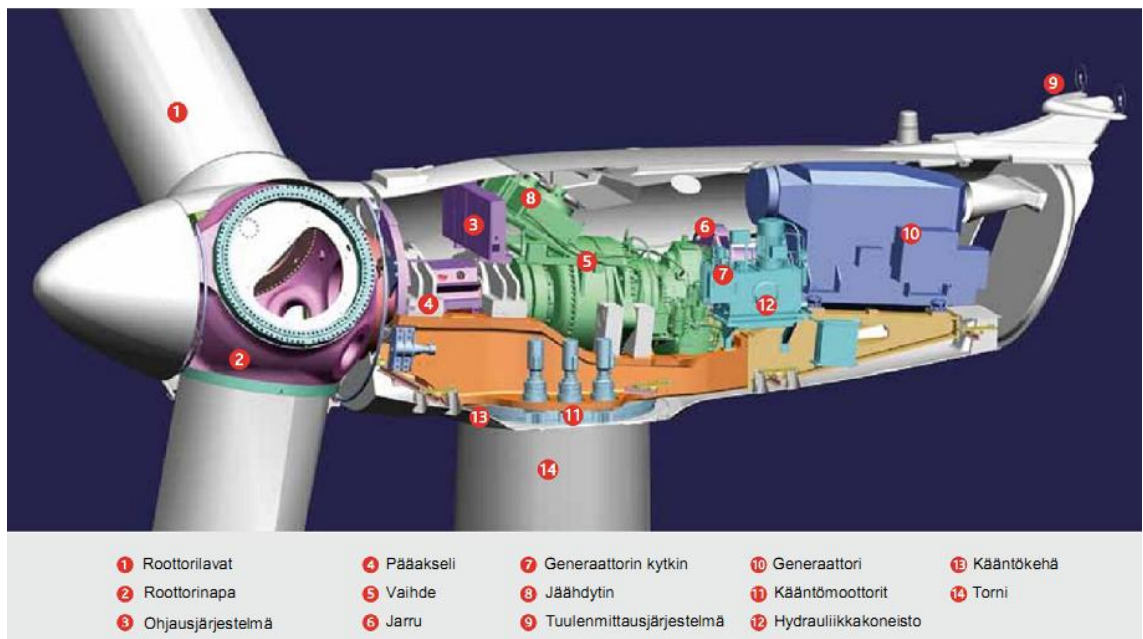
Kuva 4. Tyypillinen moderni tuuliturbiini (CleanTechnica 2012)

Tuulivoimamarkkinoiden viimeaikainen kehitys ja tulevaisuuden trendi on kuitenkin mennä yhä suurempiin turbiinien yksikkökokoihin. BTM Consult 2012 mukaan vuonna 2011 pystytettyjen turbiinien keskimääräinen koko oli jo 1,678 MW ja 1500 kW–2500 kW kokoluokan turbiinit haukkasivat 85,7 % markkinaosuuden. Kuviossa 1 on esitetty keskimääräisen turbiinikoon kasvu vuodesta 1997 vuoteen 2011. Viime vuosina yhä suurempia tuuliturbiineja on tuotu markkinoille suurimpien ollessa 6–7 MW:n luokkaa. Jopa 10 MW turbiineista puhutaan.



Kuvio 1. Keskimääräinen turbiinikoko 1997–2011 (BTM Consult 2012)

Tuuliturbiinien rakenne voidaan Speran (2009) mukaan jakaa periaatteessa kuuteen eri osakokonaisuuteen. Nämä ovat roottori, voimansiirtolaitteisto, naselli, torni, perustus ja maa-asema. Esimerkkinä tyypillisestä tuuliturbiinista on kuvassa 5 esitetty Acciona AW3000. Sen roottori koostuu roottorinavasta (2) ja siihen kiinnitetyistä lavoista (1). Voimansiirtolaitteisto sisältää pääakselin (4) laakereineen, vaihdelaatikon (5), kytkimen (7) ja generaattorin (10). Nasellirakenne sisältää voimansiirtolaitteiston lisäksi jäähdytinjärjestelmän (8), hydraulikkakoneiston (12) vaihteiston ja laakerien voitelua varten, kääntökehän (13) sekä ohjausjärjestelmän (3). Naselli on kiinnitetty tornin (14) päälle. Näiden lisäksi maa-asema sisältää yleensä esimerkiksi muuntajan, jolla turbiinin tuottama kolmivaiheinen pienjännite nostetaan sähkösiirtoa varten.

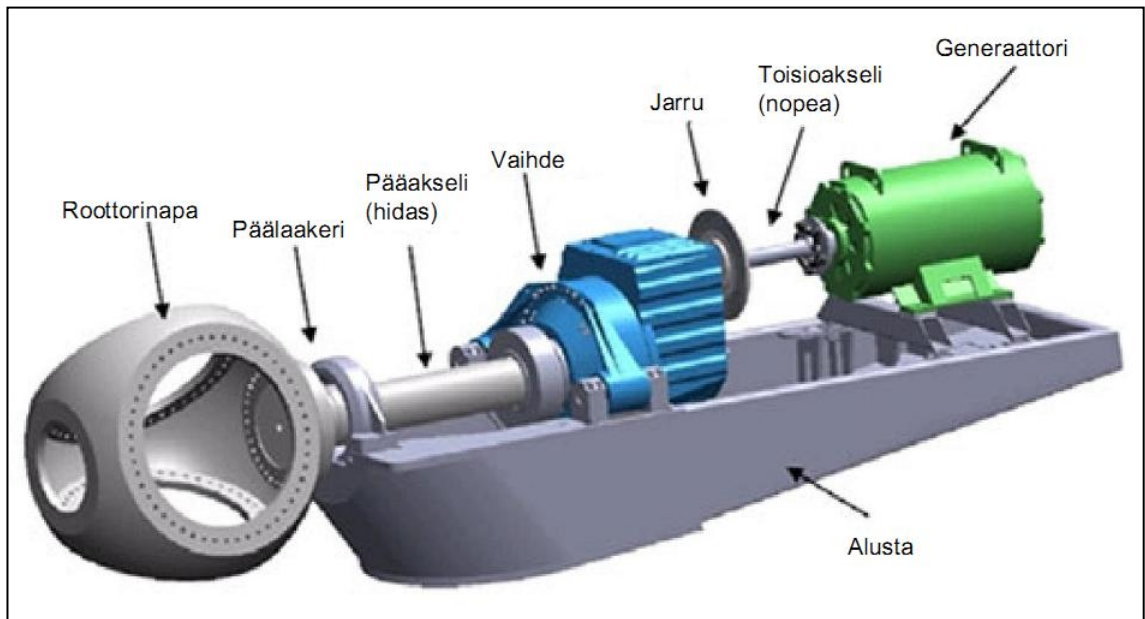


Kuva 5. Tuuliturbiinin pääkomponentit. (Acciona 2012)

3.2 Tuuliturbiinien yleisimmät voimansiirtokonseptit

Tuuliturbiineissa käytettävät voimansiirtolaitteistot sisältävät sarjan mekaanisia ja sähköisiä komponentteja muutettaessa turbiinin roottorinavasta saatava mekaaninen teho sähköenergiaksi. Vaaka-akselisissa tuuliturbiineissa tämä laitteisto on sijoitettu ylös torniin, jonka takia vähäinen huollontarve on tärkeä suunnitteluvaatimus. (Spera 2009, s. 55.) Kuvassa 6 on esitetty tyypillisen vaaka-akselisen tuuliturbiinin voimansiirtolaitteistossa käytetyt komponentit.

Näiden lisäksi, konseptista riippuen, tehonmuokkaimen katsotaan kuuluvan osaksi voimansiirtotopologiaa.



Kuva 6. Tuuliturbiinin voimansiirtolaitteisto (Timken 2012)

Tuulivoima asettaa epätavallisen joukon vaatimuksia sähkökäyttöjärjestelmille. Useimmat muut sähköntuotantojärjestelmät, jotka tuottavat vääntömomentista sähköä, toimivat vakioteholla tai kuormalla. Tuuliturbiinien tulee kuitenkin pystyä tuottamaan sähköä myös osakuormilla mahdollisimman tehokkaasti. Toisin kuin useimmat sähkökoneet, tuuligeneraattoreiden täytyy toimia mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella myös alhaisilla tuulen nopeuksilla maksimoidakseen tuotetun sähkötehon. (Spera 2009, s. 181–182.)

Polinder et al (2007) mukaan viimeisimmän kahden vuosikymmenen aikana monia erilaisia turbiinikonsepteja on kehitetty vuotuisen energian talteenoton maksimoimiseksi, kustannusten minimoimiseksi, sähkön laadun parantamiseksi ja turvallisuuden takaamiseksi. Käytettävät konseptit voidaan jaotella useammalla eri tavalla, mutta tyypillisin tapa kuitenkin lienee jaotella turbiinit pyörimisnopeuden mukaisesti vakionopeuksiin (F.S., Fixed Speed), rajoitettuihin muuttuvanopeuksiin (L.V.S., Limited Variable Speed) ja muuttuvanopeuksiin (V.S., Variable Speed) turbiineihin. Tehonsäätönsä mukaan, turbiinit voidaan jaotella sakkausohjattuihin (stall controlled) ja lapakulmaohjattuihin (pitch controlled) turbiineihin. Voimansiirtonsa mukaan turbiinit voidaan jaotella vaihteellisiin ja suoravetoisiin ratkaisuihin. Tuuliturbiinit

voidaan jaotella myös käytettävän generaattorityypin mukaan. Taulukossa 1 on esitetty yhteenveto eri tuuliturbiinikonsepteista.

Turbiinin konsepti	F.S.			L.V.S.	V.S.						
Roottorin tehonsäätö	Stall	Active stall	Pitch	Pitch	Pitch						
Voimansiirto	GD	GD	GD	GD	GD						DD
Generaattorin tyyppi	SCIG	SCIG	SCIG	WRIG	DFIG	SCIG	PMSG	PMSG	PMSG	EESG	PMSG
Vaihte	3-por.	3-por.	3-por.	3-por.	3-por.	3-por.	3-por.	1-por.	2-por. +hydro	-	-
Nopeus	2	2	2	Optislip	Muut-tuva	Muut-tuva	Muut-tuva	Muut-tuva	Muut-tuva	Muut-tuva	Muut-tuva
F.S. (Fixed Speed), Vakionopeuksinen L.V.S. (Limited variable speed), Rajoitettu muuttuvanopeuksinen V.S. (Variable speed), Muuttuvanopeuksinen GD (Geared drive), Vaihteellinen DD (Direct drive), Suoravetoinen SCIG (Squirrel-Cage Induction Generator), Oikosulkugeneraattori WRIG (Wound Rotor Induction Generator), Liukurangasgeneraattori DFIG (Doubly Fed Induction Generator), Kaksoissyötetty induktiogeneraattori PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator), Kestomagneettitahtigeneraattori EESG (Electrically Excited Synchronous Generator), Vierasmagneetoitu tahtigeneraattori											

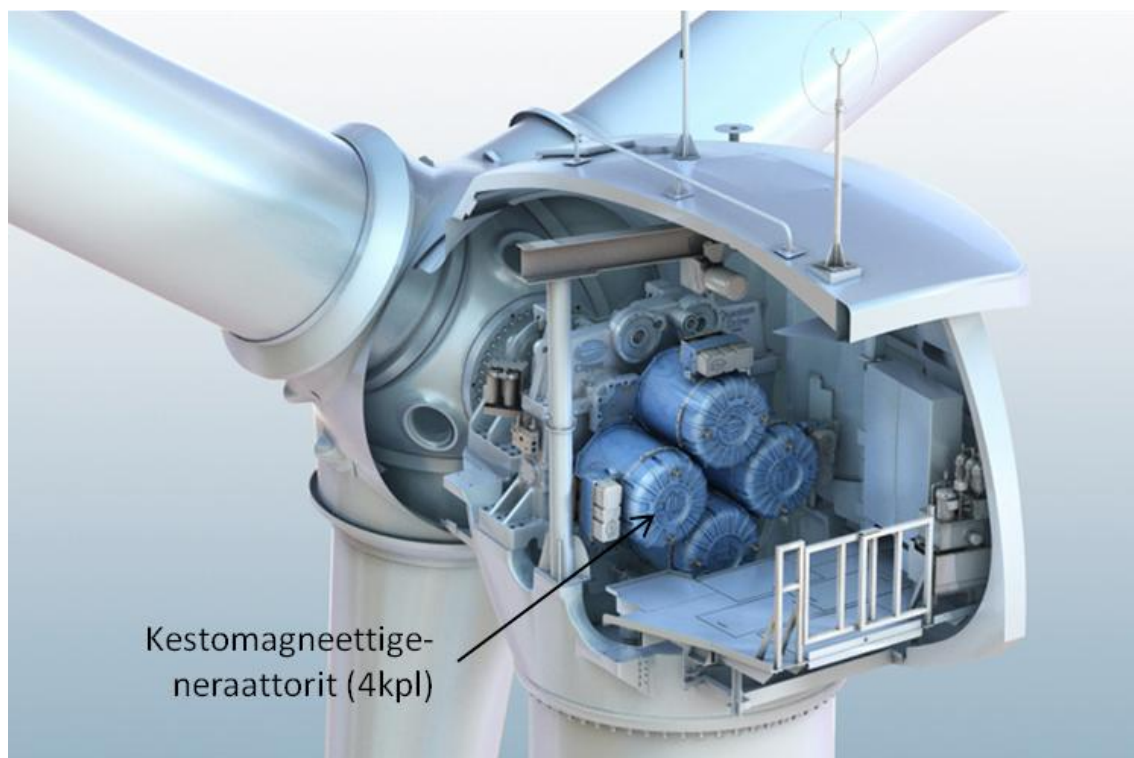
Taulukko 1. Tuuliturbiini ja voimansiirtokonseptit (Polinder et al 2007)

Suurien kaupallisten tuuliturbiinien, teho yli 1 MW, voimansiirrossa käytettiin vielä 2000-luvun lopulla seuraavia kolmea päätyyppiä.

1. Kiinteänopeuksinen turbiinikonsepti, jossa käytetään useampiportaista vaihdetta ja oikosulkugeneraattoria (SCIG, Squirrel Cage Induction Generator) ja jossa generaattori on suoraan kytketty sähköverkkoon.
2. Muuttuvanopeuksinen tuuliturbiinikonsepti, jossa niin ikään käytetään useampiportaista vaihdetta, mutta jossa standardi oikosulkuinduktiogeneraattorin tilalla on ns. kaksoissyötetty (doubly fed) induktiogeneraattori (DFIG, Doubly Fed Induction Generator). Tässä konseptissa generaattorin staattorikäänitys on kytketty suoraan sähköverkkoon, mutta roottorin magnetointikäänitykseen voidaan syöttää virtaa tehonmuokkaimen kautta.
3. Niin ikään muuttuvanopeuksinen tuuliturbiinikonsepti, mutta useampiportaisen vaihteen sijaan voimansiirrossa ei käytetä vaihteistoa vaan turbiiniroottori pyörittää suoravetoista generaattoria. Konseptissa käytetään hidasnopeuksista, korkeamomenttista synkronigeneraattoria yhdessä täyستehomuokkaimen kanssa.

Tuulivoimamarkkinoiden kehittyessä ja uusien sähköverkkovaatimusten lisääntyessä myös kestopagneettigeneraattorin käyttäminen sekä suoravetoisissa tuuliturbiineissa että DFIG:n korvaajana vaihteellisissa ratkaisuissa on lisääntynyt.

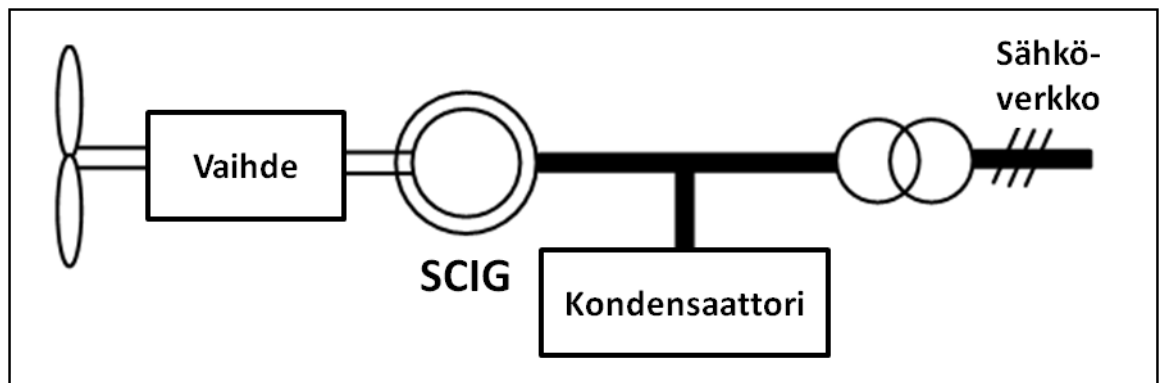
Edellä mainittujen lisäksi, myös muita, vähemmän käytössä olevia konsepteja on olemassa. Eräs tällainen on hybridivaihteen sisältävä konsepti, jossa turbiini on muuttuvanopeuksinen, mutta sähköä tuottava generaattori on vakionopeuksinen. Turbiinin pyörimisnopeuden vaihtelun välittää generaattorille vaihteisto, jonka välityssuhdetta voidaan muuttaa hydraulisesti. Tässä konseptissa generaattori voidaan kytkeä suoraan sähköverkkoon turbiinin nopeuden muutoksista huolimatta ja erillistä tehonmuokkainta ei tarvita generaattorin ja sähköverkon välille. Yhdysvaltalainen tuuliturbiinivalmistaja Clipper Wind puolestaan valmistaa kuvan 7 mukaista Liberty[®] 2,5 MW muuttuvanopeuksista tuuliturbiinia, jossa turbiinista saatava momentti jaetaan vaihteiston avulla neljälle kestopagneettigeneraattorille.



Kuva 7. Liberty 2,5 MW tuuliturbiini (Clipper 2012)

3.2.1 Vakionopeuksinen tuuliturbiini

Vakionopeuksisissa tuuliturbiineissa sähköä tuottava oikosulkugeneraattori (SCIG, Squirrel Cage Induction Generator) on kytketty suoraan sähköverkkoon ja generaattori pyörii sähköverkon taajuuden määräämällä pyörimisnopeudella. Tämän vuoksi generaattorin ja turbiinin väliin tarvitaan vaihde, joka muuttaa turbiinin hitaan pyörimisnopeuden generaattorille sopivaksi. Kuvassa 8 on esitetty tällaisen turbiinin topologia.



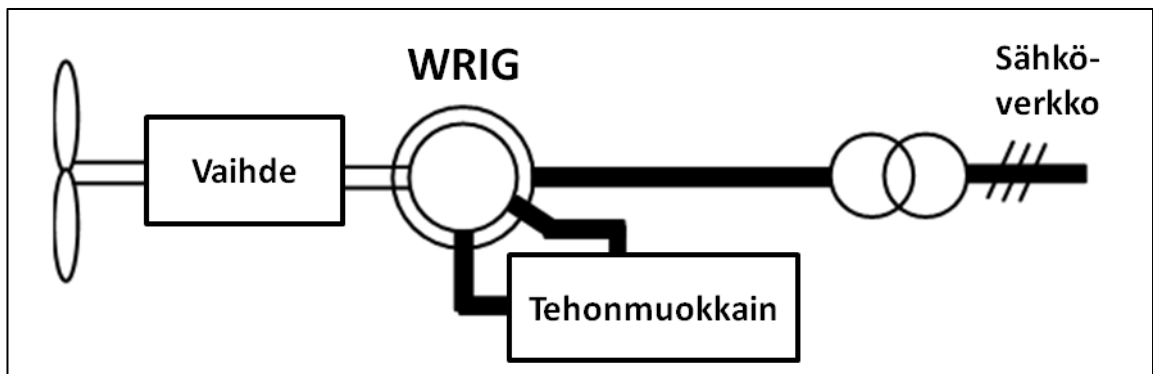
Kuva 8. Vakionopeuksinen tuuliturbiinikonsepti (Polinder et al 2007)

Yksinkertaisimmissa vakionopeuksisissa tuuliturbiineissa roottorin lavat on kiinnitetty kiinteästi roottorinapaan, jolloin lapasäätö tehdään ainoastaan asennettaessa. Turbiinin tehonsäätö perustuu sakkausohjaukseen, missä tuulen nopeuden kasvaessa riittävästi lapaprofiiliin perustuva sakkausnopeus ylittyy ja ilmiö rajoittaa turbiinin tehoa. Tällaisessa turbiinissa mahdollisuudet tehonsäätämiseen ovat minimaaliset ja koko voimansiirtolaitteisto altistuu suurille kuormavaihteluille. Kehittyneemmissä F.S.-turbiineissa roottorilavat on laakeroitu napaan, jolloin turbiinin tehoa voidaan säätää lapakulmaa muuttamalla, ns. pitch-kontrollin avulla.

Näistä konsepteista, vakionopeuksista, sakkausohjattua turbiinia yhdessä SCIG:n ja useampiportaisen vaihteen kanssa valmistettiin yleisimmin 1980- ja 1990-luvuilla.

3.2.2 Rajoitettu muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini

Rajoitetuissa muuttuvanopeuksisissa turbiineissa käytetään perinteisesti liukurengasinduktiogeneraattoria (WRIG, Wound Rotor Induction Generator) yhdessä vaihteen kanssa. L.V.S.-tuuliturbiinikonsepti tunnetaan kaupallisilla merkinnöillä myös ns. Optislip-konseptina, joka on tanskalaisen Vestas-yhtiön tavaramerkki. Tämän konsepti otettiin käyttöön 1990-luvun puolivälissä Vestaksen toimesta. Erona vakionopeuksiseen konseptiin on mahdollisuus tehonmuokkaimen avulla kontrolloida roottorikäämyksen resistanssia. Generaattori on ominaisuuksiltaan hyvin samanlainen kuin SCIG, mutta roottorin resistanssia kontrolloimalla pystytään induktiokoneille tyypillistä jättämää kontrolloimaan 0-10% synkroninopeuden yläpuolella. Tämä mahdollistaa vakionopeuksista tuuliturbiinia laajemman nopeusalueen. Kuvassa 9 on esitetty konseptin topologia. (Polinder et al 2007.)



Kuva 9. Rajoitettu muuttuvanopeuksinen tuuliturbiinikonsepti (Polinder et al 2007)

Optislip-konsepti oli vielä 1990-luvulla varteenotettava teknologia ja sen markkinaosuus olikin parhaimmillaan lähes 20 %. Ackermann (2005) mukaan tämän konseptin markkinaosuus putosi vuoden 1998 17,8 %:sta vuoden 2002 5,1%:iin. Suurin syy tähän oli muuttuvanopeuksisen DFIG-konseptin markkinaosuuden voimakas kasvu 2000-luvun alussa, jossa nopeusalue ei ole samalla tavalla rajattu kuin Optislip-konseptissa.

3.2.3 Muuttuvanopeuksinen tuuliturbiini

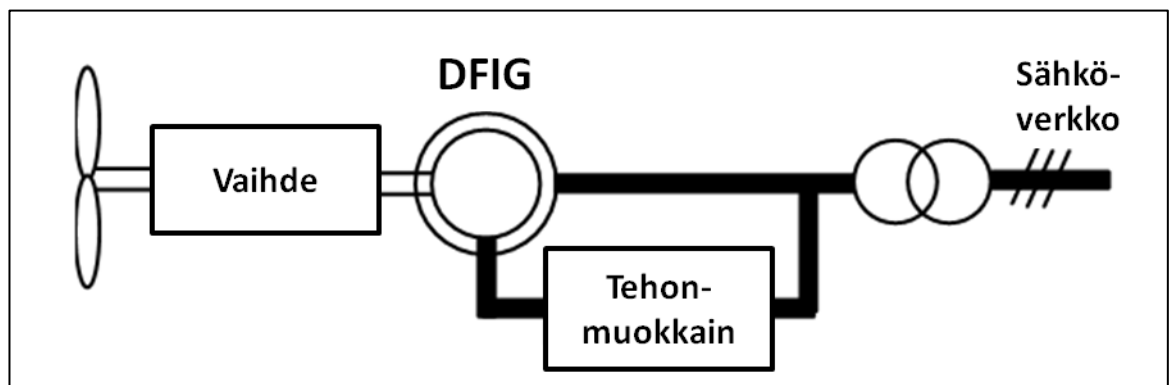
Aina 1990-luvun lopulta lähtien useimmat suuret, julkisiin sähköverkkoihin kytkettävät tuuliturbiinit on rakennettu muuttuvanopeuksisiksi tiukkojen sähköverkko- ja sähkölaatuvaatimusten takia. Näissä tuuliturbiineissa käytetään melkein poikkeuksetta aktiivista lapakulmansäätöä (pitch control) turbiinin tehon säätämiseen. Kun F.S.-turbiini pystyy toimimaan korkealla hyötysuhteella vain hyvin rajoitetulla tuulennopeusalueella, pystyy V.S.-turbiini keräämään maksimaalisen määrän energiaa pienilläkin tuulen nopeuksilla.

Muuttuvanopeuksisissa tuuliturbiineissa on kaupallisissa sovelluksissa käytössä useampia erilaisia generaattoritopologioita, joilla kaikilla on omat erikoispiirteensä. Seuraavat viisi topologiaa ovat yleisesti käytössä.

1. Kaksoissyötetty induktiogeneraattori (DFIG) yhdessä kolmiportaisen vaihteen kanssa ja jossa generaattorin staattorikäänitys on kytketty suoraan sähköverkkoon ja jonka roottorikäänitys on kytketty tehonmuokkaimen kautta sähköverkkoon. (Kuva 10)
2. Oikosulkugeneraattori (SCIG) yhdessä kolmiportaisen vaihteen kanssa ja joka on kytketty täystehomuokkaimen kautta sähköverkkoon (Kuva 11)
3. Kestomagneettigeneraattori (PMSG) yhdessä kaksi- tai kolmiportaisen vaihteen kanssa ja joka on kytketty täystehomuokkaimen kautta sähköverkkoon. (Kuva 12)
4. Suoravetoinen erillismagnetoitu tahtigeneraattori (EESG), jonka sekä roottori että staattori on kytketty tehonmuokkaimen kautta sähköverkkoon. (Kuva 13)
5. Suoravetoinen kestopagneettigeneraattori, jonka staattori on kytketty täystehomuokkaimen kautta sähköverkkoon (Kuva 14)

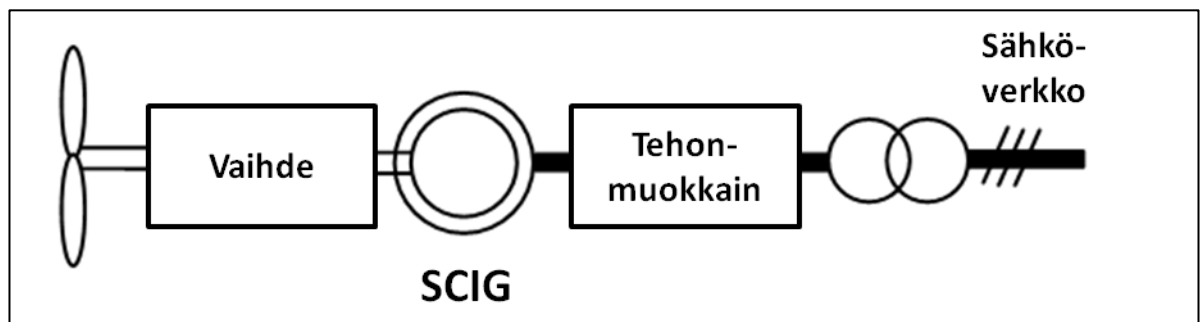
Näistä topologioista kaksoissyötetty induktiogeneraattori on vielä tällä hetkellä yleisimmin käytetty generaattorityyppi isoissa tuuliturbiineissa, koska käytettävän tehonmuokkaimen kokoa voidaan rajoittaa noin 30 %:iin generaattorin tehosta. DFIG:n staattori voi olla samanlainen kuin SCIG:ssä, mutta roottorissa käytetään häkkikäänityksen sijaan kolmivaihekkäämistä staattorin tapaan. Tämä käänitys on kytketty verkkoon tehonmuokkaimen

kautta, jonka avulla voidaan säätää roottorin pätötehoa, jolloin saavutetaan $\pm 30:n$ % säätöalue nopeudessa.



Kuva 10. Kaksoissyötetty induktiogeneraattori (Polinder et al 2007)

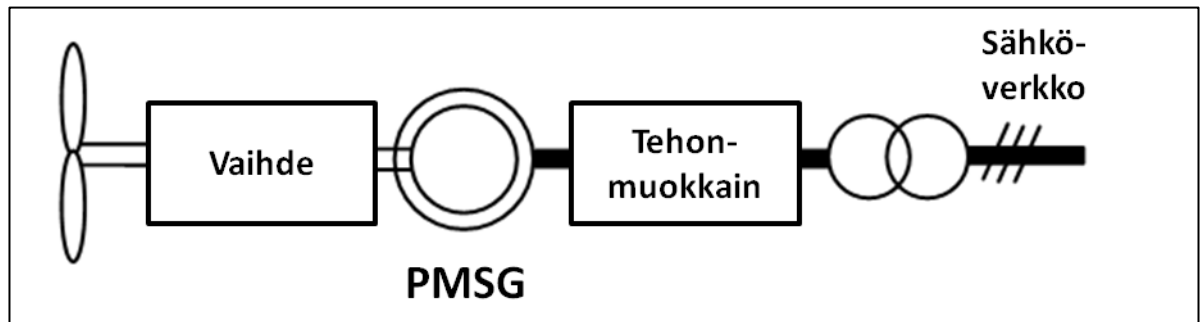
DFIG:n etuja on nopeusalueen riittävä säädettävyys kohtuullisella tehonmuokkaimen kustannuksella. Staattorin pätö- ja loistehoa pystytään kontrolloimaan roottorivirtaa säätämällä tehonmuokkaimen avulla, mikä edesauttaa tasapainottamaan sähköverkon jänniteheilahteluja. DFIG:n haittapuolena ovat vaihteen kitkahäviöt, säännöllinen huollontarve ja melupäästöt, kuten muissakin vaihteellisissa ratkaisuisa. Suoraan verkkoon kytketty staattori saattaa myös aiheuttaa korkeita momentti- ja virtapiikkejä sähköverkon vikatilanteissa. DFIG tarvitsee myös liukurengaslaitteiston roottorikämmitykselle tuotavan virran vuoksi. (Polinder et al 2007, s.10–11.)



Kuva 11. Vaihteellinen oikosulkugeneraattoriratkaisu (Polinder et al 2007)

Oikosulkugeneraattoria voidaan käyttää myös V.S.-turbiineissa kuten F.S-turbiineissa. Erona on tarvittava täystehonmuokkain generaattorin ja sähköverkon välille, jolla generaattorin taajuutta voidaan säätää (kuva 11). Tämän topologian heikkouksia on tarvittava täystehonmuokkain sekä

induktiokoneille tyypillinen heikompi hyötysuhde tahtinopeutta alemmilla nopeuksilla verrattuna esim. PMSG-ratkaisuihin (kuva 12).

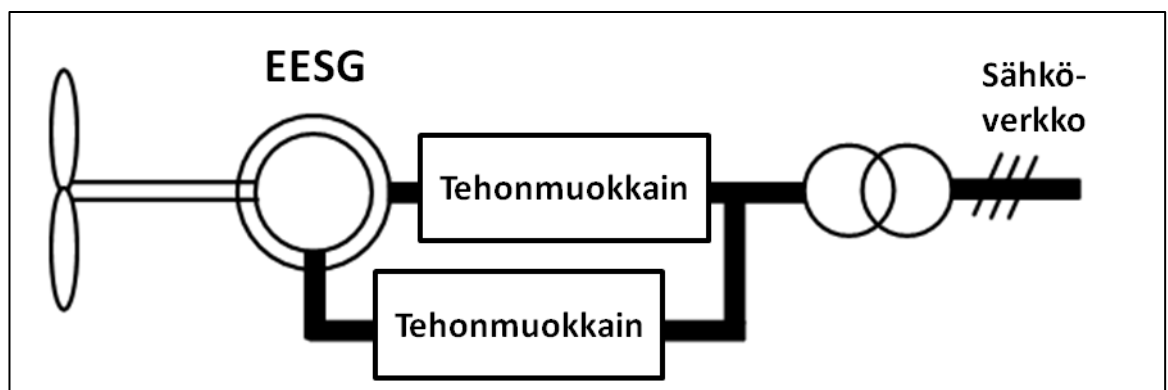


Kuva 12. Vaihteellinen kestopagneettigeneraattoriratkaisu (Polinder et al 2007)

Kestomagneettigeneraattorin yhtenä vahvuutena hyötysuhteen lisäksi on se, että sen napapariluku ja tätä kautta nimellinopeus voidaan valita hyvin vapaasti. Tällöin PMSG:n kanssa voidaan käyttää myös pienemmän välityssuhteen vaihteita tai sitä voidaan käyttää ilman vaihdetta, suoravetoisena.

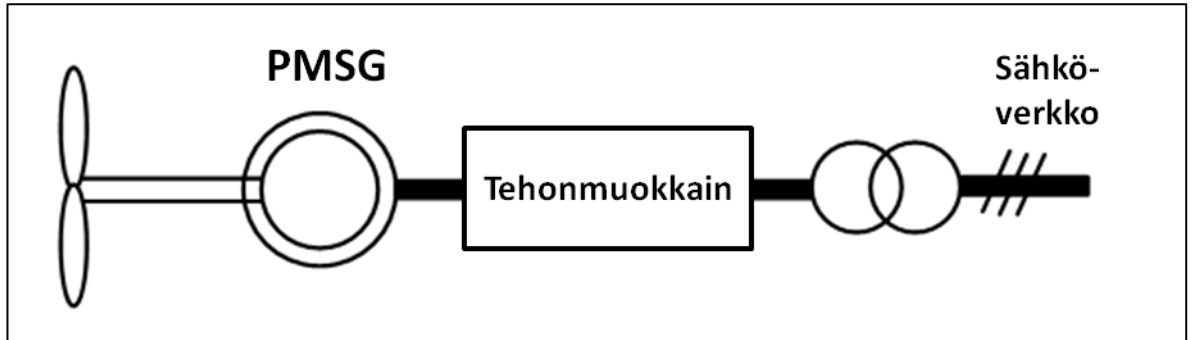
Pientämällä vaihteen välityssuhdetta voidaan kolmiportaaisen vaihteen sijaan käyttää kaksiportaista tai jopa yksiportaista vaihteistoa. Näin vaihteen luotettavuutta saadaan parannettua vähentämällä vikaantuvien osien määrää ja etenkin pudottamalla pyörimisnopeuksia.

Vuodesta 1991 suoravetoisia turbiineja on valmistettu vaihteiden aiheuttamien vikaantumisien alentamiseksi ja huoltovaikeuksien vähentämiseksi. Tämä voidaan tehdä kestopagneettigeneraattorin (kuva 14) lisäksi myös erillismagnetoidulla tahtigeneraattorilla (kuva 13).



Kuva 13. Suoravetoinen erillismagnetoitu tahtigeneraattori (Polinder et al 2007)

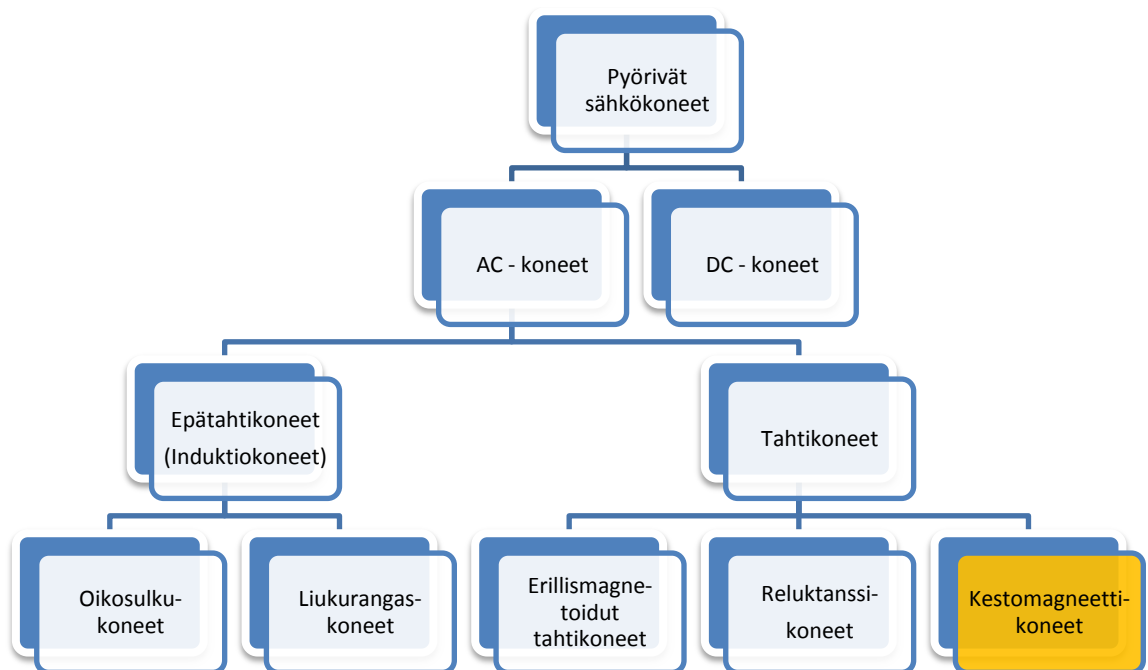
Erillismagnetoidun tahtigeneraattorin vahvuuksia on sen säädettävyys. Sekä staattoria että rottorin magnetointivirtaa ohjataan täystehonmuokkaimella. Verrattuna EESG:hen PMSG:n säädettävyys ei ole aivan yhtä hyvä, mutta PMSG on rakenteeltaan yksinkertaisempi, koska rottorikäimityksen sijaan siinä käytetään kestmagneetteja.



Kuva 14. Suoravetoinen kestmagneettigeneraattori (Polinder et al 2007)

4 Pyörivät sähkökoneet

Pyörivät sähkökoneet muuntavat mekaanisen energian sähköenergiaksi, jolloin puhutaan generaattoreista, tai ne muuntavat sähköenergian mekaaniseksi energiaksi, jolloin puhutaan moottoreista (Aura & Tonteri 2009, s. 304). Ne voidaan jaotella kuvion 2 mukaisesti vaihtovirta- (AC, Alternating Current) ja tasavirtakoneisiin (DC, Direct Current). Nykyisin suurin osa käytettävistä pyörivistä sähkökoneista on vaihtovirtakoneita ja tasavirtakoneita käytetään lähinnä moottoreina joissakin teollisissa sovelluksissa niiden hyvien nopeudensäätöominaisuuksien takia. Energiantuotannossa käytetään vaihtovirtageneraattoreita tuottamaan vaihtosähköä, jonka jännitettä on helppo muuttaa ja näin siirtää taloudellisesti pitkiäkin matkoja. Vaihtovirtakoneet voidaan jakaa epätahtikoneisiin ja tahtikoneisiin. (Aura & Tonteri 2009, s. 304.)

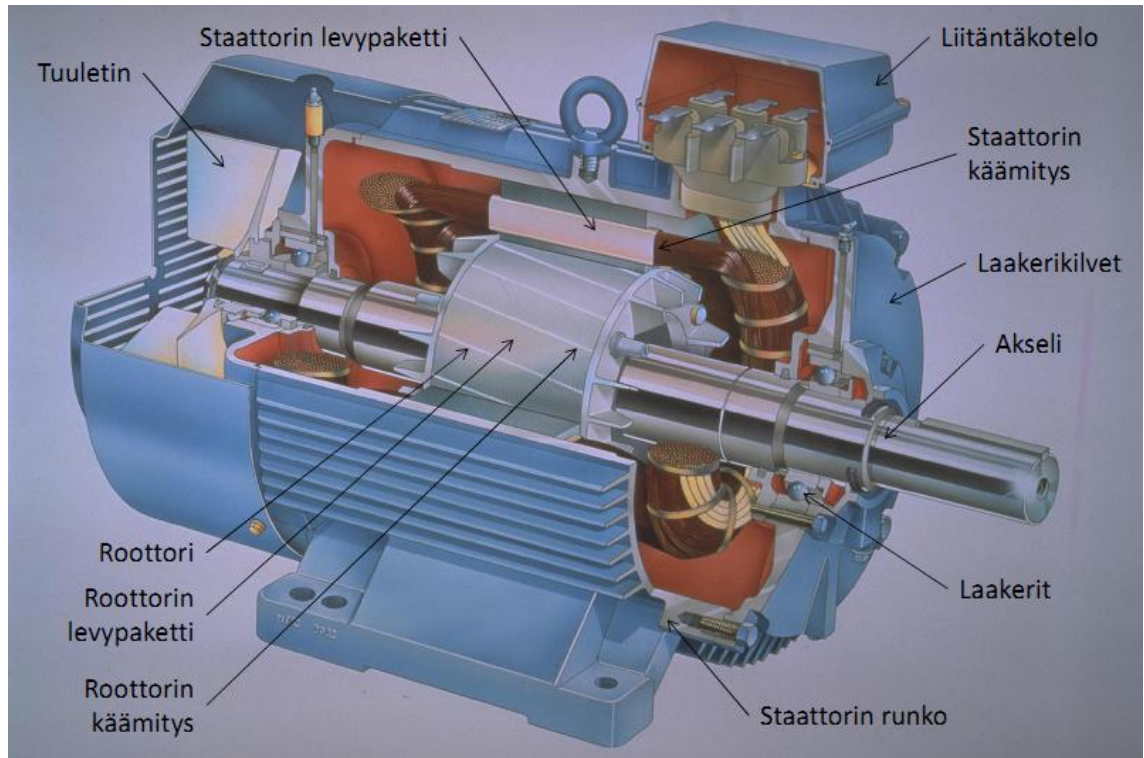


Kuvio 2. Pyörivien sähkökoneiden jaottelu (Puranen 2007)

Sähkökoneiden toiminta perustuu muuttuvan magneettikentän ja siinä olevan virrallisen johtimen väliseen voimavaikutukseen.

4.1 Pyörivän sähkökoneen perusrakenne

Rakenteeltaan erilaisia pyöriviä sähkökoneita on melko paljon. Kaikista normaalirakenteisista koneista voidaan kuitenkin erottaa kuvan 15 mukaiset perusosat: staattori, roottori, laakerit, laakerikilvet sekä runko.



Kuva 15. Normaalirakenteinen oikosulkumoottori ja sen pääkomponentit (Puranen 2007)

Oikosulkumoottorissa pyörivä magneettikenttä saadaan aikaan staattorikäämitykseen johdetun kolmivaihevirran ja siitä roottorikäämitykseen indusoituvan virran avulla. Koska oikosulkumoottorin magnetointivirtaa ei voida erikseen säätää, pyörii roottori eri tahdissa kuin pyörivä magneettikenttä. Tästä syystä oikosulkumoottori kuuluu epätahtikoneisiin.

Kestomagneettigeneraattori eroaa edellisestä roottorikonstruktioltaan. Siinä roottorikäämitys on korvattu kestmagneeteilla, jotka aikaansaavat magneettikentän. Kestomagneettigeneraattorissa roottori on pakotettu edellä mainitun magneettikentän ansiosta pyörimään samalla taajuudella pyörivän magneettikentän kanssa. Kestomagneettigeneraattorit ovatkin ns. tahtikoneita.

4.2 Kestomagneettigeneraattorin suunnittelu

Kestomagneettigeneraattorin, kuten muidenkin pyörivien sähkökoneiden suunnittelu aloitetaan normaalisti sähkömagneettisen piirin laskennalla, jossa määritellään aktiiviosan rakenne. Tätä laskentaa ennen määritellään koneelle halutut perustiedot. Perustietojen määrittämiseen vaikuttavat muunmuassa käyttöympäristö, käyttökohde, ohjaustapa sekä suunnittelijan kokemusperäinen tieto. Tärkeimpiä tällaisia tietoja ovat konetyyppi, peruskonstruktio, nimellisteho, nimellispyörimisnopeus, napapariluku, nimellistaajuus, nimellisjännite, vaiheluku, käyttötapa, kotelointiluokka ja perusrakenne sekä mahdolliset muut tiedot kuten vaadittu hyötysuhde, suunnittelussa noudatettavat standardit, taloudelliset reunaehdot ja valmistettavuus. (Pyrhönen et al 2008, s. 281.)

Konetyyppinä kestopagneettigeneraattori kuuluu tahtikoneisiin ja perusrakenteena voi olla esimerkiksi aksiaalivuo tai radiaalivuokonstruktio. Nimellispisteen määrittäminen tapahtuu yleensä käyttökohteen mukaan ja esimerkiksi tuulivoimakäytössä nimellispiste määräytyy tuuliturbiinin roottorin nimellispyörimisnopeuden ja käytetyn voimansiirtokonseptin mukaan. Yleensä isot kestopagneettigeneraattorit suunnitellaan kolmivaiheisina, mutta myös esim. kuusivaiheisia kestopagneetti-generaattoreita valmistetaan. Käyttötapa määräytyy myös käyttökohteen mukaan ja se määritellään standardin IEC60034-1 mukaisesti. Kotelointiluokka määritellään standardin IEC60034-5 mukaisesti käyttökohde ja ympäristöolosuhteet huomioiden.

Suunniteltaessa kestopagneettisähkökonetta voidaan vapaita muuttujia löytää varsin runsaasti, mikä tekee suunnittelusta hyvin raskasta ja erittäin vaikeaa. Monet näistä vapaista muuttujista vaihtelevat kuitenkin vain hieman ja siksi suunnittelun yksinkertaistamiseksi ne voidaan olettaa vakioiksi. Näin voidaan etsiä talous-tekniillisessä mielessä optimiratkaisua, johon tarvitaan yleensä lukuisia iterointikiertoja. Vapaina muuttujina voidaan pitää seuraavia kymmentä muuttujaa:

1. staattorin levypaketin ulkohalkaisija
2. staattorin levypaketin pituus
3. staattoriuran leveys

4. staattoriuran korkeus
5. ilmaväliahkaisija
6. ilmavälinpituus
7. ilmavälivuontiheyden huippuarvo
8. kestopagneetin korkeus (roottoriuran korkeus)
9. kestopagneetin leveys (roottoriuran leveys)
10. napapariluku ja taajuus.

Varsinainen koneen suunnitteleminen aloitetaan valitsemalla koneen päämitat, jotka tässä yhteydessä tarkoittavat ilmavälinhalkaisijaa sekä aktiiviosan pituutta. Koneelle sallitut rasiustasot määräytyvät koneen jäähdytyksen ja eristyskonstruktion mukaan. Lämpötilannousun lisäksi koneen tehoa ja maksiminopeutta rajoittavat keskipakovoiman, ominaistaajuuksien sekä sähkömagneettisen kuormituksen aiheuttamat korkeimmat sallitut mekaaniset rasitukset. (Pyrhönen et al 2008, s. 281–282, s.291.)

Kaikenkaikkiaan koneen suunnitteleminen on melko monimutkainen iteraatioprosessi, jossa ensin valittujen päämittojen mukaan tehdään sähkömagneettinen mitoitus. Tämä mitoituslaskenta on perusta muulle suunnittelulle. Laskennasta saadut häviöjakaumat ovat perusta jäähdytyksen suunnittelulle, kun taas sähkötekninen suorituskyky yhdessä rasitusten kanssa ovat perusta mekaanisten rakenteiden suunnittelulle. Mikäli kone ei jäähdy riittävän tehokkaasti tai sen mekaaninen kuormitettavuus ei kestä, joudutaan suunnittelussa palaamaan takaisin ja muuttamaan koneen mittoja, materiaaleja tai jäähdytyskonstruktiota. (Pyrhönen et al 2008, s. 281–282, s.291.)

5 Asiakastuotespesifikaatio

5.1 Nykyisten spesifikaatioiden tilanne ja sisältö

Nykyiset The Switchin tuotespesifikaatiot ovat tehty suurilta osin suunnittelun näkökulmasta ja sisältävät lähinnä listanomaisesti tuotteen eri ominaisuudet. Spesifikaatioissa on esitetty usein suunnittelun tuotokset sellaisenaan ja spesifikaatiot jättävät paljon tulkinnanvaraa sekä esitettyjen parametrien että melko rajatun sisältönsä vuoksi. Teknisen sisällön lisäksi, muut spesifikaatioon liittyvät aspektit ovat jääneet vähemmälle huomiolle. Voidaankin todeta, että nykyiset spesifikaatiot ovat lähinnä listauksia teknisistä parametreista.

Tällä hetkellä TSDS:llä on periaatteessa käytössä kolme erilaista tuotespesifikaatiota kestromagneettigeneraattoreille. Ensimmäinen on myynnin aikana tehtävä hyvin alustava spesifikaatio, joka sisältää tuotteen alustavat pääparametrit ja kyseessä on enemmänkin tekninen datalehti. Toinen on toimitusprojektin aikana täytettävä ulkoinen spesifikaatio, jota käytetään asiakkaan ja TSDS:n välisessä kommunikoinnissa. Kolmas on yhtiön sisäinen spesifikaatio, joka on ulkoista spesifikaatiota laajempi ja sisältää asioita, jotka ovat yhtiön sisäiseen käyttöön.

Tässä työssä keskitytään ulkoiseen spesifikaatioon, joka on tällä hetkellä jaoteltu seuraavasti:

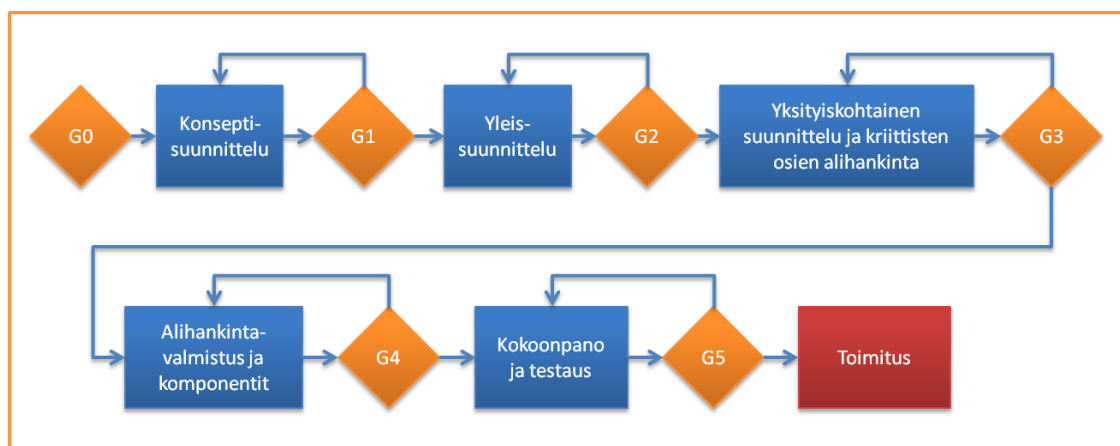
1. Standardit ja direktiivit
2. Yleiset tekniset tiedot
3. Yleiset sähköiset tiedot
4. Ympäristöolosuhteet
5. Päämitat
6. Mekaaninen konfiguraatio
7. Staattorin yleiset tiedot
8. Roottorin yleiset tiedot
9. Jäähdytysjärjestelmä
10. Liitäntäkotelot ja johdotus
11. Laakerointijärjestelmä
12. Instrumentointi

- 13. Pintakäsittely ja korroosionesto
- 14. Lisälaitteet
- 15. Nosto ja kuljetus
- 16. Tekninen dokumentointi

5.2 Asiakastuotespesifikaation rakentuminen toimitusprojektissa

Asiakkaalle tarjottavan tuotteen spesifikaation määrittely alkaa jo myyntivaiheessa, jolloin tehdään alustava sähkömagneettinen mitoitus ja määritellään alustavat pääparametrit. Näiden perusteella voidaan tehdä kustannusanalyysi ja tarjous. Jos tuote on hyvin samanlainen kuin aikaisemmin tai siitä on riittävästi tietoa esim. tehdyn toteutettavuustutkimuksen kautta, voidaan haluttaessa jo tässä vaiheessa ottaa käyttöön laajempi spesifikaatiopohja. Käytännössä kuitenkin tarjoukset melkein aina sisältävät ainoastaan pelkistetyn datalehden.

TSDS:llä uuden tuotteen toimitusprojektit seuraavat tarkasti määritettyä prosessia (kuvio 3), jossa on ennalta määritetyt vaiheet virstanpylväineen ja niitä seuraavat arviointipalaverit (G1...G5). Asiakastuotespesifikaatio seuraa tätä prosessimallia omalta osaltaan. Projektin aloituspalaverissa G0, riippuen siitä mitä asiakkaan kanssa on sovittu myyntivaiheessa ja onko vastaavanlaista tuotetta aikaisemmin tehty, informaatio spesifikaation täyttämistä varten on alustavaa ja mahdollisesti muuttuu suunnitteluvaiheiden edetessä.



Kuvio 3. Toimitusprojektin prosessikaavio

Konsepti ja yleissuunnittelun jälkeen, arviointipalaverissa G2 vapautetaan osa tuotteen osista, pitkän toimitusaikataulun komponentit, valmistukseen. Tässä vaiheessa on erittäin tärkeää, että asiakastuotespesifikaatio on valmis ja vahvistettu kaikilta niiltä osin, jotka mahdollisesti voisivat vaikuttaa näihin osiin. Jos tämän jälkeen tulee muutoksia, voivat niiden vaikutukset kustannuksiin ja aikatauluihin olla hyvinkin suuret.

Koska uuden tuotteen tekemisessä suunnitellun ja tehdyn tuotteen välillä on aina eroja, tulee spesifikaation sisältö tarkistaa ja vahvistaa tuotteen testauksen jälkeen. On siis mahdollista, että asiakastuotespesifikaatio muuttuu vielä toimituksen yhteydessä. Tästä on tietenkin aina sovittava asiakkaan kanssa erikseen.

Tuotespesifikaatio on siis projektin eri vaiheissa sisällöltään erilainen ja informaatio tarkentuu projektin edetessä. On siis tärkeää, että spesifikaatiossa myös ilmaistaan, mikä sen status milloinkin on. Erilaisia statuksia on spesifikaatiolle neljä.

- ”Preliminääri”, jolloin spesifikaatiota täydennetään ilman, että jokaisesta muutoksesta pitäisi erikseen keskustella asiakkaan tai muiden sidosryhmien kanssa. Tämä tapahtuu yleensä konseptisuunnittelun aikana, mutta on myös mahdollista, että tämä on jo tapahtunut myyntivaiheessa.
- ”Julkaistu”, jolloin spesifikaatio on siinä pisteessä, että se on julkaistu ja spesifikaatio on versiokontrollin alla. Tässä tilassa spesifikaatiossa tapahtuvat muutokset tulee olla hyväksytyt asiakkaalla ja mahdollisilla muilla sidosryhmillä. Tämä tapahtuu yleensä projektissa konseptisuunnittelun jälkeen arviointipalaverissa G1. On myös mahdollista, että tämä on jo tapahtunut myyntivaiheessa ja spesifikaatio saattaa olla esim. kaupallisen sopimuksen liitteenä.
- ”Jäädetyt”, jolloin spesifikaation sisältö on kriittisiltä osin vahvistettu ja muutokset saattavat aiheuttaa jo tehtyjen investointien hukkaamista. Tämä tapahtuu yleissuunnittelun aikana ja tarkistetaan arviointipalaverissa G2. Jos spesifikaatio ei ole kyseisessä arviointipalaverissa jäädetyt, ostotoiminta ei saa alkaa.

- ”Vahvistettu”, jolloin spesifikaation sisältöä on verrattu testauksesta saatuihin tuloksiin ja on varmistettu sisällön oikeellisuus. Tämä tapahtuu testuksen jälkeen arviointipalaverissa G5. Mahdolliset muutokset on hyväksyttävä asiakkaalla ja mahdollisilla muilla sidosryhmillä.

5.3 Asiakasvaatimukset

Eri asiakkailla, taustasta ja yritysprofiilista riippuen, on erilaisia vaatimuksia spesifikaatiossa esitettävistä tuotetiedoista ja muista tiedoista. Suuret länsimaiset yhtiöt haluavat, että tuote on kuvattu hyvinkin yksiselitteisesti ja yksityiskohtaisesti. Pienemmät yhtiöt ja yhtiöt, joilla ei ole kokemusta ostettavasta tuotteesta tai toimialasta, tyytyvät pienempään informaatiomäärään ja luottavat enemmän toimittajan heille tarjoamaan informaation tasoon.

Yrityksestä riippumatta, asiakkailla on tietyt tuotteesta halutut perustiedot, jotka täytyy olla selkeästi esitetty ja joita asiakas voi halutessaan verrata eri toimittajien välillä. Tällaisia perustietoja, jotka tulee antaa spesifikaatiossa ja jotka määrittelevät tuotteen, ovat ainakin:

1. Nimellispisteen suorituskykyarvot
2. Generaattorin sallittu maksiminopeus
3. Sähköiset arvot tehonmuokkaimen mitoitus varten
4. Mekaaniset ulkomitat ja rajapintatiedot sekä tuotteen paino
5. Jäähdytyksen rajapintatiedot

Generaattorin suorituskykyvaatimusten lisäksi monet asiakkaat haluavat tuotteen suunnittelun täyttävän sille annettuja reunaehtoja, kuten suunnitellun käyttöä. Valmistuksen halutaan täyttävän sille annettuja vaatimuksia, kuten laatumittareita tai joskus jopa ennalta asiakkaan määrittämiä valmistusprosesseja. Esimerkkinä tällaisesta asiakkaiden joskus vaatimasta valmistusprosessista on käämityn staattorin tyhjiöhartsaus. Myös suoritettavien testauksien ja toimitettavan dokumentaation suhteen saattaa olla erilaisia vaatimuksia. Nämä kaikki on hyvä kirjata spesifikaatioon.

5.4 Eri markkina-alueet ja viranomaiset

Eri markkina-alueet ja niissä voimassa olevat viranomaismääräykset standardeineen tuovat erilaisia vaatimuksia generaattoreille, jotka tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Nämä sovellettavat määräykset ja standardit tulee identifioida jo myyntivaiheessa ja ne tulee olla lueteltuna selkeästi teknisessä spesifikaatiossa. Sovellettavat standardit vaikuttavat osaltaan koneen rakenteeseen ja sitä kautta kustannuksiin.

Direktiivi / Standardi	Määritelmä
2006/95/EC	Low voltage directive
2006/42/EC	Machinery directive
IEC/EN 60034-1	Rotating electrical machines- Part 1: Rating and performance
IEC/EN 60034-5	Rotating electrical machines - Part 5: Degree of protection provided by the integral design of rotating electrical machines (IP code) - Classification
IEC/EN 60034-6	Rotating electrical machines - Part 6: Methods of cooling (IC code)
IEC/EN 60034-7	Rotating Electrical Machines - Part 7: Classification of Types of Construction, Mounting Arrangements and Terminal Box Position (IM Code)
IEC/EN 60034-8	Rotating electrical machines - Part 8: Terminal marking and direction of rotation
IEC/EN 60034-9	Rotating Electrical Machines - Part 9: Noise Limits
IEC/EN 60034-14	Rotating electrical machines Part 14: Mechanical vibration of certain machines with shaft heights 56 mm and higher. Measurement, evaluation and limits of vibration severity
IEC/EN 60204-1	Safety of Machinery - Electrical Equipment of Machines - Part 1: General Requirements

Taulukko 2. Sovellettavat standardit ja direktiivit.

TSDS:n suunnitteluprosessissa otetaan huomioon Euroopassa sovellettavat standardit ja viranomaismääräykset, kuten pienjännitedirektiivi 2006/95/EC ja

konedirektiivi 2006/42/EC tekemällä jokaiselle uudelle konetyypille sisäinen CE-vaatimustenmukaisuuskartoitus. Näiden direktiivien vaatimukset tulee täyttyä soveltuvin osin, jotta CE-merkintä on mahdollista kiinnittää generaattoriin. Spesifikaatioon voidaankin oletuksena sisältää listaus sovellettavista standardeista ja direktiiveistä taulukon 2 mukaisesti. On kuitenkin huomioitava, että tuotteesta ja sovelluksesta johtuen kyseiset standardit eivät ole kaikilta osin sovellettavissa ja tämä onkin syytä kirjoittaa spesifikaatioon epäselvyyksien välttämiseksi. Usein myös asiakkaalla tai TSDS:llä sisäisesti on tiukemmat vaatimukset tuotteelle kuin mitä standardit vaatisivat ja tämä onkin hyvä indikoida spesifikaatiossa.

Viittaukset muiden markkina-alueiden viranomais määräyksiin tai vaadittuihin sertifiointeihin ja mahdolliset muut sovellettavat standardit lisätään spesifikaatioon tapauskohtaisesti. Koska kestopagneettigeneraattorit ovat vain yksi komponentti, joka toimitetaan osaksi tuuliturbiinia, sitä ei voida pitää tässä mielessä itsenäisenä tuotteena. Tämän takia tulee asiakkaan määrittellä mitä mahdollisia vaatimuksia ja sovellettavia standardeja tulee noudattaa.

5.5 Kestomagneettigeneraattorin suorituskyky

Standardi IEC60034-1: "Rotating Electrical Machines – Part 1: Rating and performance" määrittelee omalta osaltaan pyörivien sähkökoneiden mitoituksen ja suorituskyvyn. Tätä standardia mukaillen esitettäviä ominaisuuksia spesifikaatiossa ja mitoituslähtökohtia ovat:

- Käyttötapa
- Nimellisteho
- Nimellisjännite
- Nimellisvirta
- Ympäristöolosuhteet, joihin sähkökone on tarkoitettu
- Lämpöluokka
- Eristysluokka

5.5.1 Perusmitoitus ja sähköinen suorituskyky

Käytännössä generaattorin perusmitoituksessa vapaiden muuttujien liikkumavaraa pystytään rajoittamaan lähtövaatimusten ja kokemusperäisten reunaehtoien avulla. Tämä vähentää iteroinnin tarvetta ja nopeuttaa suunnitteluprosessia. (Kurronen 2012.)

TSDS:llä alustava perusmitoitus tehdään analyyttisellä laskentaohjelmalla, jonka avulla voidaan helposti määritellä perusparametrit syötettyjen lähtöarvojen avulla. Lopullinen laskenta ja tarkastelu tehdään sähkö-FEM-laskentaa (Finite Element Method) käyttäen. Tarvittavat perustiedot, kuten generaattorin teho (P), nimellispyörimisnopeus (n) ja haluttu nimellinen liitinjännite (U) saadaan asiakkaalta.

Mitoituksen peruslähtökohtana on kokemusperäisesti asetettava maksimiraja-arvo ilmavälin tangenciaaliselle jännitykselle (σ_{tan}). Tätä arvoa voidaan pitää yksinkertaistettuna konevakiona, joka määrittää suorituskyvyn eli kuinka paljon generaattoria voidaan kuormittaa. Tangenciaalinen jännitys voidaan laskea yksinkertaisesti yhtälöllä 1, missä F_{tan} on generaattorin tehon aiheuttama tangenciaallinen voima ilmavälissä ja A_{gap} on ilmavälin aktiivinen pinta-ala. (Kurronen 2012.)

$$\sigma_{\text{tan}} = \frac{F_{\text{tan}}}{A_{\text{gap}}} \quad (1)$$

Tämän tangenciaalisen jännityksen avulla voidaan laskea tarvittava ilmavälin aktiivinen pinta-ala (yhtälö 2). Ilmavälinhalkaisijan (D_{gap}) ja magneettipiirin aksiaalisen pituuden (l') suhde määritellään kokemusperäisesti ottaen huomioon esimerkiksi mikä turbiinikonsepti on kyseessä. Suoravetoisissa generaattoreissa perinteisesti suositaan halkaisijaltaan isoja ja aktiivipituudeltaan lyhyitä konstruktioita, kun taas nopeissa vaihteellisissa ratkaisuisissa tyyppillisesti suhde on lähempänä 1:1. Halkaisija-pituus-suhdetta tarkistetaan laskennan edetessä etsittäessä optimaalista ratkaisua.

$$A_{\text{gap}} = \frac{F_{\text{tan}}}{\sigma_{\text{tan}}} \Leftrightarrow \pi D_{\text{gap}} l' = \frac{F_{\text{tan}}}{\sigma_{\text{tan}}} = \frac{2 \times T_a}{D_{\text{gap}} \sigma_{\text{tan}}} \quad (2)$$

jossa A_{gap} = ilmvälin aktiivinen pinta-ala
 F_{tan} = akselitehon aiheuttama voima ilmvälissä
 σ_{tan} = tangentialinen jännitys
 D_{gap} = ilmvälinhalkaisija
 l = magneettiin aksiaalinen pituus ilmvälissä
 T_a = akselimomentti

Alustavan ilmvälinhalkaisijan määrittämisen jälkeen määritetään staattorin käämityksen perusparametrit uraluku napaa ja vaihetta kohti (q), vaiheluku (m), napapariluku (p), rinnakkaisten haarojen lukumäärä (a) ja käämikierrokset (N_{pv}). Käämityksen perusparametrien lisäksi määritetään käytettävän sähkölevyn ja magneettien laatu. Laskija pystyy näitä parametrejä muuttamalla määrittelemään tarvittavat esitiedot FEM-laskentaa varten.

Koska kestopagneettigeneraattoria ohjataan taajuusmuuttajalla, sen syöttötaajuuden ei tarvitse olla sama sähköverkon kanssa, esim. 50 Hz kuten Suomessa. Tämä antaa liikkumavaraa valittaessa generaattorille napaparilukua, joka vaikuttaa koneen taajuuteen yhtälön 3 mukaisesti. Taajuusmuuttaja ja mahdollisimman optimaaliset sähköiset arvot kuitenkin rajaavat liikkumavaraa ja onkin tavallista, että generaattorin nimellistaajuus pyritään pitämään 10 Hz ja 100 Hz välissä. Alle 10 Hz taajuudet ovat hankalia ohjauksen kannalta ja yli 100 Hz taajuudet kasvattavat rautahäviöitä ja huonontavat näin hyötysuhdetta. (Kurronen 2012.)

$$f = \frac{np}{60} \quad (3)$$

jossa f = taajuus [Hz]
 n = pyörimisnopeus [rpm]
 p = napapariluku

Suurin osa sähkölaskennasta saadusta informaatiosta ja parametreistä on koneen sisäistä teknistä tietoa, joka ei ole asiakasspesifikaation kannalta oleellista ja jota ei ole tarpeen käydä läpi asiakkaan kanssa. Perusparametrit, jotka kuvaavat koneen suorituskykyä, sekä parametrit, joita tarvitaan

esimerkiksi tehonmuokkaimen valinnassa ja ohjeusparametrien syöttämisessä, on tarpeen mainita. Tällaisia tietoja ovat esimerkiksi:

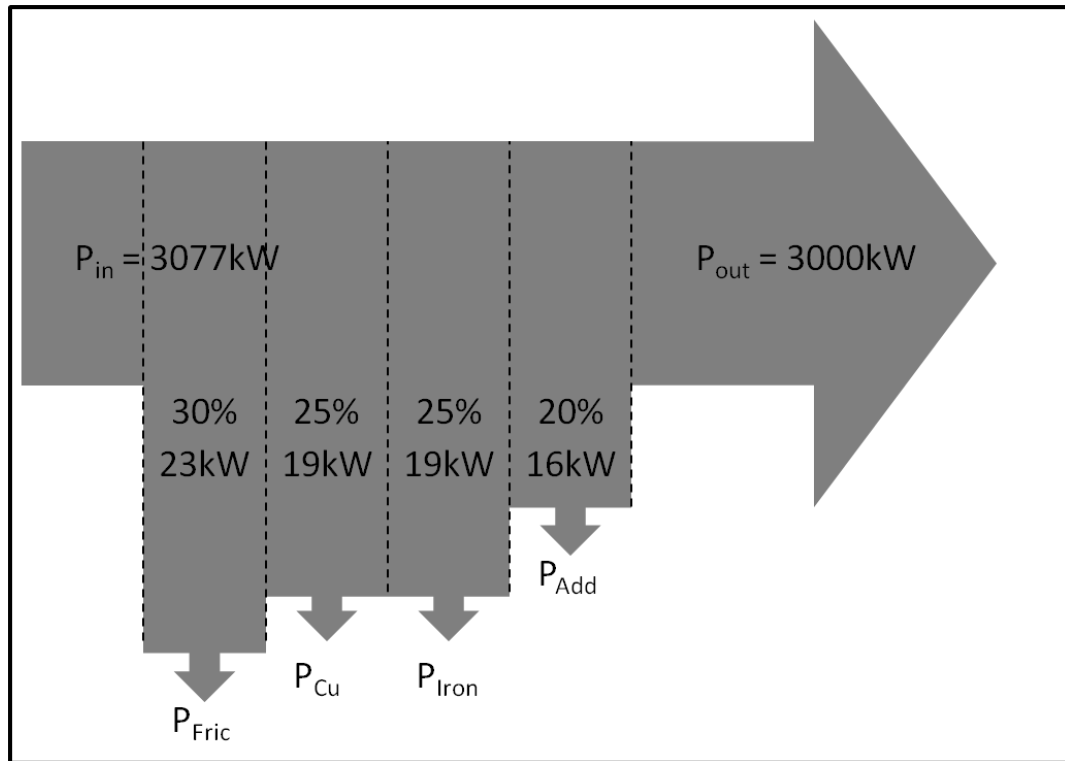
- nimellistaajuus
- nimellisvirta
- vastajännite
- laskennallinen oikosulkuvirta.

5.5.2 Jäähdytys

Sähkökoneissa jäähdytyksen suunnittelu on aivan yhtä tärkeä osa-alue kuin sähkömagneettisen piirin mitoitus. Generaattorin maksimiteho määräytyy loppujen lopuksi sallitun lämpötilanousun mukaan, joka saavutetaan jatkuvalla, käyttötappaa vastaavalla nimelliskuormituksella. (Pyrhönen et al 2008, s.457.)

Kestomagneettigeneraattorin hyötysuhde vaihtelee käytettävästä nopeusalueesta riippuen. Tuuliturbiineissa käytetyt ns. nopeat kestopagneettigeneraattorit, joiden nimellinopeus on yli 1000 kierrosta minuutissa, toimivat noin 97–98 % hyötysuhteella nimellinopeudessaan. Tämä tarkoittaa, että 3,0 MW generaattorin häviöt, jotka muuttuvat lämmöksi ovat luokkaa 60–90 kW. Tämä häviöteho täytyy jotenkin johtaa ulos generaattorista.

Generaattorissa syntyvät kokonaishäviöt jakautuvat epätasaisesti generaattorin eri osien välillä ja jäähdytyksen suunnittelun kannalta onkin tärkeää tietää häviöjakaumat koneessa. Kuvassa 16 on esitetty erään 3,0 MW kestopagneettigeneraattorin laskennallinen häviöjakauma prosentteina. Kokonaishyötysuhde generaattorilla on 97,5 % ($P_{out}/P_{in} * 100\%$), jolloin häviöitä kyseisessä koneessa on 77 kW.



Kuva 16. 3,0MW kestopagneettigeneraattorin häviöjakauma

- missä
- P_{in} = sisään syötettävä akseliteho
 - P_{out} = ulos saatu sähköteho
 - P_{cu} = kuparihäviöt (resistiiviset häviöt)
 - P_{Iron} = rautahäviöt
 - P_{Add} = lisähäviöt
 - P_{Fric} = kitkahäviöt (mekaaniset häviöt)

Pyrhösen et al (2008) mukaan häviöt voidaan jakaa neljään ryhmään:

- resistiivisiin häviöihin staattorin ja roottorin virtajohtimissa (P_{cu})
- rautahäviöihin magneettisessä piirissä (P_{Iron})
- lisähäviöihin (P_{Add}) sekä
- mekaanisiin häviöihin (P_{Fric})

Resistiivisiä häviöitä kutsutaan usein myös kuparihäviöiksi. Nämä häviöt tapahtuvat generaattorin virtajohtimissa ja ovat suoraan verrannollisia johdinresistanssiin ja neliöön verrannollisia johtimessa kulkevaan virtaan nähden. Kuparihäviöt voidaan laskea yksinkertaisen yhtälön 4 avulla.

Kestomagneettigeneraattoreissa ei ole käämitystä roottorissa, joten kuparihäviöitä ei esiinny roottorissa vaan ainoastaan staattorissa.

$$P_{Cu} = mI^2 \times R_{AC} \quad (4)$$

missä m = vaihemassa [kg]

I = virta [A]

R_{AC} = AC resistanssi vaihekäämissä [Ω]

P_{Cu} = kuparihäviöt [W]

Rautahäviöt tapahtuvat generaattorin magneetti- ja kupari- ja rautahäviöissä. Niiden osuus kokonaishäviöistä pienenee generaattorin nimellisopeuden pienentyessä. Taulukossa 3 on esitetty kolmen eri 3,0 MW:n kestomagneettigeneraattorin laskennalliset häviöt.

Konetyyppi	Nopeus	Tangentiaalinen jännitys	Häviötehot			Hyötysuhde
	n (rpm)	σ_{tan} (kN/m ²)	P_{Cu} (kW)	P_{fe} (kW)	P_{tot} (kW)	η
HS	1500	42,2	24,5	29	76	97,5
MS	150	52	45,6	23	85	97,2
DD	15	55,1	116	14,2	158	95

Taulukko 3. PMG:n häviöt kolmella eri nopeusalueella (Kurronen 2009)

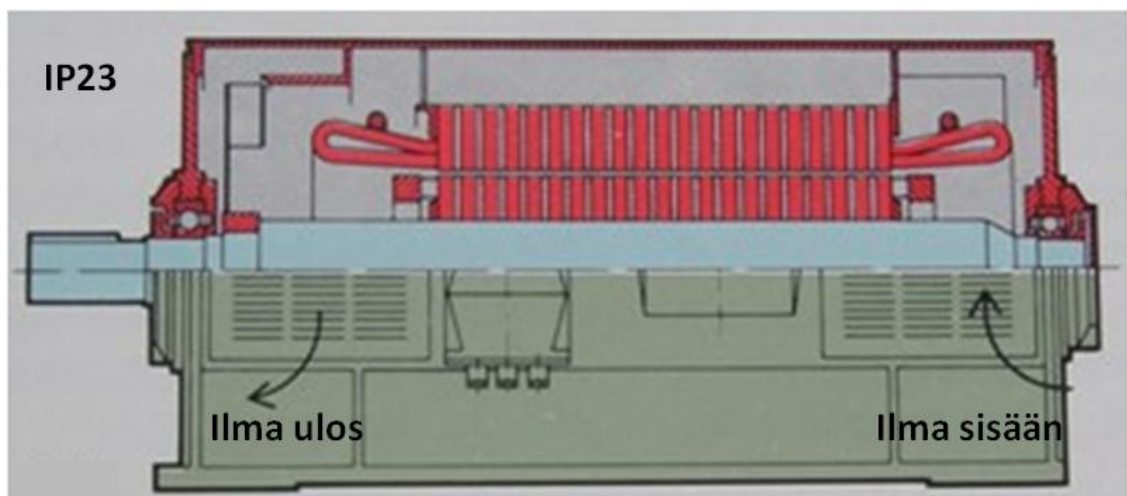
Lisähäviöt (P_{Add}) sisältävät ne sähköiset häviöt, jotka eivät sisälly resistiivisiin häviöihin tai rautahäviöihin. Näitä häviöitä on erittäin vaikea laskea tai mitata, jonka takia esimerkiksi IEC-standardeissa oletuksena on, että induktiokoneilla ne ovat 0,5 % sähkökoneen sisäänmenevästä tehosta. (Pyrhönen et al 2008, s.460.)

Kestomagneettigeneraattoreiden yhteydessä käytettävä tehonmuokkain aiheuttaa generaattorissa harmonishäviöitä, joita ei siellä muuten esiintyisi. Nämä häviöt voidaan tulkita laskettaviksi osaksi lisähäviöitä, vaikka ne johtuvat ulkopuolisesta lähteestä ja riippuvat käytettävästä tehonmuokkaimesta. Näiden häviöiden laskeminen ja erittelemine on hankalaa, mutta ne tulee huomioida jäähdytystä suunniteltaessa.

Mekaaniset häviöt (P_{Fric}) koostuvat laakerien kitkahäviöistä sekä pyörivien osien ja niitä ympäröivän kaasun, yleensä ilman, välisistä kitkahäviöistä. Mitä nopeammin kone pyörii, sitä suurempia ovat nämä häviöt. Näihin häviöihin lasketaan usein myös jäähdytyksen ottama teho, kuten tarvittavat puhaltimet pakotettuun ilmakiertoon.

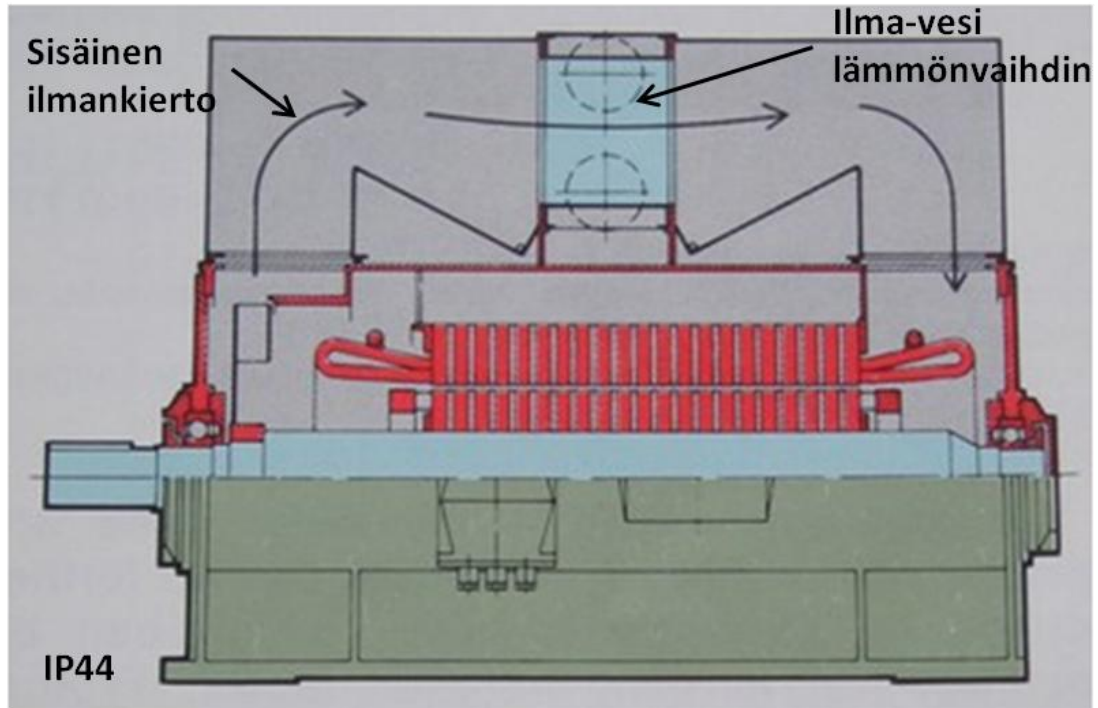
Tehokas lämmönpoistaminen koneesta voidaan toteuttaa usealla tavalla. Käytävissä olevia metodeja ovat konvektio, lämmönjohtuminen ja säteily. Näistä tehokkain lämmönsiirtomenetelmä on ehdottomasti konvektio. Suuren tehotiheyden sähkökoneissa vapaa konvektio ei enää riitä poistamaan syntyvää hukkalämpöä ja näissä joudutaan käyttämään pakotettua konvektiota. Käytännössä kaikki MW-luokan generaattorit jäähdytetään pakkokonvektion avulla. Lämmönjohtuminen ja säteily ovat huonoja jäähdytysmenetelmiä sähkökoneissa, mutteivat kuitenkaan merkityksettömiä. Esimerkiksi laippakiinnitteisissä generaattoreissa lämpöä voi siirtyä laipan välityksellä ulkoisiin rakenteisiin useita kW:ja.

Pakotettu konvektio voidaan toteuttaa suorajäähdytyksenä, jolloin pakotettu ulkoinen nesteen tai kaasun virtaus johdetaan suoraan pinnoille, joista lämpöä halutaan poistaa. Esimerkkinä tällaisesta voidaan pitää kuvan 17 mukaista järjestelyä, missä ilma imetään koneen akselille sijoitetun puhaltimen avulla ulkoilmasta. Tämä ilma kiertää koneen sisällä halutun reitin, jonka jälkeen se puhalletaan ulos toisesta päästä. Standardin IEC 60034-5 mukainen kotelointiluokka on tällaiselle konstruktiolle IP23.



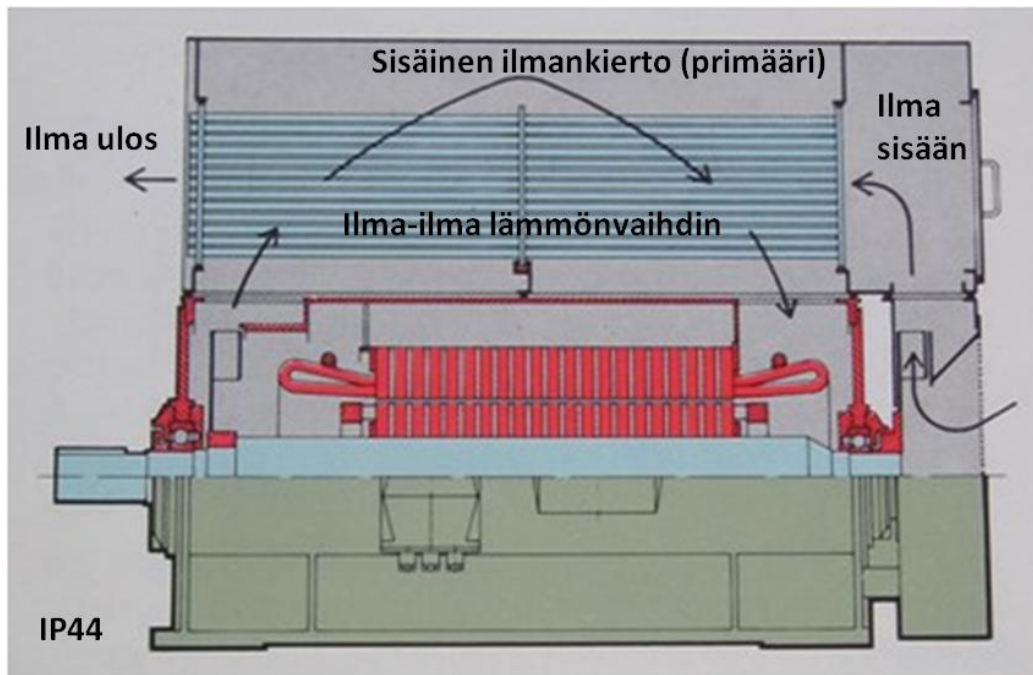
Kuva 17. Pakotettu suorajäähdytys (Savelainen 2007)

Pakotettu konvektio toteutetaan monesti epäsuorana jäähdytyksenä, jossa generaattori itsessään on suljettu rakenne. Generaattorin sisällä kiertävä ilma kiertää erillisen lämmönvaihtimen kautta, jossa se viilennetään (Kuva 18).



Kuva 18. Pakotettu epäsuora jäähdytys ilma-vesi lämmönvaihtimella (Savelainen 2007)

Epäsuorassa jäähdytyksessä, lämmönvaihdin voi olla joko ilma-vesi, kuten kuvassa 18, tai se voi olla ilma-ilmalämmönvaihdin kuvan 19 mukaisesti. Molemmissa esimerkkien tapauksissa standardin mukainen kotelointiluokka on IP44. Standardissa IEC 60034-6 on eri jäähdytysmenetelmille annettu oma spesifisensä koodi, ns. IC-koodi. Spesifikaatioon on hyvä merkitä sekä IC-koodi että IP-luokka.



Kuva 19. Pakotettu epäsuorajäähdytys ilma-ilma lämmönvaihtimella (Savelainen 2007)

Myös monen muunlaisia jäädytysmenetelmiä käytetään, kuten ns. suoraa vesivaippajäädytystä, jossa erillinen lämmönvaihdin on korvattu runkorakenteeseen integroidulla vesivaipalla, missä jäädytysvesi kiertää. Usein jäädytystä tehostetaan kuitenkin erillisellä koneen sisäisellä ilmankierrolla, joka saadaan aikaan koneen akselille sijoitetulla puhaltimella.

Standardi IEC 60085 määrittelee lämpötilaluokat ja niitä vastaavat maksimilämpötilat sähkökoneissa käytettäville eristeille. Taulukossa 4 on standardin määrittelemät lämpötilaluokat esitettyinä. Esimerkiksi lämpötilaluokan F eristeiden maksimi sallittu käyttölämpötila on 155 °C.

Alin ja ylin lämpötila °C		Lämpötilaluokka °C	Merkintä
≥90	<105	90	Y
≥105	<120	105	A
≥120	<130	120	E
≥130	<155	130	B
≥155	<180	155	F
≥180	<200	180	H
≥200	<220	200	N
≥220	<250	220	R
≥250	<275	250	-

Taulukko 4. Standardin IEC 60085 mukaiset lämpötilaluokat

Jäähdytyksen suunnittelussa tulee huomioida tämä materiaalien maksimilämpötila. Standardi IEC 60034-1 määrittelee osaltaan sähkökoneiden suorituskyvyn ja sallitun lämpenemän sekä mittausmenetelmät näiden todentamiseen. Taulukossa 5 on esitetty lämpenemät erilaisille sähkökoneiden käämityksille ja lämpötilaluokille. Esimerkiksi 3 MW kestromagneettigeneraattorin, jonka lämpötilaluokka on F (155 °C), maksimi lämpenemä (ΔT) mitattuna upotetulla lämpötila-anturilla (ETD) on 115 °C (merkitty oranssilla). Tehdastesteissä nimellisasteessa ajettaessa generaattorin lämpenemä ei saa ylittää tätä lämpötilaa, jotta se täyttää standardin vaatimukset.

Lämpötilaluokka		130 (B)			155 (F)			180 (H)		
Mittaustapa: Th = Lämpömittari, R = Resistanssi, ETD = Upotettu lämpötila-anturi		Th K	R K	ETD K	Th K	R K	ETD K	Th K	R K	ETD K
nro.	Koneen osa									
1a)	AC käämitykset teholtaan 5000kW tai enemmän	-	80	85	-	105	110	-	125	130
1b)	AC käämitykset teholtaan yli 200kW mutta alle 5000kW	-	80	90	-	105	115	-	125	135
1c)	AC käämitykset teholtaan 200kW tai alle ja jotka eivät kuulu kategoriaan 1d tai 1e	-	80	-	-	105	-	-	125	-
1d)	AC käämitykset teholtaan alle 600W	-	85	-	-	110	-	-	130	-
1e)	Itsejäähdytetyt AC käämitykset, joissa ei käytetä tuuletinta ja/tai joissa on kapseloitu käämitys	-	85	-	-	110	-	-	130	-
2	Käämitykset tai ankkurikämmitykset, joissa käytetään kommutaattoria	70	80	-	85	105	-	105	125	-
3	AC koneiden kenttäkäämitykset, jotka eivät kuulu kategoriaan 4	70	80	-	85	105	-	105	125	-
4a)	Tahtikoneiden kenttäkäämitykset, joiden roottorissa DC heräteäämitys on upotettu roottoriin, poisluettuna induktiotahtikoneet	-	90	-	-	110	-	-	135	-
4b)	Eristetyt DC koneiden kiinteät kenttäkäämitykset, joissa on enemmän kuin yksi kerros	70	80	90	85	105	110	105	125	135
4c)	AC ja DC koneiden matala resistanssiset kenttäkäämitykset, joissa on enemmän kuin yksi kerros. DC koneiden kompensointikämmitykset	80	80	-	100	100	-	125	125	-
4d)	AC ja DC koneiden yksikerroskäämit, joissa on paljaat tai lakatut metallipinnat	90	90	-	110	110	-	135	135	-

Taulukko 5. Standardin IEC 60034-1 mukaiset sallitut lämpenemät

Tuulivoimassa on hyvin yleistä, että asiakkaat vaativat ympäristöolosuhteisiin vedoten generaattorin kotelointiluokaksi IP54, standardin IEC 60034-5 mukaan. Tällöin generaattorin rakenteen täytyy olla suljettu ja esimerkiksi suora ilmajäähdytys ei ole mahdollista. Kestomagneettigeneraattoreissa on hyvin tärkeää, että roottorissa olevien magneettien lämpötila pysyy materiaalille

asetettujen lämpötilarajojen alapuolella. Riskinä on, että esimerkiksi tehonmuokkaimen vikaantumisen yhteydessä tapahtuu oikosulku, jonka seurauksena kestopagneetit saattavat demagnetoitua ja menettää magneettiset ominaisuutensa osittain tai kokonaan. Monesti kestopagneettigeneraattoreiden tehoa saattaakin rajoittaa magneettien lämpötila, eikä IEC:n mukainen staattorista mitattu lämpenemä. Epäsuora jäähditys yhdessä oikein ohjatun sisäinen ilmankierron kanssa on TSDS:llä katsottu olevan erittäin tehokas tapa pitää magneettien lämpötilat sallituissa rajoissa. Oikein suunnitteleamalla ja kestopagneettigeneraattorien erityispiirteet huomioonottamalla pystytään pienentämään demagnetointiriskiä ja koneen potentiallisesta tehosta saadaan kaikki mahdollinen irti.

Asiakkaan vaatimuksista, jäähdytystavasta ja siitä, kuinka integroitu osa generaattori on turbiinia riippuu, kuinka paljon jäähdytysjärjestelmästä spesifikaatioon merkitään. On kuitenkin tarkoituksenmukaista, että standardin IEC 60034 mukaiset parametrit, kuten lämpöluokka, eristysluokka, kotelointiluokka ja jäähdytystapa ilmoitetaan. Myös asiakkaalta jäähdytykselle asetetut rajoitteet, kuten esimerkiksi lämmönvaihtimelle maksimissaan sallittu painehäviö sekä jäähdytyksen asettamat rajoitteet, kuten käytetyn jäähdytysaineen laatu, olisi hyvä sopia asiakkaan kanssa etukäteen ja merkitä spesifikaatioon.

5.6 Mekaaninen konfiguraatio

Kestomagneettigeneraattorin mekaanisen suunnittelun lähtökohtana ovat sähkömagneettisen piirin mitoituksesta tulevat aktiiviosien mitat ja kuormitukset sekä jäähdytyslaskennan antamat reunaehdot. Suunnitteluun vaikuttavat osaltaan myös asiakkaan ja sovelluksen tuomat reunaehdot, kuten tuuliturbiinin liikkeiden aiheuttamat kiihtyvyydet, tehonsiirtoakselistosta siirtyvät ulkopuoliset voimat generaattorin akselille, tuuliturbiinissa käytettävissä oleva tila ja niin edelleen.

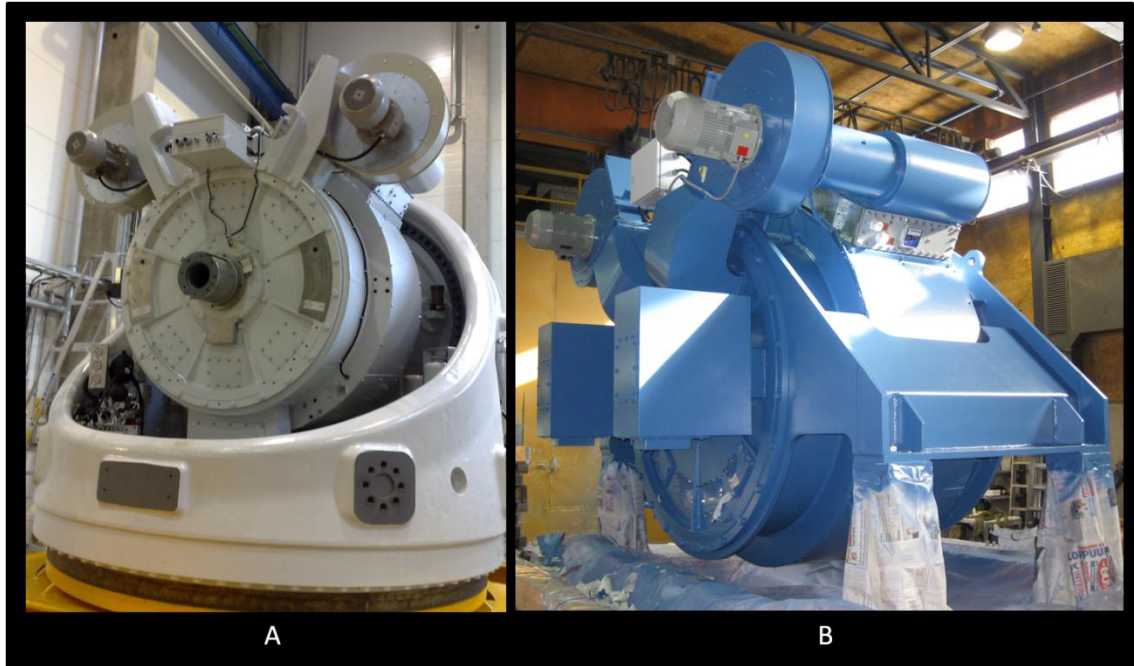
Uuden tuotteen suunnittelussa, asiakkaasta ja turbiinikonseptista riippuen, joudutaan tekemään paljon interaktiivista yhteistyötä asiakkaan kanssa sovitettaessa generaattoria osaksi turbiinin voimansiirtoa, etenkin jos kyseessä

on suoravetoinen tuuliturbiini, jossa generaattorikonstruktio on integroitu osaksi turbiinia. Tämän vuoksi on hyvin tärkeää, että tarpeelliset tiedot on merkitty spesifikaatioon, sisältäen sekä rajoitukset että ominaisuudet.

5.6.1 Peruskonstruktio ja sijoitus tuuliturbiinin

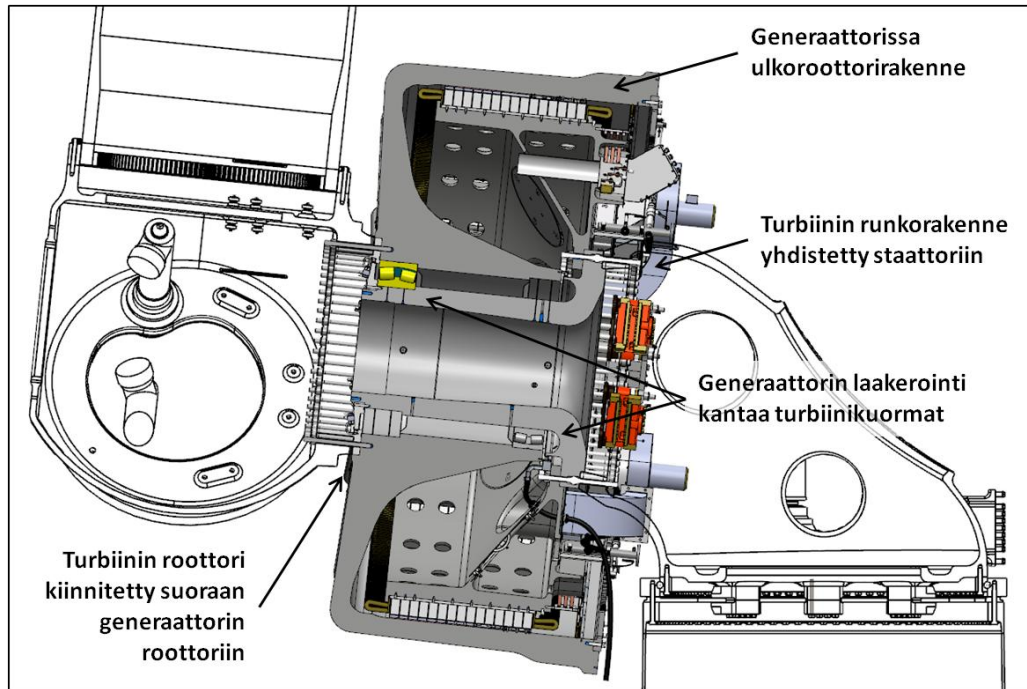
TSDS:n tuulivoimaan toimitettavat generaattorit voidaan jakaa periaatteessa kolmeen eri kategoriaan nopeusalueensa mukaan: nopeisiin (HS, High Speed), keskinopeisiin (MS, Medium Speed) ja hitaisiin eli suoravetoisiin (DD, Direct Drive). Kaksi ensimmäistä ovat tarkoitettu vaihteellisiin tuuliturbiineihin ja viimeinen, nimensä mukaisesti suoravetoisiin eli vaihteettomiin tuuliturbiineihin. HS-generaattoreiden nimellinen pyörimisnopeus on tyypillisesti 1000 rpm:stä ylöspäin, MS-generaattoreiden 100 rpm:stä alle 600 rpm:ään ja DD-generaattoreiden 10–20 rpm:ää eli sama kuin turbiinilla. Kaikissa näissä voidaan löytää sähkökoneista tuttu peruskonstruktio staattoreineen ja roottoreineen. HS- ja MS-koneet ovat lähempänä toisiaan ja vähemmän integroituja turbiiniin kuin mitä DD-koneet ovat.

Nopeat kestopagneettigeneraattorit ovat lähes poikkeuksetta kiinnitetty turbiinin rungossa olevista jaloistaan ja ne sijaitsevat usein siten, että generaattorin akselilinja on sivussa turbiinin akselilinjasta. Yleensä jalkojen alle sijoitetaan vaimentimet eristämään generaattorin ja turbiinin värähtelyt toisistaan. Keskinopeat generaattorit ovat usein kiinnitetty laippaliitoksella turbiinin runkorakenteeseen tai vaihtoehtoisesti suoraan vaihteistoon. Näin säästetään tilaa verrattuna jalkakiinnitteiseen ratkaisuun. Kuvassa 20A on esitetty laippakiinnitteinen MS-generaattori kiinnitettynä naselliin ja kuvassa 20B jalkakiinnitteinen MS-generaattori valmiina tehtaalla. Kuvan molemmissa tapauksissa generaattorin ja turbiinin akselilinjat ovat samat, jolloin turbiinin navassa tarvittavat ohjaus- ja virtakaapelit viedään generaattorin akselin lävitse.



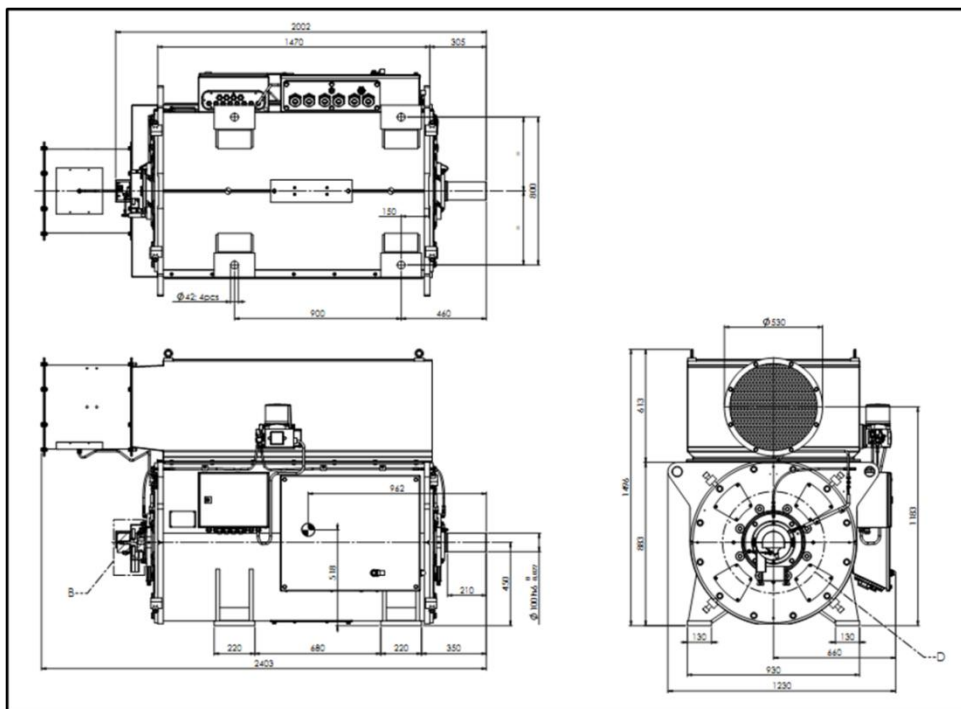
Kuva 20. Laippa- ja jalkakiinnitteinen MS-generaattori

Suoravetoisissa tuuliturbiineissa, peruskonstruktioista ja integroinnin tasosta riippuen, generaattori joutuu usein ottamaan vastaan turbiinista välittyvät tuulikuormat. Nämä kuormitukset on tunnistettava ja otettava huomioon mekaanisen rakenteen suunnittelussa. Asiakkaan antamat, turbiinilaskennasta saadut lähtötiedot ovat avainasemassa. Kuvassa 21 on esitetty tällainen TSDS:n suunnittelema ja valmistama kestomagneettigeneraattori PMR2250, jossa generaattori on integroitu osaksi turbiinia niin, että generaattorin laakerointi ottaa vastaan kaikki turbiinista välittyvät tuulikuormat. On olemassa myös ratkaisuja, joissa turbiinilla on oma päälaakerinsa, joka kantaa tuulikuormat ja ratkaisuja, joissa on vain yksi laakeri, joka kantaa sekä generaattorin että turbiinin kuormat.



Kuva 21. Kestomagneettigeneraattori integroituna tuuliturbiiniin

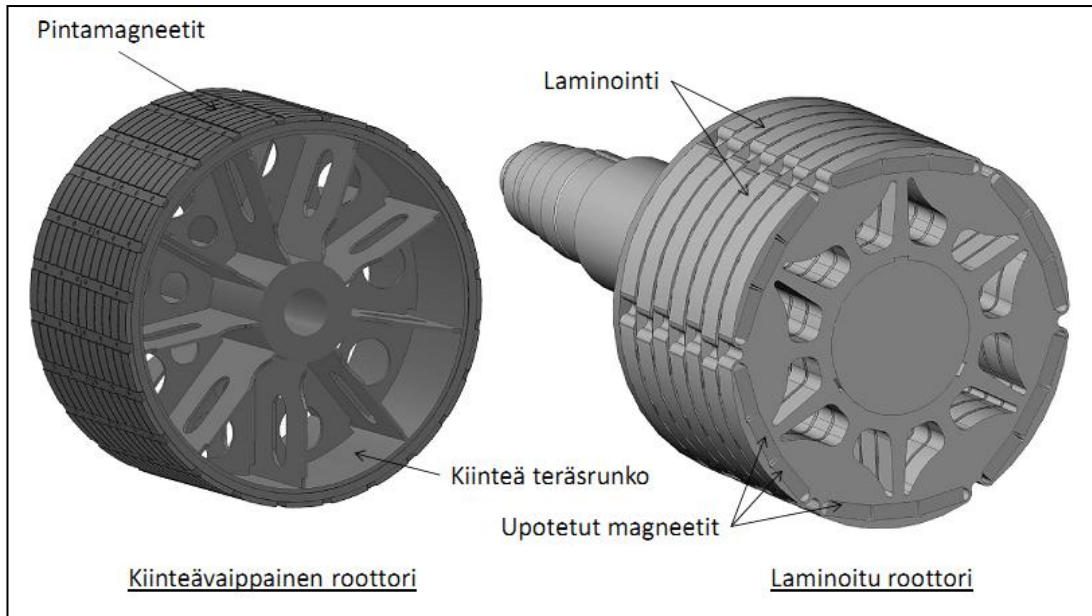
Tuotespesifikaatiota rakennettaessa on tärkeää, että turbiinin eri kuormitusolot ovat tiedossa ja suunnittelulla on tarvittavat lähtötiedot. Spesifikaatioon on hyvä liittää tiedot rajapinnoissa esiintyvistä kuormituksista ja mitoista. Rajapintamitoitus, kuten kuva 22, voidaan esittää spesifikaatiossa tai erillisessä kuvassa, johon viitataan.



Kuva 22. The Switch PMR450-kestomagneettigeneraattorin päämitat

5.6.2 Roottorikonstruktio

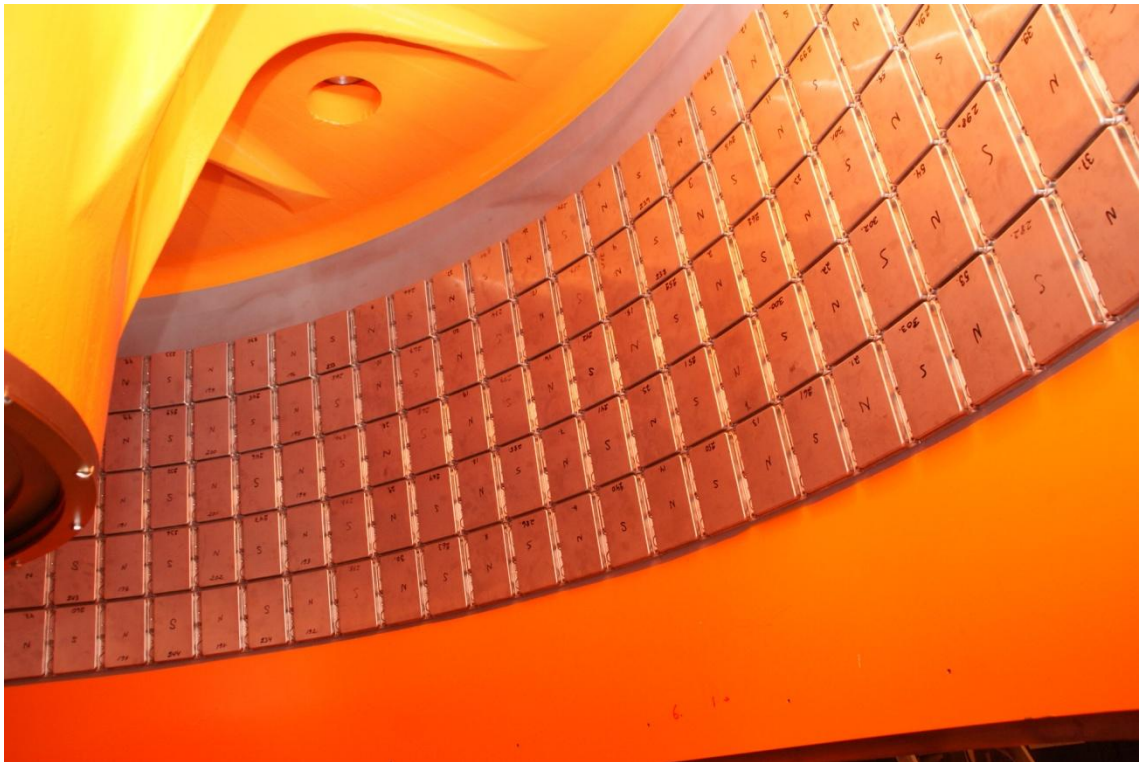
Kestomagneettigeneraattorin roottorin peruskonstruktio voidaan toteuttaa monella eri tavalla. Konstruktiot voidaan kuitenkin jakaa periaatteessa kahteen eri päätyyppiin, laminoituun rakenteeseen tai kiinteävaippaiseen rakenteeseen.



Kuva 23. Kiinteävaippainen ja laminoitu kestomagneettiroottori

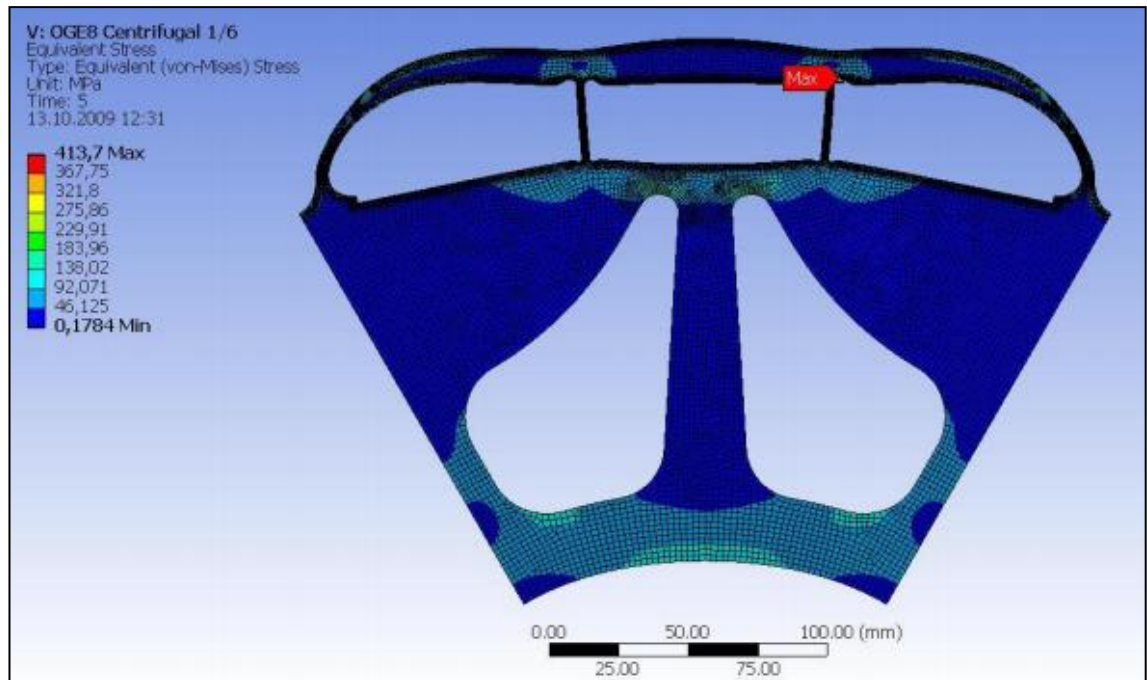
Poikkeustapauksissa (esim. aksiaalivuokoneet) myös muunlaiset ratkaisut, esimerkiksi raudaton roottori on mahdollinen. Laminoidussa roottorirakenteessa magneetit on tyypillisesti upotettu roottorirakenteen sisään ja kiinteävaippaisessa roottorirakenteessa magneetit on kiinnitetty joko suoraan roottorin pintaan (kuva 23) tai erillisessä asennusmoduulissa roottorin pinnalle (kuva 24). Sähkömagneettisen mitoituksen kannalta paras mahdollinen roottoriratkaisu olisi sijoittaa magneetit mahdollisimman lähelle ilmapäliä, jolloin kestomagneettien hajavuo on kaikkein pienin eli vuo voidaan käyttää magnetointiin mahdollisimman tehokkaasti, eikä hukattaisi kallisarvoista materiaalia. Käytännössä kuitenkin roottorin kehänopeuksien kasvaessa, magneettien kiinnitys roottoriin muodostuu kriittiseksi. Tämän vuoksi nopeissa kestomagneettigeneraattoreissa, joissa pyörimisnopeus on yli 1000rpm, käytetään usein upotettuja magneetteja ja laminoituja roottoreita. Teollisuudessa on käytössä myös erikoisratkaisuja, joissa pintamagneettien ympärille on asennettu esimerkiksi komposiittipanta tukemaan magneetteja

korkeissa kehänopeuksissa. Tällaiset ratkaisut ovat kuitenkin harvinaisia ja ne sisältävät omat haasteensa.



Kuva 24. Kestomagneettimoduuleja asennettuna ulkoroottikoneeseen

Magneettien kiinnitys yhdessä roottorirakenteen kestävyys ja stabiiliuden kanssa määrittelevät suurimman sallitun roottorin pyörimisnopeuden. Roottorin mekaniikalle tehdään eri kuormitustilanteiden analyysit, jotta varmistutaan riittävästä kestävydestä. Kuvassa 25 on analysoitu erään roottorin maksimijännitykset roottorin pyörimisnopeuden ollessa 2400 rpm huomioiden magneettien massa. Maksimijännitys kyseisessä roottorissa nousee 414 MPA:han.



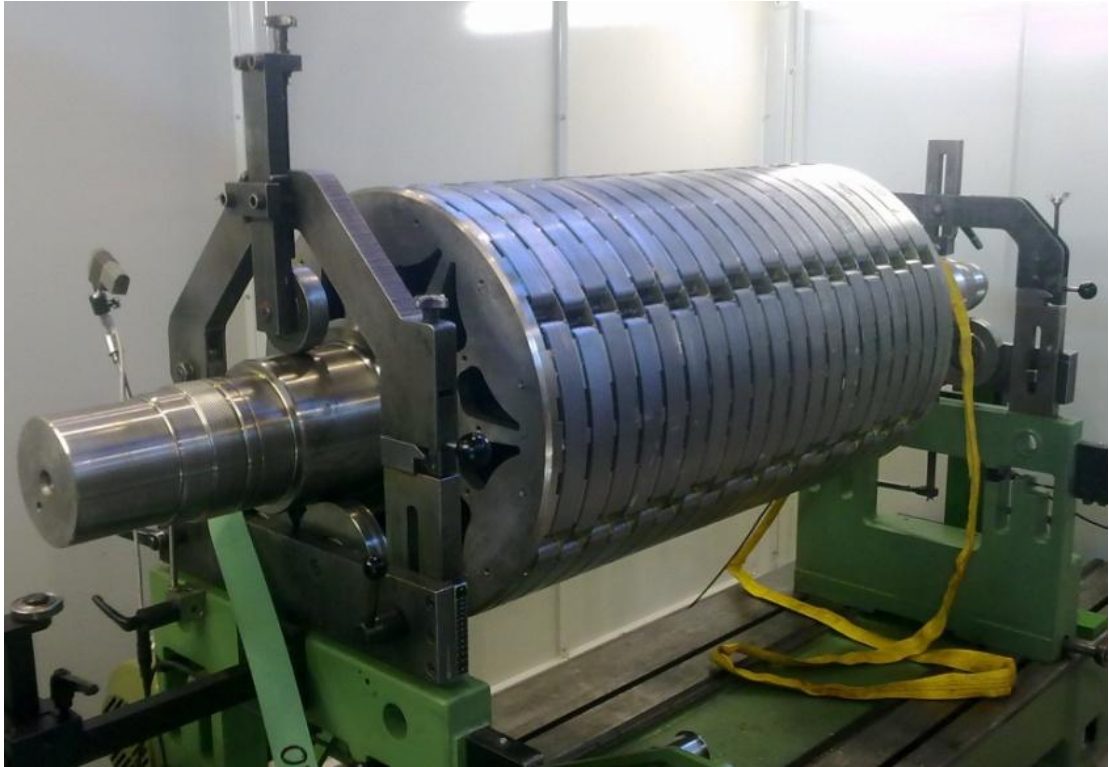
Kuva 25. Roottorin maksimijännitykset, pyörimisnopeus 2400 rpm

Standardi IEC60034-14 määrittelee sähkökoneen maksimissaan sallitut värinät mitattuna koneen rungosta. Taulukossa 6 on esitetty standardin määrittelemät maksimit. Tyypillisesti värinäloukka A on riittävä, mutta joissakin tapauksissa asiakkaat vaativat luokan B kriteerien täyttymistä.

Värinäluokka	Akselikorkeus mm	$56 \leq H \leq 132$			$132 < H \leq 280$			$H > 280$		
		s μm	v mm/s	a m/s^2	s μm	v mm/s	a m/s^2	s μm	v mm/s	a m/s^2
A	Vapaa jousitus	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Jäykkä kiinnitys	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Vapaa jousitus	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Jäykkä kiinnitys	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Taulukko 6. Standardin IEC 60034-14 mukaiset sallitut värinät

Värinöiden minimoimiseksi generaattoreiden roottorit aina tasapainotetaan parhaan mahdollisen lopputuloksen aikaansaamiseksi. Standardin ISO1940-1:2003 mukaan sähkömoottorit ja generaattorit, joiden pyörimisnopeus on yli 950 rpm tulee tasapainottaa luokkaan G2,5. Kuvassa 26 on kokonainen, laminoitu roottori, joka tasapainotetaan ennen asentamista generaattorin sisälle.



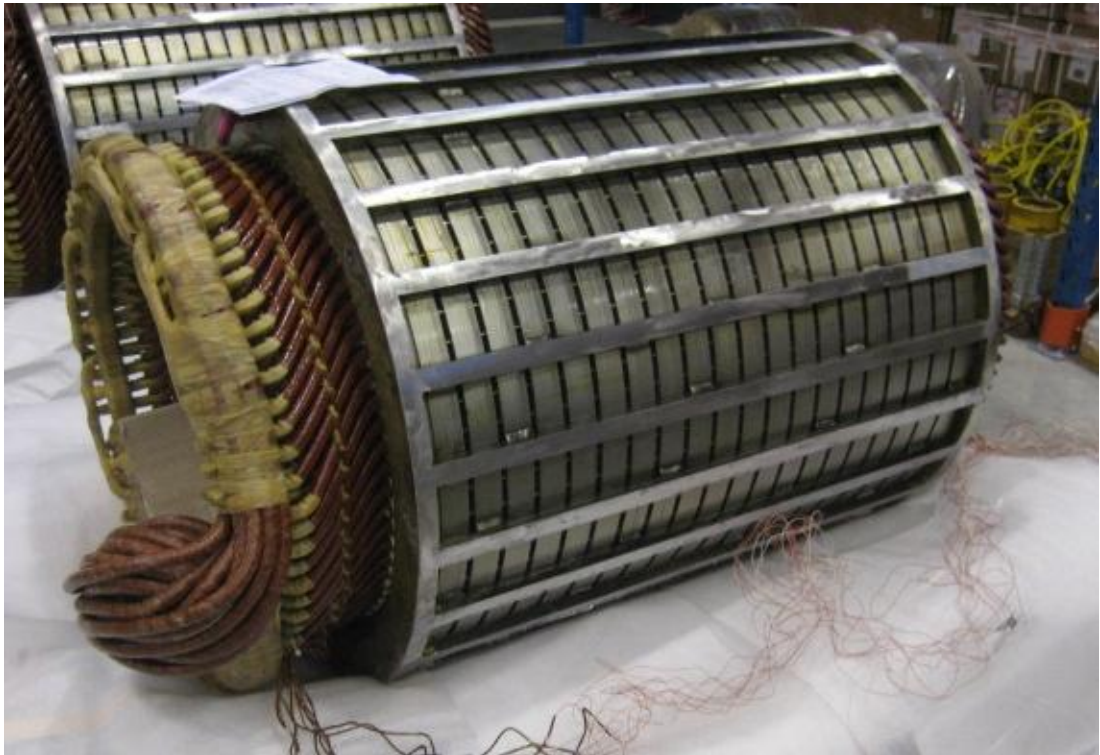
Kuva 26. Valmis roottori tasapainotukseen

Roottorikonstruktion yksityiskohtien määrittäminen spesifikaatioon ei ole tarkoituksenmukaista, ellei siitä ole erikseen sovittu. Tärkeää on kuitenkin, että edellä mainitut tasapainotusluokka, maksimi sallittu pyörimisnopeus ja maksimissaan hyväksyttävissä olevat värinät on spesifikaatioon merkitty. Koska tuulivoimasovelluksissa kestopagneettigeneraattorin pyörimisnopeusalue on suuri, on spesifikaatioon syytä selkeästi merkitä, millä nopeuksilla värinätestit ajetaan. Konstruktiosta voidaan toki mainita, mitä perusrakennetta käytetään.

Tuuliturbiinissa kestopagneettigeneraattorin rottori liitetään osaksi voimansiirtojärjestelmään, jossa turbiinin momentti välitetään generaattoriin kytkimen tai mahdollisesti joissakin tapauksissa kiinteän liitoksen kautta. Asiakkaan kanssa on sovittava tämä rajapintamitoitus, mekaaninen konstruktio yhdessä välitettävien voimien ja liikkeiden kanssa. Vaihteellisissa tuuliturbiiniratkaisuissa mitoitus on yksinkertaisimmillaan ja kytkimen kautta välittyvät voimat ovat lähinnä pyörimisliikkeen momenttia eikä tuulikuormien aiheuttamat taivutusmomentit vaikuta enää samalla tavalla.

5.6.3 Staattorikonstruktio ja käämitys

Kestomagneettigeneraattorin staattorikonstruktio ei poikkea erillismagnetoidusta tahtigeneraattorista tai häkkikääditystä induktiogeneraattorista. Staattori rakennetaan sähkölevyistä laminoituna. Staattorin uriin on sijoitettu eristetty kolmivaiheinen vaihtovirtakäämitys. Kuvassa 27 on esitetty tyypillinen staattorirakenne käämittyinä.



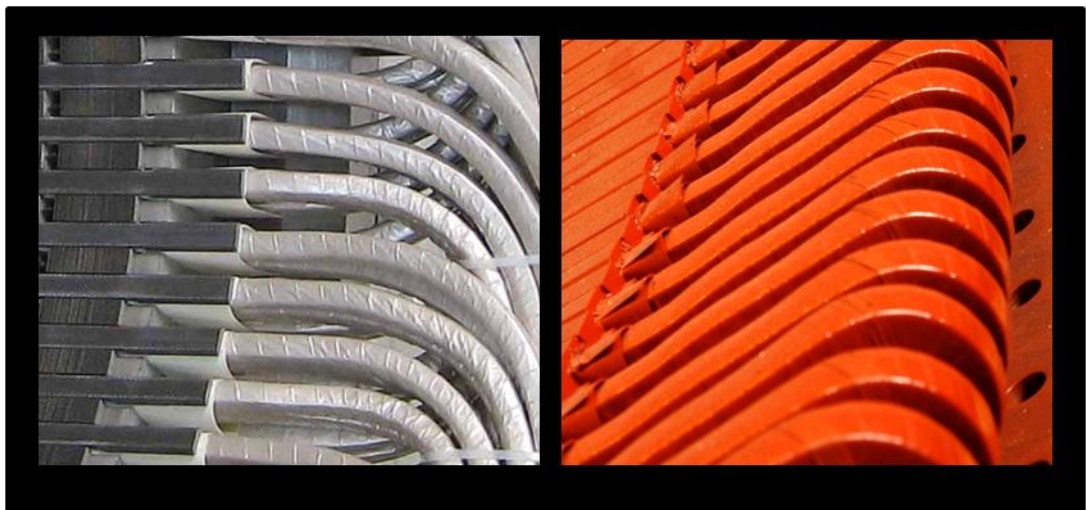
Kuva 27. The Switch PMR560-staattori

Tyypillisesti nopeissa HS-koneissa, runkokokoon 710 mm saakka, staattorit voidaan valmistaa yhtenäisistä levyistä, mutta suurempiin runkokokoihin mentäessä ei ole järkevää tehdä staattorilevyjä yhdestä kappaleesta ison halkaisijan vuoksi. Staattorin halkaisijan kasvaessa suureksi on järkevää tehdä staattorilevyt pienemmistä sektoreista kuvan 28 mukaisesti. Näissä tapauksissa yleensä staattorilaminaatit ladotaan limittäin suoraan teräksiseen runkoon.



Kuva 28. Staattorilevysegmenttien ladonta runkoon

Staattoreissa voidaan käyttää erilaisia käämiratkaisuja (Kuva 29). Tällaisia ovat esimerkiksi pyörölankakäämitys, muotolankakäämitys ja Litz-lankakäämitys.



Kuva 29. Litz- ja muotokuparivyyhdit generaattorikäämitykseen

Näistä yleisin tuulivoimakäytössä on muotolankakäämitys, jolla saavutetaan hyvä täyttökerroin. Yleistymässä on myös Litz-lankakäämitys, jonka etuna on haitallisen virranahdon (skin effect) vaikutuksen pienentäminen

korkeataajuuksisissa sovelluksissa. Virranahto lisää käytönaikaista resistanssia johtimessa, mikä lisää johtimen kuparihäviöitä pienentäen koneen hyötysuhdetta ja lisäten jäähdytyksen tarvetta käämeissä. Tätä haitallista ilmiötä pienennetään siten, että yksittäiset kuparilangat kiertävät johtimen sisällä (Kuva 30) ja vaihtavat näin posiotaan ilmväliin nähden.



Kuva 30. Erilaisia Litz-kuparilankoja käämitykseen (Sofilec 2012)

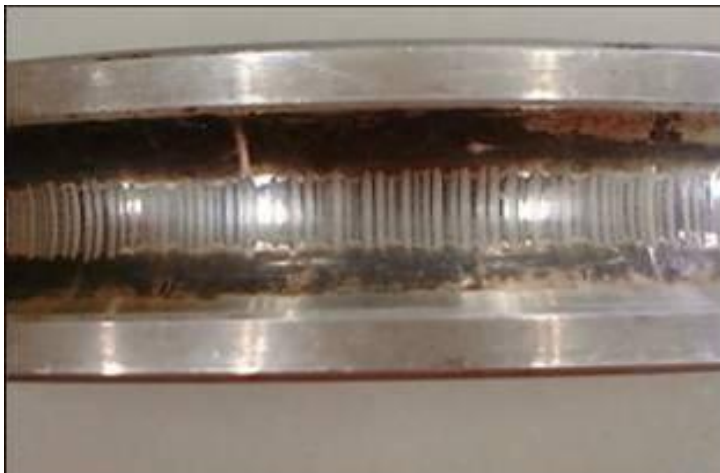
Yleensä staattorikonstruktion ja käämityksen yksityiskohtia ei asiakkaille julkaista ja ne pidetään yhtiön sisäisenä tietona. Spesifikaatiossa on kuitenkin hyvä mainita staattorin ja käämityksen perustietoja, kuten käämityyppi ja staattorin sähköisiä perusparametrejä.

Generaattorin ohjaustavasta riippuen, käytettäessä rinnakkain useampaa kuin yhtä tehonmuokkainta staattoria kohden, saatetaan staattorikäänitys jakaa useampaan galvaanisesti erotettuun osaansa. Tällöin esimerkiksi 3,0 MW:n generaattoria saatetaan ajaa kahdella tehonmuokkaimella. Toisen konverterin vikaantuessa tai haluttaessa ajaa konetta osateholla vain toisella konverterilla, tämä on mahdollista. Tällöin on hyvä spesifikaatiossa selventää, minkälaisella periaatteella käämitys on tehty.

5.6.4 Laakerijärjestelmä

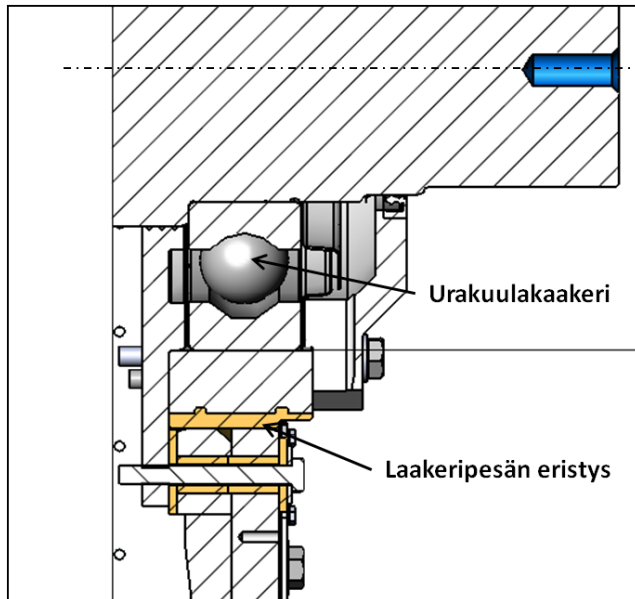
Kestomagneettigeneraattorin laakerointi voidaan järjestää monella eri tavalla. Eri kokoiisiin generaattoreihin valitaan erilaisten kuormitusten ja pyörimisnopeuksien vuoksi erilaisia laakeriratkaisuja. Perinteisesti nopeiden koneiden laakerit, jotka ovat alttiita suhteellisen pienille kuormituksille, ovat urakuulalaakereita. Suurissa suoravetoisissa generaattoreissa käytetään suurien roottorimassojen ja kuormitusten vuoksi erilaisia rullalaakeriratkaisuja.

Kestomagneettigeneraattoreissa, kuten muissakin pyörivissä sähkökoneissa, roottoriin indusoitunut jännite aiheuttaa potentiaalieron roottoriakselin ja laakerikilven välille. Jos tätä potentiaalieroä ei eristetä tai tasata maadoituksella, seurauksena saattaa syntyä laakerivirtoja. Ongelma korostuu erityisesti käytettäessä tehonmuokkainta, kuten tuulivoimassa on tapana. Laakerivirrat aiheuttavat pyöriville laakeripinnoilla, voitelukalvon yli sähköpurkauksia, jotka kiihdyttävät laakerivaurioiden syntymistä. Kuvassa 31 on esitetty laakerivirtojen aiheuttama tyypillinen vierintäpintavaurio laakerin sisäkoolissa.



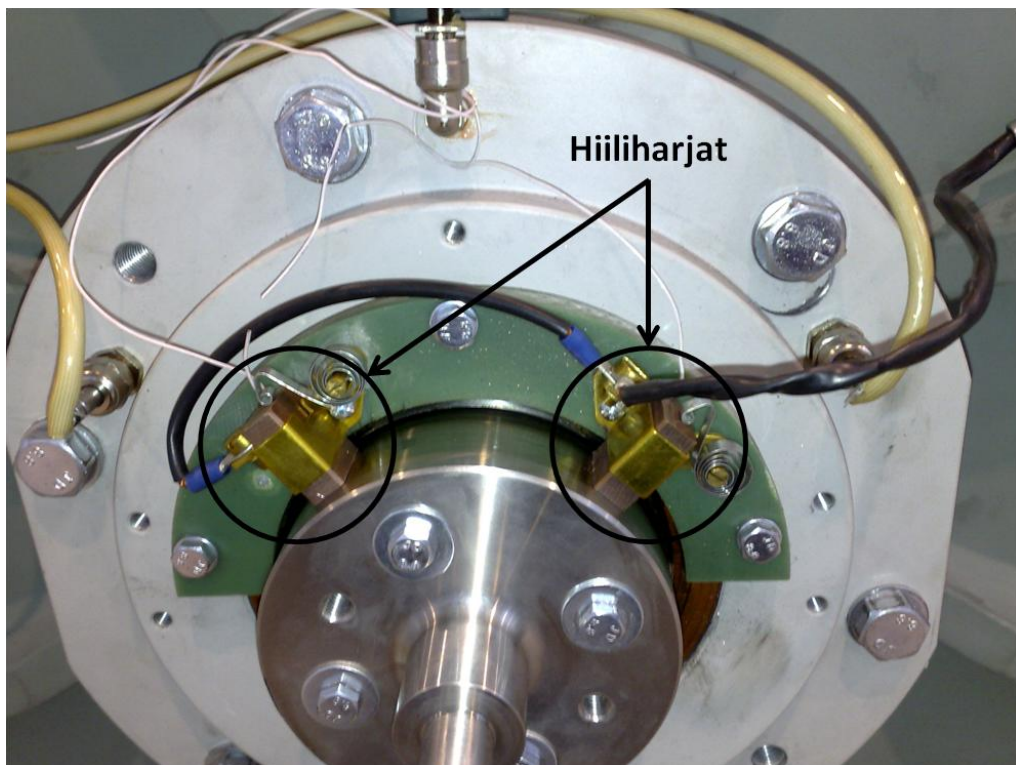
Kuva 31. Laakerivirtojen aiheuttama vaurio (Plant Engineering 2012)

Laakerivirtojen ehkäisemiseksi on kaksi yleisesti käytettyä menetelmää. Eristää laakeri (kuva 32) siten, että sähkövirtausta ei pääse syntymään laakerin läpi tai maadoittaa akseli siten, että sähkövirtaus ohittaa laakeroinnin suunniteltua reittiä pitkin. Monissa tapauksissa ja esimerkiksi TSDS:llä on käytössä myös näiden yhdistelmä, jolloin toisen menetelmän mahdollinen vikaantuminen ei vielä vaaranna laakerointia. Eristemateriaalina käytetään tyypillisesti lasikuitua.



Kuva 32. Laakeripesän eristys kilvestä laakerivirtojen ehkäisemiseksi

Pyörivän akselin maadoituksessa käytetään ns. hiiliharjoja (kuva 33), joissa esimerkiksi hiili-grafiitti seoksesta tehty kovapala asetetaan hankaamaan pyörivää akselia ja toinen pää kiinnitetään johtimella laakerikilpeen. Nämä hiiliharjat ovat usein jousitoimisia, jolloin akselin ja harjan kosketus taataan kulumisesta huolimatta.



Kuva 33. Roottoriakselin maadoitus hiiliharjojen avulla

Tuotespesifikaatiota määritettäessä laakeroinnin peruskomponentit yleensä kirjataan ylös yhdessä laakeroinnille asetettujen vaatimusten, kuten eliniän ja mahdollisen laakeritarkastelun kanssa. Asiakkailla on monesti myös huoltoväliin ja laakerinvaihtoon liittyviä vaatimuksia. Nämä on hyvä olla merkittynä spesifikaatioon.

5.7 Apulaitteet ja instrumentointi

Kestomagneettigeneraattoreissa käytetään erilaisia apulaitteita, kuten erillispuhaltimia, lämmittimiä, hiiliharjoja maadoitukseen, kosteuden poistajia, enkoodereita. Koneista myös mitataan eri asioita käytön aikana, kuten staattorikäymityksen ja laakerien lämpötiloja, pyörimisnopeutta, mahdollisesti tärinöitä. Nämä mittaustulokset ovat apuna turbiiniohjauksessa ja ilmoittavat mahdollisesta vikaantumisesta.

Spesifikaatiota määritettäessä on tarpeellista sopia mitä mahdollisia apulaitteita generaattori sisältää sekä ilmoittaa ainakin rajoittavat tekniset ominaisuudet, kuten käytettävä jännite. Rajapintana asiakkaalle instrumentoinnin osalta on yleensä apuliitäntäkotelot, johon generaattorin apulaitteet ja anturointi johdotetaan. Tästä tarvitaan kytkentäkaavio, jotta asiakas osaa omalta osaltaan varautua kytkentöihin.

5.8 Tuotteen valmistaminen ja laatu

Tuotteen valmistus tulee ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa ja TSDS:llä tätä varten on DFMA-analyysi (Design for Manufacture and Assembly) integroitu osaksi suunnitteluprosessia ja suunnittelukatselmuksissa on mukana tuotantoinsinööri arvioimassa tuotteen valmistettavuutta.

Jossain tapauksissa asiakkaan vaatimukset eivät koske ainoastaan tuotetta ja sen designia, vaan vaikuttavat myös tuotteen valmistamiseen ja siinä käytettäviin menetelmiin ja prosesseihin. Nämä vaatimukset tulee tunnistaa ja kirjata spesifikaatioon. Hyvä esimerkki tällaisesta valmistusvaatimuksesta on VPI-hartsaus (Vacuum Pressure Impregnation), jota vaaditaan usein tehtäväksi käämitykselle. Myös kirjatut laatuvaatimukset saattavat vaikuttaa valmistusmenetelmiin.

Asiakkaan vaatimuksena saattaa laatu järjestelmien suhteen olla, että kaikkien tuotantoketjussa olevien tai ainakin kriittisten komponenttien toimittajat on sertifioitu tai vähintäänkin TSDS:n auditoimia. Näiltä osin vaatimukset on hyvä tunnistaa ja ne voivat vaikuttaa käytettävään alihankkijaan. On hyvä mainita tällaiset asiat spesifikaatiossa, jotta yhtiön hankintaosasto osaa ottaa vaatimukset huomioon valittaessa toimittajia.

5.9 Testaus ja tuotteen verifiointi

Testauksella on keskeinen asema tuotekehityksen, tuotannon ja asiakkaan kannalta. Sisäisesti testauksella mitataan sekä tuotekehityksen että tuotannon kykyä tuottaa laadukasta arvonlisäystä. Tuotekehityksen kannalta on tärkeää, että suunnitellun ja toteutuman välille saadaan yhteys. Tämä mitataan tyyppitestauksessa, jolloin kyseisen konetyypin ominaisuudet verifioidaan mahdollisimman tarkasti. Testaus mittaa myös tuotannon kykyä tuottaa laatua ja siksi jokainen tuotettu yksilö rutiinistetaan ja tietyllä otannalla tyyppitestataan.

On tyypillistä, että asiakas haluaa verifioida tuotteen, että se täyttää sille asetetut vaatimukset ennenkuin hän hyväksyy sen toimitetuksi. Tämä tehdään yhteisesti sovitun testaus- ja hyväksymiskäytännön avulla. Nämä asiakkaan vaatimat testit asettavat omat vaatimuksensa myös testausympäristölle, käytettävissä oleville resursseille ja toimitusaikataululle. Siksi on hyvä, että kyseiset testaukset on selkeästi mainittu spesifikaatiossa, jolloin niihin osataan varautua hyvissä ajoin etukäteen.

Myös IEC-standardeissa on määritetty vaaditut testaukset suorituskäytännölle sekä tyyppitestauksen että rutiinitestauksen osalta. TSDS:llä on käytössä testausohjelma ja prosessi näiden vaatimusten täyttämiseksi. Rutiinitestaus pyritään suorittamaan kaikille toimitettaville koneille taulukon 7 mukaisesti.

Testaus nro.	Suoritettava testaus	Referenssi / Huomautus
R1	Visuaalinen tarkastus	
R2	Eristysvastusmittaus	
R3	Lämpötila-antureiden tarkastus	
R4	Vaiheresistanssit käämivyyhdeille kylmänä	IEC 60034-4
R5	Liitinmerkinnät ja pyörimissuunta	IEC 60034-8
R6	Apulaitetestaus	
R7	Ei-kuormitus koe moottorimoodissa	IEC 60034-4
R8	Ylinopeuskoe	IEC 60034-1
R9	Tärinäkoe	IEC 60034-14
R10	Jännitekestävyys	IEC 60034 -1, -15
R11	Eristysvastusmittaus ennen lähetystä	

Taulukko 7. Suoritettavat rutiinitestit

Tyypitestaus voidaan jakaa kahteen eri osaan, TSDS:n sisäiseen ja asiakkaan kanssa suoritettavaan tehdashyväksyntätestaukseen (FAT, Factory acceptance test). Sisäisessä testauksessa suoritetaan usein laajemmin erilaisia testejä suunnittelun ja tuotekehityksen tarpeeseen. FAT-testauksessa asiakas on usein paikalla ja silloin suoritetaan tarvittavat testit, jotta koneen suorituskyky voidaan todentaa ja asiakas voi tuotteen hyväksyä toimitettavaksi. Tämä FAT-ohjelma tulisi olla sovittuna spesifikaatiossa. Sisältö vaihtelee tapauskohtaisesti, mutta tyypilliset FAT-testit rutiinitestien lisäksi sisältävät ainakin taulukon 8 mukaiset testit.

Testaus nro.	Suoritettava testaus	Referenssi / Huomautus
T1	Eri vaiheiden sähkömotorinen voima	IEC 60034 -1, -4
T2	Lämpenemäaajo nimellisasteessa	IEC 60034 -1, -4, -11
T3	Eri vaiheiden sähkömotorinen voima lämpenemäajan jälkeen	IEC 60034 -1, -4
T4	Kuormituspisteet nimellinopeudella 20%;sta 100%:iin	IEC 60034 -1
T5	Kuormituskäyrä moottorimoodissa 0 - kuormalla	IEC 60034 -1, -4

Taulukko 8. Tyypillisiä testejä FAT-testaukseen.

Edellä mainittujen testauksien lisäksi asiakkaalla saattaa olla omia vaatimuksiaan testien suhteen, jotka tulee yhteisesti sopia ja merkata spesifikaatioon. Tällaisia ovat ainakin äänitasojen mittaaminen, tuuliturbiinin

kuormituspisteiden mukaisen kuormituskäyrän ajaminen, oikosulkutesti ja magneettien lämpötilamittaus nimelliskuormassa.

5.10 Spesifikaation jaottelu eri osa-alueisiin

Uuden spesifikaation perusrakenteelle on olemassa erilaisia vaihtoehtoja. Jotta tuotespesifikaatio olisi mahdollisimman selkeä ja muutettavissa tapauskohtaisesti vastaamaan kutakin tuotetta ja asiakastapausta, jaetaan spesifikaatio asianmukaisesti osa-alueisiin. Seuraavat yhdeksän eri osa-alueita on valittu uuteen spesifikaatioon.

1. Dokumentin esittely
2. Yleinen toimituskuvaus
3. Sovellettavat dokumentit, standardit ja vaatimustenmukaisuudet
4. Sovelluksen asettamat ja sovellukselle asetetut vaatimukset ja rajoitukset
5. Tuotteen ominaisuudet
6. Tuotteen elinkaari
7. Laadunvarmistus ja tuotteen verifioiminen
8. Toimitukseen valmistelu
9. Asiakkaalle toimitettavien dokumenttien luettelo

Jaottelun lähtökohtana on ollut jakaa spesifikaatio sidosryhmien mukaisesti omiin osioihinsa. Tämä ei toteudu täysin, koska esimerkiksi asiakkaalla on monesti vaatimuksia useammalle osa-alueelle. Periaatteena on kuitenkin, että asiakkaan turbiinin asettamat lähtötiedot käsitellään erikseen kohdassa 4.

5.10.1 Dokumentin esittely

Spesifikaation ensimmäisessä kohdassa esitellään dokumentin tarkoitus, sen erilaiset statukset ja mihin tuotteisiin spesifikaatio on sovellettavissa. Tämän kohdan tarkoitus on selventää asiakkaalle ja sisäisille sidosryhmille spesifikaation tarkoitus. Lähtökohtana ensimmäiseen lukuun on ollut TSDS:n tuotekehitysprosessi, jonka eri vaiheissa spesifikaatio täydentyy.

5.10.2 Yleinen toimituskuvaus

Spesifikaation toisessa kohdassa esitetään sanallisesti yleinen toimituskuvaus ja kerrotaan mihin sovellukseen kyseinen tuote on tarkoitettu. Tämä kohta myös rajaa toimituksen sisällön, jotta asiakkaalla ja toimittajalla olisi yhteinen käsitys siitä, mitä heille tarjottu tai mitä myyty tuote sisältää ja mitä se ei sisällä.

Yleistä toimituskuvausta voidaan pitää yhteenvedona toimitettavasta tuotteesta ja sisällöstä. Se palvelee etenkin sidosryhmiä, jotka eivät ole perehtyneet tekniikkaan, antamalla heille yleiskäsityksen.

5.10.3 Sovellettavat dokumentit ja standardit

Spesifikaation kolmannessa kohdassa luetteloidaan dokumentit ja standardit, joita sovelletaan yhdessä spesifikaation kanssa. Tässä osiossa myös mainitaan mitkä vaatimuksenmukaisuudet tulee täyttää, kuten pienjännitedirektiivi ja CE-merkintä tai mahdollisesti jokin vaadittu sertifiointi. Myös mahdolliset asiakasrajapintaan tarkoitetut kuvat, erilliset spesifikaatiot ja dokumentit, jotka asettavat rajoituksia tms. on esitetty tässä osiossa.

5.10.4 Sovelluksen asettamat vaatimukset ja rajoitukset

Spesifikaation neljännessä osiossa kuvataan sovelluksen eli tuuliturbiinin asettamat vaatimukset ja rajoitukset. Tällaisia ovat esimerkiksi ympäristöolosuhteet, joihin generaattori sijoitetaan ja turbiinin aiheuttamat ulkoiset kuormitukset. Myös turbiinin kuormituskäyrä esitetään, jos sellainen on saatavilla.

Periaatteena on, että tässä kohdassa tuodaan esiin asiakkaan sovelluksesta ja sen sijoituskohteesta tulevat vaatimukset suunnittelulle ja lopulliselle tuotteelle. Ajatuksena on, että tässä osiossa esitetyt asiat ovat olemassa ilman generaattoria.

5.10.5 Tuoteominaisuudet

Spesifikaation viidennessä osiossa määritellään tuotteen ominaisuudet, rajapinnat ja suorituskyky sekä erikseen mainitaan käytettävät apulaitteet.

Periaatteena on, että tässä osiossa keskitytään itse generaattoriin eli esitetyt ominaisuudet ovat olemassa generaattorilla ilman tuuliturbiinia.

5.10.6 Tuotteen elinkaari

Tuotteen elinkaarelle asetetaan erilaisia vaatimuksia, ja ne on esitetty spesifikaation kuudennessa osiossa. Tässä osiossa määritellään suunniteltu käyttöikä tuotteelle ja mahdollisille apulaitteille. Määritellään pisin mahdollinen huoltoväli ja mahdolliset rajoitukset esimerkiksi varaosien painolle. Asiakkaan mukaan myös mahdolliset käytettävyyteen liittyvät reunaehdot, kuten MTBF (Mean time between failure) tai MTTR (Mean time to repair) spesifioidaan tässä kohdassa.

5.10.7 Laadunvarmistus ja tuotteen verifioiminen

Jotta voidaan varmistua, että valmistettu tuote täyttää sille asetetut vaatimukset, on tuote verifioitava. Tämä verifioiminen tapahtuu laadunvarmistuksen avulla sekä suorittamalla valmistetulle koneelle tarpeenmukaiset testit. Spesifikaation seitsemännessä osiossa määritellään minkälaisia laadunvarmistuksen keinoja käytetään ja minkälaiset testaukset suoritetaan. Rutiinitestausohjelma ja ns. tehdashyväksyntätestausohjelma määritellään.

5.10.8 Toimitukseen valmistelu

Ennen tuotteen toimittamista, sopimuksen mukaisesti, tuote pakataan ja sille tehdään mahdollisesti muita toimitukseen liittyviä toimenpiteitä. Nämä vaatimukset esitetään spesifikaation kahdeksannessa kohdassa.

5.10.9 Asiakasdokumentaatio

Tuotteen mukana toimitettava dokumentaatio on määritelty spesifikaation yhdeksännessä kohdassa. Eri sopimuksissa asetetaan erilaisia vaatimuksia dokumentaatiolle ja tässä määritellään tarkasti, mitä tämä kyseinen dokumentaatio sisältää.

6 Yhteenveto ja pohdinta

Tämän työn tavoitteena oli tehdä kattava ja rakenteeltaan selkeä spesifikaatiopohja, jota voitaisiin käyttää asiakkaan ja The Switch Drive Systems Oy:n välisessä kommunikoinnissa määrittäessä tuotteen ominaisuudet ja toimituksen sisältö. Tarkoituksena oli myös, että spesifikaatiopohja kattaa sisällöltään yhtiön sisäisten sidosryhmien tarpeet ja määrittelee reunaehdot suunnittelulle.

Työssä käsiteltiin tuuliturbiinien erilaiset pääkonseptit ja niihin liittyviä ominaisuuksia sekä kuvailtiin tuuliturbiinien rakenne. Omana osanaan käsiteltiin pyörivien sähkökoneiden rakenne ja suunnittelu. Itse spesifikaatiopohjan rakentamisessa keskityttiin kestopagneettigeneraattorin eri teknisiin osalualueisiin, jotka määrittelevät tuotteen rakenteen ja suorituskyvyn. Tällaisia olivat sähköinen mitoitus, jäähdytys ja mekaaninen rakenne. Työssä kuvailtiin myös asiakkaan, viranomaismääräyksien ja standardien tuomia vaatimuksia tuotteelle ja sen suunnittelulle. Omina kokonaisuuksinaan pyrittiin antamaan kuva prosessista, jonka yhteydessä spesifikaatiot syntyvät, sekä käsittelemään tuotteen elikaareen liittyvät vaatimukset suunnittelulle ja huoltotoimenpiteille.

Työn tuloksena syntyi spesifikaatiopohja, jota voidaan soveltaa asiakasprojekteissa, kun määritellään asiakkaan sovellukseen toimitettavaa tuotetta. Spesifikaatiopohja on kattavampi kuin aikaisemmin TSDS:llä käytetyt spesifikaatiot ja se on jaoteltu uudella tavalla. Kokonaan uutena osana on esimerkiksi erilaisten testauksien, tyyppi- ja rutiinitestauksen, määrittäminen spesifikaatioon.

Syntynyt spesifikaatiopohja on hyvä alku kehitettäessä tuotteen teknistä määrittelyä ja se antaa paremman lähtökohdan asiakasprojekteille. On kuitenkin huomioitava, että jokainen projekti on yksilöllinen asiakkaan ja tuotteen mukaan. Siksi onkin tarpeen, että joustavuus pohjan käyttämisessä säilyy ja siitä tarpeen vaatiessa voidaan lisätä ja poistaa eri osia. Käytäntö tulee osoittamaan kuinka hyvin spesifikaatiopohja palvelee tarkoitustaan ja tarvitseeko sitä jatkokehittää. Onkin suositeltavaa, että ensimmäisten projektien jälkeen pohja katselmoidaan ja sitä muutetaan tarpeen vaatiessa.

Kuvat

- Kuva 1. Vastatuuleen ja myötätuuleen asennettu HAWT –turbiini, s. 11
- Kuva 2. Darrius –tyyppinen pysty akselinen tuuliturbiini, s.13
- Kuva 3. Savonius-turbiinin roottori ja periaate, s.14
- Kuva 4. Tyypillinen moderni tuuliturbiini, s.15
- Kuva 5. Tuuliturbiinin pääkomponentit, s.16
- Kuva 6. Tuuliturbiinin voimansiirtolaitteisto, s.17
- Kuva 7. Liberty 2,5MW tuuliturbiini, s.19
- Kuva 8. Vakionopeuksinen tuuliturbiinikonsepti, s.20
- Kuva 9. Rajoitettu muuttuvanopeuksinen tuuliturbiinikonsepti, s.21
- Kuva 10. Kaksoissyötetty induktiogeneraattori, s.23
- Kuva 11. Vaihteellinen oikosulkugeneraattoriratkaisu, s.23
- Kuva 12. Vaihteellinen kestopagneettigeneraattoriratkaisu, s.24
- Kuva 13. Suoravetoinen erillismagnetoitu tahtigeneraattori, s.24
- Kuva 14. Suoravetoinen kestopagneettigeneraattori, s.25
- Kuva 15. Normaali rakenteinen oikosulkumoottori ja sen pääkomponentit, s.27
- Kuva 16. 3,0MW kestopagneettigeneraattorin häviöjakauma, s.39
- Kuva 17. Pakotettu suorajähdytys, s.41
- Kuva 18. Pakotettu epäsuora jäähdytys ilma-vesi lämmönvaihtimella, s.42
- Kuva 19. Pakotettu epäsuorajähdytys ilma-ilma lämmönvaihtimella, s.43
- Kuva 20. Laippa- ja jalkakiinnitteinen MS-generaattori, s.47
- Kuva 21. Kestopagneettigeneraattori integroituna tuuliturbiiniin, s.48
- Kuva 22. The Switch PMR450-kestopagneettigeneraattorin päämitat, s.48
- Kuva 23. Kiinteävaippainen ja laminoitu kestopagneettiroottori, s.49
- Kuva 24. Kestopagneettimoduuleja asennettuna ulkoroottikoneeseen, s.50
- Kuva 25. Roottorin maksimijännitykset, pyörimisnopeus 2400rpm, s.51
- Kuva 26. Valmis roottori tasapainotukseen, s.52
- Kuva 27. The Switch PMR560-staattori, s.53
- Kuva 28. Staattorilevysegmenttien ladonta runkoon, s.54
- Kuva 29. Litz- ja muotokuparivyyhdit generaattorikäämitykseen, s.54
- Kuva 30. Erilaisia Litz-kuparilankoja käämitykseen, s.55
- Kuva 31. Laakerivirtojen aiheuttama vaurio, s.56
- Kuva 32. Laakeripesän eristys kilvestä laakerivirtojen ehkäisemiseksi, s.57
- Kuva 33. Roottori akselin maadoitus hiiliharjojen avulla, s.57

Kuviot

- Kuvio 1. Keskimääräinen turbiinikoko 1997-2011, s.15
- Kuvio 2. Pyörivien sähkökoneiden jaottelu, s.26
- Kuvio 3. Toimitusprojektin prosessikaavio, s.31

Taulukot

- Taulukko 1. Tuuliturbiini ja voimansiirtokonseptit, s.18
- Taulukko 2. Sovellettavat standardit ja direktiivit, s.34
- Taulukko 3. PMG:n häviöt kolmella eri nopeusalueella, s.40
- Taulukko 4. Standardin IEC 60085 mukaiset lämpötilaluokat, s.43
- Taulukko 5. Standardin IEC 60034-1 mukaiset sallitut lämpenemät, s.44
- Taulukko 6. Standardin IEC 60034-14 mukaiset sallitut tärinät, s.51
- Taulukko 7. Suoritettavat rutiinitestit, s.60
- Taulukko 8. Tyypillisiä testejä FAT-testaukseen, s.60

Lähteet

- Acciona 2012. Tuotelehti AW3000. Viitattu 26.3.2012. http://www.acciona-energia.com/media/315814/AW3000_brochure.pdf
- Ackermann, T. (Editor) 2005. Wind Power in Power Systems. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 9780470012680
- Aura, L. & Tontteri, A. 2009. Teoreettinen sähkötekniikka. 3.-6. painos. Helsinki: WSOY pro Oy.
- BTM Consult 2012. World Market Update 2011 –esitys. Navigant Consulting Inc. Chicago, Illinois, USA
- CleanTechnica 2012. Internetmedian kotisivut. Luettu 2.5.2012. <http://cleantechnica.com/>
- Clipper 2012. Clipper Windpower Ltd. Kotisivut. Viitattu 17.4.2012. <http://www.clipperwind.com/>
- Korpela, J. 2012. Pienehkö sivistyssanakirja. Internet-sivusto. Viitattu 16.3.2012 <http://www.cs.tut.fi/~jkorpela/siv/sanats.html#spesifikaatio>
- Kurronen, P. 2009. Tuotepäällikkö. The Switch Drive Systems Oy. Esitys The Swicth tuotteista ja niiden ominaisuuksista vuodelta 2009.
- Kurronen, P. 2012. Tuotepäällikkö. The Switch Drive Systems Oy. Haastattelu 30.4.2012.
- Manwell, J. & McGowan, J. & Rogers, A. 2009. Wind energy explained. 2nd edition. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-01500-1
- NTNU 2012. Norwegian University of Technology web pages. Viitattu 28.3.2012. <http://www.ivt.ntnu.no/offshore2/>
- Plant Engineering 2012. Internet-sivut. Luettu 21.4.2012. Artikkelit: Focus on Failure Analysis: How switching transients reduce motor life. <http://www.plantengineering.com/>

Polinder, H. & Bang, D. & Li, H. & Chen, Z. 2007. Concept report on generator topologies, mechanical and electromagnetic optimization. Upwind. http://www.upwind.eu/media/811/Deliverable_1B2.b.1.pdf

Puranen, J. 2007. Sähkösuunnittelija. The Switch Drive Systems Oy.. General overview of permanent magnet synchronous machines. The Switch sisäinen powerpoint-esitys.

Pyrhönen, J. & Jokinen, T. & Hrabovcova, V. 2008. Design of rotating electrical machines. West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd. ISBN 978-0-470-69516-6

Savelainen, J. 2007. The Switch Drive Systems Oy. The Switch sisäinen koulu- tus–Generator Training for Sales

Sofilec 2012. Yhtiön internet sivut. Luettu 2.5.2012. <http://www.sofilec.com>

Spera D. (Editor) 2009. Wind turbine technology. 2nd edition. New York, USA: ASME. ISBN 978-0-7918-0260-1

The Switch 2010. Annual review.

Timken 2012. Internet sivut. Luettu 16.3.2012. <http://www.timken.com/>