



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JOUNI KETONEN  
TUULIVOIMALAN VIKAANTUMISEN MALLINTAMINEN  
Diplomityö

Tarkastajat: lehtori Risto Mikkonen  
ja laboratorioinsinööri Lasse Söder-  
lund  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta-  
neuvoston kokouksessa 8.10.2014

## TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

**KETONEN, JOUNI:** Tuulivoimalan vikaantumisen mallintaminen

Diplomityö, 70 sivua, 11 liitesivua

Huhtikuu 2016

Pääaine: Vaihtoehtoiset sähköenergiateknologiat

Tarkastajat: lehtori Risto Mikkonen ja laboratorioinsinööri Lasse Söderlund

Avainsanat: Tuulivoima, vika-analyysi, luotettavuus

Tuulivoima on nopeasti kasvanut merkittäväksi energiantuotantomuodoksi viimeisten vuosikymmenten aikana niin maailmalla kuin Suomessakin. Tämä kasvu on painottanut tuulivoimaloiden kehityksessä yksikkökoon kasvua ja hyötysuhteen optimointia laajalla tuulen nopeusalueella. Tässä työssä on tarkoituksena avartaa ajatusta siitä, miten tuulivoimalan luotettavuutta voidaan mallintaa ja hyödyntää voimalaitoksen valinnassa. Vika-analyysin avulla on mahdollista kohdentaa huoltoresursseja ja osaltaan ennakoida osien vikaantumista todennäköisyyksien avulla. Työn varsinaisena tavoitteena on todentaa menetelmän soveltuvuutta huoltotarpeen ennustamiseen.

Tässä työssä vikaantumisen mallintamiseen on lähdetty toteuttamaan vika-analyysin keinoin kahdelle eri tyyppin tuulivoimalalle. Analyysin pohjalta on saatu vikataajuudet voimalaitoksille komponenttikohtaisesti sekä niistä muodostuville kokonaisuuksille. Vika-analyysiin käytettiin suunnittelukirjoja ja komponenttivalmistajien tietoja. Suunnittelukirjojen pohjalta valittiin myös tarpeelliset kertoimet komponenteille Weibull-sovitteita varten. Vikojen lukumäärien todennäköisyyksien selvittämiseen käytettiin eksponentti ja Weibull-jakaumia. Jakaumien ominaisuuksien vuoksi Weibull-kehitykset simuloitiin MATLAB ohjelmistolla, mutta eksponenttikehitykset voitiin laskea suoraan. Näitä vikamäärien todennäköisyyksiä vertailtiin Suomen tuulivoimaloiden vikatilaston pohjalta saatuun sarjaan.

Yhteenvedon voidaan todeta, että analyysin pohjalta saadut vuotuiset vikamäärät olivat suhteellisesti samassa luokassa voimalaitosten osalta tilastoon verrattuna. Kuitenkin tulee huomata, että komponenttikohtaisesti vikamäärien osalta on selkeää poikkeamaa tilaston ja voimalaitosten välillä johtuen vikatilastoinnin tapaerosta verrattuna vika-analyysin lähtöoletuksiin. Lopputuloksena menetelmän avulla saadut tulokset korreloivat hyvin todellisuuden kanssa ja menetelmällä voidaan hyvin ennustaa uuden tuulivoimalan tulevaa huoltotarvetta.

## ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

**KETONEN, JOUNI**: Modelling the reliability of wind turbine

Master of Science Thesis, 70 pages, 11 Appendix pages

April 2016

Major: Alternative Electric Energy Technology

Examiner: lecturer Risto Mikkonen and laboratory engineer Lasse Söderlund

Keywords: Windpower, reliability engineering,

Wind power is rapidly grown in the field of energy production over the past decades around the world and in Finland. This growth has emphasized the development of wind power unit of increase in the size and efficiency for a wide range of wind speed in the area. Point of this work is to open up the idea of how the reliability of the wind turbine can be modeled and how to exploit that information in choosing wind turbine. The failure analysis makes it possible to allocate maintenance resources, and to predict the components failures throughout probabilities. The real objective of this work is to verify the applicability of the method to predict the need for maintenance.

In this work, the modeling of failure has started to bite into the fault analysis methods for two different types of wind turbine. On the basis of the analysis the failure rates for components are obtained from as well as the formation of those entities. Failure analysis results were obtained from component manufactures' data and literature was also used to solve failure rates. Literature was also used to get needed coefficients for components for Weibull distribution. Annual failure rates probabilities were solved by using Weibull and exponential distribution. Due to the characteristics of the distributions Weibull distribution was simulated by MATLAB software, but exponential distribution could be calculated. These failure rate probabilities were compared to the Finland wind turbines statistics.

All in all, the annual failure rates based on the analysis were relatively the same class for the wind plants as compared to Finland statistics. However, it should be noted that, by component failure in respect of amounts is a clear deviation due to a fault as compared to the statistical difference in the way the fault analysis starting assumptions. The results of these method correlate well with the reality and the method can well predict the future maintenance need for a new wind turbine.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö tehtiin Sähkötekniikanlaitokselle Sähkömagnetiikan yksikölle syksyn 2014 ja kevään 2016 välisenä aikana. Työn ohjaajina ja tarkastajina toimivat lehtori Risto Mikkonen ja laboratorioinsinööri Lasse Söderlund. Kiitän molempia tasapuolisesti suuresta avusta tämän työn eteenpäin saattamiseksi kommenttien ja hyvien neuvojen avulla.

Kiitän myös perhettäni ja kavereita kannustavasta palautteesta työn viimeisteleminen. Sekä kiitän suuresti Kaisa Gripin panosta työn oikoluvusta ja positiivisesta tsempestä työn viimeisteleminen. Lisäksi kiitän Soittorasia 2 innokkaita joukkuekavereita, jotka omalta osaltaan tukivat rouhivaa tekemistä työn edessä.

Viimeiseksi kiitän vielä Aki Korpelaa, kenen innostamana lähdin toteuttamaan kyseistä diplomityötä.

Tampereella 18.3.2016

Jouni Ketonen

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	1
2	TUULIVOIMA YLEISESTI .....	3
	2.1 Tuulivoimalan yleiset tekniset ratkaisut.....	5
	2.2 Tanskalainen tuulivoimala .....	8
	2.3 Muuttuvanopeuksinen induktiogeneraattori.....	9
	2.4 Kaksoissyötetty induktiogeneraattori.....	11
	2.5 Kestomagnetoitu tahtigeneraattori .....	12
	2.6 Kehitysnäkymiä tuulivoimaloille .....	14
3	VIKA-ANALYYSIN PERIAATTEET .....	17
	3.1 Vika-analyysin määrittely .....	19
	3.2 Vika-analyysin tekeminen spesifioidulle komponentille.....	20
	3.3 Vika-analyysi muille komponenttiryhmillä .....	22
4	VIKA-ANALYYSI REFERENSSIVOIMALOILLE.....	24
	4.1 WinWind WWD-1 .....	24
	4.2 Siemens SWT-3.0-101 .....	27
5	VIKAANTUMISTODENNÄKÖISYYDET .....	30
	5.1 Eksponenttijakauma .....	30
	5.2 Weibull-jakauma.....	33
	5.3 Kolmiparametrinen Weibull-jakauma.....	36
6	VIKATILASTOT SUOMESSA .....	39
	6.1 Vikatilaston käyttäminen jakaumissa.....	40
	6.2 Käytettävyys.....	40
7	TULOSTEN ANALYYSINTI.....	42
	7.1 Eksponenttijakauma .....	42
	7.2 Weibull-jakauma.....	44
	7.3 Kolmiparametrinen Weibull-jakauma.....	45
	7.4 Jakaumien keskinäinen vertailu .....	46
	7.5 Komponenttikohtaiset vikatilastot .....	47
8	YHTEENVETO .....	50
	Lähteet.....	52
	Liite 1: WWD-1-voimalan vika-analyysi-taulukko .....	54
	Liite 2: Siemens-voimalan vika-analyysi-taulukko .....	55
	Liite 3: Weibull-jakauman simulointikoodi .....	56
	Liite 4: Kolmiparametrisen Weibull-jakauman simulointikoodi .....	57
	Liite 5: Tuulivoimalan vikatilastot Suomessa.....	58
	Liite 6: Eksponenttijakauman vikatodennäköisyystaulukot.....	59
	Liite 7: Weibull-jakauman vikatodennäköisyystaulukot .....	61
	Liite 8: Kolmiparametrisen Weibull-jakauman vikatodennäköisyystaulukot.....	63

## TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

DFIG	Kaksoissyötetty liukurengasgeneraattori
FMECA	Vika-analyysi komponenttien vikaantumistavoista, vaikutuksista ja kriittisyydestä
FRT	Fault ride through, sähköverkon viasta selviytyminen
GWEC	Global Wind Energy Council
HDBK-11	Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment 11
HDBK-271	Military Handbook of Reliability Prediction of Electronic Equipment 217
HDBK-338	Military Handbook of Reliability Prediction of Electronic Equipment 338
Huipunkäyttöaika	Aika missä ajassa voimala tuottaisi vuoden aikana tuottamansa energian nimellistehollaan
MTBF	Keskimääräinen aika vikojen välillä, mean time between failures
MTTF	Keskimääräinen aika vikaantumiseen, mean time to failure
MTTR	Keskimääräinen korjausaika, mean time to repair
PMSG	Kestomagnetoi tuhtigeneraattori
$\lambda$	Vikataajuus, MTBF:n käänteisarvo
Tehokerroin	Energian muuttamista muodosta toiseen kuvastava hyötysuhdekerroin
VTT	Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos
WTGS	Vaihtuvanopeuksinen tuulivoimala

# 1 JOHDANTO

Tuulivoima on uusiutuvista energiantuotantomuodoista keskeisessä asemassa tulevaisuuden energiantuotantoa kehitettäessä. Tuulivoimaloita asennetaan tällä hetkellä maailmalla eniten uusiutuvista energiantuotantomuodoista. Tällä hetkellä eniten asennettua kapasiteettia on kuitenkin vesivoimalla ja vuotuisten lukujen valossa aurinkovoimaa asennetaan jo lähes samoissa määrin kuin tuulivoimaa. Kuitenkin tuulivoimaloiden tekninen eroavaisuus aurinkovoimaloihin verrattuna johtaa tarpeeseen tarkastella tuulivoimalan luotettavuutta sekä käytettävyyttä. Työn keskeisenä tavoitteena on määrittellä vika-analyysin soveltuvuutta eri jakaumia hyödyntäen tuulivoimalan vikaantumisen mallintamiseen.

Tuulivoimala konseptina edustaa lähemmin perinteistä voimalaitosratkaisua kuin aurinkovoimala, sillä tuulivoimalan generaattorin akselille on kytketty voimakone sen pyörittämiseen. Tuulivoimalan tapauksessa moottorina toimii tuuliturbiini ja perinteiseen voimalaitokseen verrattuna generaattoria pyörittävän tuuliturbiinin tehoa ei pystytä mielevaltaisesti hallitsemaan, koska pyörittävä voima saadaan tuulesta ja kyseiseen tehoon ei voida vaikuttaa vapaasti ajasta riippumatta. Tämä johtuu tuulisuuden vaihtelusta, jolloin voimalaitoksen ulostulotehoa voidaan rajoittaa vain tarvittaessa. Tehoa ei kuitenkaan voida tuottaa enempää kuin tuuliturbiinin on mahdollista tuottaa tuulisuuden perusteella. Aurinkovoimaloiden toimintaperiaate ei sisällä osia, jotka olisivat mekaanisen rasituksen kohteena, jolloin voimaloiden vikaantuminen on puhtaasti satunnaista ja mallinnettavissa eksponenttijakaumalla. Tässä työssä tarkastellaan tuulivoimalan osien vikaantumista, mallinnetaan vikaantumisien vuotuisia lukumääriä tilastollisilla menetelmillä ja verrataan saatuja lukuarvoja Suomen tuulivoimaloiden vikatilastoihin. Mahdollisuuksien mukaan vikojen lukumääriä verrataan sellaisten maiden vikatilastoihin, joissa tuulivoimaloiden voimalaitostyypit ovat lähellä työssä tutkittuja voimalaitoksia.

Luotettavuus ja huollettavuus ovat keskeisiä tekijöitä voimalatyyppiä valittaessa ja vuosien saatossa kehitystyötä on tehty luotettavampien voimalaitostyyppien luomiseksi. Lisäksi tuulivoimalan toiminta sähköverkon vikatilanteissa ohjaa nykyisin voimakkaasti voimalaitosvalintoja. Täytyy myös muistaa, että voimalaitosten koko on kasvanut ja hyötysuhdetta on saatu parannettua uusilla teknisillä ratkaisuille, kuten aktiivisilla lapakulman säädöllä ja kestopagnetoidulla tahtigeneraattorilla. Kuitenkin tulemme myöhemmin huomaamaan, että tuulivoimala on usein kompromissi tehokkuuden ja luotettavuuden välillä ja on useita erilaisia teknisiä toteutustapoja halutun voimalaitoksen tekemiseksi.

Työssä esitellään keskeiset tuulivoimalatyypit, jotka ovat hallinneet tuulivoimasektoria viimeisten vuosikymmenten aikana. Näistä tuulivoimaloista kuvataan keskeiset rakenteet ja ominaisuudet sekä miten niitä on kehitetty sähköverkon hallinnan asettamien vaatimusten mukaisesti. Lisäksi tarkastellaan tuulivoiman kapasiteetin kehitystä niin Suomessa kuin maailmalla sekä käydään läpi, mihin suuntaan rakentamisen trendi on menossa.

Vika-analysoinnista esitellään peruserätyypit, jotka ohjaavat komponenttien vika-analyysia yleisellä tasolla sekä esitellään tarkemmin vaiheittain yhdelle komponentille vika-analyysi. Tätä vika-analyysimenetelmää sovelletaan työssä kahteen tuulivoimalaan, jotka ovat WinWind:n ja Siemensin tuulivoimalat. Molemmille saadaan järjestelmäkohtaiset vikataajuudet ja niiden vastineet MTBF-arvot. MTBF tarkoittaa keskimääräistä vikojen välistä aikaa ja tulee sanoista *mean time between failure*.

Seuraavaksi esitellään käytettävät jakaumat, joilla määritellään todennäköisyydet vuotuisille vikamäärille niin voimalaitos kuin komponenttikohtaisesti. Näin saatuja todennäköisyyksiä vertaillaan vertailusarjana toimivaan vikatilastoon Suomen tuulivoimaloista, joka on kerätty VTT:n toimesta vuosien 2002 ja 2011 välisenä aikana. Kyseisestä tilastosta ja sen keräysmenetelmiä on kuvailtu tarkemmin luvussa kuusi.

Varsinainen tulosten vertailu jakaumakohtaisesti tapahtuu luvussa seitsemän. Keskeisenä havaintona voidaan todeta, että Siemensin voimalaitoksen vika-analyysin pohjalta saatavat tulokset korreloivat hyvin vikatilaston kanssa eikä WinWind:n voimalan vastaavat vikojen todennäköisyydet poikkea suuresti vikatilaston arvoista. Kuitenkin on hyvä huomata, että eri jakaumat korostavat selkeästi komponenttien elinkaarikäyttäytymistä ja niiden valinta käyttökohteen kannalta on merkittävä.



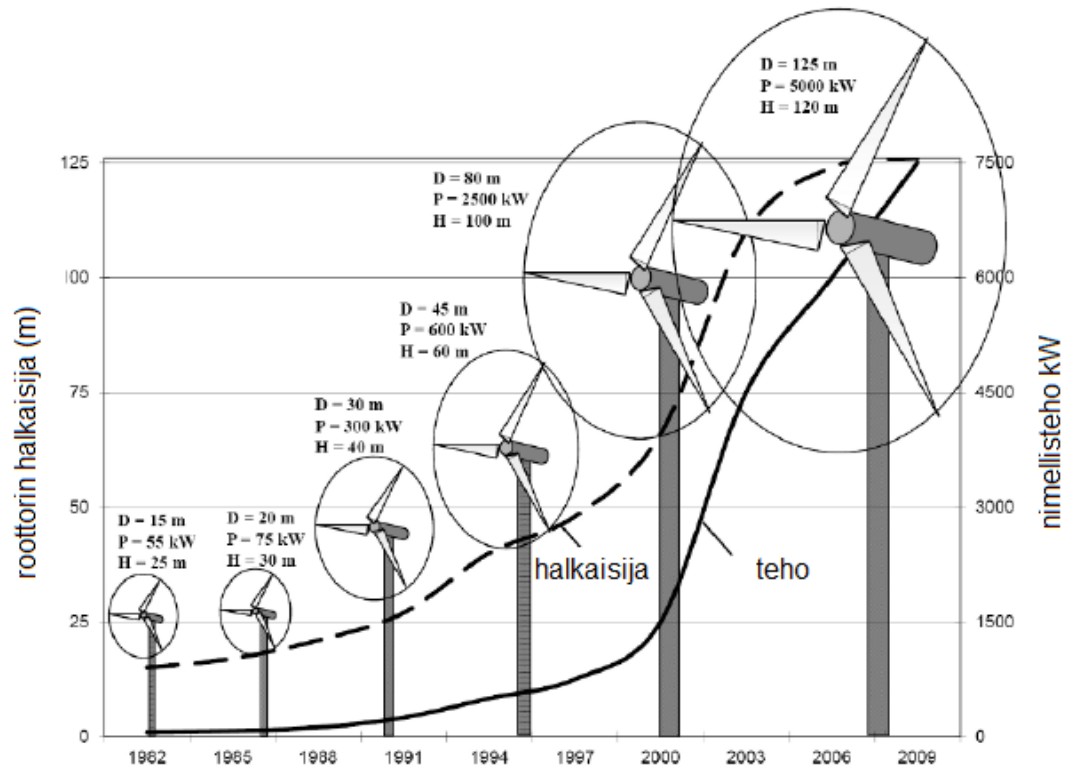
## 2 TUULIVOIMA YLEISESTI

Tuulivoima oli vuoden 2015 aikana yksi eniten tuotantokapasiteettia kasvattanut energiantuotantomuoto maailmalla. Perinteinen vesivoima on vielä kuitenkin yleisempi uusiutuvista energiantuotantomuodoista maailmalla ja Suomessa bioenergian käyttö energiantuotannossa on vielä tuulivoimaa edellä uusiutuvista energiantuotantomuodoista. Kuitenkin tuulivoimaa asennetaan toistaiseksi eniten maailmassa, kun tarkastelu kohteena ovat uusiutuvat energialähteet.[Gasch, GWEC]

Ensimmäiset tuulivoimalaprototyypit kehiteltiin sähköntuotantoon jo 1900-luvun alussa Tanskassa. Tuulivoiman tarpeellisuus tuli esille maailmansotien seurauksena, koska polttoaineiden hinnat nousivat jyrkästi sota-ajan seurauksena. Tästä seurasi voimakas tarve kehittää sähköntuotantomuoto, jonka käyttökustannukset olisivat suhteellisen alhaiset. Sotien jälkeinen polttoaineiden hinnan aleneminen pienensi mielenkiintoa tuulivoimaa kohtaan, mutta perusta voimaloiden kehitykselle oli jo syntynyt.[Hau]

Vasta 1970-luvun öljykriisi sai yleisen mielenkiinnon jälleen heräämään tuulivoimaloita kohtaan. Tässä tuulivoiman kehitysnosteessa Johannes Juulin kehittämä konsepti sai osakseen suurimman huomion ja kyseisestä konseptista tuli markkinajohtaja useiksi vuosiksi. Tultaessa 1990-luvulle kyseisiä voimalaitoksia oli yksistään Tanskaan asennettu jo noin 200 MW:n edestä. Tuulivoiman kehitys painottui edelleen kuitenkin vahvasti Euroopassa Tanskaan ja sen lähialueen maihin, kuten Saksaan, Alankomaihin sekä Ruotsiin.[Hau]

Tuulivoimaloiden tehon ja kokoluokan kehitys oli verrattain hidasta aina 1990-luvulle asti. Tällöin tapahtui tehoelektroniikassa merkittävää kehitystä, joka osaltaan johti uusien tuulivoimalakonseptien kehitykseen. Tuulivoimaloiden tehon ja roottorin halkaisijan kasvua on esitetty kuvassa 2.1. Tapahtunutta kasvua 1990-luvulla voidaan sanoa melkein yhtä suureksi kuin vastaavaan aikaan tietotekniikan saralla tapahtunutta kehitystä. Kuvasta 2.1 voidaan havaita myös tuulivoimaloiden nimellistehon kasvaneen voimakkaasti 2000-luvun alussa ja samalla roottorin halkaisija on kasvanut. Vuonna 2009 eniten tuulivoimaa oli asennettuna Euroopassa noin 86 GW:n edestä, mutta Kiina ja Yhdysvallat lähestyivät asennetun kapasiteetin osalta Euroopan tasoa. Nämä kaksi valtiota ovat kasvattaneet viime vuosina tuotantokapasiteettiaan lähes 10 GW:n vuosivauhdilla.[Gasch, Hau, Muyeen]



Kuva 2.1 Tuulivoimalan tehon ja koon kehitys 1960-2010 [Gasch s.20]

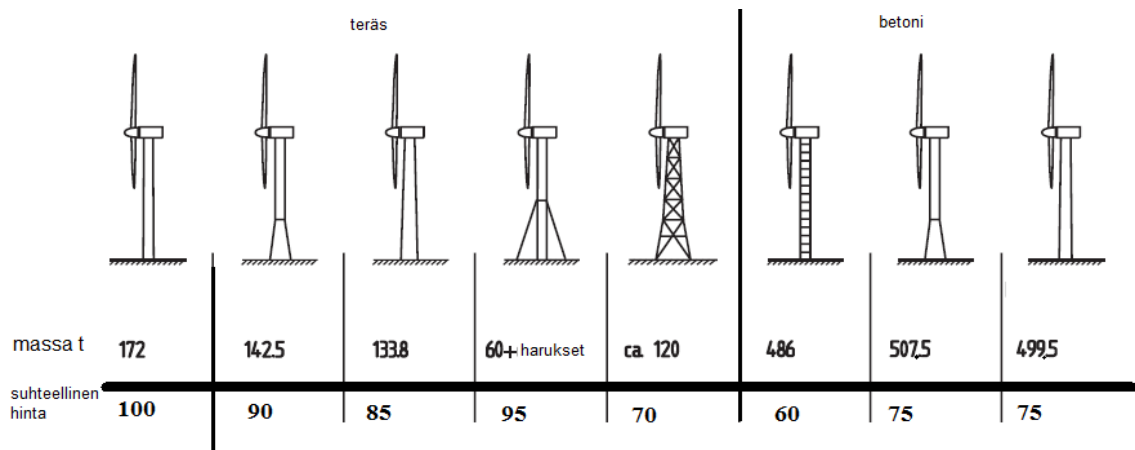
Uusimmat tilastot vuodelta 2014 kertovat, taulukko 2.1, että Aasia on ohittanut asennettussa tuulivoimakapasiteetissa Euroopan nousten 142 GW:iin. Euroopassa oli vuoden 2014 lopussa asennettuna 134 GW:n edestä tuulivoimaa ja Pohjois-Amerikassa puolestaan 78 GW. Tilastosta käy myös ilmi, että Brasilia on panostanut voimakkaasti tuulivoimaan vuonna 2014, jolloin sen tuotantokapasiteetti lähes kaksinkertaistui 2,4 GW:n kapasiteetin lisäyksellä. Euroopan sisällä tuulivoiman kasvu oli suurinta taloudellisesti vakaammassa maissa Saksa, Iso-Britannia, Ranska ja Ruotsi. Näistä maista suurimman kasvun maa oli Saksa 5,3 GW:n kasvulla. Ruotsin kasvu oli myös huomattava, sillä 1GW:n kasvuosuudella tuulivoiman kokonaisteho nousi 5,4 GW:iin. Tuulivoiman suurista Espanjan ja Italian kapasiteetit kasvoivat hieman 28 MW:n ja 108 MW:n kapasiteetin lisäyksen myötä. Yhteensä Euroopassa asennettiin 13 GW:n edestä tuulivoimaa vuoden 2014 aikana. Vertailuna samana vuonna Kiinassa asennettiin 23 GW:n edestä tuulivoimaa ja Intiassa 2,3 GW:a. Edellä kuvattu tilasto on havainnollistettu keskeisten valtioiden osalta taulukossa 2.1. Kyseisessä taulukossa ei ole eriteltyä Suomen tilastoa kyseiseltä vuodelta, mutta Suomessa oli vuoden 2013 lopussa asennettuna 447 MW:n edestä tuulivoimaa ja vuoden 2014 aikana asennettiin 180 MW:a. Yhteensä Suomessa oli vuoden 2014 lopussa 627 MW asennettua tuulivoimakapasiteettia. Ruotsiin verrattuna asennettu kapasiteetti oli kuitenkin vain viidesosa.[GWEC, VTT]

Taulukko 2.1 Tuulivoiman kapasiteettitilastot [GWEC]

Maanosa	Valtio	2013 MW	Tuotannon lisäys MW	2014 MW
Afrikka				
	Yhteensä	1602	934	2536
Aasia				
	Kiina	91413	23196	114609
	Intia	20150	2315	22465
	Japani	2669	130	2799
	Yhteensä	115969	26007	141976
Eurooppa				
	Saksa	34250	5279	39529
	Espanja	22959	28	22987
	Iso Britannia	10711	1736	12447
	Ranska	8243	1042	9285
	Italia	8558	108	8666
	Ruotsi	4382	1050	5432
	Portugali	4730	184	4914
	Tanska	4807	105	4912
	Puola	3390	444	3834
	Turkki	2958	804	3762
	Romania	2600	354	2954
	Alankomaat	2671	141	2812
	Irlanti	2049	222	2271
	Itävalta	1684	411	2095
	Kreikka	1866	114	1980
	Muut	5715	835	6550
	Yhteensä	121573	12858	134431
	EU	117384	11829	129213
Etelä- ja Väli- Amerikka				
	Brasilia	3466	2472	5938
	Chile	331	506	837
	Yhteensä	4777	3749	8526
Pohjois- Amerikka				
	Yhdysvallat	61110	4854	65964
	Kanada	7823	1871	9694
	Mexico	1917	634	2551
	Yhteensä	70850	7359	78209
Australia				
	Australia	3239	567	3806
	Yhteensä	3874	567	4441
<b>Maailma</b>	<b>Yhteensä</b>	<b>318645</b>	<b>51474</b>	<b>370119</b>

## 2.1 Tuulivoimalan yleiset tekniset ratkaisut

Tuulivoimaloita on rakennettu jo lähes vuosisadan ajan. Tänä aikana ovat myös kehittyneet tietynlaiset ratkaisut tuulivoimalan tornin rakenteelle ja turbiiniyksikön sijoituspaikalle sekä rakenteelle. Tuulivoimalan tornin eri rakenteiden painoa ja suhteellista hintaa samalle napakorkeudelle olevalle turbiiniyksikölle on esitetty kuvassa 2.2. Kuvasta voidaan havaita kaikkien teräsrakenteiden olevan huomattavasti betonirakenteita kevyempiä, mutta suhteellisesti hieman kalliimpia. Vastaavasti betonirakenteen tuoma lisäpaino edesauttaa kompensoimaan torniin kohdistuvia jännitysvoimia ja tekemään voimalaitoskokonaisuudesta stabiilimman. Kyseinen tarkastelu on tehty kuvassa 50 metrin napakorkeudella olevalle tuuliturbiinille, jonka ominaispaino on 180 tonnia ja roottorin halkaisija 60 metriä. Suhteellisesti tornin massa ja hinta kasvavat samassa suhteessa, jos tuuliturbiinin kokoa kasvatetaan.[Hau]



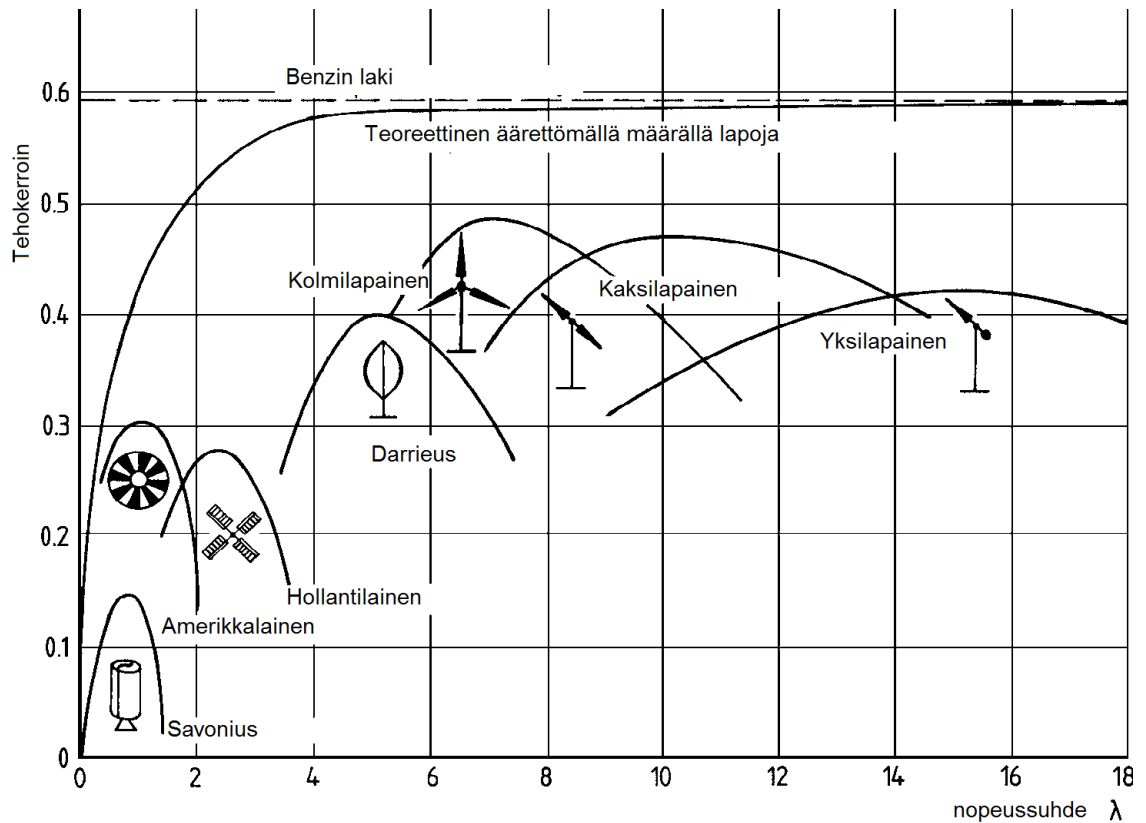
Kuva 2.2 Tuulivoimalan tornin rakenne suhteessa massaan ja hintaan [Hau s. 444]

Itse torni muodostaa kuitenkin suhteellisen pienen osan voimalaitoksen investointikustannuksista. Yhdysvalloissa asennettujen tuulivoimaloiden pohjalta voidaan todeta tornin muodostavan 10-25 %:a kokonaiskustannuksista. Verrattuna muihin keskeisiin kokonaisuuksiin niin voidaan todeta lavoista ja navasta koostuvan tuuliturbiinin olevan suhteellisesti kallein kokonaisuus 20-30 %:n osuudella.[Ancona]

Tuulivoimaloissa on yleistynyt konsepti, jossa voimalaitoksen turbiini koostuu kolmesta lavasta ja turbiiniyksikkö on sijoitettu tornin päälle. Kyseinen lapakonsepti on teknistaloudellisesti osoittautunut parhaaksi kokonaisratkaisuksi energiantuotantoon tehokertoimen puolesta. Tehokerroin kuvastaa, kuinka hyvin energiaa voidaan muuntaa muodosta toiseen. Tuulivoimalan tapauksessa tämä tarkoittaa, miten tuulen energia muutetaan sähköenergiaksi. Tehokertoimen riippuvuutta lapojen määrästä ja turbiinirakenteesta on havainnollistettu kuvassa 2.3. Kuvasta käy myös ilmi, miten lavan nopeus suhteessa tuulen nopeuteen vaikuttaa osaltaan tehokertoimeen. Vertailuna on hyvä käyttää Betzin lain pohjalta saatavaa tehokerroinarvoa, joka on samalla teoreettinen yläraja tuuliturbiinin tehokertoimelle. Kyseinen laki määrittelee, että turbiini kykenee maksimissaan ottamaan talteen sen läpi kulkevasta kineettisestä energiasta 59,3 %. Tuulivoimalan tehokertoimeen vaikuttavat osaltaan voimalaitostyyppistä riippuen vaihteiston, generaattorin, taajuusmuuttajan sekä muuntajan hyötysuhteet. Näiden lisäksi energian siirrossa syntyy häviöitä, jotka vaikuttavat kokonaishyötysuhteeseen. Lapojen määrää kasvattamalla voidaan nopeussuhdetta pienentää, jolloin tuulivoimalan energiantuotanto alkaa pienemmillä tuulen nopeuksilla. Lisäksi alhaisempi pyörimisnopeus osaltaan pienentää häviöitä, jolloin tuulivoimalan tehokerroin kasvaa. [Hau, Korpela, Muyeen]

Tuulivoimalan maston kääntämiseksi käytetään yleisesti joko sähkömoottoreita tai hydraulikkaa. Näiden tarkoituksena on kääntää tuuliturbiini aina otollisimpaan tuulen suuntaan. Usein hydraulikkaa käytettäessä lapakulmansäätö on yhdistettynä samaan hydraulikkapiiriin. Kuitenkin lapakulmansäätö voidaan toteuttaa myös sähkömoottoreilla tai vähän harvinaisemmissa tapauksissa paineilmalla. Molemmilla toteutustavoilla on

omat hyvät ja huonot puolensa, mutta hydrauliiikan puolesta puhuu etenkin sen keveys sähkömoottoriin ja akkupakettiin verrattuna. Yleisesti hydraulikkajärjestelmän luotettavuus on kuitenkin huomattavasti heikompi kuin sähkömoottoreilla.[Gasch, Hau]



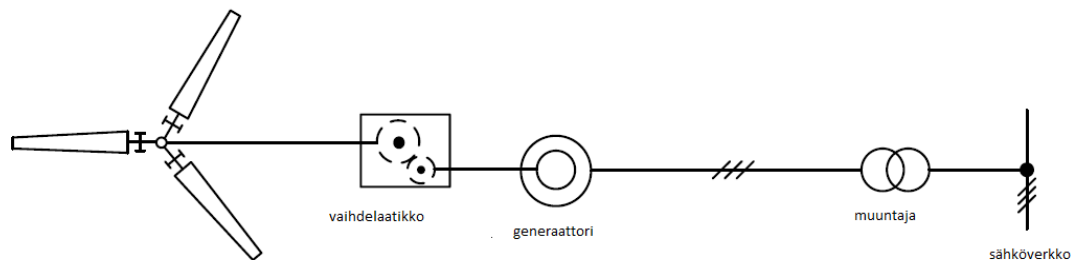
Kuva 2.3 Tuulivoimalan tehokertoimen riippuvuus rakenteesta ja nopeussuhteesta [Hau]

Tuulivoimaloiden kehitystyössä pääpainona on edelleen kokonaishyötysuhteen maksimoiminen tietyllä tuulen nopeusalueella. Lisäksi toisena keskeisenä trendinä on naselliin sijoitettavan turbiiniyksikön massan pienentäminen, mikä osaltaan pienentäisi tornin kokoa ja edelleen kustannuksia voimalaitosta kohden. Naselli on tuulivoimalan yksikkö, joka sijoitetaan tornin huipulle. Tuulivoimaloille on lisäksi esitetty nykyään FRT-vaatimuksia sähköverkon tukemiseksi vikatilanteissa. FRT-vaatimukset määrittelevät voimalaitoksen toiminnalle reunaehdot verkon vikatilojen aikaiselle toiminnalle ja lyhennys muodostuu sanoista 'fault ride through'. Osaltaan nämä vaatimukset ovat ohjanneet uusien tuulivoimaloiden investointeja uudempiin konsepteihin, koska ensimmäisten tuulivoimalakonseptien kyky tukea sähköverkkoa vikatilanteissa oli teknisesti lähes mahdotonta. Vanhat voimalaitokset kytetään irti verkosta vian ajaksi ja vian poistuttua verkosta tuulivoimala kytetään takaisin verkkoon syöttämään tehoa. Kyseinen tapa kuormittaa verkkoa runsaasti lyhyiden katkojen osalta, koska tuulivoimaloiden uudelleen käynnistäminen edellyttää loistehoa ja suurissa tuulivoimapuistoissa tämä loistehon tarve saattaa aiheuttaa uuden vikatilanteen suurien käynnistysvirtojen takia.[Hau]

## 2.2 Tanskalainen tuulivoimala

Tanskalainen voimalatyyppi oli ensimmäinen teollisessa mittakaavassa valmistettu tuulivoimala. Konseptin kehitti 1950-luvulla tanskalainen Johannes Juul, jonka mukaan konsepti on saanut nimensä. Tämä voimalatyyppi on edelleen varsin yleinen, sillä se oli aikanaan verrattain edullinen ja helppo valmistaa verrattuna muihin tuulivoimaloihin. Keskeisiä eroavaisuuksia muihin eurooppalaisiin tuulivoimaloihin olivat kolme lapaa kahden sijasta sekä se, että sähköntuotantoon käytettiin oikosulkugeneraattoria tahtigeneraattorin sijasta. Muista vaihtoehdoista voidaan mainita Hütterin tuulivoimalakonsepti, joka koostui aktiivisesta lapakulmansäädöllisestä kaksilapaisesta tuuliturbiinista, joka oli kytketty tahtigeneraattorin välityksellä sähköverkkoon. Teholuokaltaan voimalaitokset sijoittuvat välille 30–500 kW ja turbiinien halkaisijat ovat 12 metristä 35 metriin. [Gasch, Hau]

Keskeinen toimintaperiaate Juulin tuulivoimalalle on, että kiinteällä lapakulmansäädöllä oleva turbiini on kytkettynä vaihdelaatikon välityksellä suurella nopeudella pyörivään oikosulkugeneraattoriin. Generaattori on suoraan kytketty muuntajan välityksellä sähköverkkoon. Suoran sähköverkkoliitännän heikkoutena tosin on tehovaihteluiden suora heijastuminen sähköverkkoon, joka aiheuttaa saman lähdön kuluttajille epätoivottua jännitteen vaihtelua. Kyseinen vaihtelu näkyy valojen kirkkauden muutoksena, jonka ihminen usein kokee hyvin häiritseväksi tekijäksi johtuen muutoksen pulssimaisuudesta. Keskeinen syy aikanaan nopeasti pyöriviin generaattoreihin oli niiden keveys verrattuna hitaammin pyöriviin generaattoreihin sekä laajempi valikoima 1500 - 3000 rpm:n luokassa. Juulin tuulivoimalan periaate on esitettyä kuvassa 2.4. [Gasch, Hau]



*Kuva 2.4 Tanskalainen konsepti [Gasch]*

Toimintaperiaatteesta seurasi voimakasta sähkötehon vaihtelua tuulisuuden mukaan ja usein vaihdelaatikon mitoitus ei ollut voimalaitoksen tarpeisiin soveltuva, mistä seurasi runsaasti vaihdelaatikkovikoja ja heikko käytettävyys. Toisaalta päälaakereihin kohdistuvia voimia ei huomioitu riittävällä tarkkuudella, mistä aiheutui laakereiden epäsymmetristä kulumista sekä ylimääräistä värinää pääakselille. Kiinteän lapakulman myötä voimalaitoksella on luontainen suojaus suurilta tuulen nopeuksilta, koska lavat on suunniteltu siten, että ne sakkaavat yli 25 m/s olevilla tuulen nopeuksilla. [Hau, Laine]

Käynnistyksen yhteydessä voimalaa joudutaan käyttämään hetki moottorina, jotta turbiini saavuttaa riittävän pyörimisnopeuden toimiakseen generaattoritulassa. Kyseisen nopeuden saavutettua tehontuotantoa säätelee suoraan tuulen nopeus, jolloin voimalaitoksen tehon tuotantoa ei voida mielivaltaisesti hallita. Kuitenkin mahdollisen verkkovian takia voimalaitos tarvitsee jarrutusjärjestelmän, jonka avulla on mahdollista estää turbiinin liian suuret pyörimisnopeudet sekä varmistaa tuuliturbiinin liikkumattomuus huoltotöiden yhteydessä.[Gasch]

Voimalaitoksen toiminnan takaamiseksi sen yhteyteen on asennettava riittävästi kompensointikondensaattoreita vähentämään verkon loistehokuormitusta. Tämä kertoo sen, että kyseinen voimalaitostyyppi ei kykene tukemaan verkkoa FRT-vaatimusten mukaisesti. Kyseinen voimalaitostyyppi tarvitsee vikatilanteiden varalta kompensoivaa varavoimaa verkon toimintakyvyn ylläpitämiseksi. [Nordic]

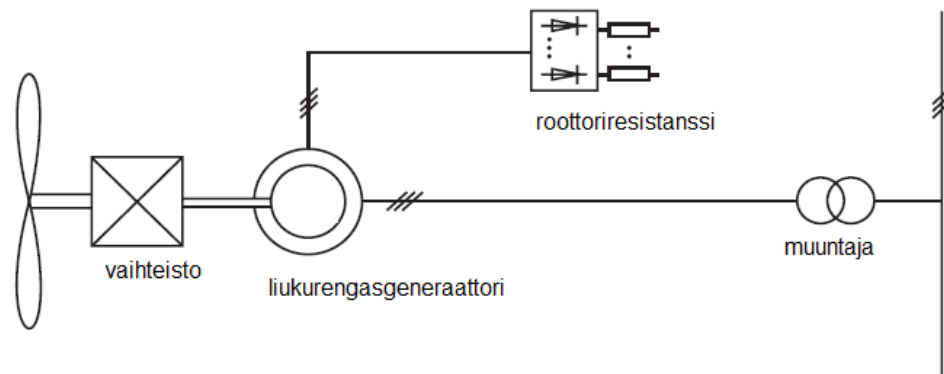
### 2.3 Muuttuvanopeuksinen induktiogeneraattori

WTSG-konsepti, muuttuvanopeuksisen induktiogeneraattorin omaava tuulivoimala, yleistyi 1990-luvun alussa generaattorin jättämäsäädön myötä, jolloin oli mahdollista hyödyntää laajempaan nopeusaluetta tuulivoimalan energiantuotannossa. Näin syntyi ensimmäinen kilpaileva tuulivoimalamalli tanskalaiselle konseptille. Tässä WTSG-konseptissa tuulivoimala koostuu induktiogeneraattorista, joka on kytketty vaihteiston välityksellä turbiiniin. Itse turbiinissa on lapakulmansäätömekanismi, jolloin lapojen kohtauskulmaa voidaan muuttaa tuulisuuden mukaan. Näin voidaan vaikuttaa tuuliturbiinin hyötysuhteeseen tuulen nopeuden vaihdella. Kyseisellä konseptilla on mahdollista hyödyntää hetkellisesti jopa 20 % nimellinopeudesta poikkeavia pyörimisnopeuksia energiantuotannossa. [Hau, Gasch]

Tuulivoimala pystyy rakenteensa ansiosta reagoimaan puuskiin ilman, että sen syöttämä jännite muuttuu merkittävästi. Tämä on osaltaan tärkeää, jotta sähköverkossa esiintyvää välkyntää pystyttäisiin vähentämään. Itse voimalaitoksen säätö puuskissa lyhyellä aikavälillä toteutetaan roottoriresistanssin arvoa muuttamalla, jolloin induktiogeneraattorin poikkeamaa nimellinopeudesta kasvatetaan tuulen nopeuden kasvaessa hetkellisesti. Vastaavasti pidempi kestoisen nopeuden kasvun myötä säädetään lapakulmaa sopivan nopeussuhteen löytymiseksi. Näin pystytään optimoimaan tehokerrointa mahdollisimman suureksi tuulisuuden mukaan.[Gasch, Hau]

Kuvassa 2.5 on esitettyä yksinkertaistettuna muuttuvanopeuksisen tuulivoimalan konsepti, josta nähdään, miten liukurengasgeneraattorin jättämää voidaan säätää roottoriresistanssia muuttamalla. Resistanssin suuruudella vaikutetaan generaattorin jättämään, mikä puolestaan on verrannollinen generaattorin momenttiin. Oikosulkugeneraattori on

suoraan kytketty verkkoon muuntajan välityksellä, jolloin verkon taajuuden muutokset heijastuvat suoraan tuulivoimalaan ja päinvastoin.



Kuva 2.5 WTSG-voimalaitoksen havainnekuva [Hau]

Induktiogeneraattorin käyttö synnyttää voimalaitoksen käynnistyksen yhteydessä suuren loistehotarpeen. Useimmiten tämän takia tuulivoimapuistoissa voimalaitoksia joudutaan käynnistämään porrastetusti, ettei sähköverkko kuormittuisi hetkellisesti liikaa suuren loistehotarpeen vuoksi. Loistehoa voidaan tuottaa keskitetysti voimalaitosten tarpeisiin, mutta tähän on aina tapauskohtainen ratkaisu sähköverkkoyhtiöstä riippuen. Vastaavasti sähköverkon vikatilanteissa kyseinen voimalaitos ei pysty syöttämään vikapaikkaan tarvittavaa loistehoa, vaan voimalaitoksen suojaamiseksi se täytyy erottaa sähköverkosta vikojen ajaksi. Nykyiset FRT-säädökset ovat tälle voimalaitostyypille haasteelliset. Varsinkin nopean katkon jälkeinen käynnistys voi kuormittaa sähköverkkoa entisestään, koska voimalaitos tarvitsee jälleen loistehoa käynnistytäkseen. Tämä osaltaan voi laukaista tarpeettomasti johdonsuojia auki, mikä osaltaan aiheuttaa uuden vikatilanteen sähköverkossa.[Hau, Nordic]

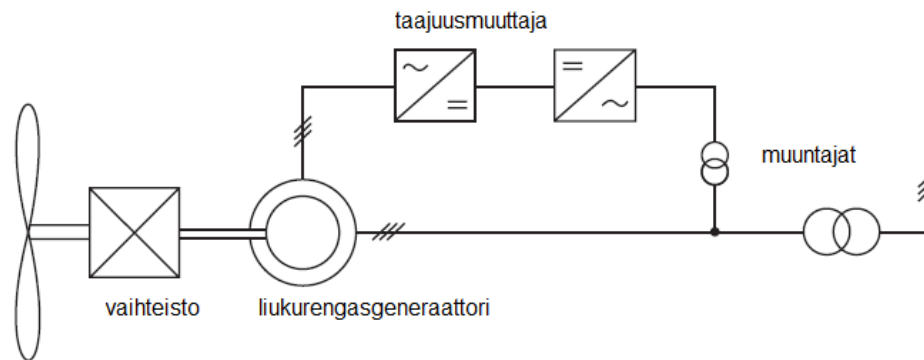
Liukurengasgeneraattoria käytettäessä on mahdollista muuttaa jättämää käyttämällä säädettävää roottoriresistanssia. Jättämää suurentamalla on mahdollista kasvattaa generaattorin ulostulotehoa, mutta vastaavasti generaattorin häviöt kasvavat samanaikaisesti. Yleisesti tätä ominaisuutta käytetään tasaamaan puuskista ja kovista tuulista aiheutuvaa tehovaihtelua, josta muuten aiheutuisi momentin muutoksia tuulivoimalan pääakselille, ja tästä seuraisi mahdollisesti mekaanisia rasituksia. Kyseisestä säätötavasta aiheutuvat lisähäviöt on helposti hallittavissa sijoittamalla säädettävät roottoriresistanssit tuulivoimalan ulkorakenteisiin, jolloin riittävän jäähdytyksen saanti on ongelmattonta.[Gasch]



## 2.4 Kaksoissyötetty induktiogeneraattori

Koska WTGS-konseptin säädettävyys oli hyvin rajoittunutta, markkinoille tuli siitä hieman kehittyneempi DFIG-konsepti, kaksoissyötetty liukurengasgeneraattori tuuli-voimala, 1990-luvun puolessa välissä. Keskeisenä parannuksena oli roottoriresistanssin korvaaminen taajuusmuuttajalla, minkä myötä jättämän säädöstä syntynyt häviöenergia pystytään syöttämään verkkoon. Lisäksi taajuusmuuttajan myötä on mahdollista osittain vaikuttaa voimalaitoksen tuottamaan loistehoon.[Gasch]

DFIG-konsepti noudattelee samaa toimintaperiaatetta kuin WTGS-konsepti. Se koostuu liukurengasgeneraattorista ja vaihdelaatikosta, jotka on kytketty lapakulmansäädöllä olevaan tuuliturbiiniin. Erona kuitenkin on, että roottoriresistanssin säätämiseen käytetään taajuusmuuttajaa, jolloin kokonaishyötysuhde kasvaa. Lisäksi kyseisellä säätötavan muutoksella mahdollistetaan voimalaitoksella kyky tuottaa tai kuluttaa loistehoa verkosta. Konseptin peruseriaate on esitettyä kuvassa 2.6.



Kuva 2.6 DFIG-voimalaitos konseptin periaatekuva [Hau]

Liukurengasgeneraattorin jättämää säädetään taajuusmuuttajan avulla ja taajuusmuuttajan läpi kulkeva teho syötetään tai otetaan, tilanteen mukaan, muuntajan läpi sähköverkkoon. Jättämänopeuksilla toimittaessa on syytä huomioida, että säätötavasta johtuen roottorissa syntyy tehohäviöitä. Tehohäviöt kasvavat jättämän kasvaessa, milloin suuria jättämä arvoja tulisi välttää pidempikestoisessa käytössä.[Gasch]

Taajuusmuuttajan käyttäminen roottoriresistanssin sijaan mahdollistaa generaattorin monipuolisemman ohjauksen loistehon suhteen sekä häviötehon pienentämisen. Pienemmän häviötehon myötä jäähdytysratkaisut voivat olla kevyemmät ja loistehon tuotanto on tarpeen silloin, kun voimalaitoksella halutaan paikallisesti pitää sähköverkon jännitettä yllä halutuissa raja-arvoissa. Lisäksi jännitteen säätöön liittyy myös läheisesti voimalaitoksen kyky leikata tehoaan, mikäli tehon tuotantoa olisi hetkellisesti enemmän kuin kuormitusta.

Kun tehoa syötetään osittain taajuusmuuttajan kautta, kyseinen voimalaitos pystyy osittain täyttämään FRT-vaatimuksia syöttämällä loistehoa verkon vikatilojen aikana. Suurempien tuulivoimapuistojen verkkoon liittymiseshdoissa on maininta loistehotuotanto kapasiteetista, joka tulee olla verkon haltijan käytettävissä vikatilanteissa. Lisäksi tuulivoimala pitää pystyä rajoittamaan tehontuotantoaan tarvittaessa, mikä osaltaan liittyy myös FRT-vaatimukseen. Kyseiset vaatimukset ovat asetettuina yli 10 MW:n tuulivoimaloille ja -puistoille.[Hui,Nordic]

Verkon viat aiheuttavat osaltaan transientteja kyseiselle voimalaitostyypille, koska generaattori on suoraan kytkettynä verkkoon. Generaattorin toimintaa voidaan hallita staattorin nopealla poiskytkennällä, josta seuraa roottorin magnetoitumisen muuttuminen. Tämän jälkeen tasasuuntaaja käynnistetään uudelleen ja staattori kytketään verkkoon. Katkon aikana voimalaitos kykenee syöttämään loistehoa taajuusmuuttajan välityksellä verkkoon, mutta näillä toimenpiteillä pystytään vähentämään transienttien vaikutusten kestoa ja suuruutta.[Hui,Nordic]

## 2.5 Kestomagnetoitu tahtigeneraattori

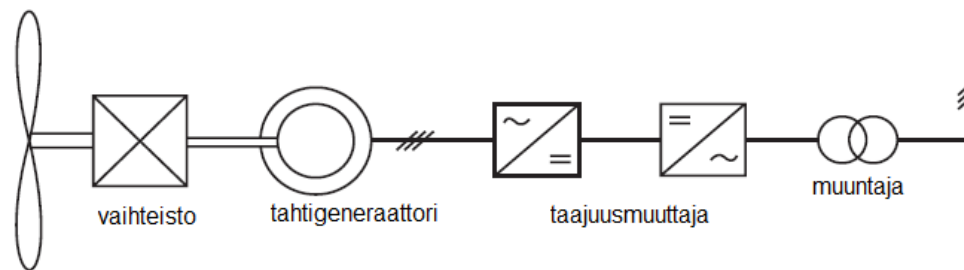
Tehoelektronikassa tapahtunut kehitys 1980-luvulla mahdollisti muuttuvanopeuksisten tuulivoimaloiden kehityksen. Osaltaan tämä kehitystyö mahdollisti myös kaupallisesti edullisempien, entistä suurempien tuulivoimaloiden rakentamisen. Enercon toimi pioneerina tällä osa-alueella julkaisemalla ensimmäisen täystehosuuntaajalla varustetun tuulivoimalan vuonna 1993 tuulivoimamarkkinoille.[Gasch]

Teknisesti kestopagnetoitua tahtigeneraattoria käyttävä tuulivoimala omaa kaikista tuulivoimalatyypeistä korkeimman hyötysuhteen laajalla tuulenoisuusalueella, mutta samalla se on myös kallein kestopagnetoidun generaattorin materiaalien ja täysteholle mitoitettun taajuusmuuttajan vuoksi. Kestomagnetoitu tahtigeneraattori on suunniteltu varta vasten tuulivoimakäyttöön sen suhteellisen hitaan pyörimisnopeuden takia. Kestomagnetointiin käytetään harvinaisia maametalleja, mikä selittää myös generaattorin suhteellisesti korkeampaa hintaa. Tälle voimalatyypille ominaista on aktiivinen lapakulmansäätö, joka voidaan toteuttaa joko hydraulisesti tai sähkömoottori avusteisesti. Generaattorin tuottama teho kulkee täysin taajuusmuuttajan läpi, jolloin generaattorin ja kytkentäverkon jännitteiden taajuudet eivät kytkeydy suoraan toisiinsa. Täystehosuuntauksen hyvänä puolena on monipuolinen lois- ja pätötehon säätö, mutta toisaalta taajuudenmuuttaja lisää voimalaitoksen kustannuksia entisestään sekä osaltaan alentaa tehokerrointa. [Hau, Pimiä]

Kestomagnetoidun generaattorin massa ja kustannukset ovat suoraan verrannollisia pyörimisnopeuteen. Mitä hitaammalle alueelle generaattori on suunniteltu, sitä painavampi

se on. Voimalaitoksen kustannuksien ja massan pienentämiseksi voidaankin käyttää hybridiratkaisua, jossa hitaasti pyörivä generaattori korvataan hieman nopeammin pyörivällä generaattorilla ja vaihteistolla. Vastapainona kyseiselle säästölle tulee lisäkomponentti, joka vikaantuessaan aiheuttaa käyttökätkön voimalaitokselle ja vaatii omia huoltotoimenpiteitä. Tämän tyyppisestä voimalaitoskonseptista mainittakoon WinWind WWD-1, joka tulee myöhemmin työssä tarkasteltavaksi luotettavuuden näkökulmasta. [WinWinD, Hau]

Edellä kuvattua tuulivoimalakonseptia on havainnollistettu kuvassa 2.7. Kuvassa tahtigeneraattori on kytketty vaihteiston välityksellä tuuliturbiiniin. Kuten aikaisemmin todettiin, vaihteiston käyttö ei ole välttämätöntä tälle voimalaitoskonseptille. Lisäksi generaattorin tuottama teho menee kokonaisuudessaan taajuusmuuttajan läpi muuntajalle ja edelleen sähköverkkoon.



Kuva 2.7 Kestomagnetoidun tahtigeneraattori konseptin havainnekuva [Hau]

Yleisesti kestopagnetoidut tuulivoimalatyypit ovat hallitsevassa asemassa uusien voimalaitosten asennuksissa, koska niiden tehon ja jännitteen säädettävyys ovat selkeästi parempia kuin muilla voimalaitostyypeillä. Lisäksi yli 3 MW kokoluokan voimalaitoksissa ei ole saatavilla muun tyyppisiä ratkaisuja kustannustehokkaasti. [Hau]

Konseptin heikkouksina on pidetty alentunutta kokonaishyötysuhdetta taajuusmuuttajan vaikutuksesta, kun verrataan pistemäisesti yksittäisellä tuulen nopeudella voimalaitoksen kokonaishyötysuhdetta. Vastaavasti laajalla nopeusalueella kokonaishyötysuhde on kilpailevia konsepteja edellä juuri voimalaitoksen laajan toiminta-alueen ansiosta. Lisäksi taajuusmuuttaja aiheuttaa harmonisia yliaaltoja sähköverkkoon, mikä aiheuttaa verkon jännitteen säröytymistä. Yliaaltojen kompensointi edellyttää toimia voimalaitos tai voimalaitospuiston tasolla. Teknisen kehityksen myötä taajuusmuuttajien ominaisuudet ovat kehittyneet ja useamman ohjatun sillan käytöllä taajuusmuuttajassa saadaan ulostulojännite hyvin säröttömäksi, jolloin yliaaltojen määrä vähenee. Voimalaitos ei tarvitse käynnistysvirtaa eikä synkronoinnin kanssa muodostu ongelmia vikatilanteiden jälkeen. [Hau]

PMSG-ratkaisulla, kestopagnetoidun generaattorin omaavalla tuulivoimalalla, on parhaat ohjattavuusominaisuudet verkon vikojen aikana ja voimalaitos kykenee syöttämään

tarvittaessa verkkoon loistehoa. Osaltaan voimalaitokset voivat tarvittaessa osallistua myös jännitteen säätöön paikallisesti, mutta se on kuitenkin usein keskitetty muille voimalaitoksille tuulivoimaloiden tuottaessa tehoa verkkoon.

Tuulivoimaloiden tehon säätäminen normaali tilanteissa on pidettävä 10 %:ssa nimellistehosta minuutin tarkastelujakson aikana. Tämä koskee erityisesti tehon kasvua eikä niinkään rajoita tehon alaspäin säätöä. Lisäksi tuulivoimalan tulee kyetä itsenäisesti säätämään ulostulojännite verkon taajuuteen sopivaksi. Näistä molemmista vaatimuksista kyseisen tyyppin tuulivoimala selviytyy sekä kykenee jännitteen paikalliseen säätöön sekä osa sen loistehotuotannosta on varattuna sähköverkon tarpeisiin kaikilla ulostulotehoilla.[Nordic]

## 2.6 Kehitysnäkymiä tuulivoimaloille

Tuulivoimaloiden rakentaminen tulevaisuudessa on hyvin riippuvainen vallitsevista määräyksistä koskien voimalaitoksen kykyä tukea verkkoa vikatilanteissa. Kyseisillä FRT-ominaisuuksilla rajataan teknisesti voimalaitosten tyyppiä erityisesti suuremmissa kokoluokissa. Lisäksi tuulivoimaloiden rakentamista suuntaavat voimakkaasti vallitsevat syöttötariffisäädökset varsinkin Suomessa ja muulla alkukasvun omaavilla markkinoilla. Vastaavasti kasvu jatkuu voimakkaana alueilla, joilla on ennestään runsaasti tuulivoimatuotantoa, keskeisinä Kiina, Yhdysvallat, Intia ja Saksa.

Tuuliturbiinin tehon kasvattaminen asettaa kasvavia haasteita tornin suunnitteluun, koska turbiiniyksikön massa kasvaa tuotantotehon mukana. Toisaalta generaattoria on mahdollista keventää tulevaisuudessa hyödyntämällä suprajohtavia materiaaleja. Näin voimalaitoksen perustuksen kustannukset osaltaan pienenevät, mutta toisaalta kyseinen säästö häviää kalliimman generaattorin myötä. Lisäksi generaattorin vaatima jäähdytystarve lisää voimalaitoksen vikataajuutta, koska eri järjestelmien jäähdyttämiseen käytettävät lämpötilatasot eroavat suuresti toisistaan. Tällöin tarvitaan kaksi erillistä jäähdytysjärjestelmää kustannustehokkaan jäähdytyksen toteutukseen. Varsinkin merellä olevissa voimalaitoksissa tulisi jatkossa pyrkiä pienentämään huoltotarvetta, jolloin kasvava vikataajuus ei suoraan ole toivottavaa.

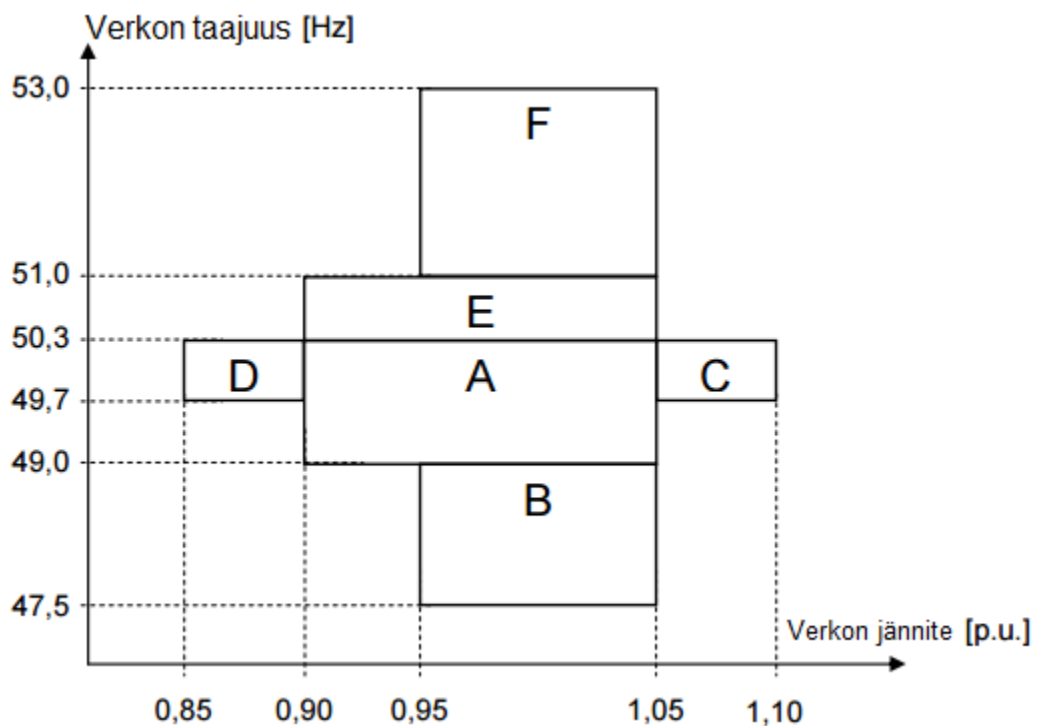
Tuulivoimalan kokoluokan kasvulle syntyy myös rajoitteita kokoamisen suhteen, sillä liikuteltavien nostolaitteiden nostokyky muodostuu usein taloudellisessa mielessä rajoittavaksi tekijäksi 2-3 MW:n voimalaitosten kokoluokassa. Tätä suuremmissa voimalaitoksissa perustamiskustannukset kasvavat huomattavasti, mikä kannustaa hieman pienempien voimalaitosten valintaan. Samalla tuulivoimalan valintaperusteella saadaan korkeampia huipunkäyttöaikoja, joka on perinteisesti yksi keskeisimmistä lukuarvoista, jolla energiantuotantomuotoja keskenään vertaillaan. Kyseinen aika kertoo kuinka kauan voimalaitos olisi kuvitteellisesti toiminut nimellistehollaan, kun vuoden aikana tuotettu energia olisi tuotettu yhtäjaksoisesti nimellisteholla. Toisaalta tämä pienentää vuo-

tuista energiantuotantoa voimalaitoskohtaisesti, koska suurempi tehoinen tuulivoimala pystyy hyödyntämään suurempia tuulen nopeuksia paremmin. Tällöin myös energiantuotanto kasvaa vuositasolla, mutta vastaavasti huipunkäyttöaika pysyy pienempänä. Tämä esimerkki kuvastaa niitä hetkiä, jolloin pienemmässä tuulivoimalassa generaattorin koko rajoittaa ulostulotehoa, vaikka tuulesta olisi mahdollista saada enemmän tehoa sekä energiaa suuremmalla tuulivoimalalla. [Gasch]

Tuulivoimaloille on asetettuina verkostovaatimuksia, jotka tulevaisuudessa ovat keskeisiä tekijöitä tuulivoimaloiden rakentamis- ja kehitysnäkymissä. Näitä ohjaavia vaatimuksia ovat, että tuulivoimaloiden tulee jatkossa kyetä jatkamaan normaalia tehontuotantoa enintään 250 ms pituisesta jännitteettömästä katkosta riippumatta ja tämän jälkeenkin voi seurata vielä 500 ms kestävä jännitteen palautuminen 0.10 p.u. arvosta 0.75 p.u arvoon. Lyhenne p.u. tarkoittaa suhteellista osuutta nimellisarvosta. Nämä raja-arvot ohjaavat tuulivoimaloiden teknistä kehitystä sähköverkon luotettavuuden kannalta. Tuulivoimapuistoille on erikseen määriteltä, että niiden käynnistykset ja pysäytykset tulisi tapahtua porrastetusti eikä yhtä aikaisesti. Tämä osaltaan heijastuu myös tehon säätöön liittyvästä vaatimuksesta, joka käsiteltiin aikaisemmassa luvussa koskien kestopagne-toitua tahtigeneraattorin omaavaa tuulivoimalaa.

Näiden lisäksi tehontuotannon ohjaus jännitteen ja taajuuden mukaan on keskeisessä osassa tuulivoimaloiden kehityksessä. Kuvassa 2.8 on esitettyä paloittain Nordic-verkkosäännösten mukaiset raja-arvot tuulivoimalan toiminnalle. Kuvan 2.8 alueella A tuulivoimalan tulee toimia normaalitilassa, jolloin se ei ota tai syötä verkkoon loistehoa. Alueella B tuulivoimalan tulee toimia normaalisti vähintään 30 minuuttia, mutta tehonrajoitus on sallittua 49 Hz:stä 47.5 Hz:n alueella siten, että teho laskee lineaarisesti enintään 15 %:a. Alueilla C ja D voimalaitoksen tulee toimia vähintään 60 minuuttia, kuitenkin 10 % tehon rajoitus on sallittua. Alueella E tulee pystyä toimimaan vähintään 30 minuuttia pienillä tehon vähennyksillä sekä alueella F voimalaitoksen tulee selvitä vähintään 3 minuuttia, jonka jälkeen tehoa voi vapaasti rajoittaa. [Nordic]

Kasvavassa määrin edellä mainittuja vaatimuksia ollaan ajamassa myös pienemmän kokoluokan tuulivoimaloille. Nykyisellään edellä mainitut vaatimukset koskevat yli 1 MW:n tuulivoimaloita, mutta pienempien voimaloiden tulisi selvittää myös lyhytkestoisista taajuuden vaihteluista välillä 47.5 Hz - 53 Hz. Näillä vaatimuksilla pyritään varmistamaan jatkossa verkon normaali toimintatila sähköverkon häiriöiden aikana siten, että tuulivoimalat olisivat osana tukemassa verkkoa häiriöiden yhteydessä eikä niitä kytkettäisi irti jokaisen verkkovian aikana. Pieniltä tuulivoimaloilta ei kuitenkaan edellytetä samaan tapaan loistehotuotantoa kuin isoilta yli 10 MW:n voimalaitoskokonaisuuksilta. Lisäksi pienille tuulivoimaloille ei ole asetettu rajoitteita yleisellä tasolla tehon kasvusta tai pienenemisestä. Kuitenkin paikallisen verkon haltijan kanssa voidaan sopia tehon vaihtelun ehdoista. [Nordic s. 172]



Kuva 2.8 Tuulivoimalan tehontuotannon rajoitus jännitteen ja taajuuden suhteen [Nordic s.175]

### 3 VIKA-ANALYYSIN PERIAATTEET

Vika-analyysin hyödyntäminen teollisuudessa on verrattain uusi menetelmä, vaikka siihen liittyvät läheisesti takuuohjelman riski sekä huolto-ohjelman toteutus. Riskiä voidaan pienentää komponenttivalinnoilla sekä huolto-ohjelmaa ajoittamalla voidaan pienentää vikaantumisen todennäköisyyttä. Usein tämä on kolmikenttäinen optimointiongelma katteen, vikaantumisen ja huoltokustannusten välillä, missä pyritään minimoimaan kokonaiskustannukset. Tämän työn analysoinnissa ei varsinaisesti puututa tähän optimointiongelmaan, vaan pysytään vikataajuuksissa sekä niitä vastaavissa vikaantumistodennäköisyyksissä.

Kynnyskysymyksenä analyysin tekemiselle on usein yrityksissä ollut resurssien puute ja usko oman tuotteen vikaantumattomuuteen sekä asiakkaan mielenkiinnon puute tietää tarkemmin laitteen luotettavuudesta. Vika-analyysi on nykyisin keskeisessä osassa yritysten laitesuunnittelua, sillä suunnitteluvaiheessa huoltotarpeen toteaminen ja osien oikeaoppinen sijoittaminen tulevat osaltaan tehostamaan myöhemmin huoltotoimenpiteitä sekä vähentämään laitteen elinkaarikustannuksia.

Vika-analyysin sijasta tuulivoimaloissa on panostettu runsaasti jatkuva-aikaiseen kunnonvalvontaan, minkä pohjalta voidaan reaaliaikaisen datan avulla todeta mahdollisia vikatiljoja. Nämä täydentävät toisiaan, sillä vika-analyysien pohjalta saadaan luotettavuusarvioita komponenttikohtaisesti. Vastaavasti kunnonvalvonta mahdollistaa tämän mittausdatan keräämisen ja hyödyntämisen tuulivoimalan luotettavuuden parantamiseksi. Ilman kunnonvalvontaa toiminta olisi vain riippuvainen vika-analyysien riskirajoista, mutta toisaalta ilman vika-analyysiä kunnonvalvonnassa voitaisiin mitata suurta määrää muuttujia ja keskeinen tieto voisi jäädä hyödyntämättä.[Gasch]

Tässä työssä käytetään MTBF-arvoja, keskimääräinen vikojen välinen aika, oletuksella, että MTTR-arvo, keskimääräinen vian korjausaika, on nolla. Tämä oletus tehdään, koska tämä selkeyttää tarkastelua sekä osaltaan mahdollistaa jatkuvan tarkastelun, kun vikaantuneet osat korjataan eikä toiminta keskeydy vikatilanteeseen. Toisaalta tämän yksinkertaistus tuo myös selkeämmin esille jakaumien eroavaisuudet keskenään, kun korjausaika ei ole samanaikaisesti satunnaismuuttujana vuotuisten vikojen määrityksessä. Kyseinen korjaamattomuustulkinta ei varsinaisesti korreloisi sitäkään vähää todellisuuden kanssa kuin nyt valittu nolla korjausaikatulkinta.

Toisaalta MTTR-arvon määrittämisen kanssa voidaan käyttää samoja jakaumia kuin vika-analysoinnissa. Tällöin vikataajuus korvataan korjaustaajuudella ja yksittäisen korjauksen kestolle saadaan näin ollen todennäköisyys eksponenttijakauman avulla. Käytännön tasolla ei voida kuitenkaan olettaa jokaisen tunnin olevan korjaamisen suhteen tasa-arvoisessa asemassa esimerkiksi työvoimakustannusten osalta, joka selkeästi vaikuttaa korjaustoimenpiteen keston. Korjaustaajuuden määrittämiseen ei varsinaisesti ole muita keinoja kuin tilaston pohjalta saatava toteutunut korjausaika, ja tämän lukuarvon hyödyntäminen uusista osista koostuvan voimalaitoksen mallintamisessa on vain suuntaa antavaa. Saatava lukuarvo korjausajalle on suuntaa antava arvaus, sillä osien korjausaikaan vaikuttaa lisäksi komponenttien sijoittelu, jota pyritään pääsääntöisesti kehitystyössä optimoimaan huoltotoimenpiteiden minimoimiseksi. Kuten aikaisemmin mainittiin, vian tapahtuma-aikakin vaikuttaa korjausaikaan, koska vuorokauden tunnit eivät ole kustannuksellisesti tasavertaisessa asemassa. Korjausaikaoletuksen myötä vikojen kestoajoja ei voida huomioida tilastoon vertailtaessa laskettuja lukuarvoja. Tällä oletuksella voimalaitoksen käytettävyydeksi saadaan yksi, koska vikojen korjausajat olivat nolla.

Edellä mainittu periaate johtaa tulkintaan, että MTTF, keskimääräinen aika vikaantumiseen, ja MTBF-arvot ovat yhtä suuria, vaikka niiden luonteet eroavat toisistaan perustavanlaatuisesti. MTTF:n tapauksessa uutta osaa ei vaihdettaisi vaan kokonaisuuden toiminta käytännössä loppuisi siihen, mikä ei ole käytännön tasolla järkevä tulkinta. Vastaavasti MTBF:n tapauksessa osa vaihdetaan uuteen ja kokonaisuuden toiminta jatkuu.

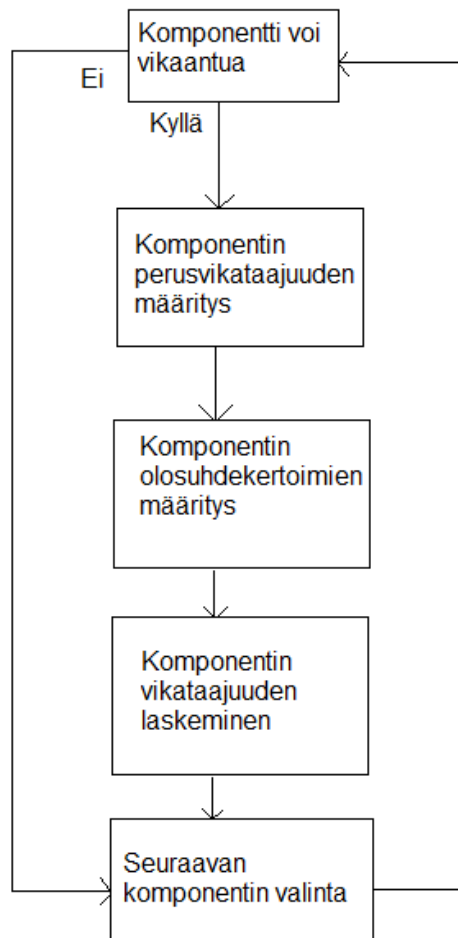
Vikataajuuden  $\lambda$  ja MTBF:n yhteys on se, että vikataajuus on MTBF:n käänteisarvo yksikössä vikaa tunnissa, kun MTBF-arvona käytetään tuntia. Laskettaessa kokonaisuusien vikataajuutta alaosien vikataajuudet lasketaan yhteen ja saadaan suuremmille kokonaisuuksille vikataajuus. Vikataajuuksien vertailu kertoo jo hyvin selkeästi osan vikaantumista, kun vastaavasti MTBF-arvojen vertailu ei avaa vikatiheyden suuruutta kovin selkeästi. Lisäksi lukuarvot ovat joko hyvin suuria tai pieniä riippuen tarkastellaanko MTBF-arvoa vai vikataajuutta.

Tietokannoissa ja kirjallisuudessa usein esitetään komponenteille ja niiden kokonaisuuksille MTBF-arvoja, sillä niiden luettavuus on hieman selkeämpää. Lukuarvot esitetään usein tuhansissa tunneissa, kun vikataajuus olisi vastaavasti 0,001 vikaa tunnissa. Tietenkin molemmista tapauksista näkee nopeasti eri asioita, kuten monta vikaa syntyy mahdollisesti seuraavan viikon aikana tai kuinka kauan keskimäärin menee seuraavaan vikaan. Laskettujen ja tietokannoista saatujen lukuarvoja vertailemalla saa hyvän käsityksen MTBF-arvon suuruusluokan oikeellisuudesta.



### 3.1 Vika-analyysin määrittely

Vika-analyysin vaiheet on esitetty yksinkertaistettuna kuvassa 3.1. Kuvasta käy ilmi lohkokaaaviomuodossa komponentin vikataajuuden määrittelyksen vaiheet. Vika-analyysin tekeminen alkaa siitä, että mietitään voiko komponentti vikaantua suunnitellussa käyttökohteessa ajan, lämpötilan tai käytön vaikutuksesta. Mikäli komponentti ei ole vikaantuvaa mallia, voidaan siirtyä käsittelemään seuraavaa komponenttia, muussa tapauksessa selvitetään komponentin vikataajuus. Esimerkkinä vikaantumattomasta komponentista otetaan vaikka yksittäinen mutteri tai pultti. Tuulivoimalan tapauksessa myös suojarakenteet ovat vika-analyysin näkökulmasta vikaantumattomia.



Kuva 3.1 Vika-analyysin tekeminen lohkokaaaviona

Komponentin perusvikataajuutta voidaan etsiä luotettavuus- ja suunnittelukirjoista tai mahdollisesti valmistajan antamilta datalehdiltä. Lisäksi voidaan hyödyntää komponentista kerättyä vikatilastoa, jos sellainen on saatavilla. Perusvikataajuuden lisäksi olisi hyvä huomioida tulevan käyttökohteen olosuhteita, joilla voi olla merkittävä vaikutus komponentin vikataajuuteen. Kyseinen tarkastelu voidaan jättää tekemättä, mikäli käyttökohteessa valitsee standardin mukaiset NTP-olosuhteet. NTP-olosuhteilla tarkoitetaan

ideaalisia laboratorio-olosuhteita, kun ilman lämpötila ja paine ovat vakioita, 293 K ja 1 bar, sekä osan kuormitusaste on vakio. Usein näin ei kuitenkaan ole, vaan tarvitaan esimerkiksi lämpötilakorjauksia sekä komponentin kuormitusastetta. Tarvittavien olosuhdekertoimien jälkeen voidaan määrittää kyseiselle komponentille käyttökohteessa vallitseva vikataajuus. Tämän jälkeen voidaan siirtyä käsittelemään seuraavaa komponenttia, kunnes koko rakenteelle on saatu määriteltyä vikataajuus.

Vika-analyysin tavoitteena on saada lukuarvo komponentin vikataajuudelle, jota voidaan hyödyntää tulevan tuulivoimalan elinkaaren suunnittelussa. Elinkaaren aikana saatavaa käyttötietoa voidaan hyödyntää tulevilla vika-analyysissä, kun osan käyttäytymisestä tietyissä olosuhteissa on tarkempaa tietoa. Näin vika-analyysi on jatkuvasti kehittyvä prosessi, jolle ei varsinaisesti ole päätöstä vaan aina voidaan luoda tarkempaa ja olosuhteista riippuvaa vikataajuusmallia. Kuitenkin on syytä huomioida rajalliset resurssit ja haluttavan lopputuloksen tarkkuus vika-analyysia tehtäessä.

### 3.2 Vika-analyysin tekeminen spesifoidulle komponentille

Jokaisen osan vikataajuuden määrittelyä ei ole mielekästä käydä yksityiskohtaisesti läpi, koska suunnittelukirjojen pohjalta se on hyvin suoraviivaista. Yhden esimerkin kautta saa riittävän näkemyksen, miten analyysi etenee. Esimerkin omaisesti käydään läpi yhdelle komponentille vika-analyysin tekeminen suunnittelukirjojen pohjalta. Tarkastelu-esimerkiksi otetaan WinWind-voimalaitoksen tahtigeneraattori. Kyseiselle kestopagnetoidulle tahtigeneraattorille on määriteltynä vikataajuus, joka noudattaa seuraavaa kaava [HDBK-217 s.45]

$$\lambda_p = \left[ \frac{\lambda_1}{A\alpha_B} + \frac{\lambda_2}{B\alpha_W} \right] \cdot 10^6 . \quad (3.1)$$

Seuraavaksi esitetyt taulukot 3.1, 3.2 ja 3.3 ovat kirjan Military Handbook of Reliability Prediction of Electronic Equipment 217 sivuilta 45 ja 46. Nämä liittyvät generaattorin vikataajuuden määrittämiseen. Kaavassa 3.1 esiintyvät vikataajuudet  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  ovat generaattorin laakerin ja käämityksen ominaisvikataajuudet. Kaavassa esiintyvät kertoimet A ja B liittyvät generaattorin käyttötapaan. Tämän työn tarkasteluissa kyseiset lukuarvot ovat 1.9 ja 1.1. Kyseiset lukuarvot saadaan taulukosta 3.1. Kertoimet  $\alpha_B$  ja  $\alpha_W$  liittyvät generaattorin arvioituun toimintalämpötilaan.[HDBK-217]

Laskentaa toteuttaessa generaattorin toimintalämpötilaksi on valittu 50 °C sekä suunnitelluksi eliniäksi valmistajan tietojen pohjalta 20 vuotta eli 175 200 tuntia. Tällöin kertoimet  $\alpha_B$  ja  $\alpha_W$  arvoiksi saadaan 55000 h ja 290 000 h taulukosta 3.2, jossa on esitettyinä kertoimien  $\alpha_B$  ja  $\alpha_W$  lämpötilariippuvuus. Näiden tietojen pohjalta voidaan taulukosta 3.3 lukea lukuarvot  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$ , jotka ovat 1 ja 0.51. Kyseiset lukuarvot saadaan laskemalla ensimmäisen sarakkeen suhde ja valitsemalla sitä vastaava arvo toisesta sarak-

keesta. Taulukossa 3.3 esiintyvä LC-arvo on aikaisemmin mainittu generaattorin suunniteltu elinikä. Lopuksi sijoitetaan saadut lukuarvot kaavaan 3.1, jolloin saadaan generaattorin vikataajuudeksi noin 11,29 vikaa miljoonassa tunnissa.[HDBK-217]

Taulukko 3.1 Generaattorin kertoimet A ja B käyttötavan mukaan

Moottorityyppi	A	B
Yleinen	1,9	1,1
Sensorikäyttö	0,48	0,29
Servokäyttö	2,4	1,7
Askelkäyttö	11	5,4

Taulukko 3.2 Kertoimien  $\alpha_B$  ja  $\alpha_W$  lämpötilariippuvuus

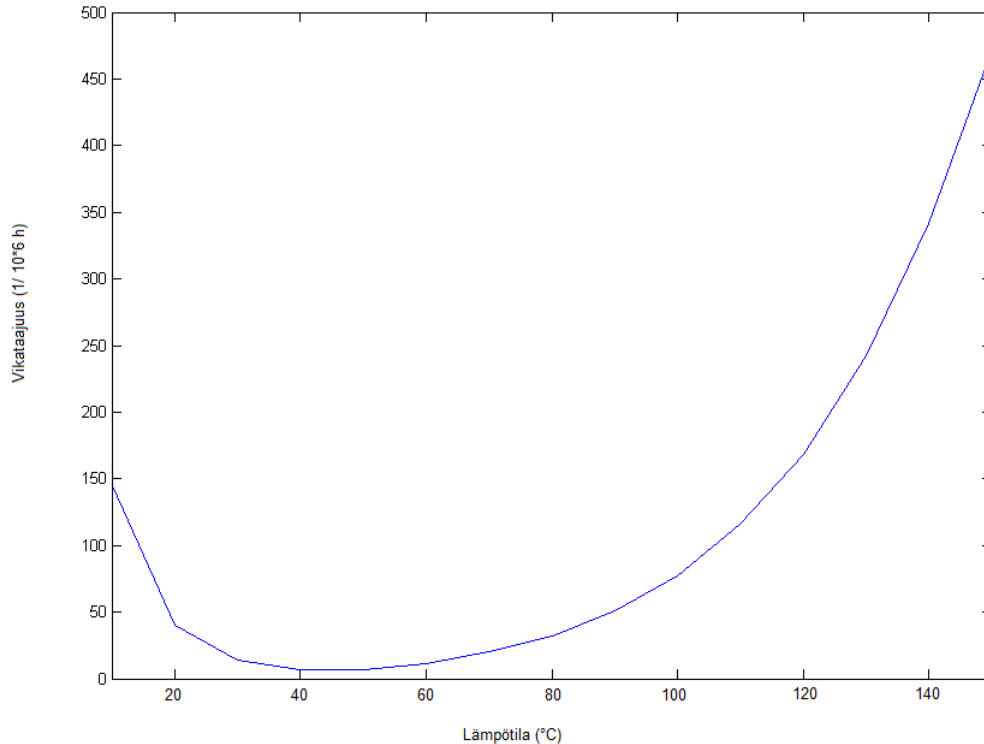
T (°C)	$\alpha_B$ (h)	$\alpha_W$ (h)
0	3600	6400000
10	13000	3200000
20	39000	1600000
30	78000	8900000
40	80000	500000
50	55000	290000
60	35000	180000
70	22000	110000
80	14000	70000
90	9100	46000
100	6100	31000
110	4200	21000
120	2900	15000
130	2100	10000
140	1500	7500

Taulukko 3.3 Vikataajuuksien  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$ , riippuvuus suunniteltu iästä ja kertoimista  $\alpha_B$  ja  $\alpha_W$

LC tai LC $\alpha_B$ $\alpha_W$	$\lambda_1$ tai $\lambda_2$ (1/h)
0-0,1	0,13
0,11-0,2	0,15
0,21-0,3	0,23
0,31-0,4	0,31
0,41-0,5	0,41
0,51-0,6	0,51
0,61-0,7	0,61
0,71-0,8	0,68
0,81-0,9	0,76
>1	1

Lisäksi voidaan vielä todeta, että generaattori on nestejäähdytetty. Tästä jäähdytysratkaisusta syntyvät viat on huomioitu jäähdytysjärjestelmän yhteydessä, vaikka ne syntyvät myös generaattorista. Kuvan 3.2 avulla voidaan havainnollistaa generaattorin toimintalämpötilan vaikutusta vikataajuuteen. Kyseinen kuva on piirretty generaattorille, jonka suunniteltu käyttöikä on 20 vuotta, yhtälön 3.1 mukaisesti. Kuvasta 3.2 voidaan havaita, että kyseisellä komponentilla optimaalisin toimintalämpötila olisi 40 °C, koska silloin vikataajuus saavuttaa minimin. Tätä alhaisemmissa lämpötiloissa vikataajuus kasvaa jyrkästi, mutta korkeammilla lämpötiloilla kasvu on maltillista aina 70 °C lämpötilaan asti. Tämän jälkeen vikataajuus lähtee jyrkästi kasvamaan ja vertailun vuoksi 100 °C lämpötilassa vikataajuus on kasvanut jo kymmenkertaiseksi 50 °C:n vikataajuuden arvoon verrattuna. Toisaalta järjestelmän ollessa nestejäähdytetty yli 120 °C toimin-

talämpötilat vaatisivat vähintään 2 bar:n painetta. Yleisesti jäähdytysjärjestelmä paineistuu jäähdytysnesteen normaalin kiertosyklin myötä noin 1-1,3 bar:n välille, jolloin jäähdytysnesteen kiehumispiste asettuisi noin 110 °C:een.



*Kuva 3.2 Generaattorin vikataajuuden riippuvuus toimintalämpötilasta yhtälön 3.1 mukaisesti*

### 3.3 Vika-analyysi muille komponenttiryhmillä

Muiden komponenttien osalta vikataajuuden määrittely noudattaa aikaisemmin esitetyn vikataajuuden määrittelyä pääpiirteittäin. Kuitenkin komponenteille on huomioitava niiden erilaisuudet määrittäessä vikataajuuksia ja näin ollen ei ole yhtä kaavaa, jonka pohjalta voitaisiin laskea kaikille komponenteille suoraan vikataajuus. Lisäksi työn rajallisuuden vuoksi jokaisen komponentin läpikäyminen ei ole mielekäästä. Tarkoituksena on vain suuntaa-antavasti ohjata oikealle polulle, miten tarvittavat vikataajuudet on muodostettu sekä antaa hieman osviittaa, ovatko kyseiset lukuarvot järkevässä suuruusluokassa.

Lähtökohtana on se, että komponenteille käytetään valmistajan antamaa vikataajuusarvoa, jos se on saatavilla. Muissa tapauksissa komponenteille määritellään vikataajuus kuvan 3.1 mukaisen lohkokaaavion mukaisesti. Suuremmille järjestelmäkokonaisuuksille, kuten jäähdytysjärjestelmän sekä jarrut, järjestelmän vikataajuus määriteltiin ala-

komponenttien avulla. Toisin sanoen määritellään tiivisteille, letkuille, jousille ja muille pikkuosille oma vikataajuus ja lasketaan nämä yhteen, jolloin saadaan kokonaiselle järjestelmälle vikataajuus ja siitä edelleen MTBF-arvo.

Järjestelmien vikataajuuksien määrittämiseen voidaan myös hyödyntää aikaisemmin tehtyä työtä muista samanlaisista järjestelmistä. Nämä vikataajuudet voivat olla peräisin omana tuotoksena tai mahdollisesti yleisen testauksen tuloksena saaduista vikatilastoista. Yksinkertaistettu esimerkki samankaltaisesta järjestelmästä on jarrujärjestelmästä, joka koostuu kaksisylinterisestä jarrusatulasta ja jarrulevystä. Kyseiselle kokonaisuudelle haetaan vikataajuutta samankokoisesta jarrulevystä sekä suunnilleen saman teholuokan omaavasta järjestelmästä.

Yksinkertaisempia järjestelmiä voidaan yleistää suoraan MTBF-arvon perusteella, kuten esimerkiksi valojen ja kytkimien osalta. Valojen osalta tyypillisesti ilmoitetaan MTBF-arvo ja kytkimien osalta vastaavasti, kuinka monta kytkentämuutosta laite kestää. Kyseinen arvo voidaan muuntaa MTBF-arvoksi.

## 4 VIKA-ANALYYSI REFERENSSIVOIMALOILLE

Työn referenssivoimalaitoksiksi valikoituivat kaksi yleisintä tuulivoimalaa Suomessa. Kyseiset voimalaitokset ovat WinWind:n WWD-1 sekä Siemensin SWT-3.0-101. Kyseisillä voimalaitostyypeillä oli noin 72 % osuus tuotantokapasiteetista vuonna 2010, kun huomioidaan myös teknisesti samankaltaiset sisarmallit kyseisistä voimalaitoksista. Kolmantena suurena tekijänä Suomen tuulivoimalamarkkinoilla on Enercon, mutta kyseistä voimalaitosta ei käsitellä tässä työssä. Kuitenkin voidaan mainita, että sen tekniset ratkaisut ovat hyvin samankaltaisia kuin Siemensin voimalaitoksessa.[VTT]

Vika-analyysin tekemiseen tarvittava rakenneluettelo ja osalistaus kerättiin julkisesti tarjolla olevista materiaaleista, joita kyseisistä voimalaitoksista on saatavilla. Tämän pohjalta lähdettiin tekemään vika-analyysiä keskeisille ja vikaantuville komponenteille käyttäen suunnittelupohjana kirjallisuuslähteinä MIL-Handbook-kokoelmaa sähkö- ja mekaanisille komponenteille. Kyseisistä kirjoista löytyvät yksinkertaiset parametrilliset jokaiselle komponentille ja suuremmille osakokonaisuudelle, joissa huomioitiin osaan vaikuttavat olosuhteet, valmistusmateriaalit sekä osan kuormitettavuus. Näiden kahden kirjan pohjalta luotiin malli riittävällä tarkkuudella, jotta tuulivoimalan vikaantumista pystytään mallintamaan.

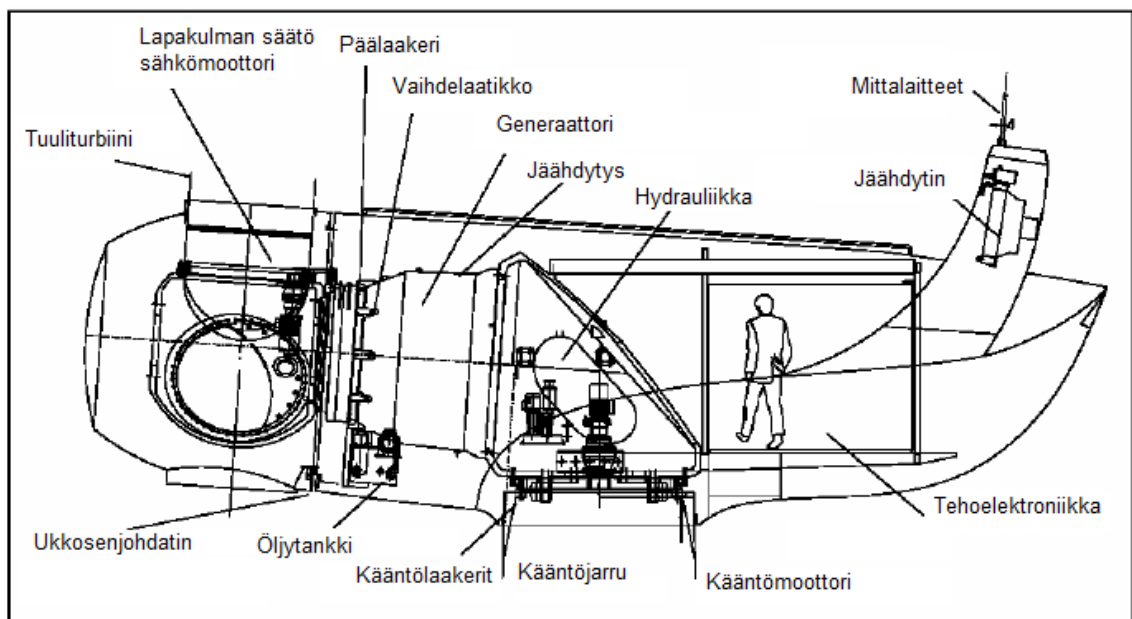
Vikaantumisen mallintamisessa ei ole otettu huomioon mahdollisista ulkopuolisista tekijöistä aiheutuvia vikoja vaan pelkästään voimalan käytöstä syntyviä vikoja. Esimerkiksi ukkosen aiheuttamia vikoja ei pystytä ennustamaan, toisin kuin tuulivoimalan roottorin pyörimisestä aiheutuvaa laakerikulumaa. Lisäksi analyysissä oletetaan, että voimalan rakenteet on mitoitettu siten, että niistä itsestään ei synny vikoja käyttöiän aikana. Tähän kategoriaan lukeutuvat pultit, lavat ja rakenteet yleisesti.

### 4.1 WinWind WWD-1

Tuulivoimala WWD-1 on suomalaisen WinWind:n suunnittelema ja rakentama 1 MW:n voimalaitos. Voimalaitos on tekniseltä luonteeltaan vastaava isomman 3 MW:n voimalan kanssa. Tuulivoimalana se edustaa hybridiratkaisua, josta löytyy sekä vaihteisto että täystehosuuntaaja yhdistettynä tahtigeneraattoriin. Kyseisellä toteutuksella kokonaisyhtöysuhde jää hieman pienemmäksi kuin vaihteettomalla PMSG-ratkaisulla. Vastavasti vaihteiston käytöllä voidaan valita monipuolisemmin sopivan kokoinen ja hintainen PMSG, mikä osaltaan pienentää voimalaitoksen investointikustannuksia. Voimalaitoksen selkeä etu vaihteettomaan voimalaitokseen verrattuna on generaattorivalikoiman lisääntyminen kasvaneen pyörimisnopeuden myötä. Turbiinin ja generaattorin pyöri-

misnopeuksien ero ei kuitenkaan ole samalla tasolla kuin ensimmäisen sukupolven tuulivoimaloilla.

WWD-1-voimalaitoksen rakennetta on havainnollistettu kuvassa 4.1. Kuvasta on poistettu tuuliturbiinin lavat, koska rakennekuva on tällöin hieman luettavampi. Voimalaitoksen rakenteesta voidaan todeta, että pääakselin vaimentamiseen käytetään kolmesta laakerista koostuvaa rullalaakeri-ratkaisua. Kyseinen ratkaisu on ideaalioissa kustannustehokkain tapa vaimentaa värähtelyjä pääakselilla, mutta tuuliturbiiniin kohdistuvien epäsymmetristen mekaanisten voimien takia laakereihin kohdistuvat voimat eivät jakaannu tasaisesti laakereiden kesken. Tästä epätasapainosta on seurannut rakenteen muuttaminen kahden laakerin ratkaisuun, jossa voimat jakaantuvat tasaisesti laakereiden kesken. Pääakselin varmistuslukitukseen käytetään levyjarrua, jonka tarkoitus on varmistaa turbiinin pyörimättömyys huollon yhteydessä sekä lapakulman säädön kanssa myrskyjen aikana. Kyseinen levyjarru sijaitsee hydraulikan lähistöllä, vaikka sitä ei ole kuvaan sijoitettu. Levyjarru on toteutettu kaksisylinterisenä levyjarruna.



Kuva 4.1 WinWind WWD-1 rakennekuva [WinWind]

Voimalan generaattorin tuottama sähkö muunnetaan taajuusmuuttajalla sähköverkon taajuudelle. Muuntajalla tuotettu sähkö muunnetaan vielä sopivalle jännitetasolle. Näiden lisäksi voimalan sähkönsyöttöön liittyvät vielä suojalaitteet sekä kytkimet. Sähköjärjestelmästä voidaan vielä todeta lapakulman säätömoottorit, tornin kääntömoottori sekä ilmailua varten olevat huomiovalot. Lisäksi voimalaitoksessa on talviolosuhteita varten erillinen lapojen lämmitysvastus, jotta lapojen mahdollinen jäätyminen olisi hallinnassa.

Voimalaitoksen komponentteja jäähdytetään erillisellä nestejäähdytysjärjestelmällä, johon on kytketty taajuusmuuttaja, generaattori sekä vaihteisto. Tällä järjestelyllä

varmistetaan riittävä jäähdytys kaikissa toimintaolosuhteissa ja pidetään voimalaitoksen toimintalämpötila optimaalisena. Muiden komponenttien osalta jäähdytys on ratkaistu vapaalla ilmakierrolla, mikä on riittävää kyseisten komponenttien kohdalla pienen lämpökuorman myötä.

WWD-1-voimalan rakenne ja sille tehty vika-analyysi käyvät ilmi liitteestä 1. Tämä rakenne on koottu voimalaitoksen datalehdeltä [WinWind]. Kyseisestä taulukosta selviää järjestelmäkohtaisesti sen vikataajuus sekä MTBF-arvo. Lisäksi taulukkoon on kirjattu, mistä kyseinen arvo on saatu. Laskettujen arvojen osalta tämä tarkoittaa, että suunnittelukirjojen pohjalta on laskettu komponenttikohtaiset vikataajuudet kokonaisuudelle. Taulukon pohjalta voidaan todeta voimalaitoksen MTBF-arvoksi 1938 h ja vastavasti vikataajuudeksi 516 vikaa miljoonassa tunnissa.

Yksittäisistä komponenteista saatuja MTBF-arvoja voidaan vertailla muihin kirjallisuudessa esiintyviin lukuarvoihin. Yksittäisenä poimintana voidaan tuoda esille tehoelektronikan komponenttina taajuusmuuttaja. Tälle yksittäiselle komponentille on tehty varsin perustavaa laatua oleva diplomityö kesällä 2012 Tuomas Kiiskin toimesta. Hänen työnsä lähdemateriaalin pohjalta on päädytty MTBF-arvoon 131 384 h teolliseen ympäristöön sijoitetuille taajuusmuuttajille. Vertailuna kyseisessä työssä teoreettisesti päädyttiin lukuarvoon noin 77 vuotta, joka vastaisi 674 520 h MTBF-arvona. [Kiiski]

Työssä on arvioitu WinWind:n taajuusmuuttajalle reilut kolme kertaa pienempi MTBF-arvo 40 000 h. Tulee huomioida myös, että Kiiskin työssä kerätty lähdeaineisto on peräisin teollisesta ympäristöstä, jossa taajuusmuuttajia on myös huollettu. Käytännössä tämä tarkoittaisi sitä, että komponenttien ei anneta vikaantua, mikäli niiden toiminnassa havaitaan muutoksia vaan huolletaan ne ennen vikaantumista. Tämä on tietenkin taloudellisessa mielessä järkevää, sillä totaalinen vikautuminen voi mahdollisesti aiheuttaa häiriöitä myös muissa laitteissa kuin itse taajuusmuuttajassa.

Taajuusmuuttajan ulostulojännitettä ja -virtaa seuraamalla voidaan havaita mahdollisia muutostiloja, joita syntyy komponentin sähköisten suureiden muutoksista vikaantumisen yhteydessä. Tässä työssä lähtöoletuksena on, että komponenttien annetaan vikaantua. Näin ollen mahdollisen ennakoivan huollon korjaustoimenpiteet komponentin elinkaaren pidentämiseksi jää kokonaan huomioimatta. Tämä osaltaan myös selittää suuruusluokka eroa MTBF-arvojen välillä.

Eroavaisuutta osaltaan voidaan selittää myös taajuusmuuttajan vaihemäärillä. Tarvittavien komponenttien määrä kolmivaiheisessa järjestelmässä verrattuna yksivaiheiseen taajuusmuuttajaan on käytännössä kolminkertainen. Lisäksi tasa- ja vaihtosuuntaus siltojen lukumäärä voi olla pienempi yksinkertaisissa taajuusmuuttajakäytöissä, joissa jännitteen ulostulon muokkaaminen ei ole keskeisenä tekijänä.



Edelleen voidaan myös todeta usean komponentin kohdalta, että saatu MTBF-arvo indikoi, että kyseisen osan vikaantumisen todennäköisyys voimalaitoksen elinkaaren aikana lähentelee nollaa, mutta mahdollinen vikaantuminen tulisi kuitenkin huomioida. Näihin lukeutuivat liityntäkaapelit, anturit, muuntaja sekä suojalaitteet. Nämä komponentit kuitenkin vikaantuvat useammin ulkopuolisista syistä johtuen, erityisesti anturit myrskyjen aikana. Niiden huomioiminen huollon suunnittelussa on myös tarpeen, mutta kuitenkin eri syistä kuin vika-analyysi antaisi olettaa.

## 4.2 Siemens SWT-3.0-101

SWT-3-2-tuulivoimala edustaa tämän hetken kehittyneimpiä tuulivoimala, joita teollisessa mittakaavassa on valmistuksessa. Tämä voimala edustaa neljännen tyyppin voimalaitoskonseptia, jossa vaihdelaatikko-generaattori yhdistelmä on korvattu täystedustajalla sekä tuulivoimankäyttöön suunnitellulla tahtigeneraattorilla. Kyseinen generaattori on erityisesti suunniteltu hitaasti pyöriväksi, jolle on hyvin rajallisesti muita käyttökohteita megawatin kokoluokassa. Päälaakeri on toteutettu kahdella rullalaakerilla, jolloin akseliin kohdistuvat voimat jakautuvat tasaisesti laakereiden kesken. Tämä ilmiö on huomioitu jo Siemensin voimalaitoksen osalta hyvissä ajoin toisin kuin WinWindin osalta, jossa oli turvauduttu kolmiosaiseen ratkaisuun.[Siemens]

Kyseisellä ratkaisulla Siemensin tuulivoimalalla on erittäin dynaaminen kyky muuttaa ulostulotehoaan pätö- ja loistehon suhteen verkon tarpeiden mukaisesti. Tämä näkökulma on yksi keskeisimmistä tekijöistä nykyisten FRT-asetusten takia. Lisäksi voimalaitoksella on nopeampi kyky reagoida tehon vaihteluihin kuin aikaisempien sukupolvien tuulivoimaloilla.

Voimalaitoksen jäähdytys on toteutettu nestejäähdytysjärjestelmällä, johon on kytkettyneenä generaattori, muuntaja sekä taajuusmuuttaja. Näin varmistetaan riittävä jäähdytyskapasiteetti kaikissa olosuhteissa ja saadaan pidettyä komponenttien toimintalämpötilat suunniteltuina. Toimintalämpötilalla on suora vaikutus komponenttien vikataajuuteen ja hetkellisesti tapahtuvilla lämpötilamuutoksilla on vaikutusta komponentin vikataajuuteen. Muiden komponenttien osalta on valittuna riittävä ilmajäähdytys, koska osissa syntyvä lämpökuorma on jäähdytettävissä riittäväällä ilmakierrolla.[Siemens]

Pääakselille on kytkettynä levyjarru estämään tuuliturbiinia pyörimistä huollon sekä myrskyjen aikana. Kyseinen levyjarru toimii yhdessä lapakulman säädön kanssa ja yksinään levyjarru ei kykenisi pysäyttämään tuulivoimalan pyörivää massaa hätätilanteissa, vaan siihen vaaditaan lapojen yhtäaikaista sakkaamista voimalaitoksen hidastamiseksi ja lopulta pysäyttämiseksi. Levyjarru on toteutettu kolmisylinterisenä levyjarrutyypinä, jonka toimintaa ohjataan hydraulisesti. Itse lapakulman säätöjärjestelmä on toteutettu sähkömoottoreilla, joissa on akkuvarmennus sähkökatkojen varalta. Jokaisella lavalla on oma säätömoottori, jolloin lapojen säätö voidaan toteuttaa tarvittaessa lapa-

kohtaisesti yksittäisen moottorin vikaantuessa. Lavat on laakeroitu kaksipalloisilla laakereilla napaan, millä vähennetään lavasta syntyviä momentin vaihteluita. Lapoihin on myös asennettuna ilmailua varten tarvittavat huomiovalot, joilla pyritään viestittämään lapojen kulloisetkin liikeradat mahdollisten törmäysten välttämiseksi.

Nasellin kääntymistä tornin suhteen hoidetaan sähkömoottoreilla ja laakerointina on käytetty rullalaakerointia. Kääntämiseen käytetään kahdeksaa sähkömoottoria, jolloin yksittäisen moottorin koko saadaan pidettyä pienempänä, mutta suhteelliset häviöt ovat suurempia. Samalla saadaan hieman luotettavuutta lisättyä, kun yksittäisen moottorin vikaantuessa ei menetetä kokonaan ohjattavuutta. Nasellin tarpeettoman liikehännän estämiseksi tornin suhteen on asennettu oma levyjarru. Kyseinen jarru toimii yhdessä kääntömoottoreiden kanssa, jotka yhdessä synnyttävät riittävän momentin kaikissa tilanteissa, kun nasellin ei toivota kääntyvän tuulen mukana tornin suhteen.

Tuulivoimalan suojausta varten on asennettu tarvittavat suojalaitteet sekä kytkimet. Suojalaitteilla suojataan tuulivoimalaa sähköisiltä vioilta sekä suojataan myös sähköverkkoa tuulivoimalan aiheuttamilta vioilta. Ilman ominaisuuksien mittausta varten tuulivoimalaan on lisäksi asennettuna tarpeelliset anturit. Antureilla mitataan myös tuulivoimalan sähköisiä ominaisuuksia, jolloin tuulivoimalan toimintaa voidaan niiden avulla ohjata kulloinkin parhaalla mahdollisella tavalla.

Tuulivoimalan rakenteelle tehdyn vika-analyysin tulokset on esitettyinä liitteessä 2. Kyseinen rakenne on kerätty valmistajan ilmoittamien tietojen pohjalta [Siemens]. Vikataajuuksien määrittämiseen on käytetty samoja lähteitä kuin WinWind:n voimalan tapauksessa. Vika-analyysin tekemiseen on käytetty luvussa 3 esitettyjä menetelmiä. Siemensin voimalan osalta MTBF-arvoksi saatiin 3092 tuntia, jolloin vikataajuudeksi saadaan 323 vikaa miljoonassa tunnissa.

Muutamien komponenttiryhmiä MTBF-arvot antaisivat olettaa vikaantumisen todennäköisyyden olevan hyvin lähellä nollaa voimalaitoksen elinkaaren aikana. Ryhminä nämä olivat anturit, muuntaja, kytkentäkaapelit sekä suojalaitteet. Näihin kuitenkin kohdistuu olennainen osa vioista, mutta niiden syntymekanismit olivat vika-analyysin ulkopuolelta ja osaltaan näiden ryhmien mahdollista huoltotarvetta tulisi myös huomioida erikseen vaikkakin niiden huoltamiseen ei synny tarvetta vika-analyysin todennäköisyyksien pohjalta.

Yksittäisten järjestelmien vikataajuuksia voidaan vertailla kirjallisuudessa esitettyihin lukuarvoihin. Esimerkiksi taajuusmuuttajan MTBF-arvo 31 111 h on lähes neljä kertaa pienempi kuin Kiiskin diplomityön pohjalta saadun teollisessa ympäristössä olevan taajuusmuuttajan MTBF-arvo on. [Kiiski]

Toisena esimerkkinä voidaan tarkastella muuntajan MTBF-arvoa, jolle on esitetty yleisesti vaihteluvälinä 180 000 h - 12 000 000 h. Määritelty lukuarvo on kyseisessä välissä, vaikka ääripäät ovat hyvin kaukana toisistaan. Lisäksi generaattorille on yleisesti esitetty MTBF-arvon vaihteluvälinä 71 000 h - 145 000 h. Siemensin voimalaitoksen generaattorin voidaan todeta osuvan kyseiselle välille MTBF-arvoltaan.[Nicholss]

Yleisellä tasolla vikataajuus-arvot olivat suuruusluokiltaan järjestelmäkohtaisesti hyväksyttävällä tasolla. Enimmäkseen arvot ovat kuitenkin hyvin pessimistisiä ja osaltaan selittävät tuloksissa esiintyviä korkeampia vikamääriä kuin tilaston pohjalta on saatavilla.

## 5 VIKAANTUMISTODENNÄKÖISYYDET

Vikaantumisen ennakointi todennäköisyysjakauman avulla on klassinen ongelma teollisessa ympäristössä. Vikaantumisen tarkalla mallilla olisi mahdollista optimoida laitteen huollot sekä hallita tarvittavien varaosien lukumäärää. Lisäksi laitteen käytettävyyttä saadaan parannettua paremmin kohdennetuilla huoltotoimenpiteillä, jolloin vältetään ylihuoltamista.

Vikaantumisen ennustaminen jatkuvasti käytössä olevalle laitteelle on haastavaa ja usein yksittäisellä käyttäjällä on rajallinen määrä laitteita käytössään, jolloin vikojen jakautuminen voi olla paljonkin jakaumista poikkeavaa pienen otannan takia. Tämän vuoksi vikojen ennustaminen on usein keskitetty valmistajalle tai yhdelle alihankkijalle, joka pystyy laaja-alaisemmin tarkastelemaan komponenttien vikaantumista. Aikaisemmista vioista saatujen tietojen avulla voidaan indikoida eri jakaumien avulla luotettavuusrajat osan tulevalle kestävyydelle.

Seuraavaksi esitellään vika-analyysin kannalta keskeisimmät jakaumat, eksponentti- ja Weibull-jakauma, sekä niihin liittyvät tunnusluvut. Näiden kahden tapauksen lisäksi olisi mahdollista käyttää normaalijakaumaa sekä Poisson-jakaumaa. Näistä normaalijakauman pääsääntöinen käyttökohde on komponenttien erojen mallintaminen ajatuksella, ettei yksikään ole samanlainen. Kuitenkin vika-analyysin kannalta normaalijakauma ei ole käytännöllinen, sillä usein vikaantumiset eivät keskity tasaisesti muodostaen Gaussin kellokäyrää. Poisson-jakauma soveltuu paremmin luotettavuusanalyysiin, jossa lähtökohtaisena kysymyksenä on rinnakkaisten järjestelmien tuoma luotettavuus halutulle ajanjaksolle. Weibull-jakaumasta käytetään paloittain määriteltyä menetelmää komponentin vikaantumisen mallintamiseen. Paloittain määriteltynä voidaan korostaa komponentin elinkaaren aikaista vikataajuuden muutosta elinkaaren niin alku- kuin loppupäässä. [HDBK-338]

### 5.1 Eksponenttijakauma

Eksponenttijakauma on eniten käytetty jakauma luotettavuuslaskennassa ja sitä käytetään pääsääntöisesti aina sähköisten komponenttien luotettavuuden ennustamiseen [HDBK-338 s. 99]. Vahvuuksina tämän jakauman käytössä on sen yksiparametrisuus sekä seurattavuus. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että tarkasteltavasta komponentista ei tarvita vikaantumisen mallintamiseen muuta tietoa kuin komponentin vikataajuus tai

sen käänteisarvo MTBF, joista jompikumpi on yleensä annettu komponenttivalmistajan toimesta. Kuitenkin tarvittavan lukuarvon määrittäminen on mahdollista suunnittelukirjallisuuden pohjalta, kuten aikaisemmassa luvussa 3.2 käytiin läpi WinWind:n voimalaitoksen generaattorille. [HDBK-338 s. 100]

Lisäksi eksponenttijakauman ominaisuuksiin lukeutuu summautuvuus, joka tarkoittaa sitä, että kahden tai useamman komponenttien vikataajuudet voidaan laskea yhteen ja muodostaa näin suuremmalle kokonaisuudelle vikataajuus. Tämä ominaisuus on laskentaa helpottava tekijä, koska kokonaisuuden ja komponenttikohtaisten vikataajuuksien suhde säilyy samana läpi tarkastettavan ajanjakson. Toisaalta tämän jakauman käytön edellytyksinä on, että komponentin vikataajuus ei merkittävästi muutu ajan suhteen ja monimutkaisten laitteiden yksittäisillä korjauksilla ei ole heijastusvaikutuksia muihin korjaamattomiin osiin. [HDBK-338, Kumamoto s. 297]

Eksponenttijakauman ominaisuuksiin lukeutuu se, että komponentin jäljellä oleva käyttöikä ei ole riippuvainen komponentin iästä. Heikkoutena tässä tulkinassa on se, että uuden komponentin vaihto ei koskaan lisää järjestelmän luotettavuutta todennäköisyyksien pohjalta. Lisäksi sopivalla komponentin kunnonvalvonnalla olisi matemaattisesti mahdollista saada selviytymistodennäköisyyksiä, jotka olisivat lähellä arvoa 1. Vastajatuksena tälle lyhyelle kuntotarkastukselle olisi tehtävä pidemmän aikavälin selviytymistodennäköisyys mahdollisen korjaustoimenpiteen riskin määrittämiseksi. Molemmat tapaukset antavat matemaattisesti kuitenkin saman tuloksen, mutta hetkellisellä tarkastelulla saadaan luotettavamman oloinen komponentti, vaikkakin resursseja käytetään runsaasti kuntotarkastukseen ja kuitenkin matemaattisesti ei saavuteta luotettavampaa kokonaisuutta pidemmällä aikavälillä. Tarkoituksena tässä oli havainnollistaa, että pelkästään todennäköisyyden maksimointi ja seuraaminen eivät kerro ajallisesti komponentin luotettavuudesta.

Eksponenttijakaumalle tiheysfunktio määritellään kaavan 5.1 mukaisesti

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad (5.1)$$

jossa  $\lambda$  on vikataajuus ja  $t$  ajanhetki. Tiheysfunktio kertoo vikaantumisien selvityksessä sen, missä suhteessa yksittäiset komponentit vikaantuvat suhteessa koko joukkoon. Suoraan kaavasta voidaan todeta, että komponenteista vikaantuu aina noin 63,2 % MTBF-arvon välein. Kyseinen tulkinta saadaan, kun  $t$  on yhtä suuri kuin MTBF-arvo, jolloin funktion arvoksi tulee noin 0,368. Tämä arvo vielä suhteutetaan kertomalla vikataajuudella, jolloin saadaan kyseistä ajanhetkeä vastaava tiheysarvo. Tiheysfunktio on voimassa silloin, kun  $t$  on suurempi tai yhtä suuri kuin nolla. [HDBK-338, Kumamoto]

Luotettavuusfunktio voidaan esittää muodossa

$$R(t) = e^{-\lambda t}. \quad (5.2)$$

Luotettavuusfunktio kertoo suoraan edellä todetun havainnon, miten vikaantumattomien alkioiden joukko pienenee ajan kuluessa. Kyseinen joukko pienenee aina noin 0,368 osaan jokaisen MTBF:n mittaisen ajanjakson välillä. [HDBK-338, Kumamoto]

Kun tiheysfunktio 5.1 jaetaan luotettavuusfunktiolla 5.2, niin saadaan eksponenttijakaumalle vikataajuusfunktio

$$r(t) = \lambda. \quad (5.3)$$

Vikataajuusfunktioista voidaan suoraan havaita, että vikataajuus ei ole ajasta riippuva. Tämä aikaisemminkin todettu ominaisuus on eksponenttijakauman keskeinen ominaisuus ja tämä mahdollistaa kyseisen funktion yksinkertaisen matemaattisen mallin. Yksinkertaisuus mahdollistaa todennäköisyyksien määrittämisen, vaikka ei tiedettäisi komponentin eliniästä mitään. Edelleen jokaiselle komponentille riittää vain vikataajuuden määrittely. [HDBK-338]

Eksponenttijakaumaa käytettäessä saadaan hyvin suoraviivaisesti vikaantumistodennäköisyydet. Seuraavaa kaavaa voidaan käyttää todennäköisyyden selvittämiseen tietyille vikamäärälle halutulla ajanjaksolla [HDBK-338 s.109 5.56]

$$P(n, t, \lambda) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-(\lambda t)}. \quad (5.4)$$

Kaavassa  $t$  on tarkasteluajanjakson pituus ja  $n$  vikojen lukumäärä. Kaava 5.4 on johdettu binomitodennäköisyyden kaavasta ja sen käyttämisen mahdollistaa eksponenttijakauman tapauksessa se, että vikataajuus säilyy ajan suhteen vakiona. [HDBK-338, Kumamoto]

Eksponenttijakauman heikkoutena on se, että vikataajuus säilyy vakiona läpi tarkasteluajanjakson. Tämä puolestaan johtaa huoltoa suunniteltaessa siihen, että ehjän osan vaihtaminen ei ole todennäköisyyden puolesta koskaan järkevää, koska käytetyllä ja uudella osalla on sama vikaantumistodennäköisyys tietylle ajanjaksolle. Lähtökohtaisesti kyseinen menetelmänä antaa kuitenkin suuntaa antavia arvioita, kunhan ei väärinkäytetä kyseistä ominaisuutta ja ohiteta yleistä kunnossapitoa sen varjolla. Edellinen tulkinta siitä syystä, että lähtökohtaisesti jokaiselle komponentille on määritetty 90 %:n joukko ja sitä vastaavat vikaantumisasijat. Vaikka eksponenttijakauman vikataajuus säilyy samana läpi tarkastelujakson, olisi syytä pysyä lähtötilanteessa määritellyssä joukossa.

Toisaalta, jos ja kun halutaan paremmin mallintaa ja hyödyntää komponentin elinkaaren kestävyyttä, tätä varten on kehitelty tarkempia malleja kuvastamaan todellista tilannetta,

jossa vanhentuvan osan vikaantuminen on todennäköisempää kuin uudella vastaavalla osalla. Tästä esimerkkinä seuraavassa kappaleessa esiintyvä Weibull-jakauma.

Voimaloiden komponenttien vikaantumismääriä vastaavat todennäköisyystaulukot eksponenttijakaumalla on kerättyä liitteeseen 6.1 WinWind:n voimalan sekä liitteeseen 6.2 Siemensin voimalan osalta.

## 5.2 Weibull-jakauma

Weibull-jakauma on kehitelmä eksponenttijakaumasta, jossa eksponentin potenssia muokataan kertoimella siten, että jakauman painopiste on halutulla alueella. Esimerkiksi vikataajuuden voimakas kasvu MTBF-arvon jälkeisen ajan jälkeen saadaan aikaan ykköstä suuremmilla arvoilla, ja vastaavasti ykköstä pienemmillä arvoilla vikataajuus on elinkaaren alussa suurimmillaan. Kyseisellä kertoimella saadaan aikaan mekaanisille osille tyypillistä vikaantumisen painottumista elinkaaren loppuun ja vastaavasti elinkaaren alussa vikataajuus on suhteessa pienempi kuin eksponenttijakaumalla. Tästä seuraa se, että vikaantumista täytyy mallintaa simuloimalla, koska ajan suhteen jakauman vikataajuus ei ole vakio.

Weibull-jakauman tiheysfunktio voidaan esittää seuraavassa muodossa [HDBK-338 s.104 5.49]

$$f(t, \beta) = \beta \lambda (\lambda t)^{\beta-1} e^{-(\lambda t)^\beta} . \quad (5.5)$$

Kaavassa 5.5  $t$  on aika,  $\lambda$  kyseisen komponentin vikataajuus ja  $\beta$  komponentille määritetty Weibull-kerroin. Luotettavuusfunktio voidaan esittää seuraavassa muodossa Weibull-jakaumalle [HDBK-338 s.105 5.50]

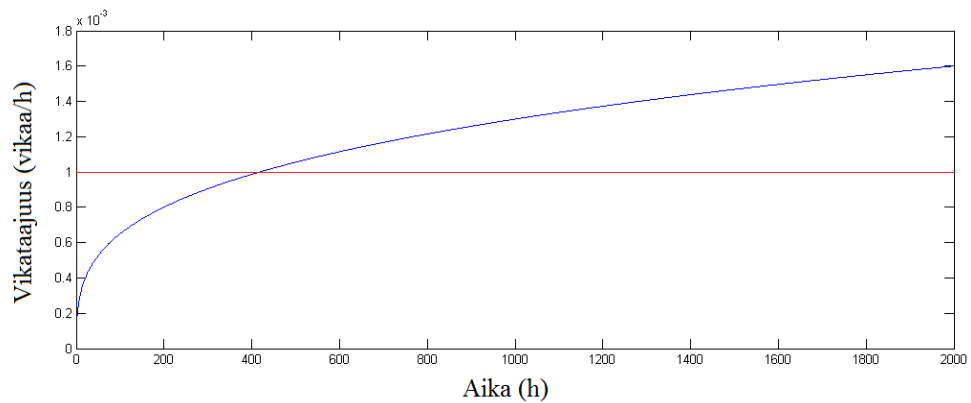
$$R(t, \beta) = e^{-(\lambda t)^\beta} . \quad (5.6)$$

Nyt vikataajuus saadaan samoin kuin eksponenttijakauman tapauksessa eli jakamalla tiheysfunktio 5.5 luotettavuusfunktiolla 5.6 vikataajuusfunktiksi, jolloin [HDBK-338 s.105 5.51]

$$r(t) = \beta \lambda (\lambda t)^{\beta-1} . \quad (5.7)$$

Kaavasta 5.7 voidaan havaita, että kaikilla muilla  $\beta$  arvoilla kuin yksi, vikataajuus on riippuvainen ajasta ja vikaantumisen mallintamista rajatulla aikavälillä ei ole analyytisesti mahdollista esittää. Tällöin turvaudutaan numeeriseen menetelmään simuloimalla satunnaistapahtumia komponenttien vikamäärien selvittämiseksi. Kaavan 5.7 käyttäytymistä on havainnollistettu kuvassa 5.1. Lukuarvot kuvan 5.1 piirtoa varten on valittu

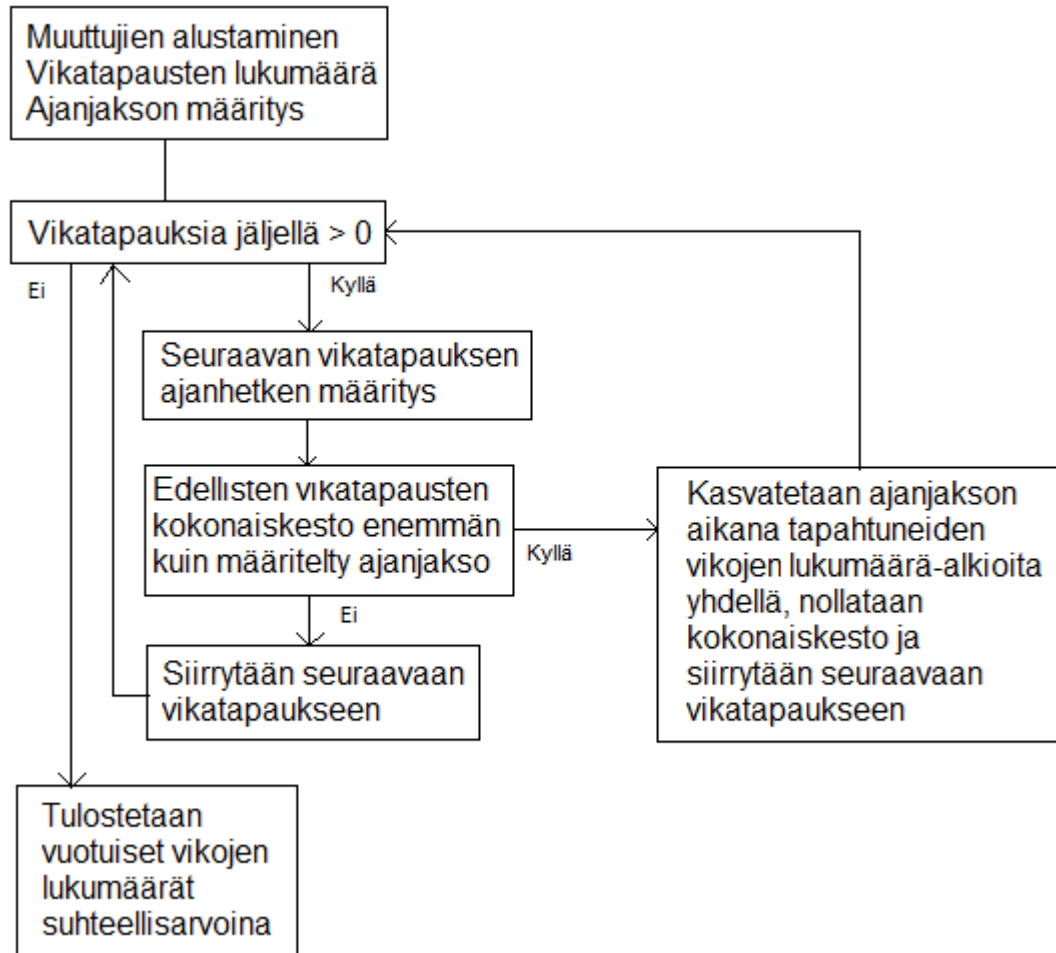
siten, että  $\beta$  on 1,3 ja  $\lambda$  on 0,001 vikaa tunnissa, jolloin MTBF-arvoksi tulee 1000 h. Käytetyillä arvoilla eksponenttijakaumalle syntyisi tasainen viiva 0,001 vikataajuuden kohdalle, koska kyseisen jakauman vikataajuus ei ole ajasta riippuvainen. Kuvasta 5.8 voidaan havaita, että Weibull-jakauman vikataajuus pysyy pienempänä aina 0,4 MTBF arvoon asti verrattuna eksponenttijakauman vikataajuuteen. Weibull-jakauman mukainen vikataajuus on esitettyinä kuvassa 5.1 sinisellä ja eksponenttijakauman vikataajuus punaisella. Tästä ajanhetkestä eteenpäin vikataajuus kasvaa osan vanhentuessa. Kuvasta 5.1 voidaan kuitenkin todeta, että molempien jakaumien tapauksessa MTBF-arvon molemmille puolille jää yhtä paljon komponentteja. Eli 63,2 % komponenteista hajoaa ennen MTBF-arvoa ja vastaavasti 36,8 % selviää sen yli. Weibull-jakauman tapauksessa selviytyvien komponenttien osuus pienenee voimakkaasti ajan kasvaessa, kun eksponenttijakaumalla selviytyvien ja hajonneiden komponenttien suhde säilyy vakiona MTBF:n kerrannaisen pituisilla ajanjaksoilla. [HDBK-338]



*Kuva 5.1 Weibull-jakauman ja eksponenttijakauman vikataajuus aikatasossa*

Kuvan 5.2 lohkokaavio yksinkertaistaa seuraavaksi selitettävää simulointikoodia, jota käytetään vikamäärien selvittämiseen. Tähän simulointiin päädyttiin juuri siitä syystä, sillä Weibull-jakauman tapauksessa vikataajuus on riippuvainen ajasta ja analyttistä ratkaisua ei ole kuten eksponenttijakauman tapauksessa. Itse kaavio on esitettyinä kuvassa 5.2 ja samainen lohkokaavio on voimassa myös myöhemmin esiteltävän kolmiparametriselle Weibull-jakaumalle. Näiden kahden jakauman simulointikoodin erona ovat laskentakaavojen muutokset vika-ajan määrittämisessä. Tapahtumat tarkoittavat kokonaisuutena olevia vikatapausten määrää ja kokonaistapahtumat tarkoittavat ajanjakson pituisena aikana tapahtuneiden vikojen lukumääräistä joukkoa.





Kuva 5.2 Weibull-jakaumien simulointikoodi yksinkertaisena lohkokaaavana

Itse simulointikoodin rakennetta ja toimintaa pyritään avaamaan seuraavaksi sanallisesti ja kyseinen simulointikoodi löytyy liitteestä 3. Vikatapahtumien lukumäärän verran luodaan satunnaislukuja vektoriin *vika\_tod*. Kyseiset satunnaisluvut kertovat yksittäisen komponentin luotettavuusarvon, josta voidaan määrittellä komponentin kestoikä kaavan 5.6 mukaisesti. Kaavan 5.6 käyttämiseksi annetaan komponentille valitut arvot  $\beta$ :lle ja *MTBF*:lle. Lisäksi luodaan tarvittavat apumuuttujat simulointikoodin toimintaa varten. Nämä muuttujat seuraavat vikojen vuotuista lukumäärää, komponenttien yhteenlaskettua kestoikää, kertyneitä vuosia sekä komponentin järjestyslukua. Näiden ohella luodaan vektori *vikojen\_lkm\_vuodessa*, johon kerätään tapahtuneiden vikojen lukumääriä vastaavat arvot. Vektorin sarakkeet vastaavat tapahtuneita vuotuisia vikamääriä siten, että ensimmäinen sarake vastaa viatonta vuotta ja sitä seuraavat sarakkeet ovat kasvavassa järjestyksessä.

Simulointikoodin toiminta perustuu kahteen sisäkkäiseen while-silmukkaan. Niistä uloimmassa käydään läpi kaikki vikatapaukset ja alustetaan sisemmän while-silmukan apumuuttujat vikojen lukumäärälle ja kestoille nolliksi. Sisemmässä while-silmukassa ketjutetaan vikatapauksista tarkastelujakson pituisia jaksoja. Näin saadaan selville kuin-

ka monta vikaa tapahtuu tarkastelujakson aikana. Samassa silmukassa kasvatetaan apumuuttujista järjestyslukua, vikojen lukumäärää sekä yhteenlaskettua kestoikää. Huomioitavaa tässä kohtaa on myös tilanne, jossa kestoikä ylittää tarkastelujakson, mutta ylimennyttä aikaa ei huomioida seuraavan tapahtuman kestoikässä. Sisemmän silmukan loputtua kasvatetaan yhdellä vikojen lukumäärää vastannut arvo *Vikojen\_lkm\_vuodessa*-vektorin vastaavan vikamäärän sarakkeeseen. Simuloinnin lopuksi suhteutetaan vuotuiset vikamäärät tapahtuneilla sarjoilla. Käytetty simulointikoodi löytyy liitteestä 3.

Komponentteittain saadut vikaantumistodennäköisyystaulukot on esitettyinä liitteissä 7.1 WinWindin voimalan osalta sekä Siemensin voimalan osalta liitteessä 7.2. Laskentatarkkuutta olisi mahdollista parantaa lisäämällä tapahtumien määrää, mutta samalla laskenta-aika vastaavasti pidentyisi. Kuitenkin työn kannalta riittävä laskentatarkkuus saavutetaan jo 100 000 vikatapauksella, koska vikataajuuksien määrittelytarkkuus ei ollut sen tarkempaa. [Kumamoto, HDBK-217, HDBK-11]

### 5.3 Kolmiparametrinen Weibull-jakauma

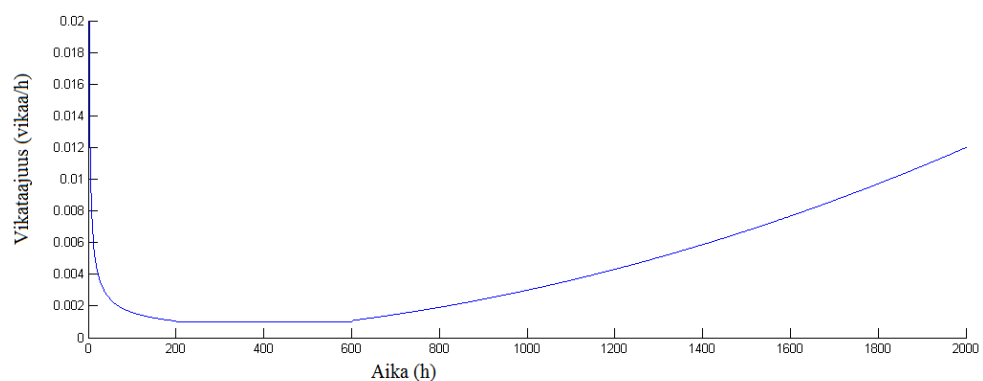
Hyödyntämällä kolmiparametrista Weibull-jakaumaa, on mahdollista saada esille mekaanisille osille tyypillistä kulumiskäyttäytymistä. Kaavoilta ja esitystavaltaan tämä menetelmä on vastaava kuin edellä mainitun Weibull-jakauman tapauksessa. Kuitenkin tässä menetelmässä komponentin elinkaari jakautuu kolmeen vaiheeseen ja jokaiselle vaiheelle on omat tyypilliset kertoimet, mutta yhteisenä tekijänä säilyy kuitenkin MTBF-arvo.

Kolmiparametrinen jakauma koostuu siten, että komponentin käyttöönotossa on suurempi vikataajuus, jolloin  $\beta$ :n arvo on ykköstä pienempi ja vikataajuus pienenee voimakkaasti ajan kasvaessa. Tämä kuvastaa sitä, miten vialliset komponentit hajoavat nopeammin elinkaaren alussa. Tähän kategoriaan lukeutuvat myös mahdollisista virheellisistä asennuksista aiheutuvat hajoamiset. Vikataajuuden tasaannuttua seuraa vakiovikataajuusjakso, joka kuvastaa komponentin käyttökelpoista ajanjaksoa. Tällöin jakauman  $\beta$  arvo on yksi ja jakso noudattaa eksponenttijakauman kaavoja. Vakiovikataajuuden jälkeen komponentin vikataajuus lähtee kasvamaan käyttökelpoisen eliniän jälkeen, jolloin  $\beta$ :n arvo on ykköstä suurempi. Mitä suurempi kerroin, sitä voimakkaammin komponentin vikataajuus kasvaa ajan suhteen, koska kyseinen kerroin vaikuttaa kaavan 5.7 mukaisesti vikataajuuden potenssissa. Tämä jakso kuvastaa sitä, miten komponentti vikaantuu suuremmalla todennäköisyydellä sen jälkeen, kun käyttökelpoinen ikä on ylitetty ja vikataajuus kasvaa voimakkaasti komponentin iän kasvaessa. Näin saadaan aikaan komponentille vikataajuuden osalta klassinen kylpyamme-käyrä, jossa vikataajuus pienenee ensimmäisten käyttötuntien aikana ja sitä seuraa vakio vikataajuuden aika, minkä jälkeen vikataajuus kasvaa jälleen voimakkaasti.

Jakauman tiheysfunktio noudattaa kaava 5.5, mutta sen  $\beta$ -kertoimet ovat alueittain määriteltä. Näihin määrittelyrajoihin palataan tarkemmin kuvan 5.4 kohdalla. Vastaavasti luotettavuus- ja vikataajuusfunktio noudattavat kaavoja 5.6 ja 5.7 samalla  $\beta$ -kertoimen määrittelyehdoilla.  $\beta$ -kertoimien aikariippuvuudella saadaan hyvin mallinnettua klassista kylpyammemallia vikataajuudelle, jossa korostuvat elinkaaren alkupäässä tapahtuvat vikaantumiset sekä elinkaaren päättymistä ennakoiva voimakas vikataajuuden kasvu käyttökelpoisen eliniän päätteeksi.[Kumamoto]

Vikataajuuden käyttäytymistä on mallinnettu kuvassa 5.3 ja sen parametreina on käytetty kuvassa 5.4 esiintyviä  $\beta$ -kertoimen arvoja kyseisillä todennäköisyysarvoilla.  $\lambda$  on valittu 0,001 suuruiseksi, jolloin MTBF-arvo on 1000 h. Kyseiset arvojen valinnat ovat mielivaltaisia kuvan piirtämistä varten, sillä tarkoituksena on havainnollistaa tämän jakauman käyttäytymistä. Kuvasta 5.3 voidaan havaita, että vikataajuuden rakenne koostuu jyrkästi laskevasta komponentin käyttöönottoajasta, jolloin vikataajuus pienenee 0,02:sta aina 0,001 vikaan tunnissa. Kyseinen aika vastaa noin 5 % MTBF-arvosta. Tätä seuraa vakio vikataajuuden jakso, joka kestää ajallisesti noin 65 % MTBF-arvosta. Tämän jälkeen vikataajuus lähtee kasvamaan komponentin ikääntyessä.

Vertailun ja tulkinnan avaamiseksi kyseisillä arvoilla ikääntyvän osan vikataajuus kasvaa suuremmaksi kuin ensimmäisen tunnin vikataajuus ajanhetkellä 2,8 MTBF. Vastaavasti toisen tunnin vikataajuus arvo saavutetaan jo 2,3 MTBF kohdalla. Kyseisillä ajanhetkillä osan vaihto olisi järkevää vikaantumistodennäköisyyden pohjalta, mutta toisaalta voidaan sanoa, että vain 0,8 % osista kestäisi tuohon ajankohtaan asti. Kyseiset vikataajuuden lukuarvot saadaan ratkaistua kaavasta 5.7 sekä kaavan 5.6 mukaisesti kyseistä ajanhetkeä vastaava selviytymistodennäköisyys.

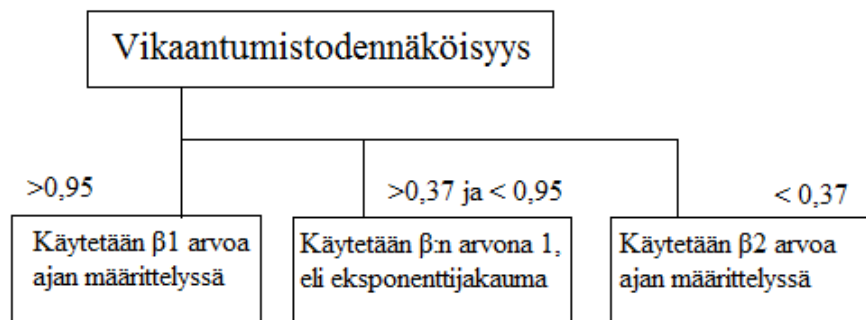


*Kuva 5.3 Kolmiparametrinen vikataajuus Weibull-jakaumalle*

Käytetty simulointikoodi noudattaa rakenteeltaan hyvin paljon Weibull-jakauman koodia, mutta lisäyksenä on paloittain määrittely todennäköisyyden mukaan. Simuloitaessa luodaan ensin satunnaisluvusta *vika\_tod*-vektori, joka kertoo meille yksittäisen komponentin luotettavuusarvon kaavan 5.6 R:n arvona. Kyseisiä komponentteja luodaan

$lkm$ -vektori kappaleen lukumäärän verran ja lisäksi määritellään komponentin lähtöarvot  $MTBF$ ,  $\beta_1$  ja  $\beta_2$ . Kertoimista  $\beta_1$  ja  $\beta_2$  ensimmäinen liittyy elinkaaren alun kertoimen määrittelyyn ja jälkimmäinen elinkaaren lopun Weibull-kertoimen määrittelyyn. Lukuarvojen avulla voidaan määrittellä kutakin todennäköisyyttä vastaava ajanhetki  $t$ .

Kuvassa 5.4 on kolmiparametrisen mallin ajan määrittely lohkokaaavana. Kyseinen lohkokaaavio sijoittuu kuvan 5.2 ajanjakson määrittely lohkon paikalle. Tämä kaavio kuvastaa sitä, että miten satunnaislukuna saatava vikaantumistodennäköisyys muunnetaan ajaksi ja mitä kertoimia käytetään milläkin vikaantumistodennäköisyyden arvolla.



Kuva 5.4 Kolmiparametrisen Weibull-jakauman lohkokaaavio lisäys

Simulointikoodi noudattelee samaa rakennetta kuin Weibull-jakauman simulointikoodissa käytettiin. Keskeisenä erona ovat aluksi määriteltävät kertoimet komponentille. Lisäksi vikatapauksen todennäköisyys määrittelee, mitä kertoimia käytetään komponentin kestoajan määrittelyssä kaavassa 5.6. Kyseiset raja-arvot ja käytettävät kertoimet on selvitettyä kuvassa 5.4.

Simuloinnin pohjalta saadaan komponenteille vikamääriä vastaavat todennäköisyydet tarkasteluajanjaksolla ja ne ovat esitettyinä WinWind:n voimalan osalta liitteessä 8.1 ja Siemensin voimalaitoksen osalta liitteessä 8.2. Kyseisistä taulukoista löytyy myös voimaloiden kokonaisvikamäärien todennäköisyydet tarkasteluajanjaksolta. Laskentatarkkuutena pidettiin samaa 100 000 vikatapauksen simulointimäärää kuin Weibull-jakauman kanssa edellisessä luvussa.

## 6 VIKATILASTOT SUOMESSA

Tuulivoimaloiden vikatilastoinnista vastaa Suomessa Teknologian tutkimuskeskus, VTT. Kyseinen toimija kerää tuulivoimaloiden ylläpitäjiltä vuosittain tilastotietoja tuulivoimatuotantoon liittyvistä tuotanto- ja käytettävyystiedoista, kuten tuotetusta energiasta, vikojen lukumäärästä, vika-ajoista sekä mahdollisista häiriöistä. Tilastot on kuitenkin kerätty siten, ettei niistä voida päätellä yksittäisen voimalan vikoja turvallisuus- ja luotettavuussyistä johtuen. Vuodesta 1999 lähtien tuotanto- ja vikaraportointi on luettu automaattisesti yhteiseen tietokantaan. Kyseiseen raportointijärjestelmään on myös liitettyinä mahdollisuus käyttökustannusten tilastointiin vuodesta 2002 lähtien, mutta kyseinen ominaisuus ei ole muutamaa omistajaa lukuun ottamatta käytössä.[VTT]

Vikatilastot tuulivoiman osalta ovat koottuna luettavampaan muotoon liitteeseen 5. Vikatilastoon ei ole kirjattuna kyseisenä vuonna perustettujen voimalaitoksien tietoja eikä tietoja niiden voimalaitosten osalta, jotka ovat kokoluokaltaan alle raportointi rajan. Näistä pienistä tuulivoimaloista on saatavilla vain tuntitehokäyrästä, johon ei ole seisokkiaikoja eriteltyinä. Kyseisen tilaston kieliasua on muutettu siten, että eri vuosien nimeämiskäytännöistä sekä järjestyksestä on tullut yhtenevä luettavuuden helpottamiseksi.[VTT]

Tilastointiin osallistumisen edellytyksenä on, että tuulivoimalan kapasiteetin tulee olla sähköverkkoon kytkettynä vähintään 50 kW:a. Tilastointiin osallistuvien voimalaitosten minimikoko on kasvanut 1999 – 2011 välisenä aikana muutamia kilowatteja, mutta käytännön kannalta ei ole suurta merkitystä onko minimi 50 kW vai 70 kW. Uusista voimalaitoksista puhuttaessa ollaan kuitenkin MW-luokassa ja tällä tilastoinnilla rajataan pienempiä yksityiskäyttöön hankittavia tuulivoimaloita. Kuitenkin perustamisvaiheen jälkeiseltä koekäyttöajalta ei vaadita tilastointia sekä ennen vuotta 1999 rakennetuista voimalaitoksista arvioidaan seisokkiajat jälkikäteen, koska nämä voimalaitokset eivät ole automaattisen luennan piirissä.

Vikatilasto kattaa vuodesta 2002 vuoteen 2011 sijoittuvan ajanjakson, johon mahtuu riittävä tilastollista vaihtelua. Voimalaitosten käytettävyys on vaihdellut tänä aikana 89 %:n ja 96 %:n välillä. Vikatilastosta ei kuitenkaan käy ilmi, minkä tyyppin voimalaitoksista tieto on kerätty ja tämän vuoksi oletuksena on tuulivoimaloiden yhteneväisyys tietojen vertailun kannalta. Vikatilastoon on lisäksi kerätty myös voimalaitoksen ulkopuolisista tekijöistä aiheutuvia vikoja, mutta näiden osuus on tilastossa niin vähäistä,

että niiden vaikutus kokonaisuuteen jää varsin pieneksi. Tämä huomio käy ilmi myöhemmin tarkasteltaessa komponenttikohtaista vikaantumista vuoden ajalta.

## 6.1 Vikatilaston käyttäminen jakaumissa

Vikatilaston pohjalta saadaan laskettua keskimääräinen vikataajuus Suomen tuulivoimaloille ja matemaattisessa mielessä tämä arvo soveltuu hyvin eksponenttijakaumalle käytettäväksi. Koska voimalaitosten vikatilastoista ei voida todeta yksittäisten voimaloiden ikää, ajasta riippumaton vikataajuus soveltuu erinomaisesti käytettäväksi eksponenttijakaumalle. Vastaavasti kyseistä vikataajuutta käytetään myös kahden Weibull-jakauman sovitteena, koska parempaa tilastollista arvoa ei voida määrittää kyseisille jakaumille. Kuitenkin eroavaisuutta saadaan jakaumille, kun valitaan Weibull-kertoimet vastaavalla menetelmällä kuin aikaisemmin WinWind:n ja Siemensin voimalaitosten osalla.

Tilaston pohjalta saadaan vuosien 2001 ja 2011 väliseksi vikakeskiarvoksi 1,97 vikaa vuodessa ja keskimääräiseksi vika-ajaksi 225 tuntia. Lisäksi voidaan todeta, että vuonna 2004 oli keskimäärin vähiten vikoja 0,55 vikaa vuodessa, mutta vika-aika oli keskimäärin 490 tuntia. Vastaavasti vuonna 2001 oli keskimääräisesti eniten vikoja 4,41 vikaa vuodessa, kuitenkin keskimääräinen vika-aika oli 189 tuntia. Voimalakannan kasvu ja kehitys osaltaan selittää vikojen lukumäärän keskiarvon laskua vuoden 2001 huipusta eteenpäin. Keskimääräisen vika-ajan kasvua selittävät yksittäiset hyvin pitkäkestoiset viat, jotka vääristävät keskiarvoa. Nämä pitkäkestoiset viat ovat johtuneet usein ulkopuolisista syistä, jolloin niiden korjaaminen ei ole prioriteettilistan kärkipäässä. Tämä kasvattaa tilastollisesti pienen otannan vika-aikaa, vaikkakin syyt tähän ovat itse vikatilasta riippumattomia.[VTT]

Toisaalta ilman tarkempaa lähdemateriaalia pitkäkestoisten vikojen erottelu tilastosta on hankalaa. Tarkemman tulkinnan myötä voidaan myös havaita, että tämä tuottaa enemmänkin pessimistisiä lukuarvoja, jolloin todelliset vikataajuudet todennäköisesti tulisivat pieneneen saaduista arvoista.[VTT]

## 6.2 Käytettävyys

Tilastoista käy ilmi luotettavuuden kannalta tärkeä lukuarvo, käytettävyys. Termi kuvastaa kuinka suuren osan vuoden tunneista voimalaitos on käytettävissä. Käytettävyys voidaan tuulivoimalan kohdalla jakaa vielä erikseen tekniseen ja kokonaiskäytettävyyteen. Tekninen käytettävyys kertoo, kuinka voimalaitos on kykenevä toimimaan suunnitellusti eli voimalaitos ei ole vian takia poissa käytöstä. Kokonaiskäytettävyys puolestaan sisältää lisäksi suunnitellut keskeytykset, mikä tuulivoiman tapauksessa tarkoittaa aikoja, jolloin tuulivoimalan toiminta pysäytetään suuren tuulen nopeuden takia tai lämpötilan poiketessa toimintalämpötiloista. Tämä pääsääntöisesti Suomen olosuhteissa

tarkoittaa pakkasta, mutta yleisesti maailmalla voi myös tulla tilanne, että ympäristön lämpötila nousee liian korkeaksi.

Tässä työssä pääpainona on vikojen lukumäärän vertailu ja esiintymistodennäköisyydet. Eri vikojen aiheuttamille vika-ajoille ei ole luontevaa vertailumenetelmää, koska mahdollisia huoltoajoista ei ole riittävä pohjaa tähän työhön. Osaltaan vika-ajat ovat kriittinen tarkastelukohde, kun ajatellaan voimalaitoksen luotettavuutta sekä sen huollettavuutta. Näin ollen suoraa vertailua voimalaitoksen käytettävyyksille ei synny työssä tehtävän analyysin pohjalta. Kuitenkin suomalaisten tuulivoimaloiden käytettävyyttä voidaan vertailla muiden maiden vastaaviin lukuarvoihin. Pääpainona on tekninen käytettävyyden, jos olosuhteet ovat hyvin erilaiset kohteiden välillä.

Vikojen esiintymisten määrää voidaan verrata Saksan tilastoihin, jossa tuulivoimaloiden tekninen käytettävyyden oli 98 %:n tasolla vuoden 2005 julkaisussa. Tarkastelujakson pituus julkaisussa oli tuolloin 15 vuotta ja koostui 250 voimalaitoksesta, joiden koot olivat yli yhden MW:in. Vastaava tekninen käytettävyyden Suomen tuulivoimaloille vuonna 2011 oli tilaston pohjalta 95,7 %. [Peinke, VTT]

Tekninen käytettävyyden on Suomessa ollut yleisellä tasolla hyvä, koska lukuarvo on ollut pääsääntöisesti yli 95 %. Tämä on resurssien kohdentamisen kannalta hyvä taso, sillä teknisen käytettävyyden parantaminen vaatisi tarkempaa ja tiheämpää huolto-ohjelmaa vikojen ehkäisemiseksi. Ilman kustannuslaskentaa on hyvin vaikeaa tulkita, kummassa tapauksessa energiantuotantokustannukset ovat minimissään. Teknisessä mielessä Saksan tuulivoimatuotanto on tehokkaammin käytössä.

Todellisessa käytettävyydessä huomioidaan myös muut tuulivoimalan käyttöön liittyvät katkot, esimerkiksi liian suuret tuulen nopeudet ja Suomen oloissa myös talvisin esiintyvät pakkasjaksot, kun lämpötila laskee alle tuulivoimalan toimintalämpötilan. Voimalaitoskohtaisesti tämä voi tarkoittaa -25 tai -30 °C. Tähän käytettävyyteen huomioidaan myös sähköverkosta aiheutuvat seisokit ja muut häiriöt. Vuosien 2002 ja 2011 välisenä aikana todellinen käytettävyyden on vaihdellut 89 ja 96 %:n välillä. Vuonna 2011 todellinen käytettävyyden tuulivoimaloille oli noin 89 %, kun tekninen käytettävyyden oli kuitenkin 95 %. Käytännössä tuulivoimalat olivat pysähdyksissä keskimäärin 500 tuntia vuonna 2011 niistä riippumattomista syistä johtuen. [VTT]

## 7 TULOSTEN ANALYSOINTI

Vika-analyysin pohjalta saatujen MTBF-arvojen avulla on laskettu voimalaitoksille ja tilastolliselle käyttäytymiselle vuotuisten vikojen lukumäärien todennäköisyydet eri jakaumia hyödyntämällä. Nämä kolme eri tapausta, WinWind ja Siemens sekä tilasto, on yhdistettynä yhteen kuvaan jakaumakohtaisesti tuloksien vertailun helpottamiseksi. Näin saatuja todennäköisyysjakaumia voidaan käyttää huolto-ohjelman määrittelyparametreina sekä korjaavan tai ennakoivan huollon peruslähtökohtana. Kuvaajien viimeiseksi arvoksi vuotuisten vikamäärien osalta on valikoitunut 14 vikaa vuodessa, koska muutamassa tapauksessa kyseinen todennäköisyys poikkesi nolasta vielä merkittävässä määrin ja oli siltä osin mahdollista toteutua. Pääsääntöisesti yli 14 vikaa vuodessa tapahtumien osuus kaikissa tapauksissa jäi alle 0,05%.

Komponenttikohtaisella tasolla voidaan lisäksi miettiä tarkemmin, mihin kohteeseen huoltotoimenpiteitä tulisi kohdentaa. Tämä käy ilmi vikojen jakaantumisesta voimalaitoskohtaisesti tai tilastollisesti.

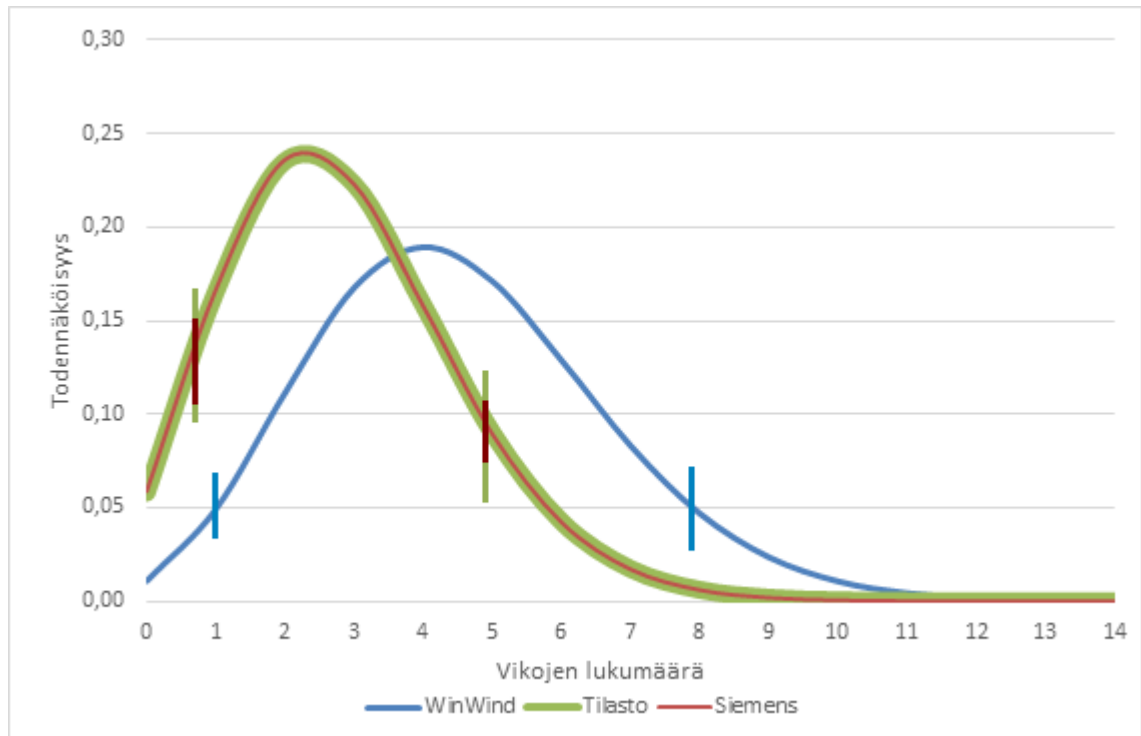
Analyysit tehdään jakaumakohtaisesti sekä vertaillaan järjestelmäkokonaisuuksille, missä suhteissa järjestelmissä syntyy vikoja niin voimalaitoskohtaisesti kuin tilastollisesti. Lisäksi pohditaan, miksi jakaumien tulokset eroavat toisistaan ja ovatko niistä saatavat tulokset järkevää suuruusluokkaa keskenään.

### 7.1 Eksponenttijakauma

Eksponenttijakauma soveltuu parhaiten korjaavan huolto-ohjelman perustaksi ja sen avulla voidaan ennakoivasti kohdentaa resursseja tietyille aikavälille, jolloin vikaantuminen olisi todennäköisintä, kuitenkin siten, että komponentti korjataan vasta vian tapahtuttua eikä yhtään aiemmin.

Vikojen esiintymisen todennäköisyys on esitettyinä eksponenttijakaumalla kuvassa 7.1 voimalaitoskohtaisesti sekä tilaston osalta. Kyseiset lukuarvot on saatu laskettua kaavan 5.4, avulla ja vikataajuusarvoina on käytetty WinWind:n ja Siemensin voimalan osalta liitteissä 1 ja 2 olevia vikataajuuksia. VTT:n tilaston osalta on käytetty puolestaan liitteen 5 pohjalta saatavaa MTBF-arvoa, joka on 3080,59 h. Vastaavat lukuarvot Siemensin ja WinWind:n voimalan osalle ovat 3091,85 h ja 1938,38 h.





Kuva 7.1 Vikojen lukumäärän todennäköisyys eksponenttijakauman mukaisesti

Kuvasta 7.1 huomataan WinWind:n voimalan vikamäärien olevan tilastoon ja Siemensin voimalaan verrattuna laajemmalla alueella ja keskiarvo on suurempi. Tilastollisesti 90 %:ssa voimalaitoksista tapahtuu yhdestä viiteen vikaa vuoden aikana ja suurin todennäköisyys on kahdella vialla vuodessa. Vastaavasti WinWind:n 90 % rajat ovat yhdestä kahdeksaan vikaa vuodessa ja todennäköisin vaihtoehto on neljä vika vuodessa. Siemensillä puolestaan 90 %:n joukko osuu yhdestä viiteen vian välille ja todennäköisin vaihtoehto on kaksi vikaa vuodessa.

Odotetusti WinWind:n tuulivoimalan vikamäärät ovat hieman suuremmat kuin Siemensin tuulivoimalan pienemmän MTBF-arvon myötä. Tilaston ja Siemensin voimalaitoksen välistä eroa ei voida erityisesti havaita käytetyllä tarkkuudella. Kyseiset todennäköisyysjakaumat menevät lähes päällekkäin. [VTT]

Vikojen lukumäärä on valittu piirrettäväksi aina 14 vikaan asti vuoden aikana, koska kokonaisuudelle kyseinen vikatodennäköisyys on vielä tuhannesosa-luokassa. Kyseinen todennäköisyys on jo hyvin pieni, mutta kuitenkin tulkinnan kannalta merkittävä, sillä se poikkeaa selvästi nolasta. Samaa vikamäärää pidetään muissakin jakaumissa raja-arvona, koska tällöin kuvien vertailu on suoraviivaisen helppoa, sillä asteikot on jaettu yhtä suuriksi.

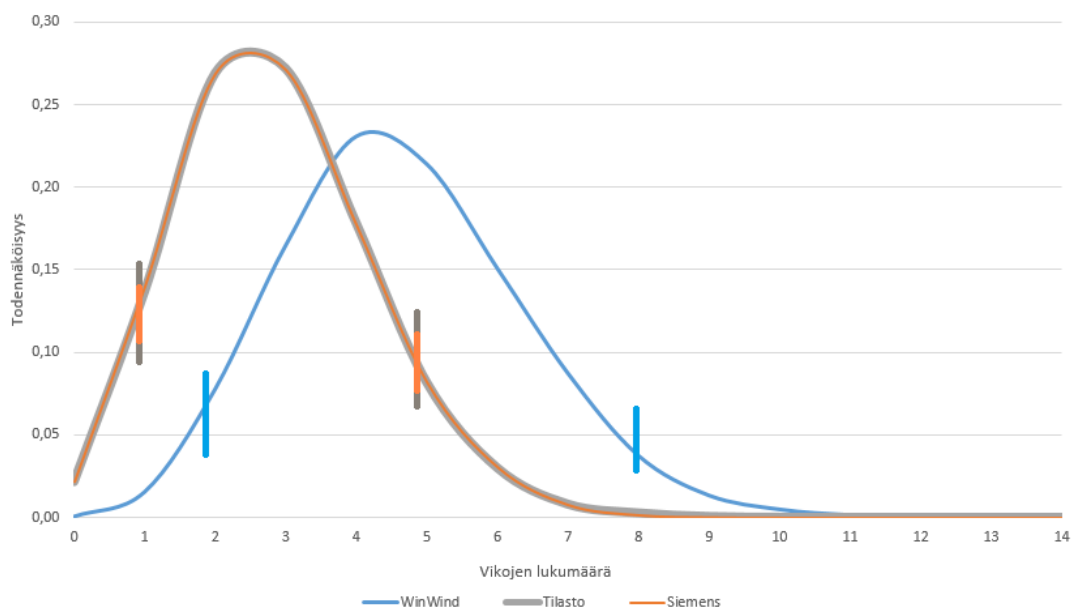
Vertailun vuoksi voidaan laskea, paljonko MTBF-arvojen perusteella tulisi keskimäärin vikojen lukuarvoksi yhden vuoden aikana. Tilaston vikamääräksi tulisi 2,8 samoin kuin Siemensin voimalalle ja WinWind:n voimalalle tulisi puolestaan 4,5 vikaa. Näistä voi-

daan suoraan havaita, että tämän jakauman todennäköisimmät vikamäärät sijoittuivat hyvin lähelle näitä yksinkertaisesti laskettuja arvoja. WinWind:n osalta todennäköisin vaihtoehto oli aikaisemmin mainittu neljä vikaa vuodessa, mutta likimäärin viisi vikaa vuodessa oli lähes yhtä todennäköinen.

Lisäksi voidaan havaita, että viattomien vuosien todennäköisyys on kuitenkin merkittävästi nolosta poikkeava lukuarvo. WinWind:n voimalan osalta viattoman vuoden todennäköisyys on noin 1,1 %, kun Siemensin ja tilaston pohjalta kyseinen todennäköisyys on noin 6 %. Voimaloiden järjestelmäkohtaiset vikojen lukumäärien todennäköisyysarvot on esitettyä liitteissä 6.1 ja 6.2 WinWind:n ja Siemensin voimaloille.

## 7.2 Weibull-jakauma

Vikojen esiintymisen todennäköisyys on esitettyä Weibull-jakaumalla kuvassa 7.2. Kyseiset todennäköisyydet on saatu käyttämällä samoja MTBF-arvoja kuin eksponenttijakauman kanssa kappaleessa 7.1. Tarvittavat Weibull-kertoimet jakaumalle käyvät ilmi liitteestä 7.



*Kuva 7.2 Vikojen lukumäärän todennäköisyys vuodessa Weibull-jakauman mukaisesti*

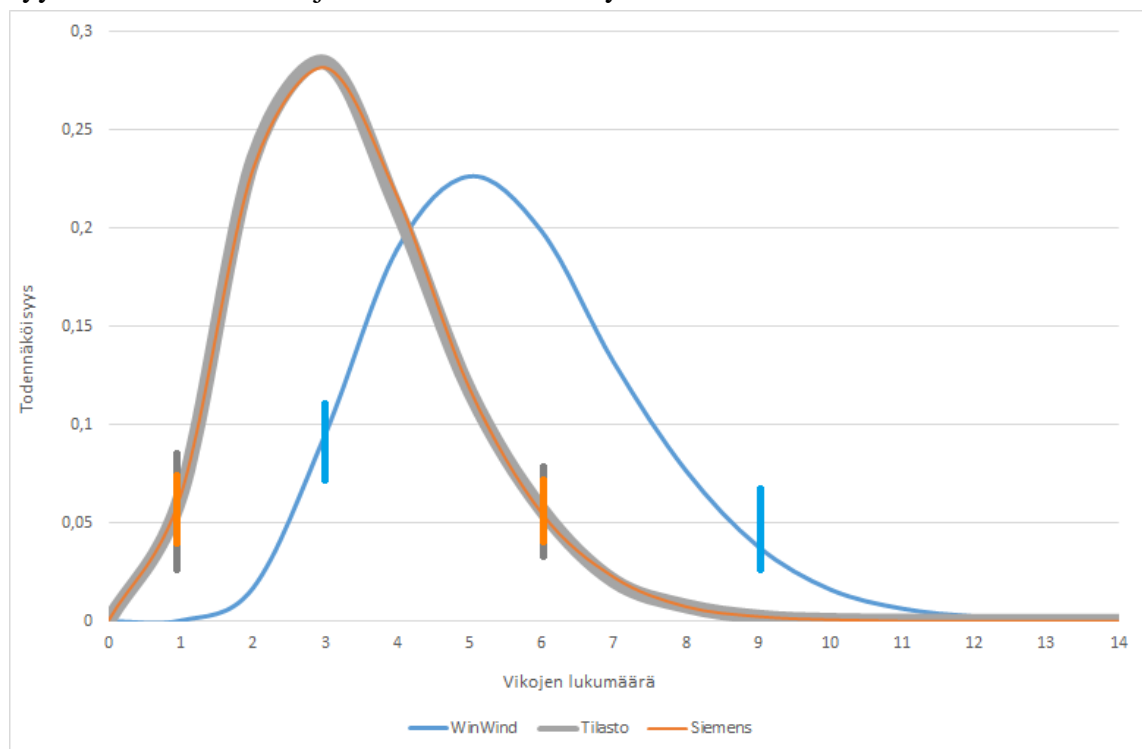
Weibull-jakauman tapauksessa tilaston ja Siemensin voimalaitoksen välille ei syntynyt eroa ja näiden pohjalta 90 % voimalaitoksista kokee tilastollisesti yhdestä viiteen vikaa vuodessa huipun osuessa kolmeen vikaan vuodessa. Siemensin voimalaitoksen osalta 90 %:n joukko kokee yhdestä viiteen vikaa vuodessa ja todennäköisin vuotuinen vikamäärä on kolme. WinWind:n osalta 90 % voimalaitoksista kokee kahdesta kahdeksaan vikaa vuodessa todennäköisimmän vaihtoehdon ollessa neljä vikaa vuodessa. Viattoman vuoden todennäköisyys jää kaikissa tapauksissa alle 0,3%.

Huomion arvoista on se, että todennäköisin vikojen lukumäärä saa yli 25 % todennäköisyyden sekä tilastollisesti että Siemensin voimalan osalta. WinWind:n osalta jakauma on laakeampi, jolloin todennäköisin vikamäärä saa hieman yli 23 %:n todennäköisyyden. Yksittäisiä järjestelmiä katsottaessa voidaan huomata liitteiden 7.1 ja 7.2 pohjalta, että WinWind:n hydraulikkajärjestelmän vikamääriä vastaavat todennäköisyydet yksinään olisivat hyvin lähellä Siemensin ja tilaston kokonaisuuksien todennäköisyyksiä. Kyseisen järjestelmän 90 %:n joukko osuu yhden ja neljän vian välille. Todennäköisin vaihtoehto tällöin on kaksi vikaa vuodessa todennäköisyydellä 34,8 %.

Siemensin voimalaitoksen osalta yksittäisistä järjestelmistä jarru- ja jäähdytysjärjestelmät todennäköisimmin kokevat useamman vian vuoden aikana. Samat järjestelmät ovat myös WinWind:n osalta selkeästi seuraavaksi todennäköisimpiä vikaantuvia järjestelmiä lapakulmasäätöjärjestelmän ohella. Voimaloiden vikojen todennäköisyysarvot on esitettyinä järjestelmäkohtaisesti liitteessä 7.1 WinWind:n voimalan ja liitteessä 7.2 Siemensin voimalan osalta.

### 7.3 Kolmiparametrinen Weibull-jakauma

Vastaavasti kolmiparametrisen mallin pohjalta saadut vikojen esiintymisen todennäköisyydet voimalaitoksille ja tilastolle ovat esitettyinä kuvassa 7.3.



Kuva 7.3 Vikojen lukumäärän todennäköisyys vuodessa kolmiparametrisen Weibull-jakauman mukaisesti

Kuvasta 7.3 voidaan havaita, että nyt tilastollinen 90 % joukko sijoittuu yhdestä kuuteen vikaan todennäköisimmän vikamäärän ollessa kolme. Siemensin voimalalla on vastaa-

vat lukuarvot kuin tilastolla. WinWind:n osalta 90 %:n joukko sijoittuu kolmen ja yhdeksän vian välille huipun osuessa viiden vian kohdalle vuodessa. Käyrät kasvavat jyrkästi kohti huippuarvoa, jonka jälkeen seuraa loiva lasku kohti vikaantumistodennäköisyyttä nolla. Tämä menetelmä antaa enemmän painoarvoa vikojen syntymiselle elinkaaren alkupäässä, mistä seuraa loiva todennäköisyyden lasku suurilla vikamäärillä vuotta kohti sekä laajempi hajonta 90 %:n joukolle. Selkeästi on havaittavissa, että kaikista jakaumista pienin todennäköisyys viattomalle vuodelle tai yhden vian vuodelle oli kolmen parametrin mallilla.

Järjestelmäkohtaisesti edelleen WinWind:n voimalaitoksen osalta todennäköisimmin vikaantuvia olivat hydrauliiikka, jäähdytysjärjestelmä sekä jarrujärjestelmät. Yksinään hydrauliiikkajärjestelmä aiheuttaa vuoden aikana yhdestä kolmeen vikaa 90 %:n todennäköisyydellä. Lisäksi jarru- sekä jäähdytysjärjestelmästä syntyisi yhdestä kahteen vikaa 30 %:n ja 50 %:n todennäköisyydellä. Vastaavasti lähes 95 %:n todennäköisyyden viattoman vuoden kokisivat sähkön siirtoon liittyvät laitteet sekä vaihteiston planeettarattaisto. Nämä sähkön siirtoon liittyvät järjestelmät olivat liityntäkaapelit, suojalaitteet sekä muuntaja. Järjestelmäkohtaiset todennäköisyysarvot on esitettyinä WinWind:n voimalan osalta liitteessä 8.1.

Siemensin voimalan osalta todennäköisimmät vikaantuvat järjestelmät olivat lapakulman säädön sähkömoottorit sekä jäähdytys- ja jarrujärjestelmä. Lapakulman säätömoottoreiden ja jarrujärjestelmän osalta vikoja esiintyi yhdestä kahteen vikaa vuodessa noin 50 %:n todennäköisyydellä, kun puolestaan jäähdytysjärjestelmässä tapahtuisi yhdestä kahteen vikaa vuodessa 30 %:n todennäköisyydellä. Vastaavasti sähkön siirtoon liittyvissä kaapeleissa, suojalaitteissa tai muuntajassa ei tapahtuisi yhtään vikaa vuoden aikana lähes 95 %:n todennäköisyydellä. Tarkat lukuarvot järjestelmäkohtaisesti löytyvät Siemensin voimalan osalta liitteestä 8.2.

## 7.4 Jakaumien keskinäinen vertailu

Tiiviimmän käyrästä muodosti eksponenttijakauma, kun puolestaan kolmiparametrisella jakaumalla syntyi suurempi hajonta. Keskeisesti eksponenttijakaumalla saatiin hyvin kuvastettua tilannetta, jossa vikojen jakautuminen ajan suhteen on tasaista. Toisaalta tämä ei korreloi reaali maailman tilanteita kovin hyvin, joten Weibull-jakauman elinkaaren loppupäässä tapahtuvien vikojen painotus sekä kolmiparametrisen elinkaaren alkupään vikojen painotus kuvastavat molemmat paremmin voimalaitoksen vikaantumista kuin eksponenttijakauma.

Toisaalta kaikkien jakaumien pohjalta saadaan samansuuntaiset arviot vikojen lukumäärille vuoden aikana. Näin ollen voidaan valita käyttökohteeseen soveltuvien menetelmä. Valintaa tehtäessä on huomioitava, että Weibull-jakaumien kehitelmissä komponenttien elinikä tulisi olla hyvin tiedossa vikaantumista ennustettaessa. Usein kyseinen tieto on

saatavilla vain taloudellisesti merkittävälle osille, kuten pääakselin laakeroinnille, generaattorille ja siihen liittyvälle tehoelektronikalle sekä vaihteistolle.

Weibull-jakaumista voidaan huomata kaikkien tapausten osalta, että todennäköisin vikamäärä on selkeästi eri suuruusluokkaa todennäköisyysarvoltaan kuin eksponenttijakaumassa. Kuitenkin 90 %:n joukko säilyy suhteellisen saman suuruusluokassa vikojen lukumäärinä kaikissa jakaumissa. Pyöristämisen seurauksena kuitenkin aiheutuu pientä vaihtelua, sillä ei ole järkevää esittää joukon sijoittumista esimerkiksi puolikkaiden vikojen tarkkuudella. Käytännössä ei voi tulla eteen voimalaitosta, joka kokisi esimerkiksi 5,5 vikaa vuoden aikana. Kuvaajasta ja suuremmasta otannasta tämän kyllä voisi esittää näin, mutta edelleenkin sille ei olisi järkevää vastinetta reaali maailman kanssa.

WinWind:n voimalan osalta kyseinen 90 %:n joukko kuitenkin siirtyy suurempia vikamääriä kohti Weibull-jakaumilla. Kyseinen ilmiö havainnollistaa sitä, miten vikoja kertyy todennäköisemmin elinkaaren alussa kolmiparametrisessä tapauksessa. Vastaavasti Weibull-jakauman tapauksessa ilmiö kuvastaa, miten vikaantumisen todennäköisyys kasvaa elinajan ylittäessä MTBF-arvon. WinWind:n voimalaitoksen pienempi MTBF-arvo korostaa kyseistä ilmiötä voimakkaammin vuoden tarkastelujaksolla.

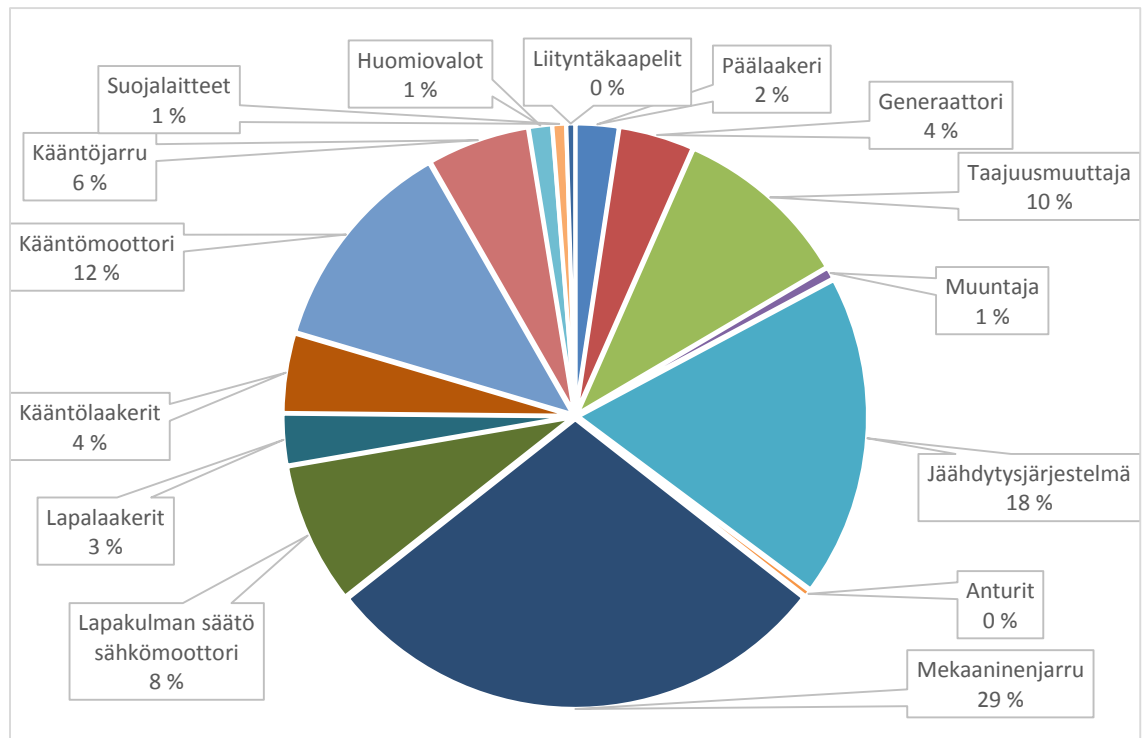
Vastaavasti Siemensin voimalan ja tilaston osalta havaittaisiin samanlainen ilmiö, kun tarkastelujakson pituutta kasvatettaisiin pidemmäksi. Tällöin MTBF-arvon ja jakson pituuden suhde pienenee, jolloin vikojen lukumäärään syntyy enemmän vaihtelua. Kuitenkin käytetty ajanjakso, yksi vuosi, on hyvin perusteltua, koska vikatilasto on kerätty voimalaitoskohtaisesti vuoden ajalta.

## 7.5 Komponenttikohtaiset vikatilastot

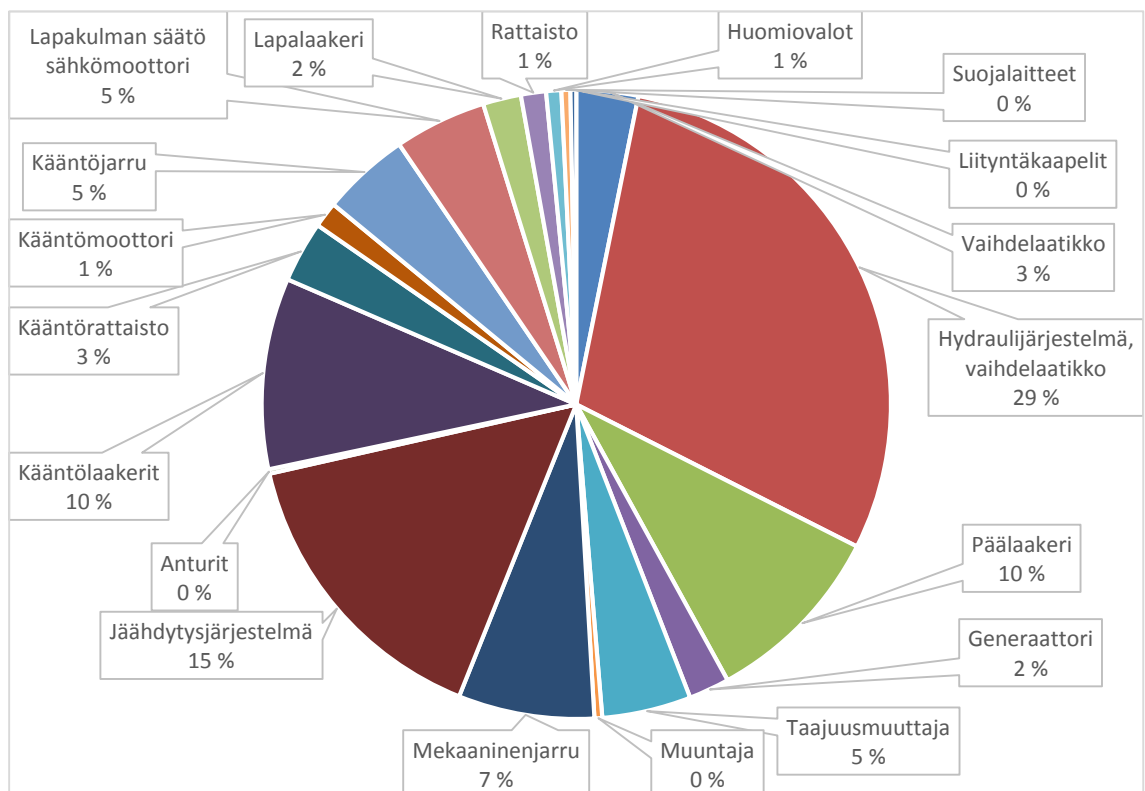
Vikojen jakautuminen vuosittain on esitettyinä kuvissa 7.4 Siemensin, 7.5 WinWind:n ja 7.6 tilaston osalta. Kuvista voidaan huomata, että hydraulikan osalta ollaan prosentuaalisesti samassa luokassa WinWind:n voimalan osalta tilastoon verrattaessa. Molempien voimalaitosten osalta generaattorista ja siihen liittyvästä taajuusmuuttajasta syntyvät vikamäärät ovat tilaston kanssa samassa suuruusluokassa. Kuvat on määritelty liitteiden 1 ja 2 pohjalta WinWind:n ja Siemensin voimaloille. Vikaosuudet on määritelty siten, kuinka paljon yksittäisen järjestelmän vikataajuuden osuus on voimalaitoksen kokonaisvikataajuudesta. Vastaavasti tilaston osalta on käytetty liitteessä 5 esiintyviä arvoja.

Mekaanisen jarrun osalta Siemensin voimalassa on havaittavissa suurta poikkeama WinWind:n voimalan ja tilastoon verrattuna, joka johtuu vikaherkemmästä rakenneratkaisusta. Kyseinen eroavaisuus järjestelmien osalta oli, että Siemensin voimalaitoksessa käytetään kolmea sylinteriä, kun WinWind:n ratkaisussa käytetään vain kahta. Toisena merkittävästi tilastosta poikkeava järjestelmä on jäähdytysjärjestelmä, joka on molem-

missä voimalaitoksissa arvioitu tilastollista kehitystä vikaherkemmäksi. Lisäksi molempien voimalaitosten osalta lapojen toimintaan ja turbiinin kääntämiseen liittyvien järjestelmien osuudet olivat hieman suurempia kuin tilastollisesti.

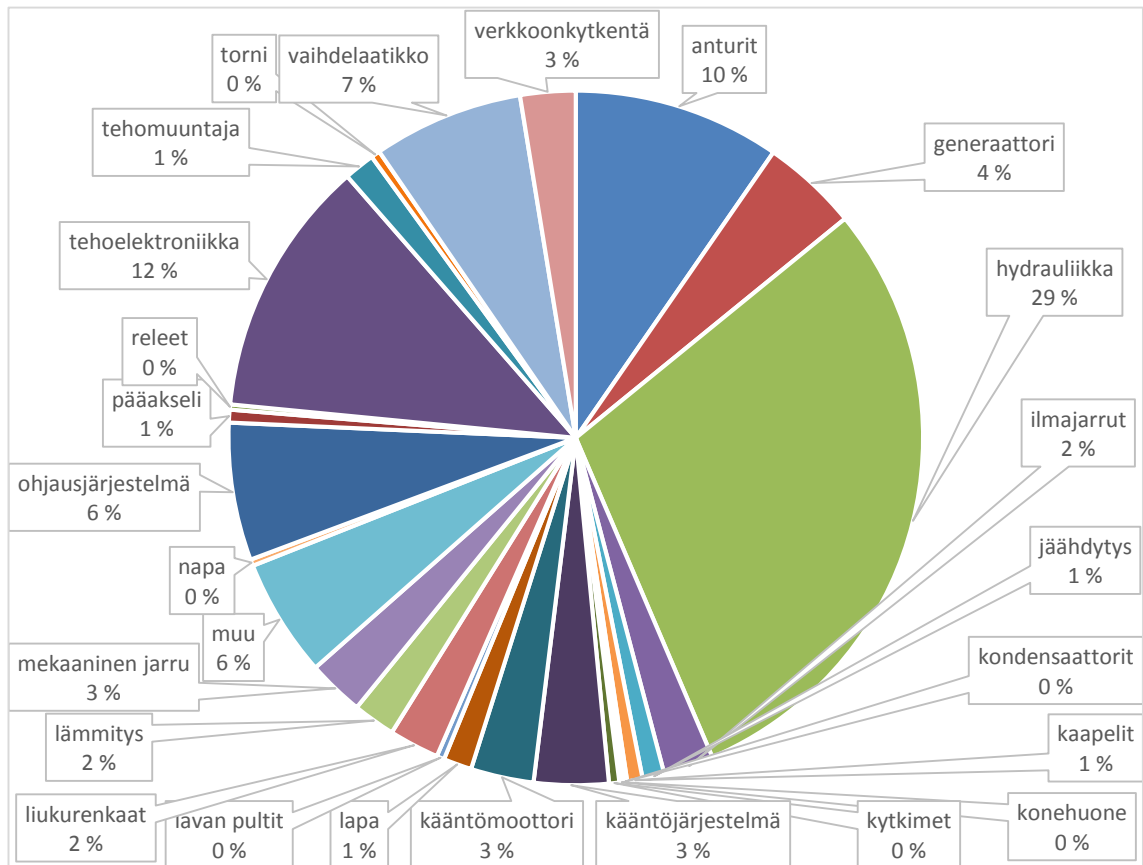


Kuva 7.4 Vuotuisten vikojen prosentuaaliset osuudet Siemensin voimalalle [Liite 2]



Kuva 7.5 Vuotuisten vikojen prosentuaaliset osuudet WinWind:n voimalalle [Liite 1]

Tilaston pohjalta anturit vikaantuvat selkeästi enemmän kuin vika-analyysin pohjalta voitaisiin olettaa. Tätä voi osaltaan selittää antureiden sijoittuminen siten, että ne ovat ulkopuolisille voimille alttiina ja voivat usein rikkoutua ukkosen tai myrskyn vaikutuksesta. Yksittäisen anturin suojaaminen näitä voimia vastaan verrattuna anturin vaihtokustannuksiin ei olisi kokonaistaloudellisesti järkevää. Tietenkin sähköisten ominaisuuksien mittaukseen liittyvät anturit ovat tuulivoimalanrakenteiden sisällä ja niiden osalta edellä mainittu selitys ei päde.



Kuva 7.6 Vuotuisten vikojen prosentuaaliset osuudet tilastolle [Liite 5]

## 8 YHTEENVETO

Vika-analyysillä voidaan saavuttaa merkittäviä hyötyjä uuden voimalaitoksen vikaantumista arvioitaessa. Työssä tarkasteltiin lähtökohtaisesti kahden tuulivoimalan vuotuisia vikamääriä kolmen eri jakauman avulla. Voimaloiden valinta kohdistui Suomessa yleisimpään WinWind:n tuulivoimalaan sekä toiseksi yleisimpään Siemensin voimalaitokseen. Näistä molemmat voimalat edustavat viimeisimmän tyyppin tuulivoimaloita ja keskenään ne erosivat WinWind:n vaihdelaatikko-generaattori yhdistelmän osalta. Työssä käytiin myös läpi aikaisemmat tuulivoimalatyypit sekä miten Suomessa ja maailmalla tuulivoiman kasvu on ollut merkittävää energiantuotantosektorilla.

Itse vika-analyysin tekeminen on hyvin suoraviivaista ja työssä käytiin läpi yksityiskohtaisesti WinWind:n generaattorin vikataajuuden määrittäminen. Muiden komponenttien osalta vikataajuudet pystytään määrittämään yhtä suoraviivaisesti suunnittelukirjojen ohjeiden mukaisesti, ellei vikataajuutta komponentille ole muuten saatavilla valmistajan toimesta.

Työssä mallinnettiin vikojen lukumäärien todennäköisyyksiä kahden jakauman pohjalta, eksponentti- ja Weibull-jakauma. Näistä Weibull-jakaumalle sovellettiin vielä kolmiparametrinen mallia, jossa saatiin komponentille tyypillinen elinkaari käyttäytyminen aikaan. Tässä mallissa elinkaaren alkuun vikataajuus on keskiarvoa korkeammalla ja pienenee voimakkaasti. Tätä vaihetta seuraa vikataajuuden vakiojakso, joka kuvastaa komponentin käyttökelpoista elinkaarta ja elinkaaren loppuun vikataajuus lähtee kasvamaan voimakkaasti kuvastaen ikääntyvän osan vikaherkkyttä. Eksponenttijakaumasta voidaan sanoa se, että siinä komponentin vikataajuus säilyi vakiona läpi elinkaaren, mikä toisaalta helpottaa laskentaa ja analysointia vikamäärien suhteen. Toisaalta kuitenkin tiukasti noudatettuna eksponenttijakauman ominaisuus mahdollistaa tulkin, jossa ehjää osaa ei koskaan vaihdeta uuteen, koska osan vikaantumisen todennäköisyys säilyisi kuitenkin samana käytetyllä ja uudella komponentilla.

Weibull-jakauma korosti sitä, että komponentin vikataajuus kasvaa voimakkaasti tietyn ajanhetken jälkeen. Kuitenkin kaikkia jakaumia yhdisti se, että vikaantuneiden ja selvinneiden komponenttien suhde oli yhtä suuri MTBF-arvon kohdalla. Eksponenttijakaumalla tämä suhde säilyi vakiona MTBF-arvon kerrannaisten kohdalla, mutta Weibull-jakaumilla selviytyneiden osuus pienenee voimakkaasti käyttöajan kasvaessa.



Voimalaitosten vuotuisille vikojen lukumäärille saatiin todennäköisyysarvot jakaumien pohjalta ja niitä vertailtiin Suomen tuulivoimaloiden vikatilaston vertailusarjaan. Tilastosta määriteltiin kymmenen vuoden ajalta vikataajuus tuulivoimalalle ja vikojen jakaantuminen ryhmittäin. Tilastosta oli saatavilla vielä vikojen kestoajat sekä voimaloiden käytettävyyssarvo. Näitä ei kuitenkaan hyödynnetty tässä työssä, koska tavoitteena oli tarkastella vuotuisten vikamäärien todennäköisyyksiä ja alkuperäisenä oletuksena työssä olikin, että MTTR-arvo oletetaan nolllaksi, jolloin käytettävyys olisi 100 %. Tämä tietenkään ei todellisuudessa pidä paikkaansa, mutta laskenta ja tulokset ovat tällöin järkevästi tulkittavissa, koska vikaantunut komponentti vaihdetaan uuteen eikä voimalaitoksen toiminta pääty ensimmäiseen vikaan.

Yhteenvetona voidaan todeta, että käytetyillä menetelmillä saatiin molemmille voimalaitoksille todennettua järkevän suuruinen vikataajuus, joka oli vertailukelpoinen tilaston pohjalta saatavaan lukuarvoon. Lisäksi vikojen lukumäärien todennäköisyydet olivat Siemensin voimalaitoksen osalta kohtuullisen lähellä tilaston vastaavia lukuarvoja. WinWind:n voimalaitoksen osalta vikojen lukumäärät olivat todennäköisemmin suurempia kuin vertailusarjana olleen tilaston vastaavat arvot.

Järjestelmäkohtaisesti vikojen jakaantuminen kuitenkin aiheutti pientä poikkeamaa tilaston ja voimaloiden välille. Molemmissa voimalaitoksissa jäähdytysjärjestelmän vikojen osuudet olivat tilastoon verrattuna suuremmat, samoin oli myös mekaanisten jarrujen osalta. Vastapainona tehoelektroniikan vikaosuudet olivat molemmissa voimalaitoksissa pienempiä kuin tilaston pohjalta saatuna.

Tuloksellisesti käytetyillä vika-analyysimenetelmillä pystyttiin kohtuullisen hyvin ennustamaan vikojen lukumäärien todennäköisyyksiä vuoden ajalta. Varmuus asioiden oikeellisuudesta saadaan kuitenkin vasta, kun kyseiselle voimalalle tehdään riittävä määrä testijaksoja ja todennetaan, että sen vikojen jakautuminen menee myös tilastollisesti samassa suhteessa kuin vika-analyysin pohjalta on ennustettu. Tämä kuitenkin on usein epärelevantti asia ja voimalaitoskokonaisuuksia voidaan tuoda markkinoille ilman varsinaista testisarjaa, jolloin ensimmäiset toimituserät toimivat valmistajalle eräänlaisena testisarjana.

## LÄHTEET

Ancona Dan, McVeigh Jim. (2001) Wind Turbine - Materials and Manufacturing Fact Sheet. Office of Industrial Technologies, US Department of Energy. 8 s.

Department of Defense United States of America. (1991). Military Handbook of Reliability Prediction of Electronic Equipment 217, 322 s.

Department of Defense United States of America. (1998). Military Handbook of Reliability Prediction of Electronic Equipment 338, 1046 s.

Gasch Robert, Twele Jochen. (2012) Wind Power Plants Fundamentals, Design, Construction and Operation. 2. painos. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 548 s.

Global Wind Energy Council. (2015). Global statistics of Wind power. [WWW] [Viitattu 12.6.2015] <http://www.gwec.net/global-figures/graphs/>

Hau Eric. (2006) Wind Turbines. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 792 s.

Hui Zao, Lingling Ma. (2012) Low Voltage Ride-Through Analysis of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines under Grid Fault. Recent Advances in CSIE 2011, LNEE 129. Springer-Verlag Berlin Heidelberg s. 299-305

Kiiski Tuomas. (2012) Taajuusmuuttajien luotettavuus, huollettavuus ja kunnossapito teollisessa ympäristössä. Diplomityö. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 73 s.

Korpela Aki. (2012). Tuulivoiman luonnontieteelliset perusteet. Tampereen Teknillinen Yliopisto. 75 s.

Kumamoto Hiromitsu, Henley J. Ernest. (1996) Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists. 2. painos. IEEE Press, 588 s.

Laine Mikael . Tuuliturbiinin käyttö- ja ylläpitokustannusten pienentäminen Moventak- sen päivityksillä. 29.10.2014 Energia-messut Tampere. Seminaari esitys

Muyeen S. M., (2012) Wind Energy Conversion Systems. 1. painos. Springer. 526 s.

Naval Surface Warfare Center Carderock Division. (2011). Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment 11, 522 s.

Nicholls David. (2005) System Reliability Toolkit. 1. painos. Reliability Information Analysis Center. 857 s.

Nordic Grid Code. 2007. Pohjoismaiden sähköverkon liityntäehtoja. [PDF] [Viitattu 10.6.2015]

[https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/\\_library/publications/nordic/planning/070115\\_entsoe\\_nordic\\_NordicGridCode.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/_library/publications/nordic/planning/070115_entsoe_nordic_NordicGridCode.pdf)

Peinke Joachim, Schaumann Peter, Barth Stephan, (2007) Wind Energy Proceedings of the Euromech Colloquium, 1. painos. Springer. 332 s.

Pimiä Tuomo, (2014) Info package of wind energy. Kymenlaakso University of Applied Sciences, Publication Series B.113. 106 s.

Siemens. (2014) Wind Turbine SWT-3.0-101 Technical Specification. [WWW]. [Viitattu 8.9.2014] Saatavissa: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/wind-power/platforms/d3-platform/wind-turbine-swt-3-2-101.htm>

Valtion Teknillinen Tutkimuslaitos. (2014) Tuulivoimatilastot 2002-2011. [WWW]. [Viitattu 4.9.2014]. Saatavissa: <http://www.vtt.fi/proj/windenergystatistics/>

WinWinD. (2003) Technical specification WWD-1. ver 8-1. 18 s. Saatavissa: [http://www.ecosource-energy.bg/uploads/Technical\\_Specification\\_WWD1.pdf](http://www.ecosource-energy.bg/uploads/Technical_Specification_WWD1.pdf)

## LIITE 1: WWD-1-VOIMALAN VIKA-ANALYYSI-TAULUKKO

Osan nimi	Vikataajuus vikaa/1M h	MTBF h	Lähde ( laskettu, handbook, valmistaja)
Vaihdelaatikko	17,12	58400	valmistaja
Hydrauliikkajärjestelmä, vaihdelaatikko	158,27	6318,43	laskettu
Päälaakeri	51,62	19372,34	NSWC-HDBK-11
Generaattori	11,30	88533,18	MIL-HDBK-217
Taajuusmuuttaja	24,73	40444,50	MIL-HDBK-217
Muuntaja	2,16	462962,96	MIL-HDBK-217
Mekaaninen jarru	37,79	26465,53	laskettu
Jäähdytysjärjestelmä	83,15	12026,56	laskettu
Anturit	1,22	816993,46	MIL-HDBK-217
Kääntölaakerit	53,04	18853,70	NSWC-HDBK-11
Kääntörattaisto	16,96	58966,44	NSWC-HDBK-11
Kääntömoottori	7,14	140005,43	MIL-HDBK-217
Kääntöjarru	24,43	40933,08	laskettu
Lapakulman säädön sähkömoottori	25,57	13035,58	MIL-HDBK-217
Lapalaakeri	10,58	94517,96	NSWC-HDBK-11
Rattaisto	6,97	143484,89	NSWC-HDBK-11
Huomiovalot	4,21	23778,27	MIL-HDBK-217
Suojalaitteet	2,48	403307,12	MIL-HDBK-217
Liityntä kaapelit	1,60	625000,00	MIL-HDBK-217

## LIITE 2: SIEMENS-VOIMALAN VIKA-ANALYYSI-TAULUKKO

Osan nimi	Vikataajuus vikaa/1 M h	MTBF h	Lähde ( laskettu, handbook, valmistaja)
Päälaakeri	7,76	128865,98	NSWC-HDBK-11
Generaattori	13,55	73777,65	MIL-HDBK-217
Taajuusmuuttaja	32,14	31111,15	MIL-HDBK-217
Muuntaja	2,16	462962,96	MIL-HDBK-217
Jäähdytysjärjestelmä	58,20	17180,80	laskettu
Anturit	1,22	816993,46	MIL-HDBK-217
Mekaaninen jarru	93,16	10734,80	laskettu
Lapakulman säätö sähkömoottori	25,57	13035,58	MIL-HDBK-217
Lapalaakerit	9,30	107526,88	NSWC-HDBK-11
Kääntölaakerit	14,33	69783,67	NSWC-HDBK-11
Kääntömoottori	39,28	25455,53	MIL-HDBK-217
Kääntöjarru	18,46	54171,18	laskettu
Huomiovalot	4,21	23778,27	MIL-HDBK-217
Suojalaitteet	2,48	403307,12	MIL-HDBK-217
Liityntäkaapelit	1,60	625000,00	MIL-HDBK-217

## LIITE 3: WEIBULL-JAKAUMAN SIMULOINTIKOODI

```

{
lkm=100000;
vika_tod=rand(lkm,1);           %Komponenttien kestävyys todennäköi-
syydet
MTBF=128865.98;                %Weibull-jakauman MTBF arvo
B=1.2;                          %Weibull-jakauman B kerroin
T=8760;                          %Komponentin tarkastelujakson pituus
apumuuttuja_1=1;                %Järjestysluku
apumuuttuja_2=0;                %Komponentin yhteenlaskettu kestoikä
apumuuttuja_3=0;                %Vikojen lukumäärä vuodessa
apumuuttuja_4=0;                %Tapahtumien lukumäärä
vikojen_lkm_vuodessa=zeros(1,50);

while apumuuttuja_1 < lkm

    while apumuuttuja_2 < T

        apumuuttuja_2=(MTBF*abs(log(vika_tod(apumuuttuja_1,1))-
log(1))^(1/B)+apumuuttuja_2);

        apumuuttuja_1=apumuuttuja_1+1;
        apumuuttuja_3=apumuuttuja_3+1;

    end

    viko-
jen_lkm_vuodessa(1,apumuuttuja_3)=vikojen_lkm_vuodessa(1,apumuuttuja_3
)+1;
    apumuuttuja_2=0;
    apumuuttuja_3=0;
    apumuuttuja_4=apumuuttuja_4+1;

end
vikojen_lkm_vuodessa=vikojen_lkm_vuodessa/apumuuttuja_4;
}

```

## LIITE 4: KOLMIPARAMETRISEN WEIBULL-JAKAUMAN SIMULOINTIKOODI

```

{
lkm=100000;
vika_tod=rand(lkm,1);           %Komponenttien kestävyys todennäköisyydet
MTBF=1938.38;                  %Weibull-jakauman MTBF arvo
B1=0.4;                         %Weibull-jakauman kerroin komponentin
elinkaaren alkuun
B2=1.9;                         %Weibull-jakauman B kerroin
T=8760;                         %Komponentin tarkastelujakson pituus
apumuuttuja_1=1;                %Järjestysluku
apumuuttuja_2=0;                %Komponentin yhteenlaskettu kestoikä
apumuuttuja_3=0;                %Vikojen lukumäärä vuodessa
apumuuttuja_4=0;                %Tapahtumien lukumäärä
vikojen_lkm_vuodessa=zeros(1,50);

while apumuuttuja_1 < lkm

    while apumuuttuja_2 < T

        if (vika_tod(apumuuttuja_1,1) > 0.95)
            apumuuttu-
ja_2=(MTBF*abs(reallog(vika_tod(apumuuttuja_1,1))-
reallog(1)))^(1/B1)+apumuuttuja_2);

            elseif (vika_tod(apumuuttuja_1,1) > 0.37)
                apumuuttu-
ja_2=(MTBF*abs(reallog(vika_tod(apumuuttuja_1,1))-
reallog(1))+apumuuttuja_2);

            else
                apumuuttu-
ja_2=(MTBF*abs(reallog(vika_tod(apumuuttuja_1,1))-
reallog(1)))^(1/B2)+apumuuttuja_2);
            end

            apumuuttuja_1=apumuuttuja_1+1;
            apumuuttuja_3=apumuuttuja_3+1;
        end

        viko-
jen_lkm_vuodessa(1,apumuuttuja_3)=vikojen_lkm_vuodessa(1,apumuuttuja_3
)+1;
        apumuuttuja_2=0;
        apumuuttuja_3=0;
        apumuuttuja_4=apumuuttuja_4+1;

    end

vikojen_lkm_vuodessa=vikojen_lkm_vuodessa/apumuuttuja_4;
}

```

# LIITE 5: TUULIVOIMALAN VIKATILASTOT SUOMESSA

Vuosi	2001		2002		2003		2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011	
	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm	Vika-aika yhteensä	Vikojen lkm
anturit	606	14,0	332	3	324	6	364	3	1050	7	3191	20	4437	22	3869	36	3612	27	680	11	550	12
gen. laakerit	0	0,0	0	0	0	0	315	1	288	1	0	0	220	1	88	2	825	3	1051	5	563	5
generaattori	284	3,0	1942	5	6	2	190	2	915	7	3753	1	1097	8	1303	13	745	8	279	6	533	2
hydrauliikka	4731	50,0	1631	22	1489	12	819	5	2782	10	3426	22	6793	26	3012	28	3070	28	5075	31	2993	13
imajärut	18	1,0	96	1	482	3	9063	4	2225	4	2421	4	2081	4	89	1	416	3	162	2	2869	8
jälhölyty	0	0,0	0	0	0	0	0	0	75	1	0	0	43	1	0	0	143	3	139	3	915	9
kaapelit	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	330	5	142	2	410	4	120	1
kondensaattorit	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	99	2	0	0	81	1
konehuone	0	0,0	0	0	0	0	3154	1	1806	1	0	0	0	0	0	0	20	1	0	0	0	0
kytkimet	15	1,0	0	0	533	1	0	0	220	3	130	2	0	0	0	0	0	0	65	1	0	0
kääntöjärjestelmä	268	4,0	48	1	484	4	210	1	0	0	0	0	423	2	93	2	4986	21	3666	13	1193	10
kääntömoottori	974	8,0	1357	7	1320	3	821	6	696	5	211	2	27	3	527	3	1187	2	251	6	157	4
lapa	78	1,0	0	0	0	0	66	1	0	0	2453	1	2308	2	1167	3	194	1	3188	8	1731	5
lapakuulman	34	1,0	191	2	241	2	0	0	129	6	1980	15	2136	15	1023	13	7016	66	11115	65	8476	60
sääntömekanismi																						
lavan pallit	114	1,0	0	0	0	0	26	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	17	1	429	3
lukurenkait	137	5,0	48	2	93	4	347	1	50	1	0	0	1347	4	146	5	575	5	704	8	1230	4
lämmitys	430	13,0	24	1	0	0	1246	5	1044	3	57	2	384	1	0	0	297	8	0	0	0	0
mekaaninen jarru	203	4,0	0	0	1821	8	0	0	0	0	456	6	0	0	141	3	205	6	433	7	5327	10
muu	1204	6,0	359	6	1656	16	240	5	324	2	1983	1	36	2	0	0	435	8	498	15	2314	31
napa	54	2,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	92	1	0	0	50	2	0	0
ohjauksjärjestelmä	534	6,0	307	4	6	1	0	0	1221	13	2362	9	1289	6	2292	10	7083	18	3486	27	774	13
pääakseli	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	152	1	66	1	430	3	120	2	90	1	954	2
releet	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tehoelektronikka	340	3,0	4	1	128	4	1134	4	442	17	1647	10	1357	9	1345	20	4692	45	6219	48	3555	40
tehomuuntaja	0	0,0	0	0	0	0	1100	1	374	1	744	1	0	0	1136	5	262	4	903	4	1828	8
torni	10	1,0	0	0	175	1	48	1	0	0	0	0	0	0	0	0	726	3	20	1	0	0
vaihdelehti	16538	13,0	2253	9	41	2	0	0	2225	5	7985	10	572	7	397	7	607	8	11287	34	6566	22
verkkojytkentä	73	4,0	4	1	404	2	109	1	6573	4	1401	6	668	7	752	11	467	5	0	0	104	2
<b>Yhteensä</b>	<b>26645</b>	<b>141</b>	<b>1058</b>	<b>65</b>	<b>11206</b>	<b>71</b>	<b>21056</b>	<b>43</b>	<b>24494</b>	<b>91</b>	<b>36558</b>	<b>113</b>	<b>32441</b>	<b>125</b>	<b>18248</b>	<b>172</b>	<b>28646</b>	<b>141</b>	<b>47468</b>	<b>308</b>	<b>43462</b>	<b>265</b>



## LIITE 6: EKSPONENTTIJAKAUMAN VIKATODEN- NÄKÖISYYSTAULUKOT

Osan nimi / Vikojen lukumäärä	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vaihteitaikko	0,8607	0,1291	0,0097	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Hydrauliijärjestelmä, vaihteitaikko	0,2500	0,3466	0,2402	0,1110	0,0385	0,0107	0,0025	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Päälaakeri	0,6362	0,2877	0,0650	0,0098	0,0011	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Generaattori	0,9058	0,0896	0,0044	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Taajuuksuuntaja	0,8053	0,1744	0,0189	0,0014	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Muuntaja	0,9813	0,0186	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mekaaninenjarru	0,7182	0,2377	0,0393	0,0043	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Jäähdytysjärjestelmä	0,4827	0,3516	0,1280	0,0311	0,0057	0,0008	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Anturit	0,9893	0,0106	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntölaakerit	0,6284	0,2920	0,0678	0,0105	0,0012	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöraitisto	0,8619	0,1281	0,0095	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntömoottori	0,9393	0,0588	0,0018	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöjarru	0,8073	0,1728	0,0185	0,0013	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapukalman säätö sähkömoottori	0,5107	0,3452	0,1153	0,0258	0,0043	0,0006	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapalaakeri	0,9115	0,0845	0,0039	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Rattaisto	0,9408	0,0574	0,0018	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Huomiovalot	0,6918	0,2549	0,0469	0,0058	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suojalaitteet	0,9785	0,0213	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Liityntä kaapelit	0,9861	0,0138	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>0,0109</b>	<b>0,0492</b>	<b>0,1113</b>	<b>0,1676</b>	<b>0,1894</b>	<b>0,1712</b>	<b>0,1289</b>	<b>0,0832</b>	<b>0,0470</b>	<b>0,0236</b>	<b>0,0107</b>	<b>0,0044</b>	<b>0,0017</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0002</b>

Osan nimi / Vikojen lukumäärä	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Päälaakeri	0,9343	0,0635	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Generaattori	0,8880	0,1054	0,0063	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Taajuusmuuttaja	0,7546	0,2125	0,0299	0,0028	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Muuttaja	0,9813	0,0186	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Jäähdytysjärjestelmä	0,6006	0,3062	0,0781	0,0133	0,0017	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Ajurit	0,9893	0,0106	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mekaaninenjarru	0,4422	0,3608	0,1472	0,0400	0,0082	0,0013	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapakulman säätö sähkömoottori	0,5107	0,3432	0,1153	0,0258	0,0043	0,0006	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapalaakerit	0,9218	0,0751	0,0031	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntölaakerit	0,8820	0,1107	0,0069	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntömoottori	0,7088	0,2439	0,0420	0,0048	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöjarru	0,8507	0,1376	0,0111	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Huomoväbit	0,6918	0,2549	0,0469	0,0058	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suojalaitteet	0,9785	0,0213	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Liityntäkaapelit	0,9861	0,0138	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>YHTEENSÄ</b>	<b>0,0588</b>	<b>0,1667</b>	<b>0,2361</b>	<b>0,2230</b>	<b>0,1579</b>	<b>0,0895</b>	<b>0,0423</b>	<b>0,0171</b>	<b>0,0061</b>	<b>0,0019</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

# LIITE 7: WEIBULL-JAKAUMAN VIKATODENNÄKÖISYYSTAULUKOT

Osan nimi / Vikojen lukumäärä	Weibull kerron $\beta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vahdekaatikko	1,3	0,8825	0,1122	0,0051	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Hydrauliijärjestelmä, vahdekaatikko	1,4	0,0446	0,2467	0,3480	0,2261	0,0964	0,0299	0,0070	0,0011	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Päälaakeri	1,3	0,5971	0,3286	0,0664	0,0075	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Generaattori	1,2	0,9289	0,0689	0,0022	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Taajuusmuuttaja	1	0,8047	0,1746	0,0195	0,0012	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Muuntaja	1	0,9810	0,0188	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mekaaninenjarru	1,4	0,6620	0,2933	0,0413	0,0032	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Jäähdytysjärjestelmä	1,4	0,2915	0,4458	0,2044	0,0503	0,0072	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Anturi	1	0,9888	0,0111	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntölaakerit	1,3	0,5840	0,3366	0,0707	0,0078	0,0007	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöraitisto	1,9	0,0469	0,4062	0,3946	0,1294	0,0206	0,0021	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntömoottori	1,2	0,9585	0,0407	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöjarru	1,4	0,7998	0,1855	0,0141	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapakulman säätö sähkömoottori	1,2	0,4791	0,3774	0,1171	0,0231	0,0030	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapalaakeri	1,3	0,9361	0,0624	0,0015	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Rattaisto	2	0,5702	0,3831	0,0446	0,0021	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Huomiovalot	1	0,6887	0,2574	0,0476	0,0057	0,0007	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suojalaitteet	1	0,9786	0,0212	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Liityntä kaapelit	1	0,9860	0,0138	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>YHTEENSÄ</b>		<b>0,0009</b>	<b>0,0166</b>	<b>0,0751</b>	<b>0,1657</b>	<b>0,2259</b>	<b>0,2146</b>	<b>0,1529</b>	<b>0,0854</b>	<b>0,0400</b>	<b>0,0157</b>	<b>0,0051</b>	<b>0,0016</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>

Liite 7.1 WinWind

Osan nimi / Vikojen lukumäärä	Weibull kerroin $\beta$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Päälaakeri	1,3	0,9567	0,0426	0,0007	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Generaattori	1,2	0,9120	0,0845	0,0034	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Taajuusmuuttaja	1	0,7554	0,2115	0,0299	0,0030	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Muuntaja	1	0,9811	0,0187	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Jäähdytysjärjestelmä	1,4	0,4694	0,4069	0,1066	0,0154	0,0016	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Anturit	1	0,9893	0,0106	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mekaaninenjarru	1,4	0,2325	0,4373	0,2444	0,0708	0,0132	0,0017	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapakulman säätö sähkömoottori	1,2	0,5377	0,3517	0,0943	0,0146	0,0014	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapalaakerit	1,3	0,9469	0,0522	0,0008	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntölaakerit	1,3	0,9050	0,0918	0,0031	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntömoottori	1,2	0,7172	0,2469	0,0326	0,0031	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöjarru	1,4	0,8604	0,1331	0,0064	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Huomiovalot	1	0,6921	0,2548	0,0469	0,0056	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suojalaitteet	1	0,9785	0,0213	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Liityntäkaapelit	1	0,9860	0,0138	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>YHTEENSÄ</b>		<b>0,0205</b>	<b>0,1379</b>	<b>0,2681</b>	<b>0,2725</b>	<b>0,1779</b>	<b>0,0830</b>	<b>0,0295</b>	<b>0,0081</b>	<b>0,0021</b>	<b>0,0003</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Liite 7.2 Siemens

## LIITE 8: KOLMIPARAMETRISEN WEIBULL-JAKAUMAN VIKATODENNÄKÖISYYSTAULUKOT

Osan nimi / Vikojen lukumäärä	Weibull $\beta_1$ kerroin	Weibull $\beta_2$ kerroin	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Vaihdelaatikko	0,4	1,9	0,8580	0,1303	0,0108	0,0009	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Hydrauliijärjestelmä, vaihdelaatikko	0,4	1,9	0,1541	0,3996	0,2730	0,1186	0,0399	0,0117	0,0024	0,0006	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Pääläakeri	0,4	1,9	0,6358	0,2860	0,0660	0,0105	0,0014	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Generaattori	0,4	1,9	0,9064	0,0868	0,0064	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Taajuusmuuttaja	0,4	1,9	0,8013	0,1760	0,0206	0,0019	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Muuntaja	0,4	1,9	0,9503	0,0472	0,0023	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mekaaninenjarru	0,4	1,9	0,7171	0,2361	0,0412	0,0050	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Jäähdytysjärjestelmä	0,4	1,9	0,4844	0,3504	0,1249	0,0334	0,0060	0,0008	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Anturit	0,4	1,9	0,9499	0,0477	0,0023	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntölaakerit	0,4	1,9	0,6272	0,2912	0,0691	0,0111	0,0013	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöratista	0,4	1,9	0,8634	0,1244	0,0112	0,0009	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntömoottori	0,4	1,9	0,9396	0,0569	0,0033	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöjarru	0,4	1,9	0,8062	0,1715	0,0202	0,0020	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapakulman säätö sähkömoottori	0,4	1,9	0,5078	0,3445	0,1151	0,0269	0,0048	0,0008	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapalaakeri	0,4	1,9	0,9123	0,0814	0,0059	0,0004	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Rattaisto	0,4	1,9	0,9403	0,0562	0,0034	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Huomiovalot	0,4	1,9	0,6904	0,2553	0,0474	0,0061	0,0007	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suojalaitteet	0,4	1,9	0,9502	0,0470	0,0027	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Liityntä kaapelit	0,4	1,9	0,9497	0,0480	0,0022	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>YHTEENSÄ</b>			0,0000	0,0005	0,0176	0,0917	0,1860	0,2325	0,1956	0,1308	0,0772	0,0402	0,0176	0,0061	0,0028	0,0007	0,0005

Osan nimi / Vikojen lukumäärä	Weibull $\beta_1$ kerroin	Weibull $\beta_2$ kerroin	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Päälaakeri	0,40	1,90	0,9354	0,0604	0,0039	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Generaattori	0,40	1,90	0,8889	0,1024	0,0080	0,0006	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Taajuusmuuttaja	0,40	1,90	0,7569	0,2086	0,0307	0,0036	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Muuntaja	0,40	1,90	0,9516	0,0461	0,0022	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Jäähdytysjärjestelmä	0,40	1,90	0,6017	0,3050	0,0774	0,0137	0,0022	0,0002	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Anturit	0,40	1,90	0,9504	0,0470	0,0024	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Mekaaninenjarru	0,40	1,90	0,4426	0,3613	0,1457	0,0399	0,0088	0,0014	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Lapakulman säätö	0,40	1,90	0,5114	0,3425	0,1138	0,0268	0,0046	0,0008	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
sähkömoottori																	
Lapalaakerit	0,40	1,90	0,9215	0,0732	0,0050	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntölaakerit	0,40	1,90	0,8826	0,1080	0,0088	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntömoottori	0,40	1,90	0,7099	0,2422	0,0421	0,0053	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Kääntöjarru	0,40	1,90	0,8483	0,1379	0,0127	0,0010	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Huomiovalot	0,40	1,90	0,6922	0,2527	0,0479	0,0065	0,0006	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Suojalaitteet	0,40	1,90	0,9484	0,0489	0,0026	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Liityntäkaapelit	0,40	1,90	0,9497	0,0477	0,0025	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>YHTEENSÄ</b>			<b>0,0007</b>	<b>0,0668</b>	<b>0,2296</b>	<b>0,2823</b>	<b>0,2112</b>	<b>0,1215</b>	<b>0,0554</b>	<b>0,0216</b>	<b>0,0076</b>	<b>0,0024</b>	<b>0,0006</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,0000</b>

Liite 8.2 Siemens