



Tuulivoimatuotannon erityispiirteet ja tilastollinen tarkastelu teknillisen koulutuksen kehittämisessä

Sami Heikkilä

OPINNÄYTETYÖ
Maaliskuu 2024

ÄLYKKÄÄN JA UUSIUTUVAN
SÄHKÖENERGIATUOTANNON YLEMPI TUTKINTO-OHJELMA

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu

Älykkään ja uusiutuvan sähköenergiatuotannon ylempi tutkinto-ohjelma

SAMI HEIKKILÄ:

Tuulivoimatuotannon erityispiirteet ja sen tilastollinen tarkastelu teknillisen koulutuksen kehittämisessä

Opinnäytetyö 119 sivua

Maaliskuu 2024

Opinnäytetyön aiheina oli käydä läpi tuulivoimalaitosten generaattoreiden erityispiirteitä Suomessa esiintyvissä voimalaitoksissa, sekä rakentaa tuleville opintokokonaisuuksille teknistä ja tilastollista lähdemateriaalia. Laitteistojen teknisen tarkastelun ohella tuli käydä läpi generaattoreiden energialähteen, eli tuulen muodostuminen, sekä sen hyödyntämisen tekniikkaa perusymmärryksen luomiseksi.

Tilastollinen tarkastelu on tehty keräämällä tuulivoima-alan toimijoilta tietoa, jonka analyysilla ja keskenään vertailulla haettiin yleiskuvaa erinäisistä esiintyvyyksistä ja trendeistä. Tämä lähestymistapa selvensi myös tulevan metodiikan tutkimista, toimiiko tämäntyyppinen data tulevaisuudessa aihealueen tutkimiseen. Tehty selvitys on käytettävissä opintokokonaisuuksien resurssoinnin apuna korkeakouluissa, kun pyritään priorisoimaan läpikäytäviä teknisiä kokonaisuuksia.

Suurin määrä tietoa työn tilastolliseen tarkasteluun on saatu Energiavirastolta syöttötariffijärjestelmän kautta. Tämän tietokanta tarvitsi tietyiltä osin täydennystä teknisiin yksityiskohtiin, jotka vaativat merkittävän määrän työtä, mutta palkitsivat taas käsittelyn laadulla. Tämä materiaali päättyy vuoteen 2018, jolloin tämän ajanhetken jälkeen tapahtuneet kehityskulut eivät omaa yhtä laajaa tilastollista pohjaa. Näitä tapahtumia on kuitenkin ristiin verrattu Tuulivoimayhdistyksen tämän päivän tilastotietojen kanssa sekä verrattu tätä kautta ennusteiden paikkansapitävyyttä. Tällä pyritään varmistamaan, olisiko vastaavan datan keruu tänä päivänä kannattavaa vastaavien ennusteiden tekemiseen.

Merkittäväksi jatkokehityskohteeksi tunnistetaankin huomattavasti laajempi tilastanalyysi myös muista tiedonlähteistä aihealueeseen liittyen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Smart Renewable Energy Production

SAMI HEIKKILÄ:

Special Factors of Wind Power Production and its Statistical Analysis for Development of Education in Universities of Applied Sciences

Master's thesis 119 pages
March 2024

Subject of this thesis was different generator sets in wind power plants located in Finland. Second subject was to build material for future courses regarding the technical aspects of the mentioned subject and to perform statistical analysis regarding the matter. Outside of the technical study, the thesis goes through the formation of wind and how to use it for electric energy production.

Statistical analysis required significant amount of data gathering. The analysis was used to clarify possible trends and to study if similar data could be used for following the field in future. Combination of these elements can be used to plan the studies in universities of applied sciences as the limited resources are being prioritized.

The biggest data amount for this work was acquired from Finnish Energy Authority through their Feed-in Traffic databases. Database was supplemented with necessary technical details so that it could be used for the analysis required by this thesis. This required substantial amount of work, but it also rewarded the author with new information which would not have been available otherwise. As the database is limited to year 2018 the forecasting tests were performed against the historical data from Finnish Wind Power Association. The matches of forecasts with the facts what happened proved to be a match by most parts.

Significant area for future development was recognized to be another statistical analysis of data from other sources.

Key words: wind power, renewables, generators,

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	10
2	TUULEN MUODOSTUMINEN JA SEN TEHO	11
2.1	Ilmanpaine	11
2.1.1	Ilmanpaineen vaakasuuntaiset muutokset	12
2.1.2	Matala- ja korkeapaineet	14
2.2	Ilmavirtauksien voimat	15
2.2.1	Keskihakuvoima	15
2.2.2	Coriolisvoima	16
2.2.3	Kitka	17
2.2.4	Gravitaatio	18
2.3	Ilmavirtauksien voimien yhteisvaikutukset	19
2.3.1	Hydrostaattinen tasapaino	19
2.3.2	Geostrofinen tuuli	20
2.3.3	Gradienttituuli	21
2.3.4	Tuuli rajakerroksessa	22
2.3.5	Terminen tuuli	24
2.3.6	Ilmavirtaustyyppien yhteenveto	25
2.4	Globaalit ilmavirtaukset	26
2.4.1	Maapallon yksinkertaistettu malli tuulien osalta	26
2.4.2	Painealueet, jotka ovat osittain pysyviä	28
2.5	Tuulen teho	30
2.5.1	Ilmavirtauksessa esiintyvä kineettinen energia ja teho	30
2.5.2	Tehon muodostaminen kineettisestä energiasta	33
2.5.3	Betzin laki	36
2.5.4	Roottorirakenteen vaikutus sähköntuotantoon	38
2.6	Hyödynnettävän tehon määrän säätäminen	40
2.6.1	Voimalaitoksen mekaanisen säädön vaikutus sähköntuotantoon	41
2.6.2	Tuuliturbiinin kärjen nopeussuhde	42
2.6.3	Pintasuhde	45
2.6.4	Tehon tuoton mekaaninen säätäminen	45
3	TUULIVOIMALAITOSTEN KÄYTETYT GENERAATTORITYYPIT	48
3.1	Tuulivoimalaitosten rakenne	48
3.1.1	Tuulivoimalaitosten vaihdelaatikat	50
3.1.2	Generaattoreiden jännitteet ja sähkön siirto kantaverkkoon	53
3.1.3	Siemensin SWT-2.3-108 rakenne	55

3.1.4	Hyundai HQ2000 datalehti	56
3.1.5	Lagerwey L100 2.5 MW datalehti	56
3.1.6	Enerconin käyttämä tekniikka	57
3.2	Pyörivän sähkökoneen rakenne	58
3.2.1	Sähkömagneettinen induktio ja sen aiheuttamien voimavaikutuksien fysikaalinen perusta	59
3.2.2	Yksinkertainen generaattori magneettisten vuorovaikutuksien alaisena.....	62
3.2.3	Magneettivuon määrä eri materiaaleissa.....	65
3.3	Kolmivaihekoneiden perusteet	66
3.3.1	Kolmivaihekoneen staattorin perusrakenne.....	66
3.3.2	Nimellistehon määritelmä	69
3.4	Epätahtikone	69
3.4.1	Epätahtikoneen periaate tuulivoimaloissa	70
3.4.2	Epätahtikoneen perusrakenne.....	70
3.4.3	Epätahtikoneen ekvivalenttipiiri	72
3.4.4	Epätahtikone generaattorina	75
3.4.5	Epätahtigeneraattorin koonti tuulivoimakäytössä	77
3.5	DFIG-generaattori	78
3.5.1	Liukurengasmallisen roottorin rakenne.....	78
3.5.2	Verkkoon kytkentä ja toimintaperiaate.....	79
3.5.3	DFIG-generaattorin koonti	82
3.6	Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tuulivoimalassa	83
3.6.1	Tahtikoneiden toimintaperiaate.....	83
3.6.2	Tahtikoneiden roottorien rakenteet.....	84
3.6.3	Tahtikoneen roottorin ja staattorin yhteistoiminta	86
3.6.4	Tahtigeneraattorin yhteenveto.....	91
3.7	Kestomagneettigeneraattorin käyttö tuulivoimalassa	92
3.8	Muut – ei käsiteltävät generaattorirakenteet	93
4	KERÄTTYÄ DATAA TUULIVOIMALAITOKSISTA	95
4.1	Toimijan yksi haastattelun tietoja	95
4.1.1	Toimijan kanssa tehty erillinen haastattelu	95
4.1.2	Toimijan haastattelun tuloksia Tuulivoimajärjestelmät-kurssin yhteydessä.....	97
4.2	Energiaviraston tilastotiedot syöttötariffin tietokannoista.....	98
4.2.1	Syöttötariffin perusteella tehtävä korkeusennuste	99
4.2.2	Syöttötariffin perusteella ennakoitava tehotason kasvun ennuste tuulivoimaloissa.....	99
4.2.3	Syöttötariffin perusteella ennustettava tuulipuistojen voimalaitoksien määrä	100

4.2.4	Generaattorien tyypit syöttötariffin sisällä	101
4.2.5	Syöttötariffijärjestelmässä olevien valmistajien volyymit... ..	103
4.2.6	Voimalaitosten jännitetaso.....	103
4.2.7	Valmistajien käyttämät generaattorit syöttötariffin piirissä olevissa voimalaitoksissa	104
4.3	Suomen tuulivoimayhdistyksen julkiset tilastot vuoden 2023 tilanteesta.....	104
4.3.1	Tuulivoimayhdistyksen tilastot	104
5	POHDINTA	109
5.1	Kerätyn tiedon hyödyntäminen ristiin vertailulla	109
5.2	Vaikutus opetukseen.....	109
5.3	Tiedonkeruun haasteet	110
5.4	Poikkeamat ennakko-olettamista	112
5.5	Maailmanpolitiikan vaikutus kehityskulkuihin	112
5.6	Havaintoja suuren yleisön ymmärryksen ja mielikuvien luomista haasteista tuulivoima-alalla	113
5.7	Havainnot saatavilla olevasta opintomateriaalista.....	114
5.8	Työ yleisesti	114
	LÄHTEET.....	116

LYHENTEET JA TERMIT

A	Pinta-ala
B	Vuon tiheys
E	Jännite
F	Voima
F_c	Coriolisvoima
F_g	Gravitaatiovoima
F_k	Kitkavoima
F_{kh}	Keskihakuvoima
F_{og}	Painegradienttivoima
f	Taajuus
f_k	Käämityskerroin
Φ	Magneettivuon tiheyden vuo tietyn pinnan läpi
Φ_m	yksittäisen magneettinavan päävuo
I	Virta
$i_L(t)$	Kelan läpi kulkevan virran funktio
k	Kerroin
L	Induktanssi
λ	Nopeussuhde
M	Momentti
M_s	Käynnistysmomentti
M_h	Huippumomentti
m	Massa
\dot{m}	Massavirta
N	Kierrosmäärä
n	Pyörimisnopeus
P	Teho
p_{avg}	Ilmanpaineen suuruus merenpinnassa
ρ	Ilmantiheys
R	Resistanssi
δ	Napakulma
s	Jättämä
T	Momentti
t	Aika

U	Jännite
$u_L(t)$	Kelan ylitse vaikuttavan jännitteen funktio
μ	Permeabiliteetti
v	Nopeus
W_0	Kineettisen energian suuruus
X	Reaktanssi
Hajavuo	Se osa magneettikentästä sähkökoneessa, joka kulkee koneen toiminnan kannalta ei tarkoituksenmukaisissa rakenneosissa
Kineettinen energia	Massallisten yksiköiden liikkeessä oleva energia
Konvertteri	Tehoelektroniikan muodostama kokonaisuus, toiminnaltaan taajuusmuuttaja
Lidar	Valotutka, joka laservalon heijastuksia käyttämällä pysyy mittamaan tietyllä tarkkuudella tuulennopeutta
Naselli	Tuulivoimalaitoksen konehuone tornin päällä, johon kiinnittyy sen roottori
Rajakerros	Virtausdynamiikan termi kuvaten kaasun lähintä rajapintaa sen kerroksesta
Rautahäviöt	Magneettikentän alkeismagneettien kääntämisestä johtuva häviöllinen komponentti
Roottorirakenne	Tuulivoimalaitoksen navan ja lapojen muodostama kokonaisuus
Sodar	Äänitutka, jota voidaan käyttää mittamaan keskimääräisiä turbulensseja ilmakehän rajakerroksessa

Staattorin urat	Sähkökoneen kiinteän osan rakenteen rakenteellinen yksityiskohta, johon käämitys on asennettavissa
Synkroninopeus	Sähkökoneen luontainen nopeus sille syötetyllä taajuudella
Sähkömagneettinen induktio	Magneettikentän aiheuttama jännitteen indusointi tietyissä olosuhteissa toiseen sähköä johtavaan kappaleeseen

1 JOHDANTO

Ilmavirtaus koostuu energiantuotannon kannalta massallisten hiukkasten kineettisestä energiasta. Tällä energialla on merkittävä potentiaali sähköenergian tuotannossa, jota on teollisessa mittakaavassa lähdetty hyödyntämään viime vuosikymmeninä. Kineettisen energian osuuden talteenotto on suhteellisesti noussut energijärjestelmässämme hyvin merkittävään rooliin.

Tuulen kineettinen energia toimii nykyisten tuulivoimaloiden energialähteenä. Tämä poikkeaa energialähteenä merkittävästi perinteisenä pidetyistä voimalaitoksista, joissa energian virtaus on mahdollista pitää prosessin kannalta erittäin vakaana. Tämä tarkoittaa generaattoreiden kannalta tasaista pyörimisnopeutta, eli yleisimmin käyttöön on perinteisissä voimalaitoksissa valikoitunut tahti-generaattoreita.

Tuuli muodostuu erityyppisten ilmiöiden kautta, joita ymmärtämällä on mahdollista tukea omaa ymmärrystä tuulivoimalan valittujen teknisten ratkaisuiden perustelussa. Erilaiset tekniset ratkaisut voimalaitoksessa mahdollistavat erityyppiset hyödyntämispotentiaalit ja tavat tuulella olevan kineettisen energian talteenottoon.

Merkittävästi vaihtelevat tuotanto-olosuhteet ja investoinnin taustalla olevat tuotto-odotukset ohjaavat hankekehittäjiä voimalaitoksien osalta erityyppisiin valintoihin, jotka johtavat erityyppisiin generaattorirakenteisiin tuulivoimaloissa.

Työ käy läpi tuulen syntymekanismit lyhyesti, joilla avataan tarve erityyppisille teknisille ratkaisuille. Tämän jälkeen käsitellään tuulivoimalan teknistä rakennetta keskittyen pääsääntöisesti niiden generaattoreihin. Tehoelektroniikan, sähkönsiirron ja mekaniikan osuudet ovat rajattu pääosin työn ulkopuolelle. Niihin viitataan siinä määrin, kuin on tarpeen generaattoreihin liittyvien ratkaisuiden ymmärtämiseksi.

Viimeisenä kokonaisuutena on haastatteluiden ja tilastojen läpikäynti tuulivoimalaitosten teknisistä rakenteista. Tilastot käydään läpi kvantitatiivisten menetelmien kautta, josta siirrytään lähteiden ristiin vertaamiseen.

2 TUULEN MUODOSTUMINEN JA SEN TEHO

Tuulen muodostumisen mekanismit ovat olennaista pohjatietoa, jonka perusteella tuulivoimalaitoksien rakenteet ovat paremmin ymmärrettävissä.

Kun suhteutamme ilmamolekyylien liikkeen maapallon kiinteän massan pyörimisliikkeeseen, saame aikaiseksi erilaisia nopeusvektoreita ilmamolekyyille. Tätä ilmiötä ilmamolekyylien osalta kutsutaan tuuleksi. Nämä vektorit muodostuvat taas useammasta erityyppisestä luonnonilmiöstä, jotka muodostavat merkittävän ilmastoomme vaikuttavan kokonaisuuden. (Korpela A 2016, sivu 7)

Tuulen energia on pääosin peräisin aurinkoenergiasta. Lähes puolet aurinkoenergiasta sitoutuu lämpönä maapallon pintaan, joka taas säteilee pitkäaaltoista lämpösäteilyä takaisin avaruuteen. Noin kahdesta kolmeen prosenttia auringosta tulevasta energiasta muuttuu liike-energiaksi. (Tuulivoimayhdistys 1.3.2024 <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/mita-tuuli-on-2/mita-tuuli-on-2///>)

Ilmavirtojen liikkeeseen vaikuttavia voimia voidaan luokitella viisi kappaletta:

- Painegradienttivoima, joka on merkittävin tekijä
- Keskihakuvoima, eli ilman virtaus jotain muuta kuin suoraa reittiä pitkin
- Coriolisvoima, näennäisvoima joka johtuu maapallon pyörimisestä akselinsa ympäri
- Kitka, eli maapallon pintamuotojen aiheuttamat pyörreviskositeetit
- Gravitaatio, maan painovoima

(Korpela A 2016, sivut 7...30)

2.1 Ilmanpaine

Ilma kohdistaa voiman kaikkiin kappaleisiin joiden kanssa se on kontaktissa. Ilman päästessä kontaktiin fyysisen kappaleen kanssa, kohdistuu siihen voima, jota kutsutaan ilmanpaineeksi. Ilmanpaineeseen vaikuttavat ilmamolekyylien massa, gravitaatio ja lämpötila.

Keskimääräinen ilmanpaine määritetään yleisimmin bareina, mutta sen SI-yksikkö on pascal (N / m²). Pascalin ja barin välinen riippuvuus on 1 Pa = 0,01 mbar. p_{avg} merenpinnan tasolla on:

$$p_{avg} = \frac{1.0328746 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{10^{-4} \text{ m}^2} = 101\,325 \text{ Pa}$$

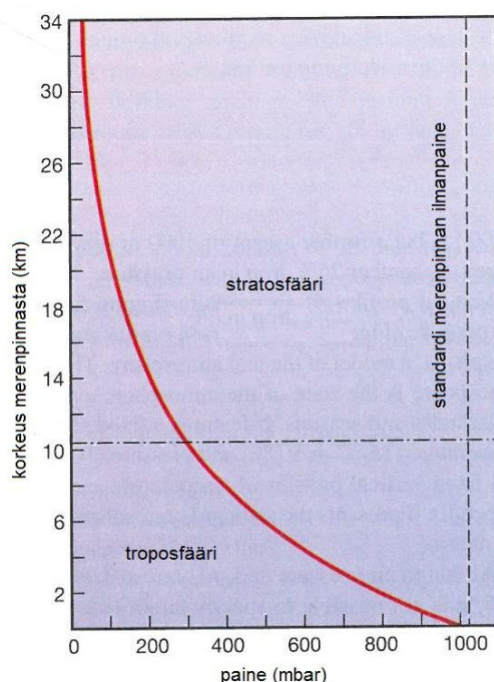
Keskimääräinen ilmanpaine merenpinnan tasolla on 1,01325 bar.
(Korpela A 2016, sivu 7)

Ilmanpaineen erot ilmakehässä johtavat diffuusioon, jossa korkeampi paine pyrkii tasoittumaan matalamman paineen kanssa. Ilma on hyvin voimakkaasti puristuva kaasu, joka on havaittavissa ilmakehän eri korkeuksilla esiintyvistä muuttuvasta ilmanpaineesta. Toinen hyvin arkinen käytännön sovellus tälle ilmiölle on esimerkiksi auton tai polkupyörän renkaan täyttäminen ilmanpainetta korkeampaan paineeseen. Ilmanpaineen muutos kuvataan ilmakehässä pystysuuntaisena muutoksena, jossa ilmakehää meteorologiassa mallinnetaan standardilla ilmakehämallilla. Tämä malli perustuu olosuhteiden keskiarvoistamiseen kaikilla leveyspiireillä. Erilaiset esitettävät mallit ovat verrannollisuuksia tähän malliin, jossa merenpinnan tason lämpötila on 15 °C ja ilmanpaine on 1013,25 mbar. (Korpela A 2016, sivu 7)

2.1.1 Ilmanpaineen vaakasuuntaiset muutokset

Vaakasuuntaiset muutokset ovat useimmiten kiinnostavimpia meteorologiassa, koska ne vaikuttavat merkittävästi säätilaan. Vaakasuuntaiset ilmanpaineen muutokset ovat huomattavasti pienempiä kuin pystysuuntaiset.

Pystysuuntaiset muutokset ovat kuvan 1 mukaisesti satoja mbareja kilometrien matkalla standardi ilmakehämallissa. Vaakasuuntaiset erot taas ovat yleensä korkeintaan 100 mbarin suuruusluokassa riippumatta kohteiden etäisyydestä. Tämä ilmanpaineen vaakasuuntainen ero muodostaa hyvin merkittävän vaikutuksen vallitsevaan säätilaan. (Korpela A 2016, sivu 8)



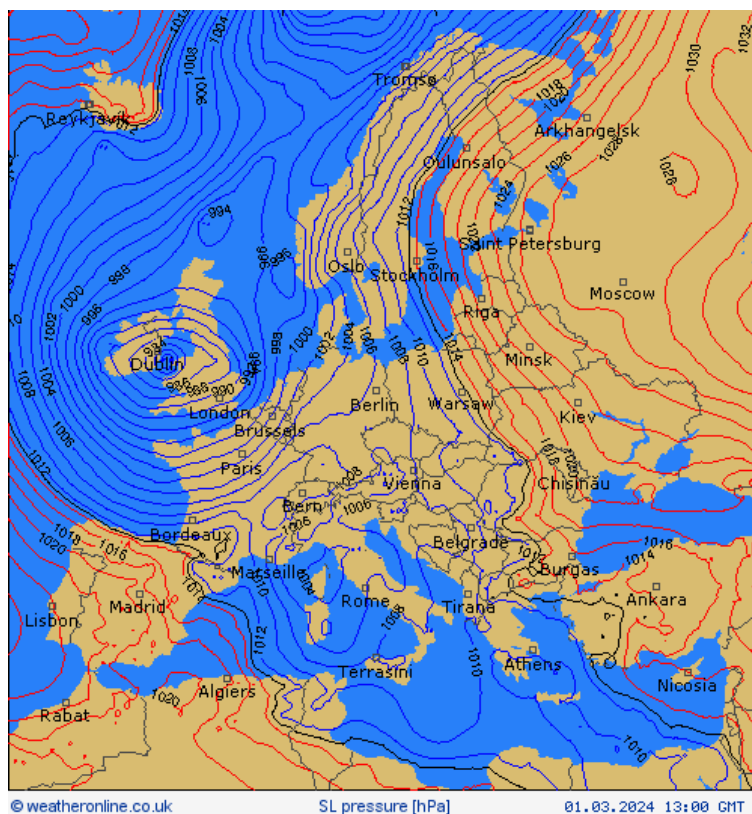
KUVA 1. Ilmanpaineen ja korkeuden välinen riippuvuus standardin ilmakehän mallissa (Korpela A 2016, sivu 10)

Vaakasuuntaisten ilmvirtausten oletetaan yleensä olevan hydrostaattisessa tasapainossa. Tämä tarkoittaa ilmanpaineen aiheuttamien painegradienttivoimien olevan gravitaatiovoimien kanssa tasapainossa. Painegradientilla tarkoitetaan kahden eri alueen välistä paine-eroa, joka saa aikaiseksi ilmvirtauksen suuremmasta paineesta kohti pienempää. Gravitaatiovoimat tarkoittavat painovoiman aiheuttamaa voimaa massallisiin ilmamolekyyleihin. Kuvassa 2 ovat ilmanpaineen lukemat tarkoittavat painetta merenpinnan tasolla, eli ne ovat aina redusoituja suureita.

Ilmanpaineeseen vaikuttaa ilmankosteus. Vesihöyryn lasketaan kuuluvan ilmamolekyyleihin ja sen molekyylimassa on pienempi kuin hapella ja typellä, jotka muodostavat suurimman osan ilman koostumuksesta. Ilmankosteuden lisääntyminen tarkoittaa, että vesimolekyyli korvaa ilmassa joko hapen tai typen, jolloin ilmanpaine pienenee. Mikäli verrataan kahta samassa lämpötilassa olevaa ilmaa, on niistä kuivempi ilma painavampaa. (Korpela A 2016, sivu 10)

2.1.2 Matala- ja korkeapaineet

Matala- ja korkeapaine kuvataan kuvan 2 mukaisesti tasa-arvokäyrien, eli isobarien avulla. Kulkiessa käyrää pitkin säilyy ilmanpaine kartalla samana. Olennaista on ilmassan liikkeen kannalta paineen muutos pituusyksikköä kohden, sillä tämä painegradientiksi kutsuttu suure määrää merkittävältä osin tuulen nopeuden.



KUVA 2. Ilmanpainealueiden erot esimerkkinä ([SL pressure Europe - Forecast maps - weather forecast \(weatheronline.co.uk -\)](https://www.weatheronline.co.uk/maps-weather-forecast) Viitattu 1.3.2024)

Kuvan 2 esimerkissä on havaittavissa eri etäisyyksillä olevia isobareja. Mitä lähempänä nämä ovat, sen suurempi on ilmanpaineen ero tietyllä matkalla, jolloin myös tuulen nopeus tulee suuremmaksi. Matemaattisesti asiaa ajatellen voisi puhua ilmanpaineen derivaatista, jossa tarkastelun kohteena on merenpinnan tasoon redusoidun paineen muutos tietyllä etäisyydellä.

Mikäli painegradienttien korkea- ja matalapaineeseen hakee verrannollisuutta tai käytännön esimerkkiä, voisi kuvitella karttapinnan muovikalvona, jonka päällä on

vettä, matalapaine on painauma kalvossa, jolloin muualla oleva korkeampi paine pyrkii täyttämään tämän alueen. Tämä korkeampi paine esiintyy kalvolla suurempana potentiaalienergiana, joka pyrkii täyttämään matalamman potentiaalienergian alueen.

2.2 Ilmavirtauksien voimat

Tässä luvussa tarkastellaan erinäisten ilmavirtauksien vaikuttavat voimat ja ilmiöt. Tämän kokonaisuuden ymmärtäminen auttaa suuressa mittakaavassa ymmärtämään tuulen muodostumista.

2.2.1 Keskihakuvoima

Newtonin I lain mukaan kohdistuu kiihtyvässä liikkeessä olevaan kappaleeseen jokin nollasta poikkeava nettovoima. Nopeuden muutos voi tarkoittaa kahta asiaa, joko vauhdin tai suunnan muutosta. Kaarevalla liikeradalla oleva kappale on aina kiihtyvässä liikkeessä, sillä sen suunta muuttuu jatkuvasti.

Keskihakuvoima pitää kaarevalla liikeradalla olevan kappaleen liikeradallaan. Mikäli ajattelemme ympyrän kehää kiertävää kappaletta, jolta katoaisi keskihakuvoima, lähtisi se tangentin suuntaan liikkeeseen. Käytännön esimerkkejä tästä on esimerkiksi moukarinheitto, tai auton kitkavoima sen ajaessa kaarteessa.

Ilmavirtojen liike on harvoin suoraa, jolloin niissä keskihakuvoima on lähes aina läsnä. Ilmavirroissa tämä voima on kuitenkin seuraus muiden voimien välisestä epätasapainosta. (Korpela A 2016, sivu 15)

Keskihakuvoiman suunta on aina kohti pyörivän liikkeen keskipistettä. Ilmavirtauksessa ei varsinaisesti ole sisäänpäin pitävää kitkavoimaa, vaan painegradientin ja corioliksen voimat poikkeavat toisistaan. Tällöin ilmavirtauksen suunnasta tulee kaareva painegradientin saadessa ilma liikkeelle ja coriolisvoiman kääntäessä ilmavirtausta. (Korpela A 2016, sivu 15)

2.2.2 Coriolisvoima

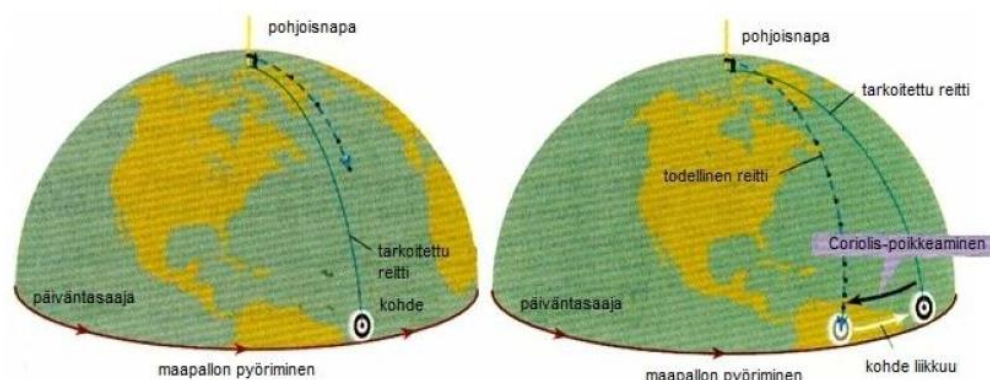
Coriolisvoima on maapallon muodosta ja sen pyörimisestä johtuva näennäisvoima. Voiman ymmärtämiseksi maapallo on käsitettävänä kiinteänä kappaletena, jolla on siihen löyhästi mekaanisesti kytkeytynyt kaasukehä. Asiaa voi havainnollistaa kahdella eri tarkastelupisteellä.

Tarkastellaan hypoteettista tilannetta, jossa maan pyörimisliike on pysäytetty ja se käynnistetään uudestaan. Kiertoradalla paikallaan oleva tarkkailija seuraa pinnalla olevaa pistettä, jossa seisoo henkilö. Jonkin ajan kuluttua on henkilön asema muuttunut maapallon pyörimisliikkeestä johtuen, koska hän seisoo kiinteänä osana maapallon pintaa. Maapallon kaasukehä on löyhemmin kiinni maanpinnassa, jolloin kiertoradalla olevan tarkkailijan mielestä kaasukehän molekyylit eivät ole vielä liikkuneet, vaan seuraavat heikomman mekaanisen kytkennän vuoksi myöhässä pinnan liikettä.

Toisena esimerkkinä toimii tilanne, jossa maapallo pyörii ja samat tarkkailupisteet esiintyvät. Maapallon ollessa liikkeessä ja tuulen käydessä kohti pohjoista, on kiertoradalla olevan tarkkailijan mielestä tuulen suunta edelleen sama, mutta maan pinnalla olevan henkilön mielestä tuulen suunta kääntyy.

Coriolisvoimasta voi täten puhua näennäisvoimana, jossa eri pisteissä olevat tarkkailijat huomaavat liikkeen eri tavoin. Tämä havainto riippuu etäisyydestä maapallon napoihin. Päiväntasaajalla maan pinnalla olevan tarkkailijan kehänopeus on suurimmillaan, noin 1670 km/h, kun taas navoilla tarkkailija käytännössä pyörii paikallaan hitaasti 24 tunnin aikana.

Nopeusero on esitettävissä esimerkillä, jossa nuoli ammutaan pohjoisnavalta kohti päiväntasaajaa. Ajanhetkellä nolla tähdätään taulua päiväntasaajalla. Nuolen lähtiessä liikkeelle ei nuolella ole kehänopeutta ja saapuessaan päiväntasaajalle on taulu pyörähtänyt pois alta. Tuulien kannalta tämä vaikuttaa niiden virtauksien kiertosuuntaan matala- ja korkeapaineekeskusten ympärillä.



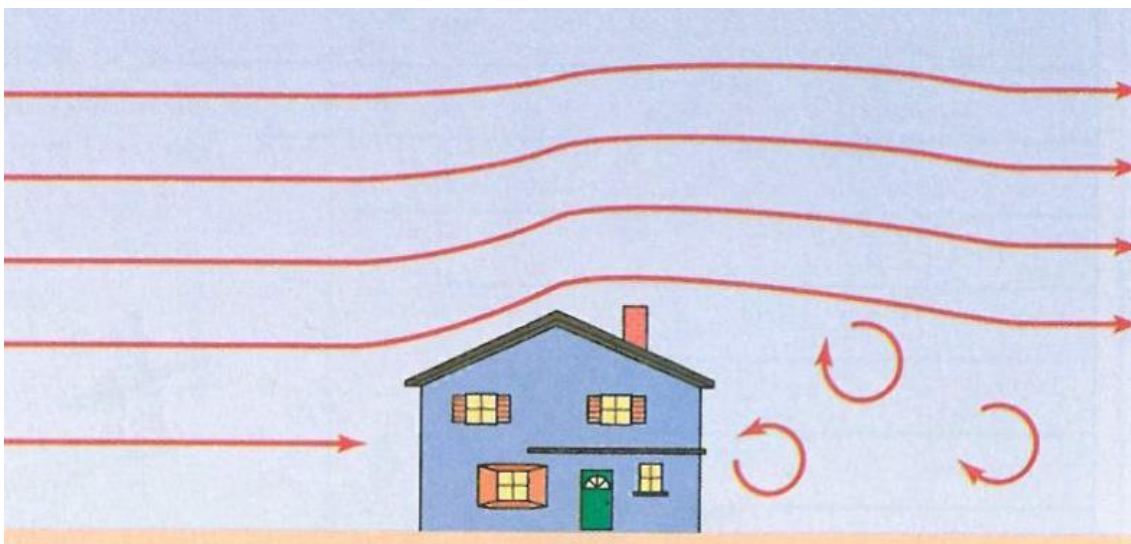
KUVA 3 Coriolisvoima ja navoilta ammuttu nuoli (Korpela A 2016, sivu 19)

Coriolisvoiman ilmiö vahvistuu ilmavirran nopeuden kasvaessa, koska ilmamolekyylit liikkuvat suuremman matkan aikayksikössä. Eli mitä suurempi pohjois-etelä-välinen matka tapahtuu aikayksikössä, sen suurempi poikkeama tarkastelupisteiden välisessä kehänopeudessa toteutuu. Coriolisvoima poikkeuttaa pohjoisella pallonpuoliskolla ilmavirtauksia kulkusuunnassaan oikealle ja eteläisellä pallonpuoliskolla kulkusuunnassaan vasemmalle. (Korpela A 2016, sivut 16...20)

2.2.3 Kitka

Tuulivoimalle on Suomessa erityisen hyödyllistä voimaloiden napakorkeuden nousu. Suomen hyvin metsäinen maasto hidastaa tuulen nopeutta. Mitä korkeammalle maanpinnasta nousee, sen pienempi on kitkan vaikutus tuulen nopeuteen.

Tuulen kitkasta puhuessa kyseessä ei ole varsinaisesti hankauskitka, vaan pyöriviskositeettien aiheuttamat energiamenetykset ilmavirtauksessa. Tilanne voidaan havainnollistaa kuvalla 4. (Korpela A 2016, sivut 20...21)



KUVA 4 Pyörreviskositeetin vaikutus ilmavirtaukseen (Korpela A 2016, sivu 21)

Noustessa korkeammalle maan pinnasta, noin 1 km korkeudessa pyörreviskositeetti ei enää vaikuta ilmavirtaukseen. Pyörreviskositeettien pienentyminen johtaa lisääntyviin tuulennopeuksiin korkeammalla, jolloin tuulivoimaloiden kannalta voimalaitoksen napakorkeuden nostaminen lisää tuulesta saatavaa energiaa merkittävästi. (Korpela A 2016, sivut 20..21)

2.2.4 Gravitaatio

Ilma muodostuu massallisista hiukkasista, joihin vaikuttaa painovoima. Hydrostaattisessa tasapainossa oletetaan painegradienttivoiman kumoavan painovoiman vaikutuksen.

Käytännössä kuitenkin esiintyy esimerkiksi syöksyvirtauksia, kun esimerkiksi pitkän hellejakson jälkeen esiintyy ukkosta. Tällöin pystysuuntainen ilmavirtaus tulee suureksi, jolloin pystysuuntaisissa voimissa on voimakas epätasapaino.

Voimakas paikallinen haihtuminen voi myös pudottaa ilmantiheyttä merkittävästi ilmakehän alaosassa, jolloin yläpuolella oleva suuremman tiheyden omaava ilma pyrkii täyttämään tämän tilan. Tällöin syntyy ilmavirtaus alaspäin.

Tässä tilanteessa ilmavirtauksessa korkeammalla oleva raskas ilma putoaa gravitaation seurauksena suurella voimalla alaspäin kääntyen maan pinnan kohda-

nessaan vaakasuoraksi. Tätä ilmiötä kutsutaan syöksyvirtaukseksi, joka voi paikallisesti aiheuttaa merkittävää tuhoa nopeuden noustessa jopa 50 m/s tasolle. (Korpela A 2016, sivut 22...23)

2.3 Ilmavirtauksien voimien yhteisvaikutukset

Ilmavirtauksien voimia käsitellessä tulee ajatusmaailma muodostua voimavektoreista, joiden suuruudella ja suunnalla saadaan perusteltua liike. Aina kun tarkasteltavasta pisteestä ulospäin osoittavien voimavektorien summa poikkeaa nolasta, on tarkastelupisteellä liikkeen aiheuttava voimavaikutus.

2.3.1 Hydrostaattinen tasapaino

Edellä todettiin pystysuoran painegradientin olevan ilmakehän ominaisuus. Mikäli painegradientti kohdistaa aina voiman ilmasoluun, nousee kysymyksenä että miksi voima ei tasaannu ajan suhteen.

Asiaa voidaan tarkastella gravitaation kautta. Ollessamme lähempänä merenpintaa, vaikuttaa yksittäiseen ilmasoluun suurempi voima ja sen enemmän yläpuolella on ilmaa joka sitä painaa alaspäin. Eli tätä kautta ilma jakautuu ilmakehään siten että matalimmalla kohdalla on suurin määrä ilmaa, kun taas korkeammalla ilman tiheys on heikompi (Korpela A 2016, sivu 23-24)

Usein ajatellaan ilmantiheyden olevan referenssitasoltaan merenpinnassa absoluuttinen maksimi, jota käytetään hyvin monessa ohjausjärjestelmässä maksimireferenssinä ilmanpaineesta. Tämä on yleinen puute esimerkiksi diesel-mootto-
reiden ohjausyksiköissä, joissa ei useinkaan huomioida merenpinnan alapuolelle mentäessä vaikuttavia paineita ja ne aiheuttavat ohjausyksikölle virhetilan.

Hydrostaattinen tasapaino on pystysuoran painegradientin ja gravitaation tasapainotila. Ilmaa alaspäin painava gravitaatio on tällöin tasapainossa sitä ylöstyöntävän painegradientin kanssa, jolloin ilmassa ei tapahdu liikettä. Tämä tasapainotila ei kuitenkaan estä liikettä, joka voi tapahtua pystysuunnassa. Eli tasa-

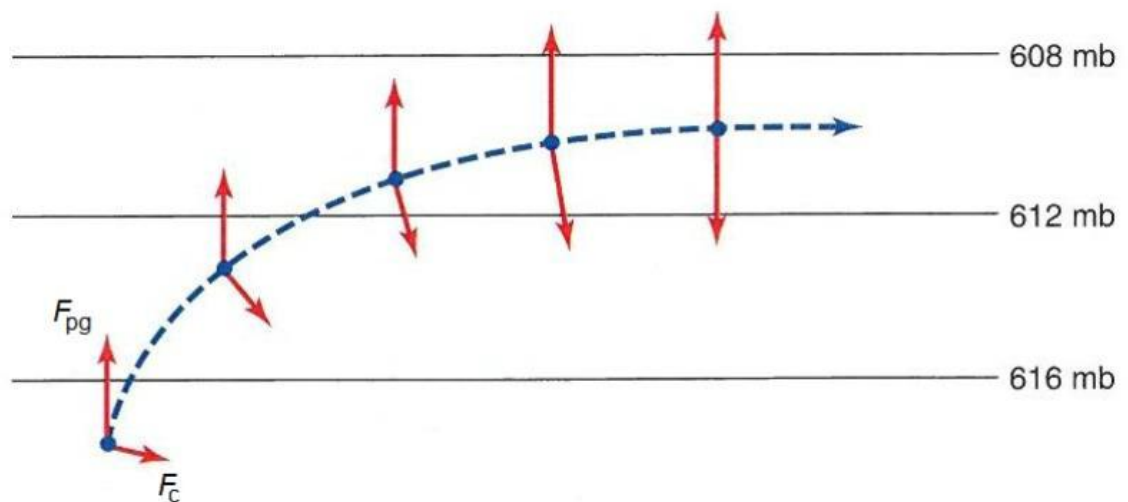
painotila voi olla voimassa myös liikkuvassa ilmamassassa, jolloin liikkeen aiheuttaa jokin muu voimakomponenttien epäsymmetria. (Korpela A 2016, sivu 23-24)

2.3.2 Geostrofinen tuuli

Geostrofiseksi tuuleksi kutsutaan vaakasuoraa ilmapvirtausta suorista isobareista pitkin kulkevana rajakerroksen yläpuolella olevaa ilmapvirtausta. Jotta virtauksen reitti säilyy suorana, on kyseessä oltava voimatasapaino.

Tämä tuulen tyyppi syntyy rajakerroksen yläpuolella olevan ilmasolun lähtiessä painegradienttivoiman seurauksena liikkeelle, jossa alussa virtaus suuntaa kohtisuoraan isobareja vastaan. Virtausnopeuden kasvaessa coriolisvoiman vaikutus suurenee ja virtaus lähtee kääntymään. Kääntymisen suunta riippuu siitä, kummalla puolella päiväntasaajaa tarkastelupiste on.

Kun painegradienttivoima ja coriolisvoima saavuttavat yhtäsuuruuden, on saavutettu tasapainotila, jossa ilma virtaa isobarien suuntaisesti kuvan 5 mukaisesti.



KUVA 5. Geostrofisen tuulen synty pohjoisella pallonpuoliskolla (Korpela A 2014)

Geostrofisessa tuulessa vaikuttaa voimien välinen tasapainotila, jolloin ilmapirran reitti on suora. Suorat isobarit ovat vaatimus geostrofiselle tuulelle, muussa tapauksessa tasapainotilaa ei saavuteta. Käytännön kannalta tämänkaltaisen tuuli

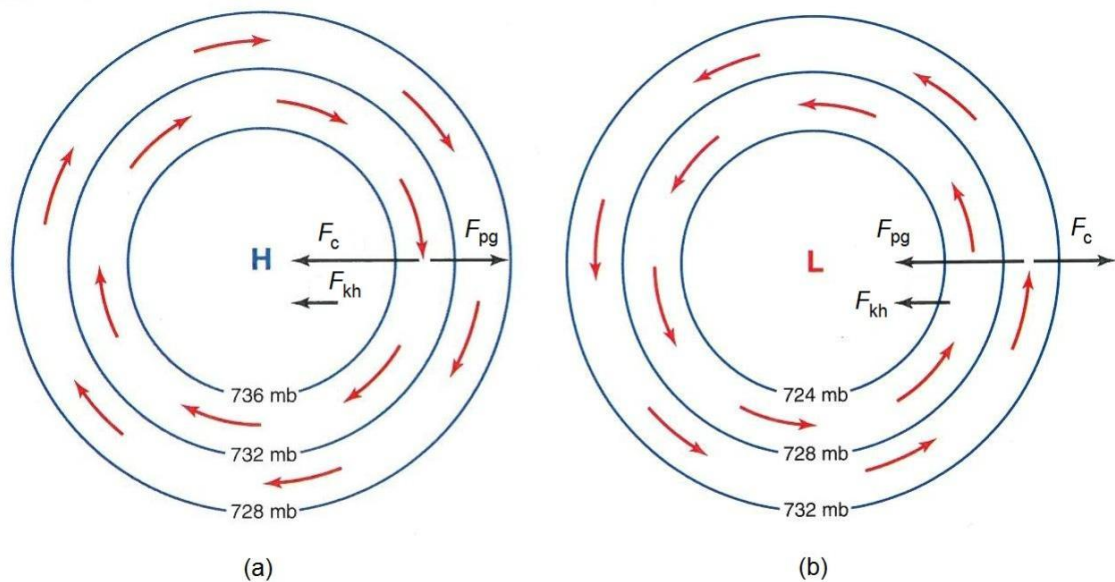
on harvinainen, mutta niitä esiintyy ilmakehän yläosissa. Vaikkakin tämä virtaustyyppi on harvinainen, on sillä kuitenkin roolinsa voimalan kohdeanalyysissä. (Korpela A 2016, sivu 24)

2.3.3 Gradienttituuli

Gradienttituuli on vaakasuora ilmavirtaus kaarevia isobareja pitkin kulkevana rajakerroksen yläpuolella. Geostrofiseen tuuleen nähden ero on ilmavirtaukseen vaikuttavissa nettovoimissa, joka näkyy tuulen kaarevana reittinä. Gradienttituulta tarkasteltaessa on huomioitava painegradientti- ja coriolisvoiman lisäksi keskihakuvoima.

Gradienttituulen avulla on pääteltävissä matala- ja korkeapaineen keskuksia kiertävien virtauksien suunnat ilmakehässä. Vaikkakin gradienttituulia esiintyy ainoastaan rajakerroksen yläpuolella, säilyy keskusta kiertävien virtauksien kiertosuunta samana siirryttäessä rajakerrokseen.

Kuvan 6 mukaisissa tilanteissa tarkasteltaessa ilmanvirtausta, on lähtökohtana painegradientti- ja coriolisvoiman vastakkaisuus. Tämän aiheuttajana on coriolisvoiman vaikutus, joka kääntää ilmavirtausta pallonpuoliskosta riippumatta aina samankaltaisesti. Koska painegradienttivoiman ja coriolisvoiman on oltava vastakkaissuuntaisia, painekeskuksen kiertosuunta kääntyy vastakkaiseksi, kun siirytään pohjoiselta pallonpuoliskolta eteläiselle. Jos pohjoista pallonpuoliskoä esittävässä kuvassa 6 (a) kiertosuunta olisi vastapäivään, coriolisvoima kääntäisi virtausta kulkusuunnassaan oikealle, eli ulospäin korkeapaineen keskuksesta. Tämä olisi kuitenkin ristiriitatilanne, sillä tällöin painegradientti- ja coriolisvoima olisivat samansuuntaiset. Niiden tulee olla siis aina erisuuntaiset.



KUVA 6. Gradienttitiulen esiintyminen pohjoisella pallonpuoliskolla, (a) korkea-paine ja (b) matalapaine (Korpela A 2016, sivu 25)

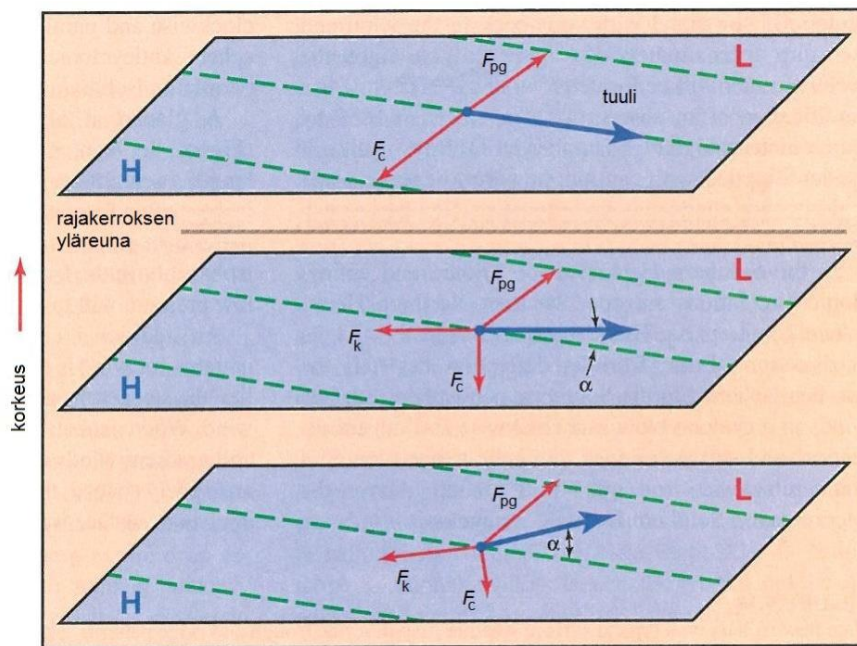
Gradienttitiulen virratessa kaarevalla radalla, on ilmavirtaukseen vaikuttava nettovoima nolasta poikkeava. Gradienttivoima onkin toimiva esimerkki ilmavirtauksien keskihakuvoiman kaltaisesta voimien epätasapainosta. Epätasapainolla tarkoitetaan tässä yhteydessä coriolisvoiman olevan hieman painegradienttivoimaa suurempi tai pienempi, jonka vuoksi ilmavirtauksen radasta muodostuu kaareva. Voimien erotus saa aikaan keskihakuvoiman, joka ei ole itsenäinen voimakomponentti, vaan epätasapaino painegradientti- ja coriolisvoimien välillä. (Korpela A 2016, sivu 25-26)

2.3.4 Tuuli rajakerroksessa

Kitka on merkittävästi vaikuttava voima rajakerroksen ilmavirtauksiin. Gradienttitiuli ja geostrofinen tuuli ovat rajakerroksen yläpuolella esiintyviä virtauksia, joiden mallinnuksessa ei huomioida kitkaa.

Kitka aiheuttaa käytännössä liike-energian muuttumista lämpöenergiaksi, jolloin luovutettu energia hidastaa virtauksen liikettä. Kitkan suunta on aina tuulen suunnalle vastakkainen. Kitka ei itsessään muuta virtauksen suuntaa. Ilmavirtauksen heikentyessä kitkan voimasta coriolisvoiman vaikutus heikkenee, jolloin virtaus kääntyy kohti painegradienttivoiman suuntaa.

Kuva 7 esittää rajakerroksen yläpuolella olevaa ilmapirtausta pohjoisella pallonpuoliskolla. Painegradienttivoima suuntaa korkeammasta paineesta matalampaan, kun samalla coriolisvoima kääntää virtauksen kulkusuunnan oikealle. Kuvassa suoralta näyttävän isobarin ajatellaan olevan kaareva, jolloin tilanne vastaa gradienttituulen tilannetta korkeapaineessa (edellinen luku). Siirryttäessä rajakerrokseen, alkaa kitkavoima F_k vaikuttaa virtaukseen. Kitkavoiman ollessa virtauksen suunnalle vastakkainen, on rajakerroksessa virtausnopeus pienempi kuin sen yläpuolella. Coriolisvoiman heikentyessä virtausnopeuden laskiessa, ilmapirtaus lähtee poikkeamaan isobarien suunnasta yllä olevan kuvan mukaisesti.

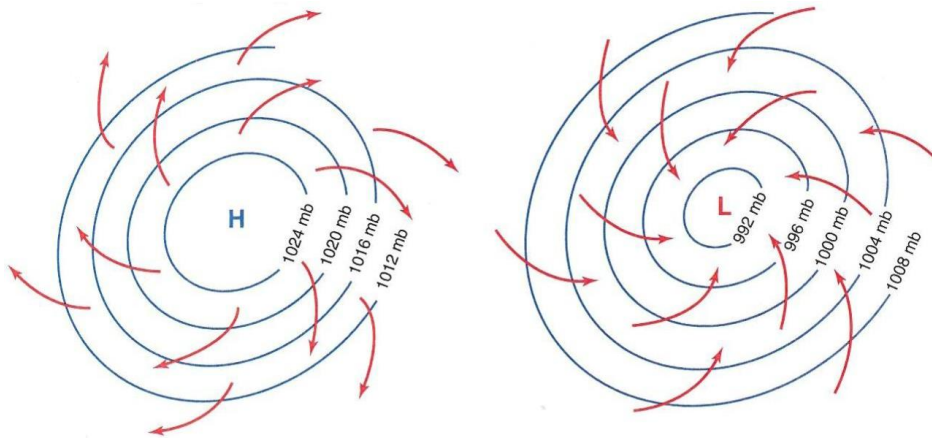


KUVA 7. Kitkan vaikutus ilmapirtaukseen (Korpela A 2014)

Mitä suurempi on kitkavoima, sen merkittävämpi coriolisvoiman heikkenemä on ja sitä voimakkaammin ilmapirtaus kääntyy painegradienttivoiman suuntaan. Poikkeamiskulma α yllä olevassa kuvassa riippuu voimakkaasti virtauskorkeudesta ja pinnanmuodoista. Yksinkertaistettuna yleissääntönä sileäpintojen pinnanmuotojen, kuten peltojen ja niittyjen yläpuolella poikkeamiskulma on noin 10° , kun taas suuremmat epätasaisuudet voivat nostaa poikkeamiskulman jopa 45° :een.

Rajakerroksen kitka siis poikkeuttaa isobarien suunnasta ilmapirtaukset. Gradienttituulen ollessa teoreettinen malli ilmapirtauksen kierrosta eri paine-keskus-

ten ympärillä, on se kuitenkin hyvä aproksimaatio käytännön tilanteesta rajakerroksen yläpuolella. Ilmavirtauksien virtauksien periaatetta paine keskusten ympärillä kuvattu kuvassa 8. (Korpela A 2016, sivu 26-28)

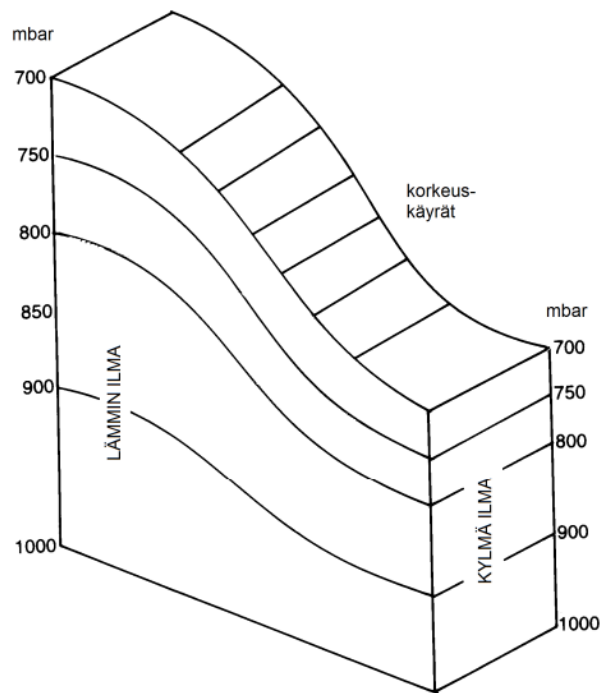


KUVA 8. Ilmavirtauksien periaatteellinen kuva paine keskusten ympärillä pohjoisella pallonpuoliskolla. (Korpela A 2016, sivu 28)

2.3.5 Terminen tuuli

Rajakerroksen yläpuolelle siirryttäessä ilmavirtauksen nopeus kasvaa. Kitkan vaikutuksen ollessa tällöin olematon, tulee tämä ilmiö selittää termisellä tuulella. Tämä on seurausta lämpötilaerojen ilmaan synnyttämistä tiheyseroista. Termisen tuulen muodostumista kuvaa kuva 9.

Yllä mainitussa tilanteessa tiheässä ilmassa gravitaatiosta johtuva ilmanpaine pienentyy korkeuden kasvaessa nopeammin kuin ei niin tiheässä ilmassa. Termisen tuuli on ilmavirtausta lämpimästä ilmamassasta kohti kylmempää. Coriolisvoima kääntää virtausta siten, että pohjoisella pallonpuoliskolla kylmempi ilmamassa jää kulkusuunnassa vasemmalle puolelle tuulta, kun taas eteläisellä pallonpuoliskolla tilanne on päinvastainen. (Korpela A 2016, sivu 28) (Korpela A 2014)



KUVA 9. Kylmän ja lämpimän ilman väliset tiheyserot luovat korkeuden muuttuessa vaakasuoran painegradientin, joka synnyttää termisen tuulen (Korpela A 2016, sivu 29)

2.3.6 Ilmavirtaustyyppien yhteenveto

Taulukko 1 kerää erityyppiset voimat jotka vaikuttava erilaisiin ilmavirtaustyyppihin.

TAULUKKO 1. Ilmavirtauksien voimat ja ilmavirtaustyytit (Korpela A 2014)

	hydrostaattinen tasapaino	geostrofien tuuli	gradientti- tuuli	tuuli raja- kerroksessa	terminen tuuli
F_{pg}	X	X	X	X	X
F_{kh}			X	X	$X^{(1)}$
F_c		X	X	X	X
F_k				X	$X^{(2)}$
F_g	X				

Jossa:

F_{pg}	Painegradienttivoima
F_{kh}	Keskihakuvoima
F_c	Coriolisvoima
F_k	Kitkavoima
F_g	Gravitaatiovoima

Gravitaatio vaikuttaa vain hydrostaattiseen tasapainoon, kun muiden ilmavirtaus-tyyppien oletetaan olevan vaakasuoria. Terniseen tuuleen liittyvä lisämerkintä (1) taulukossa tarkoittaa vaatimusta kaarevalle radalle ja (2) vaadetta rajakerroksessa olevalle virtaukselle.

Esitetyt mallit ovat kuitenkin ainoastaan ilmakehän teoreettista mallintamista, jolloin niiden esiintyminen käytännössä voivat poiketa esitetystä. Yllä olevan taulukon teoriasta poiketen, gravitaatio vaikuttaa ilmavirtauksiin käytännössä merkittävämmiin, sillä ilmavirtaukset ovat hyvin harvoin vaakasuoria. (Korpela A 2016, sivu 30)

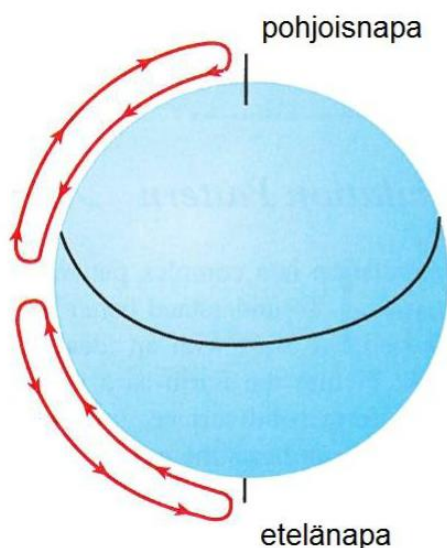
2.4 Globaalit ilmavirtaukset

2.4.1 Maapallon yksinkertaistettu malli tuulien osalta

Oletetaan tarkastelussa maapallon olevan tasainen ja pyöreä kappale, joka ei pyöri. Pallon pinnalla on ilmakerros. Auringon lämmittäessä suurimmalla teholla päiväntasaajan lähellä olevia alueita ja pienellä teholla napoja, syntyy lämpötilaeroja. Tällöin lämpötilaerojen vuoksi syntyy kuvan 10 mukaiset ilmavirtaukset.

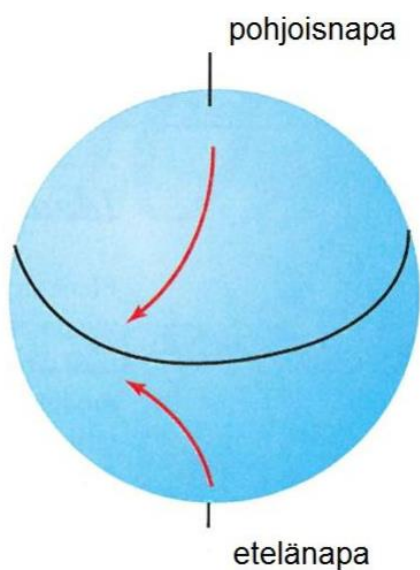
Ilman lämpötila on suurimmillaan päiväntasaajalla, ja sen tiheys on pienimmillään. Tästä seuraa se, että kevyt ilma nousee ylöspäin, jolloin päiväntasaajalle muodostuu matalapaine. Navoilla taas vastaavasti ilma on kylmempää ja sen tiheys on suurempi (korkeapaine). Ilma lähtee virtaamaan korkeapaineesta kohti matalapainetta pallon pintaa pitkin.

Niin kauan kun lämpötilaero säilyy, säilyy myös napojen ja päiväntasaajan välinen vaakasuora painegradientti, sillä rajakerroksen yläpuolelle mentäessä syntyykin vastakkaissuuntainen virtaus.



KUVA 10. Lämpötilaerojen aiheuttama ilmavirtaus teoreettiseen kappaleeseen (Korpela A 2016, sivu 31)

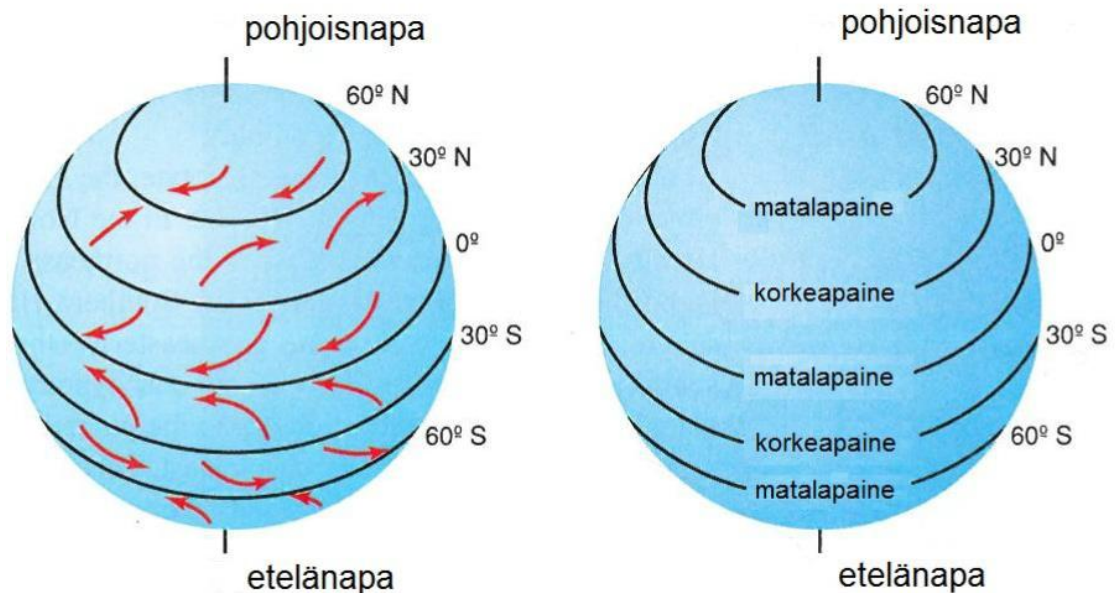
Kun mallia monimutkaistetaan, lisätään kokonaisuuteen seuraavaksi pyörimisliike. Kuvassa 11 on lisätty pyörimisliikkeen vaikutus teoreettiseen kappaleeseen.



KUVA 11. Teoreettinen kappale, johon on lisätty pyörimisliike (Korpela A 2016, sivu 31)

Pyörivässä mallissa epätasaisen lämmittävän voiman lisäksi kokonaisuuteen vaikuttaa myös coriolisvoima. Rajakerroksen virtaukset kääntyvät yllä olevan kuvan mukaisesti, jossa käytännössä maan pinnassa löyhästi kiinni oleva kaasukerros pyrki vastustamaan siihen kohdistuvaa muutosta. Ilmavirtaus jää siis edellä esitetyn tavoin ”jälkeen” allaan pyörivästä kappaleesta. Tämä tilanne ei kuitenkaan

käytännössä ole mahdollinen, sillä muuten pallolla itsellään vallitsevat voimat olisivat sellaiset, että ne jossain vaiheessa pysäyttäisivät kappaleen pyörimisen jarrutusvoimansa kautta. Kuvassa 12 kuvattu vyöhykkeistetty teoreettista mallia.



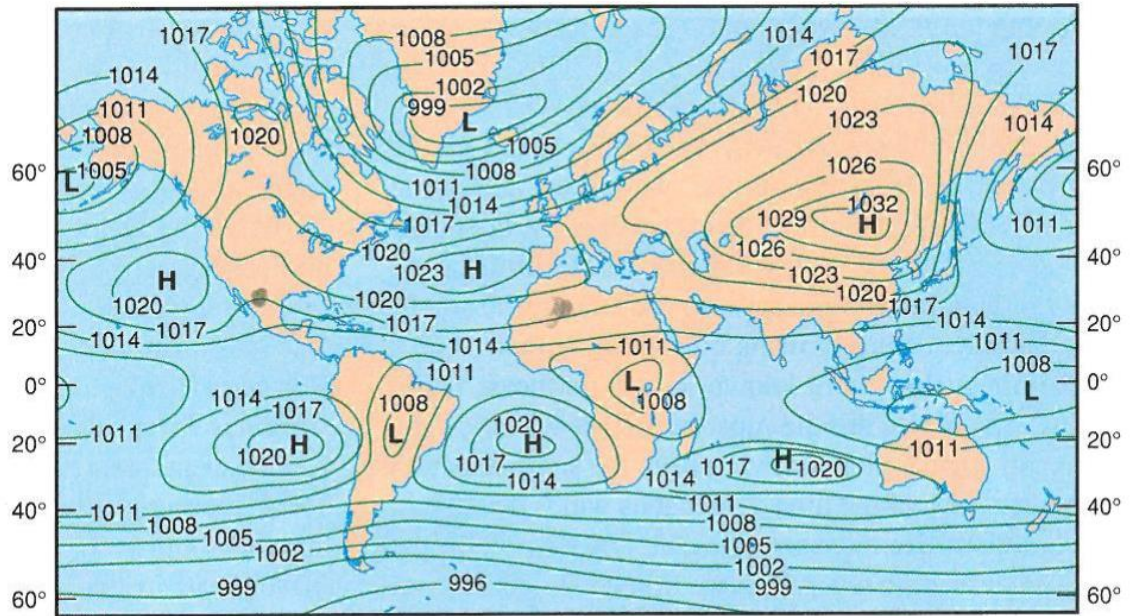
KUVA 12. Vyöhykkeistetty teoreettinen malli (Korpela A 2016, sivu 31)

Käytännössä ilmajärvien virtaukset jakaantuvat globaalissa mittakaavassa kolmelle vyölle sekä pohjoisella- että eteläisellä pallonpuoliskolla. Näiden ilmajärvien virtauksen aiheuttama jarruvoima avaruudessa pyörivään kappaleeseen summautuu nol-laksi, jolloin maapallon pyörimisliike ei menetä energiaansa tuulien vuoksi.

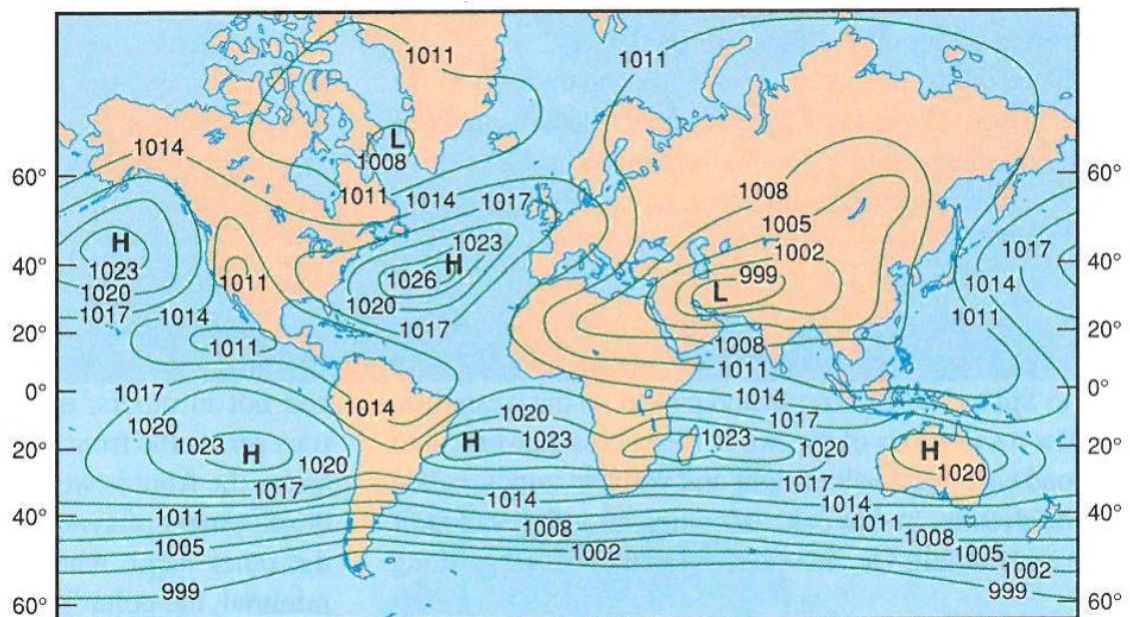
Kun mallia monimutkaistetaan, lisätään pallolle valtaveret ja mantereet. Tällöin lämpötilojen jakauma lähtee muuttumaan merkittävästi. Tämä taas aiheuttaa muutoksia ilmajärvien virtauksiin. Kun painevyöt jaetaan erilaisiksi painealueiksi, saadaan eroja syntymään lisäksi maa- ja merialueiden välillä. (Korpela A 2016, sivu 30-32)

2.4.2 Painealueet, jotka ovat osittain pysyviä

Tiettyjä vuosista toisiin samalla tavalla toistuvia painealueita kutsutaan osittain toistuviksi. Näiden toistuvien painealueiden sijainnit ja voimakkuudet vaihtelevat vuosittain, mutta niiden esiintyminen noudattaa pitkälti edellisen luvun ilmanpainevoimia. Kuvassa 13 on esimerkki osittain pysyvien painealueiden esiintymisestä.



(a)



(b)

KUVA 13 Esimerkki eräästä ajankohdasta, jossa painealueet merenpinnan tasolla (a) tammikuussa ja (b) heinäkuussa (Korpela A 2014)

Nämä osittain pysyvät painealueet vaikuttavat sääilmiöihin merkittävästi ympäri maailmaa. Esim päiväntasaajan molemmiin puolin esiintyvät subtrooppiset korkeapaineet (noin 30° leveyspiiri) määrittävät hyvin suurelta osin näiden alueiden sääilmiötä.

Tuulivoiman tuotannon kannalta subtrooppiset korkeapaineet ovat pääsääntöisesti sille epäedullisia. Vaakasuorien painegradienttien jäädessä tällä alueella pieniksi, ovat rajakerroksessa vaikuttavat tuulet myös hyvin heikkoja. (Korpela A 2016, sivu 32-34)

2.5 Tuulen teho

Tuulen hyödynnettävä teho muodostuu virtaavista massallisista hiukkasista, joiden liike-energiaa pyritään ottamaan käyttöön muuttamalla se toiseen muotoon. Kaasun virtauksen kineettisen energian muuttaminen sähköenergiaksi tapahtuu sähköntuotannossa tuulivoimaloiden pyörivillä roottoreilla.

Voimaloiden tietyt erityyppiset tekniset ratkaisut mahdollistavat eri tavoin ilmavirtauksen energiasisällön hyödyntämisen. Jotta roottoreiden valintaan vaikuttavat tekniset rakenteet tulevat järkevästi perustelluksi, tulee ymmärtää tuulen muodostumisen lisäksi energiasisällön hyödyntämiseen liittyviä tekijöitä ilmavirtauksesta.

2.5.1 Ilmavirtauksessa esiintyvä kineettinen energia ja teho

Ilmavirtauksen kineettisen liike-energian voidaan määritellä klassisen mekaniikan kineettisen energian yhtälöllä. Yhtälössä kineettisen energian määrä W_0 on

$$W_0 = \frac{1}{2}mv_0^2 \quad (1)$$

jossa m on ilmavirtauksen massa ja v_0 on sen nopeus. Mikäli kineettistä energiaa tarkastellaan aikayksikköä kohden, saadaan aikaiseksi kineettinen teho. Tässä yhtälössä massa voidaan korvata massavirralla \dot{m} , jolloin kaavan 1 muuttujan m tilalle voidaan sijoittaa massavirta, joka kuvataan yhtälöllä

$$\dot{m} = \rho Av_0 \quad (2)$$

jossa ρ on ilman tiheys, A ilmavirtausta vastaan kohtisuora pinta-ala. Kineettisen tehon yhtälöksi saadaan yhdistämällä edellä olevat yhtälöt:

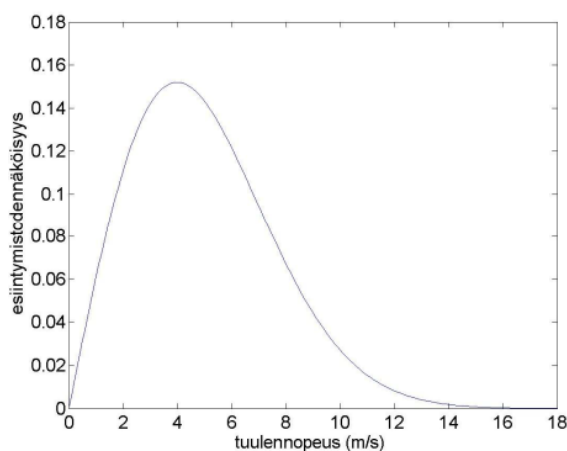
$$P_0 = \frac{1}{2} \rho A v_0^3 \quad (3)$$

Yllä olevan kaavan mukaisesti ilmapvirtauksen tehon osuus riippuu massavirtausta käsitellessä tuulennopeuden kolmannesta potenssista. Toisin sanoen tuulennopeuden lisääntyessä ei energiamäärän kasvaminen ole lineaarista, vaan kolmanteen potenssiin riippuvainen. (Korpela A 2016, sivu 36-40, muokattu)

Pohdittaessa tuulivoimalaa sen varsinaisen ”polttoaineen” kannalta, tulee ilmassan virtauksen kolmannen potenssin tunnistaminen erittäin olennaiseksi tiedoksi, sillä paikallisten tuuliolosuhteiden tuntemisessa keskiarvoistaminen sekä lineaariset mallit luovat merkittävän virheen tuotantomäärän arvioinnissa. Esimerkiksi 10% lisäys tuulennopeudessa lisää energiamäärää 33,1 %.

Tuulivoimalaa rakennettaessa tehdään yleensä noin vuoden mittainen tuulennopeuden mittaus mastolla, jossa on tuulennopeusantureita suunnitellulla voimalaitoksen korkeudella. Mittauksissa käytössä on yleensä myös joitain tutkia varsinaisen mittaustornin lisäksi, joilla pyritään saamana laajemmalla alueella tietoa kyseisen alueen tuulisuudesta.

Kerätyllä mittaustiedolla voidaan todentaa tuulivoimala-alueella esiintyvät tuulet ja tehdä tätä kautta erinäisiä valintoja, jotta voidaan valita mahdollisimman kustannustehokkaat tuulivoimalat. Tuulennopeuden esiintymistodennäköisyydestä voidaan tehdä esimerkiksi kuvion 1 mallinen Weibull-jakauma.



KUVIO 1. Esimerkki tuulennopeuden jakaumasta (Weibull-jakauma), joka saadaan muodostettua mittaustiedon perusteella (Korpela A 2014)

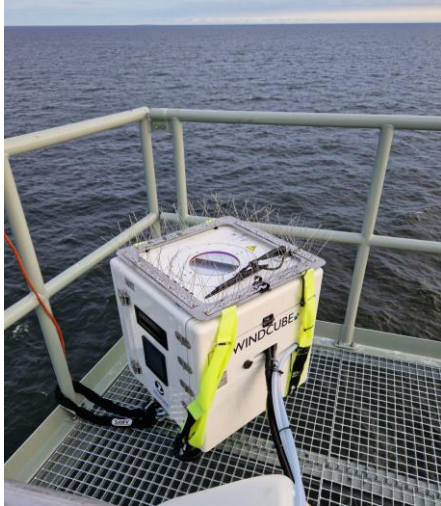
Kuvassa 14 esimerkki Isojoen alueelta tuulennopeuden mittaustornista. Kuvissa 15 ja 16 esimerkit Lidar-perustaisesta tuulenmittauksesta Pohjanlahden eräältä majakalta.



KUVA 14. Noin 200 m korkea tuulivoimalaprojektin tuulenmittausvaiheen mittaus-torni Isojoella 25.2.2024. (Heikkilä S Helmikuu 2024 – Omat valokuvat)



KUVA 15. Lidar-perustainen tuulennopeusmittaus Pohjanlahden eräällä maja-kalla syksyllä 2022 (Lehtola Mika Väylävirasto 2022 –Valokuva)



KUVA 16. Lidar-perustainen tuulennopeusmittaus Pohjanlahden eräällä majakalla syksyllä 2022 (Lehtola Mika Väylävirasto 2022 –Valokuva)

2.5.2 Tehon muodostaminen kineettisestä energiasta

Virtaavan massavirran energiasta saadaan aikaan teho, kun liike-energian kertymää käsitellään tunnetun ajan jakson ylitse. Matemaattisesti sama asia voidaan käsitellä derivoimalla liike-energian määrä jonkin ajan jakson ylitse.

Kun liike-energia derivoidaan ajan suhteen, saadaan tehoksi P_0 :

$$P_0 = \frac{dW}{dt} \quad (4)$$

Kaavan kannalta olennaista on ymmärtää siinä vaikuttava ajanhetken tarkastelu. Energian tuotanto määritellään ajanhetken muutoksessa, jona aikana teho on hetkellinen suure. Muiden tekijöiden oletetaan olevan tarkasteltavalla ajanjaksolla vakioita. Koska tuulennopeuden kolmas potenssi tulee hyvin dominoivaksi kaavassa, keskitytään sen käsittelyyn pääsääntöisesti kaikissa eri aihetta käsittelevissä materiaaleissa.

Käytetään tarkastelujaksona yhtä vuotta ja oletetaan tuuliolosuhteiden olevan vuodesta toiseen samalla todennäköisyydellä toistuvia. Kun vuosi jaetaan mitaustiedossa esimerkiksi sekuntien tarkkuudella osiin tuulennopeuden mukai-

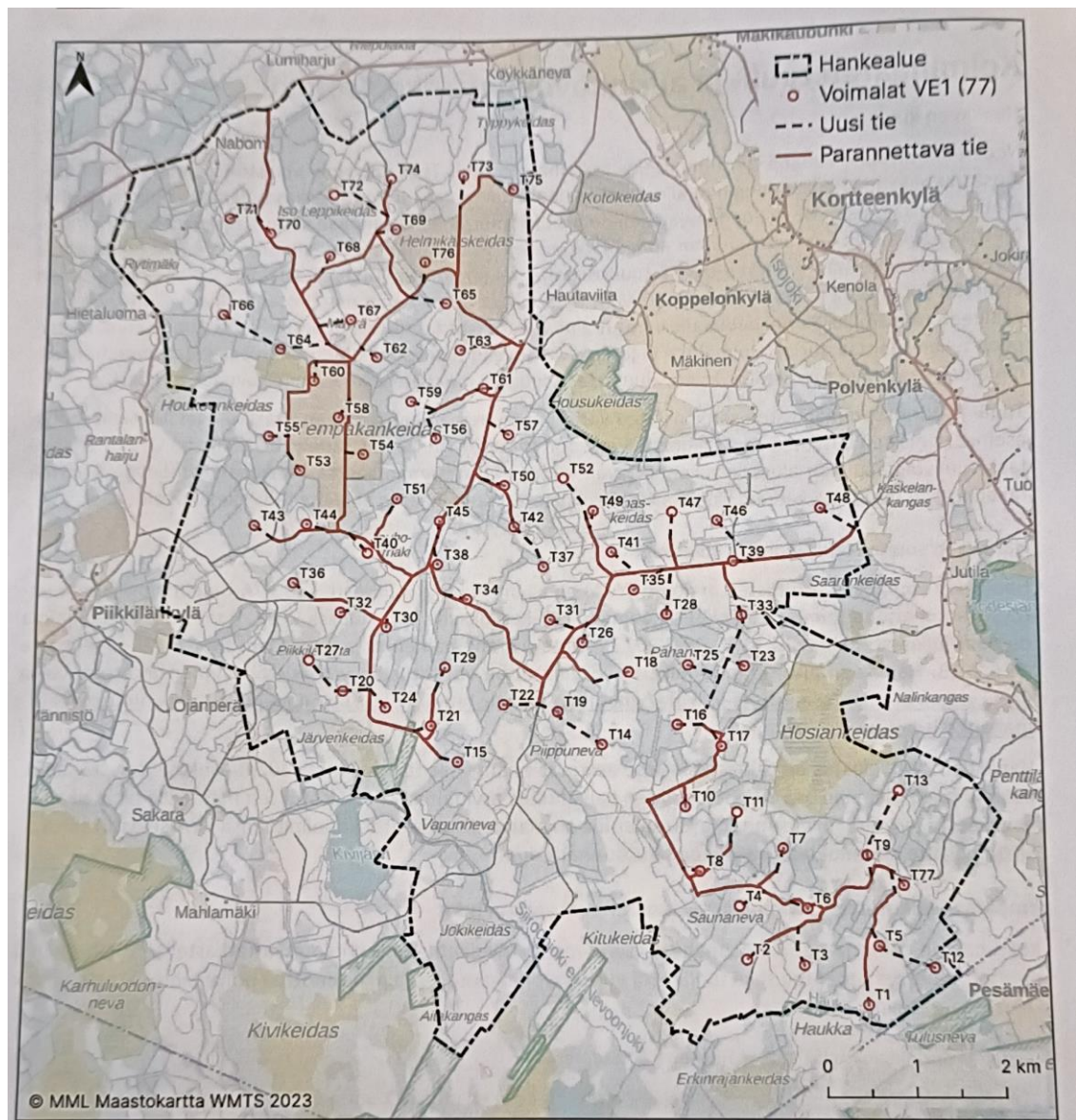
sesti, saadaan aikaiseksi laskennan kannalta todennäköinen kineettisen energian määrä, joka on tarjolla energiamuunnokseen. Mittaustulosten perusteella saadaan kuvion 1 mukaiset Weibull-jakaumat muodostettua, jotka kuvaavat esiintymistodennäköisyyksiä tuulelle vuoden ajanjaksolla. Riippuen kohteesta jossa mittaukset tehdään, nämä tulokset vaihtelevat merkittävästi.

Riippuen energialähteen vaihtelevuudesta ja sen hyödyntämiseen liittyvistä päätöksistä, päädytään tuulivoimalaitoksien osalta osin erityyppisiin teknisiin ratkaisuihin. Erityyppiset tekniset ratkaisut mahdollistavat tuulen tehon hyödyntämisen eri tavoin. Mikäli esimerkiksi pääosa tuulesta todetaan tulevan lännestä, ei ole järkevää sijoittaa torneja varjostamaan toisiaan. Sijoittelumuutokset aiheuttavat poikkeamia tornien sijoitteluihin hankkeiden edetessä.

kuvissa 17 ja 18 on esimerkkejä kahdesta eri sijoitusvaihtoehdosta yhdestä hankkeessa tuulenmittausvaiheen aikana.

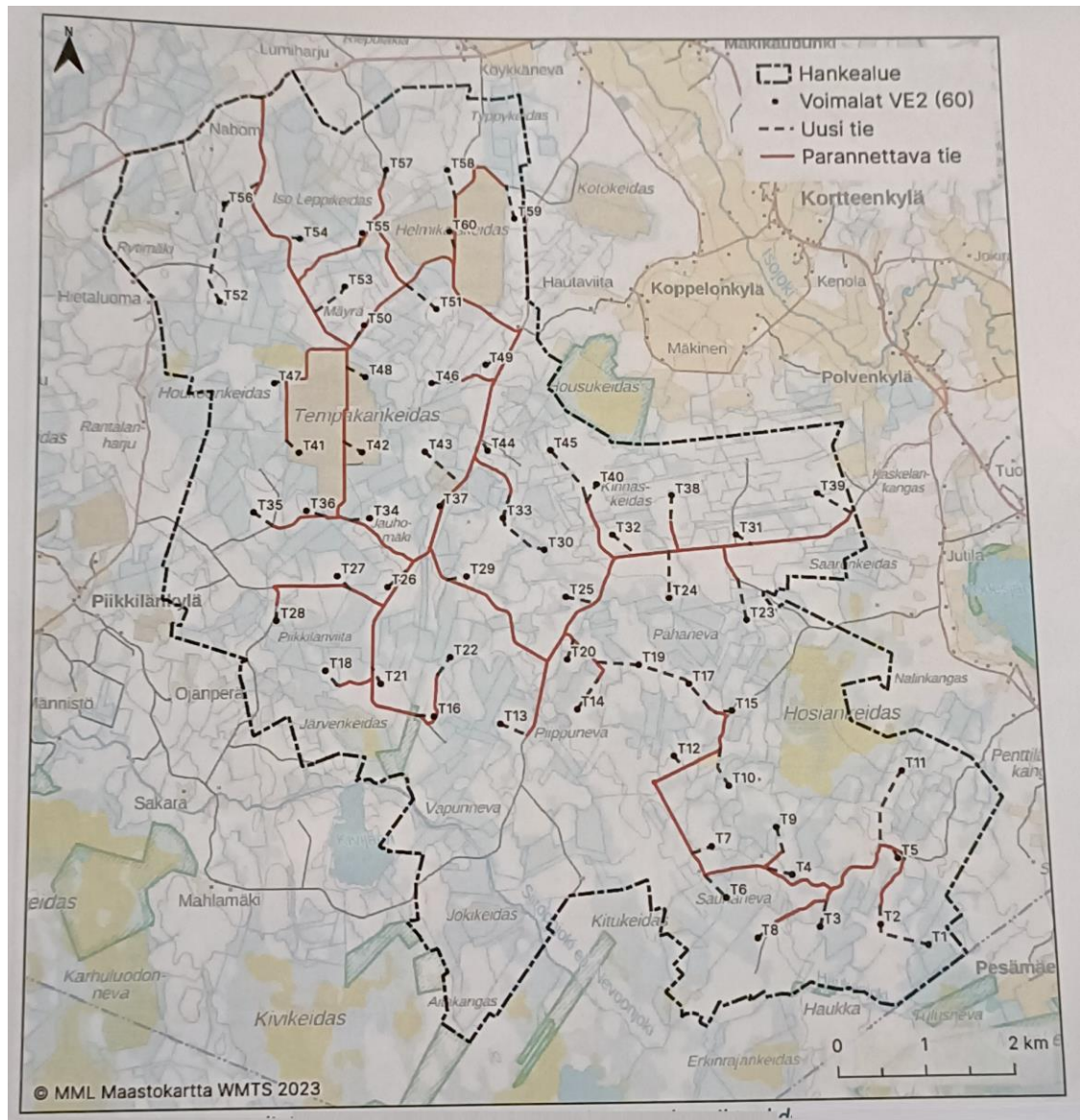
Kun hankkeen tuulimittaukset ovat valmistuneet jokusine muine tekijöineen, pääsee hankekehittäjä tekemään sijoitukseen liittyen päätöksiä. Tämä vaihe on monille maanomistajille merkittävän odottamisen aikaa, sillä heidän saama voimailoista saatava korvaus vaihtelee lopullisen sijoituksen mukaisesti. Riippuen siitä mitä hankkeen rakennelmia sijoitetaan maanomistajan maalle, ovat korvaukset eri suuruiset.

Kunnan osalta tuulivoimaloiden sijoitus taas tuottaa kiinteistöverotuloja sekä työpaikkoja. Hankkeen aikaiset rakennustyöt taas työllistävät paikallisia majoitustoimijoita, ravintoloita sekä kauppia. Tiestön kannalta taas tuulivoimala-alueet edellyttävät teiden kunnossapitoa ja tarvittaessa vahvistamista, mikä voi osaltaan kehittää alueen infrastruktuuria näiltä osin. Hyvin pitkälti näiden tekijöiden vuoksi useat kunnat suhtautuvat positiivisesti tuulivoimaloiden rakentamiseen. Sijoittelu sitoo maa-alueiden käyttöä tuulivoimapuistoihin pitkäksi aikaa, jolloin maankäyttöön ja luontoarvoihin liittyvät kysymykset taas ovat usein vastustusta herättäviä tekijöitä.



KUVA 17. Isojoen Kolmihaaran alueen tuulivoimapuiston voimalasijoittelun vaihtoehto 1 (77 voimalaa) (Kolmihaaran hankkeen kuvaus dokumentti)

Kuvassa 18 vaihtoehtoinen suunnitelma tuulivoimaloiden sijoituksessa Kolmihaaran alueella, jossa voimaloiden määrä ja sijoittelu on erityyppinen. Hankealueiden kuvauksissa ei näy aurinkovoimaloiden sijoitteluita, joita tässä kokonaisuudessa on suunniteltu alueen tyhjille laidoille sijoitettavaksi.



KUVA 18. Isojoen Kolmihaaran alueen tuulivoimapaiston voimalasijoittelun vaihtoehto 1 (60 voimalaa) (Kolmihaaran hankkeen kuvaus dokumentti)

2.5.3 Betzin laki

Teoreettisesti hyödynnettävissä olevan energiamäärän tuulesta määrittelee Betzin laki, joka kuvaa teoreettisen ylärajan roottorin ja ilmapvirtauksen tehon osamäärälle. Koska tuulivoimalat hyödyntävät tuulesta sen kineettisen energian komponentin, vaatisi täysi tuulen tehon hyödyntäminen tuulen virtauksen pysäyttämistä. Tämä on hyvin teoreettinen tilanne, joka johtaisi käytännössä ilmamolekyylien seinämän muodostumiseen roottorin taakse. Asiaa voi verrata vesivoimalaitokseen, joka ottaisi talteen kaiken liike-energian veden virtauksesta. Veden virtaus käytännössä pysähtyisi ja joen virtaama olisi tämän jälkeen nolla. Tämä

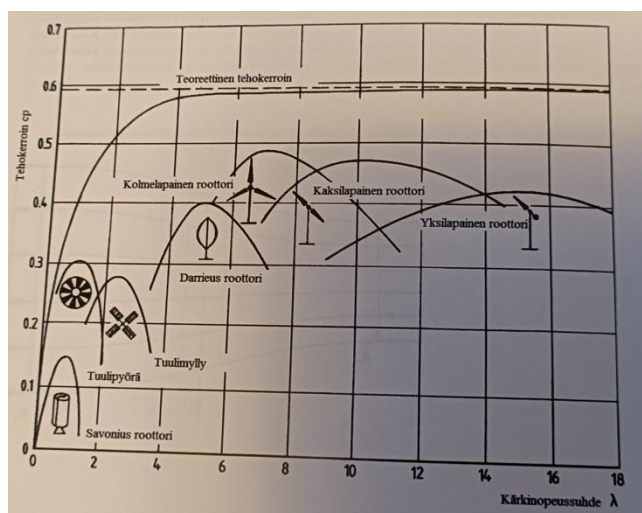
taas käytännössä pysäyttäisi täysin tuulivoimalan tuotannon. Tuulivoimalan roottori ei pysty pysäyttämään roottorin tasossa etenevää tuulta lopettamatta, ilman että se lopettaisi olemasta itse roottori. Energian talteenotto jää aina merkittävästi pienemmäksi kuin kaikki tarjolla oleva kineettinen energia tuulessa. (Kauppinen J 2018 – s249-250)

Albert Betz osoitti vuonna 1920 (1920 Theoretical Limit for the Best Utilization of Wind by Wind Motors), että roottorin läpi kulkevasta ilmavirtauksen energiasta on hyödynnettävissä maksimissaan:

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A v^3 \quad (5)$$

Lain mukaan siis ideaalisessa tilanteessa tuuliturbiinin teho on 16/27 eli hieman alle 60 % ilmavirtauksen kineettisen energian tehosta. Käytännössä tuuliturbiinien teho jää merkittävästi Betzin lain rajan alapuolelle. (Kauppinen J 2018 – s249)

Ilmavirtauksen läpäistessä roottorin, on erityyppisillä roottorirakenteilla suuri merkitys sen suhteen, kuinka paljon energiaa on talteen otettavissa tuulen liikkeestä. Kuviossa 2 on esitetty erilaisia tuuliturbiinien tehokertoimia kärkinopeussuhteen λ funktiona. Tehokerroin tarkoittaa hyödynnettävissä olevan energian määrää tuulessa. Kärkinopeussuhde tarkoittaa roottorin kärjen nopeuden ja ilman virtausnopeuden suhdetta. (Voimalaitostekniikka 2013 - s 285)



KUVIO 2. Erilaisten tuuliturbiinien tehokertoimia (Voimalaitostekniikka 2013 - s 286)

Kuvio 2 selventää myös osittain yleisimmän vastaantulevan tuulivoimalaitoksen rakennetta, joka on kolmilapainen. Kolmilapaisella rakenteella saavutetaan hyvä kyky hyödyntää tuulen kineettistä energiaa. Valintaan vaikuttavat myös muut tekijät.

2.5.4 Roottorirakenteen vaikutus sähköntuotantoon

Roottorirakenteella vaikutetaan tuotannossa vaikuttaviin voimiin. Vaikkakin tuulivoimala on luonnostaan tuotantoteholtaan voimakkaasti vaihteleva, pyritään tehdyillä valinnoilla rakentamaan voimala mahdollisimman stabiiliksi siinä vaikuttavien mekaanisten voimien kannalta. Kuvassa 19 esimerkki lavan asennustilanteesta turbiiniin.



KUVA 19. Nordexin N131-3900 voimalaitoksen turbiinin asennustilanne (<https://www.nordex-online.com/en/product/n131-3900/>)

Kolmilapainen roottori on pyörähdyssymmetrisesti tasapainossa ja sen massahäviövoimat ovat tasapainossa kaikkien akseleiden suhteen. Tämä tarkoittaa pyörimisliikkeen osalta tasaista painojakaumaa pyörivässä liikkeessä, kun liikettä roottorin keskipisteestä ja siihen vaikuttavaa pyörivän liikkeen aiheuttavia voimia.

Esimerkiksi moukarinheittäjän moukari ei ole pyörimiseen kannalta kiihdyttävässä vaiheessa tasapainossa, mutta mikäli hänellä olisi kolme moukaria 120° välein kiihdytyksessä, olisivat ne pyörimisliikkeen kannalta tasapainossa.

Lisäksi pyörähdysymmetriset kappaleet ovat yleisesti ihmissilmälle miellyttävämpiä kuin epäsymmetriset rakenteet. Mikäli roottorin rakenne on pyörimisen kannalta epäsymmetrinen, esiintyy siinä aina epävakaista tangentiaalisia voimia tuulen osuessa voimalaitoksen roottorin lapoihin. (Kauppinen J 2018 – s250)

Mikäli lapojen määrää vähennetään, aiheutuu lapoja käännettäessä koneistoa yleisesti kuluttavaa tärinää, joka syntyy massahitausvoimien eroista vaaka- ja pystyakselilla. (Kauppinen J 2018 – s250)

Mikäli kaksilapaista voimalaa pohtii pelkästään voimalaitoksen mekaanisen rakenteen kannalta, toistuu pyörimistilanteissa sellainen hetki, jossa lavat ovat pystysuorassa. Tällöin alempi lapa on kokonaan tornin rungon varjossa ja toinen on ylhäällä. Tällöin vaikuttava tuulenvoimakkuus on hyvin vahvasti epätasapainossa pyörimisliikkeeseen nähden. (Korpela A – luento Tuulivoimajärjestelmät 2023)

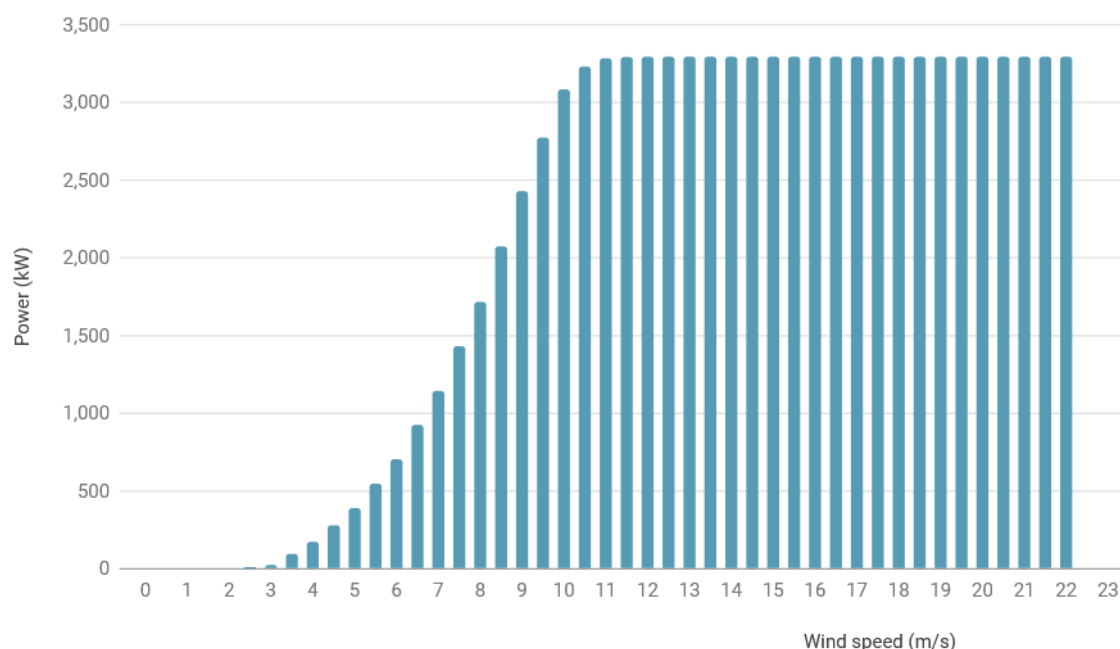
Epäsymmetrinen kineettisen energian muutos pyörivässä liikkeessä johtaa käytännössä vahvasti vaihtelevaan tehon tuotantoon tuulivoimalan generaattoreissa. Tällöin generaattori joutuu toimimaan jatkuvassa nopeasti vaihtuvien voimien tilanteissa, joka taas vastaavasti vaatii sen ympäröiviltä järjestelmiltä jatkuvaa säätämistä ja tämä heikentää laitteiston elinikää.

Mikäli roottorin malli on lukittu, jää kineettisen energian talteenottoon vaikuttavaksi tekijäksi kaavassa 5 roottorilapojen pyyhkäisyala. Koska ympyrän pinta-ala on neliöllisesti kasvava sen säteeseen nähden, saadaan teoreettisesti tuulivoimalan lapojen säteen kasvattamisella nostettua tehoa neliöllisesti. On kuitenkin huomattava, että esimerkiksi 200 metriä korkealla tuulivoimalaitoksella, jossa on 100 metrin pituiset lavat, on niiden korkeusero pyöriessään parhaimmillaan 200 metriä. Tällöin jo korkeusero voi aiheuttaa tuuliolosuhteisiin eroa, jolloin kaava ei ole aivan suoraviivainen.

Tehon kuutiollinen riippuvuus tuulennopeudesta vaikuttaa merkittävästi tuulivoimalan teknisiin ratkaisuihin. Tämä on merkittävästi tuulivoimalaitoksen teknistä generaattorirakennetta varioiva tekijä, koska tyypillisesti sähkön tuotantoon on käytetty vierasmagnetoituja tahtigeneraattoreita, joiden pyörimisnopeus on aina vakio. Mikäli sähköntuotannossa halutaan hyödyntää vaihtelevat pyörimisnopeudet, on tehtävä merkittävästi erityyppisiä teknisiä valintoja, jotka kaikki ovat kompromisseja tuotannon kannalta.

Kuviossa 13 on esimerkki Vestaksen V126 3 MW:n tuuliturbiinin tuotannosta eri tuulennopeuksilla.

Power curve



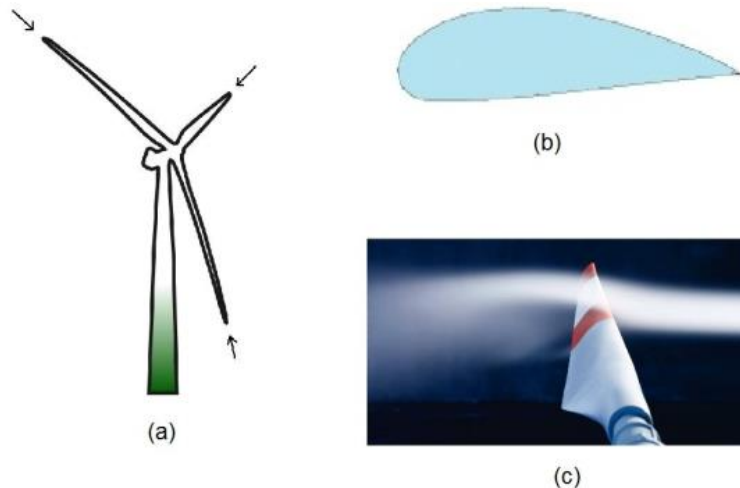
KUVIO 3. Vestaksen V126 3 MW:n tuotanto eri tuulennopeuksilla (https://www.thewindpower.net/turbine_en_865_vestas_v126-3000.php)

2.6 Hyödynnettävän tehon määrän säätäminen

Tässä luvussa tarkastellaan erilaisia tehon tuotantoon vaikuttavia tekijöitä. Tuulivoimalan sähkön tuotannossa on sen energialähteen vaihtelevuuden, kuin myös sen rakenteen suunnittelun kannalta, useita tiedostettavia kokonaisuuksia.

2.6.1 Voimalaitoksen mekaanisen säädön vaikutus sähköntuotantoon

Tuulivoimalan lavan muotoilu muistuttaa lentokoneen siipeä, mutta tästä poiketen se joutuu kohtaamaan eri nopeudella vastaan tulevia tuulia pituutensa vuoksi, jolloin siihen on rakennettu koko matkalle kierre. Yleinen periaatekuva tuulivoimalan rakenteesta kuvassa 20.



KUVA 20. Tuulivoimalaitoksen periaatekuva (a), lavan poikkileikkaus (b) ja lapa ilmvirtauksessa (c) (Korpela A – 2014)

Lentokoneen siiven rakennetta tarkastellen, on helpoin päästä ymmärrykseen tuulivoimalaitoksen lapojen rakenteesta. Lentokoneen ilmassa pitävä voima johtuu ilmvirtausten differentiaalista siiven ala- ja yläpuolella. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että ilmalle muodostuu alipaine siiven yläpuolelle, jolloin paine-ero aiheuttaa nostovoiman. Vastaavalla tavalla tuulivoimalan lapa on suunniteltu aiheuttamaan voiman, mutta voimalan tapauksessa pyörivään liikkeeseen. Lapaan vaikuttaa nostovoima, mutta myös ilmvirtauksesta johtuva vastusvoima (kitka). Tuulivoimalan lavat ovat säädettävissä kulmansa puolesta, jolloin voidaan vaihtaa lavan nostovoiman ja vastusvoiman suhdetta. Tätä ohjaustapaa voidaan käyttää voimalaitoksen tehon säätelyyn, sekä tehon rajoittamiseen liian suurella tuulella. (Korpela A 2016 -sivu 57)

Roottorin pyöriessä siihen vaikuttaa ilmvirtauksen varsinainen tuulennopeus, mutta roottorin lavat kokevat tuulennopeuden suhteellisen. Koska lavoilla on jo pyörimisnopeus, vaikuttaa niihin sellainen tuulen nopeus, joka on suhteutettava jo olemassa olevan pyörivän liikkeen nopeuteen.

2.6.2 Tuuliturbiinin kärjen nopeussuhde

Edellä mainittiin nopeussuhteesta ja sen vaikutuksesta tuulivoimalasta saatavaan tehoon. Tuulivoimaloiden ensimmäiset suuren mittakaavan mallit olivat vakionopeuksisia voimalaitoksia, joissa roottori pyöri lähes vakionopeudella eri tuulen nopeuksilla. Tällöin tuulivoimalan säädön ja sen tuottaman tehon kannalta voitiin roottorin lapojen kulmaa säätämällä rajoittaa pyörimisnopeutta, mutta vastaavasti se mahdollisti hyvin rajatun nopeusalueen käytön sähköön tuotantoon. Tuotetun sähkömääräsi generaattorin kannalta tällöin turbiinin akselilla vaikuttava momentti, joka oli muunnettavissa tehoksi. Pyörivässä roottorissa mekaaninen teho saadaan vääntömomentin ja kulmanopeuden tulona.

Tänä päivänä rakennettavat tuulivoimalat ovat joko täysin muuttuvanopeuksisia tai rajoitetusti muuttuvanopeuksisia. Jälkimmäinen vaihtoehto mahdollistaa laajemman tuulennopeusalueen käytettävyyden huomattavasti tehokkaammin, mutta se vastaavasti monimutkaistaa teknistä rakennetta. Lisäksi energian talteenoton kannalta päädytään aina kompromissiin roottorin rakenteessa, koska myös kärjennopeussuhde vaihtelee.

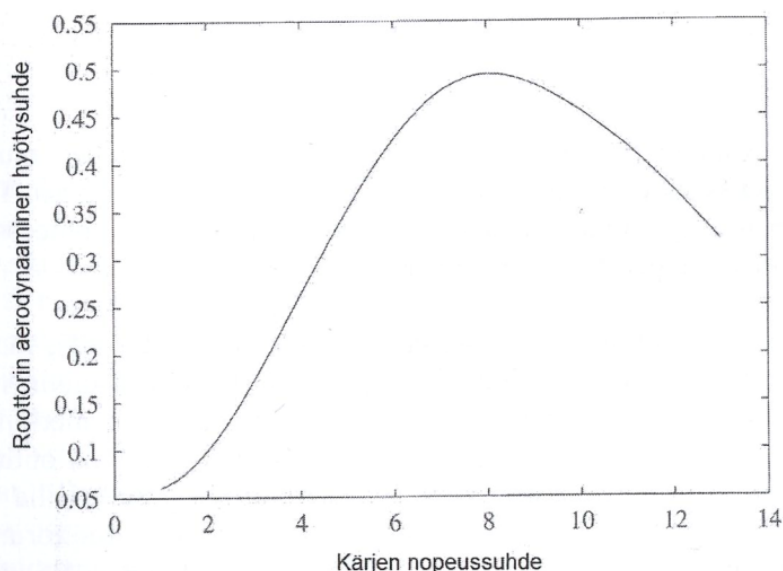
Jotta lavan aerodynaaminen toiminta voi olla optimaalista on joko:

- Kärjen nopeussuhteen pysyttävä vakiona, jolloin lapojen pyörimisnopeus seuraa likimain lineaarisesti tuulennopeuden vaihtelua
- Kärjen nopeussuhteen absoluuttisen arvon on oltava optimaalinen, jotta lapojen pyörimisnopeus on mahdollisimman suuri siten, etteivät lapojen aiheuttamat jälkipyörteet kuitenkaan häiritse toisiaan.

Matemaattisesti ajatellen, tuulivoimala toimii aerodynaamisesti ajatellen optimaalisesti, kun sen lapojen kärjen kehänopeus $v_{kehä}$ säilyy optimaalisena maanpäällisen tuulen nopeuteen nähden v_0 .

$$\lambda = \frac{v_{kehä}}{v_0} \quad (6)$$

Kuviossa 4 on esimerkki roottorin aerodynaamisesta hyötysuhteen verrannollisuudesta kärjen nopeussuhteeseen.



KUVIO 4. Periaatekuva kärjen nopeussuhteen vaikutus hyötysuhteeseen (Korpela A 2014)

Kohtauskulman hallinta ei yksinään takaa optimaalista toimintaa, vaan jokaisella roottorityypillä on myös absoluuttisia arvoja, jotka siihen vaikuttavat. Käytännössä liian alhaisilla roottorin pyörimisnopeuksilla merkittävä osa ilmavirtauksesta ohittaa roottorin luovuttamatta sille energiaansa.

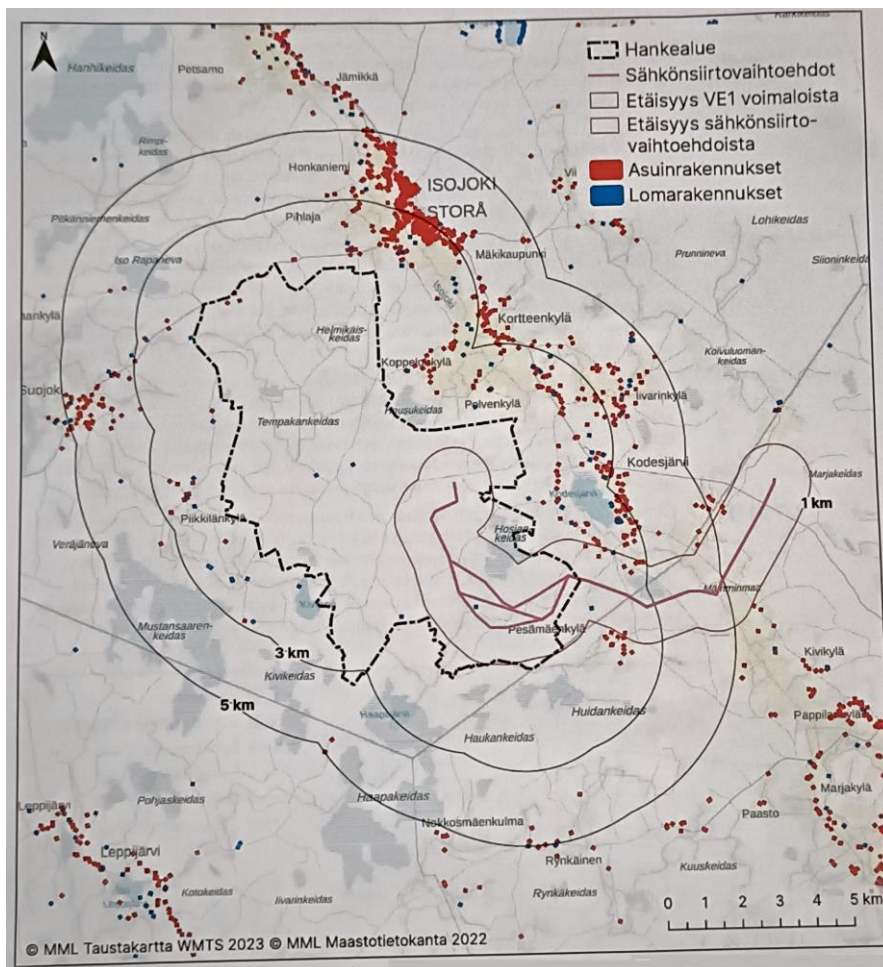
Toinen aiheeseen liittyvä termi on pintasuhte, joka kuvaa lapojen pinta-alan suhdetta roottorin pyyhkäisy-pinta-alaan nähden. Täysin umpinainen roottori ei ole kuitenkaan nopeasti ajatellusti optimaalinen, sillä jokainen lapa tuottaa pyörteitä ja optimaalisessa suunnittelussa seuraava lapa saapuu "neitseelliselle" ilmavirtaukselle, josta pyörteisyys on vähentynyt merkittävästi.

Mikäli jollekin pyörimisnopeussuhteelle suunniteltua roottoria pyöritetään liian suurella nopeudella, aiheuttaa se lavoille ilmavirtaukseen pyörteisyyttä ja turbulentsuutta, joka taas heikentää hyötysuhdetta (katso kuvio 2 hyötysuhteista).

Lavan kierre, kärjen nopeussuhde ja aktiivinen säätäminen ovat tekijät, joilla kohtauskulmaa pyritään pitämään optimaalisessa arvossaan. Lavan kierre pitää kohtauskulma koko matkalla sopivana, kun taas nopeus on sovitettu suunnitellun roottorin rakenteeseen. (Korpela A 2016)

Yleinen julkinen hyväksyntä on myös merkittävä tekijä lapsuunnittelussa. Lavan kärjen nopeus on äänenvoimakkuuteen verraten verrannollinen viidenteen potenssiin, jolloin tämä tekijä itsessään rajaa myös hyväksyttävää pyörimisnopeutta. (Tekniikan Maailma 15.2.2024 sivu 83)

Hankesuunnittelussa pyritään sijoittamaan voimalaitokset sopivalle etäisyydelle asutuksesta, erityisesti meluhaittojen vuoksi. Alla olevassa kuvassa kuvattu Isojoen Kolmihaaran hankkeen karttaa, jossa on tarkasteltu asutuksen sijaintia voimalaitoksiin nähden.



KUVA 21. Isojoen Kolmihaaran hankekuvauksen etäisyydet lähialueen asuin- ja lomarakennuksiin (Kolmihaaran hankekuvaus 2024)

2.6.3 Pintasuhde

Edellä esitetty teoria pintasuhteen merkittävyydestä herättää kysymyksen, että minkä vuoksi tuulivoimalan rakenteessa ei olla päädytty pyörähdysymmetrian kannalta useampilapaiseen tai melkein umpinaiseen rakenteeseen roottorissa.

Mitä suurempi määrä roottorissa on lapoja, sen suuremman vääntömomentin se tuottaa. Tilanne muistuttaa sähkömoottorin pyörimisnopeuden käytöstä napaluvun suhteen, jossa saman tehoisten moottoreiden vääntömomentti on verrannollinen pyörimisnopeuteen.

Pinta-alasuhteen kannalta on kuitenkin teknistaloudellisesti järkevämpää pyrkiä tavallaan samaan rakenteeseen, kuin sähkömoottorin magneettikentän hyödyntäminen pienemmillä napaluvuilla. Sama teho on otettavissa moottorista pois, mutta pyörimisnopeus on suurempi. Tämä sama analogia pätee lapasuunniteluun, jossa tuulen tehosta on hyödynnettävissä riittävä määrä energiaa kolmilapaisella mallilla. Aivan kuten sähkömoottorin rakenteessa, jossa napaluvun kasvattaminen lisää koneen hintaa ja tekee valmistuksesta monimutkaisempaa, sama tapahtuu roottorin rakenteessa suurilla tehoilla.

Tuulivoimaloita rakennettaessa ei ole tarkoituksena maksimoida energiatuotantoa, vaan voimalaitoksen taloudellista tuottoa, samalla kun pienennetään siihen vaikuttavia riskejä. Tällöin tuulivoimalassa päädytään energian talteenoton kannalta kompromisseihin, jotta rakenne säilyy taloudellisena.

2.6.4 Tehon tuoton mekaaninen säätäminen

Tuulivoimalan säädössä on huomioitava niin pienet kuin suuretkin tuulennopeudet. Mikäli tuulivoimala rakennettaisiin siten, että se kykenee hyödyntämään suurimmat myrskytuulet, olisi sen rakenne mekaanisesti huomattavasti nykyisiä järeämpi. Voimala, joka jättää nämä harvinaiset ja kokonaisenergian kannalta pienisisältöiset tilanteet hyödyntämättä, on mekaanisesti huomattavasti kevyempi.

Toisaalta myös erittäin pienen nopeuden ilmavirtausten hyödyntäminen ei ole välttämättä järkevää. Tämä loisi pintasuhteeltaan hyvin umpinaisen roottorirakenteen, joka on taas huono kompromissi muilla nopeusalueilla. Se olisi myös vastaavasti suuremmilla nopeuksilla heikko rakenteeltaan.

Yksinkertaisin mekaaninen säätömenetelmä on sakkaussäätö (*stall control*). Sakkaussäätö jakautuu passiiviseen ja aktiiviseen säätömenetelmiin.

Vakionopeuksisen voimalaitoksen säätömenetelmänä voi olla liian suuren tuulennopeuden energian ohittaminen passiivisella sakkauksella. Tässä menetelmässä roottorin lavat ovat kiinteästi kiinni navassaan, eikä niissä ole kääntöä. Aerodynaamisesti lavat ovat suunniteltu siten, että ilmavirtaus irtoa lavoista liian voimakkailla tuulilla ja niiden aiheuttama nostevoima pienenee. Ilmavirtauksen nopeuden lisääntyessä ilmavirtaus irtoa enemmän lavan pinnasta ja aerodynaaminen hyötysuhde heikkenee. Menetelmän nimenä oleva passiivinen sakkaussäätö tulee sen perusluonteesta, jossa aerodynaaminen suunnittelu mahdollistaa säädön. Aktiiviseen sakkaussäätöön palataan lapakulman säädön jälkeen.

Lapakulman säätö (*pitch control*) on yksi yleisimmistä tehonsäätömenetelmistä, jossa lapojen kulmaa säädetään voimalaitoksen oman tuulennopeusmittauksen perusteella. Säädöllä pyritään pitämään kohtauskulma mahdollisimman optimaalisena alhaisista nopeuksista nimellisteho asti. Ylittäessä nimellisteho säädetään kohtauskulmaa taas pienemmäksi, jotta mekaaninen teho ei ylitä voimalaitoksen suunniteltua kestoa. Tämä johtaa käytännössä siihen, että tuulivoimalan tehontuotanto kasvaa sen nimelliseen tuulennopeuteen asti. Tämän jälkeen se pysyy melko vakiona, kunnes ylittäessään voimalaitoksen myrskykestoisuuden rajan, voimalaitos ajetaan alas (katso kuvio 3). Säätö on hidas, jolloin suurilla tuulennopeuden muutoksilla tehontuotantoon tulee heilahtelua erityisesti toimittaessa ylitse nimellisnopeuden alueella.

Aktiivinen sakkaussäätö (*active stall control*) on yhdistelmä kahta edellistä. Pienillä tuulennopeuksilla toimitaan lapakulman säädön periaattein, mutta suuremmat kuin nimelliset tuulet sakataan. Erona lapakulman säätöön on, että sakkaussäädössä lapakulmia säädetään nimellisnopeuden yläpuolella vastakkaiseen

suuntaan. Lapakulman säädössä kohtauskulmaa pienennetään, jotta lapa ei sakkaa, kun taas aktiivisessa sakkaussäädössä tämä tehdään tarkoituksella.

Käytännön kokemukset ovat osoittaneet aktiivisen sakkaussäädön olevan tasaisin tehontuotoltaan, erityisesti oltaessa ylitse nimellisen tuulennopeuden. (Korpela A 2014 luentomoniste) (Korpela A 2016) (Korpela A – luento Tuulivoimajärjestelmät 2023)

3 TUULIVOIMALAITOSTEN KÄYTETYT GENERAATTORITYYPIT

Kuten kaikessa muussakin sähköntuotannossa, on generaattorille saatava aikaiseksi mekaanista vääntömomenttia pyörivän liikkeen kautta, joka voidaan oikein ohjattuna muuttaa sähköverkkoon sopivaksi energiaksi.

Perinteisesti voimalaitokset ovat rakennettu vierasmagnetoiduilla tahtigeneraattoreilla, joiden merkittävin ominaispiirre on tässä yhteydessä vakiona säilyvä kierrosnopeus. Vakiona säilyvä pyörimisnopeus on taas suoraan yhteydessä tuotettavan sähkötehon taajuuteen. Liittyen kuormituksen luonteesta, on koneen magnetointia säädetty suuremmaksi tai pienemmäksi. Tuulivoimalan kannalta tämän kaltaisen tehontuotannon rakentaminen suoraan verkkoon kytkettynä loisi hyvin monimutkaisen ja kalliin rakenteen. Lisäksi se olisi monivaiheisena erittäin suuresti tehoa hukkaava. Tuulivoimalat tarvitsevatkin erityyppisiä teknisiä ratkaisuita pyörivän liikkeen muuttamiseksi sähköenergiaksi. Tässä yhteydessä voidaan pääsääntöisesti sanoa, että tuulivoimalaitosten kannalta tehoelektroniikka on välttämättömyys verkkoon kytkennän kannalta teknistaloudellisten ratkaisuiden osalta.

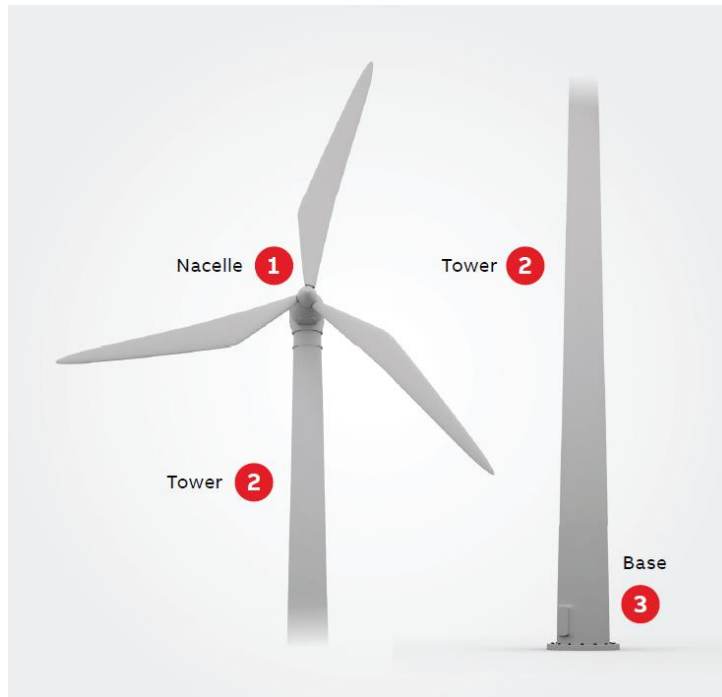
Seuraavat osiot käyvät läpi periaatteet tuulivoiman erityyppisten sähköntuotantotapojen rakenteesta lähtien vakionopeuksisesta epätahtikoneesta, päätyen tästä kehitettyyn DFIG-koneeseen, josta taas päästään tahtikoneeseen ja kestopagneettikoneisiin.

Voimalaitosten tehoelektroniikka on rajattu tämän työn ulkopuolelle ja sitä käsitellään lähinnä sen perustoiminnallisuuksien kautta, eli vaihtosuuntaus ja tasa-suuntaus. Tehoelektroniikkaan liittyvät toiminnallisuudet ovat hyvin laaja kokonaisuus voimalaitoksissa ja niiden käsittely syvällisemmin on useamman tutkielman arvoinen.

3.1 Tuulivoimalaitosten rakenne

Tuulivoimalaitoksen rakenteessa on tunnistettavissa tiettyjä yleisiä rakenteellisia elementtejä, joihin tässä työssä viitataan. Seuraavat käsiteltävät kokonaisuudet nimeävät ja käsittelevät erinäisiä osien kokonaisuuksia voimalaitoksissa yleensä,

sekä tietyissä turbiinimalleissa. Kuva 22 avaa yleisiä termejä rakenteen kokonaisuudelle ja kuva 23 antaa yleiskuvaa nasellin rakenteesta.



KUVA 22. Tuulivoimalaitoksen osien termistöä (ABB:n Wind Power Industry 2021 esitelmä)



KUVA 23. Voimalaitoksen nasellin rakenne (ABB:n Wind Power Industry 2021 esitelmä)

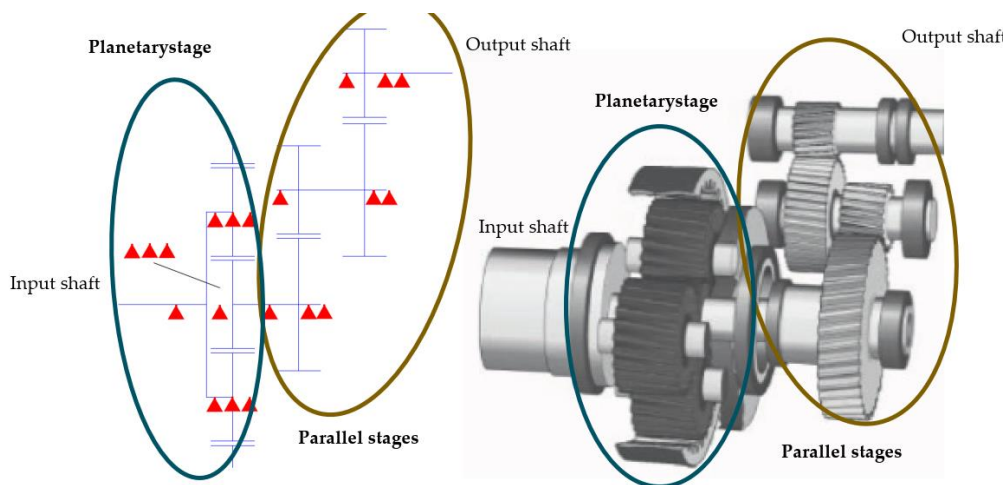
Perusrakenteeltaan voimalaitoksen nasellista tulee ymmärtää erityisesti muuttamat sähköntuotantoon vaikuttavat tekijät.

Roottorin pyöriminen on yleensä nopeudeltaan suuruusluokassa kymmeniä kieroksia minuutissa. Tämä nopeus on generaattoreiden osalta liian pieni, pois lukien tietyt kestopagneettigeneraattorit ja hyvin suurinapaiset tahtigeneraattorit. Käytännössä roottorin pyörimisnopeus on sovitettava suuremmaksi vaihteistolla, jolla pyörimisnopeus saadaan edullisemmaksi sähkökoneille, esim. satoihin kieroksiin minuutissa tai yli tuhanteen kierrokseen minuutissa.

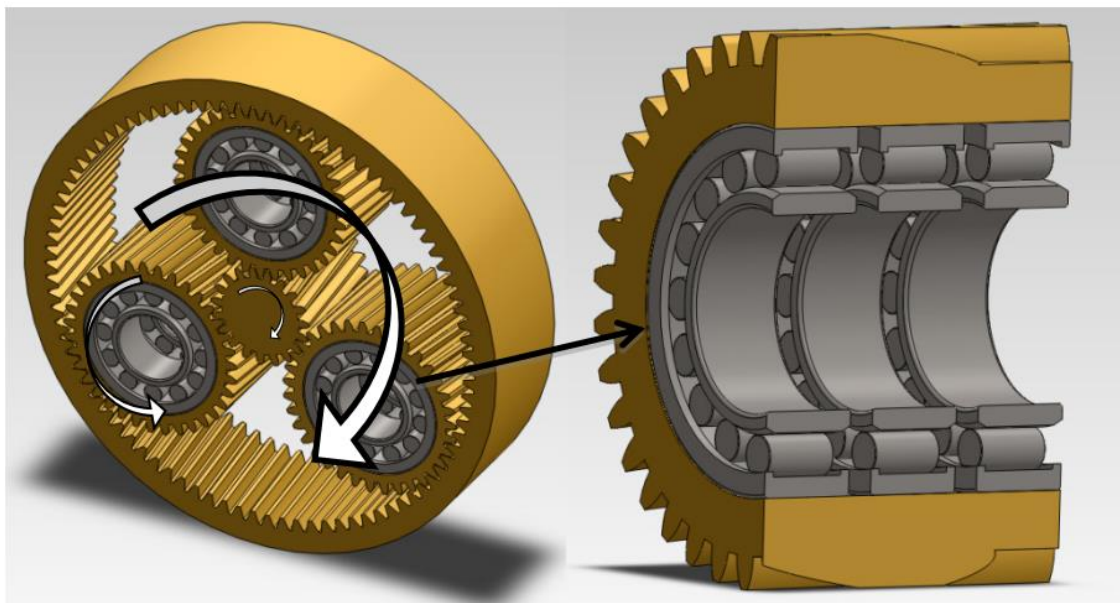
Mikäli tuulivoimala rakennettaisiin siten, että vain tietyllä tuulennopeudella oltaisiin kytkeydytty sähköverkkoon, menetettäisiin tuulen sisältämästä kineettisestä energiasta merkittävä osa. Tämän vuoksi tuulivoimala sisältää erityyppisiä generaattoriratkaisuita, jotka ovat yhdistetty erityyppisiin tehoelektroniikkalaitteistoihin. Näistä muodostuvat tietyntylaiset sähkötekniset kokonaisuudet mahdollistavat laajemman pyörimisnopeusalueen hyödyntämisen sähköntuotantoon.

3.1.1 Tuulivoimalaitosten vaihdelaatikot

Pääosa tuulivoimaloista välittää vaihteistolla kineettisen energian generaattorille. Tuulivoimalaitoksissa käytetään pääsääntöisesti planeettavaihteistoja. Kuvat 24 ja 25 kuvaavat tuulivoimalan vaihteistojen rakenteita.



KUVA 24. Tyypillinen 2 MW:n tuulivoimalan vaihteiston rakenne (Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista – viitattu 3-2024)



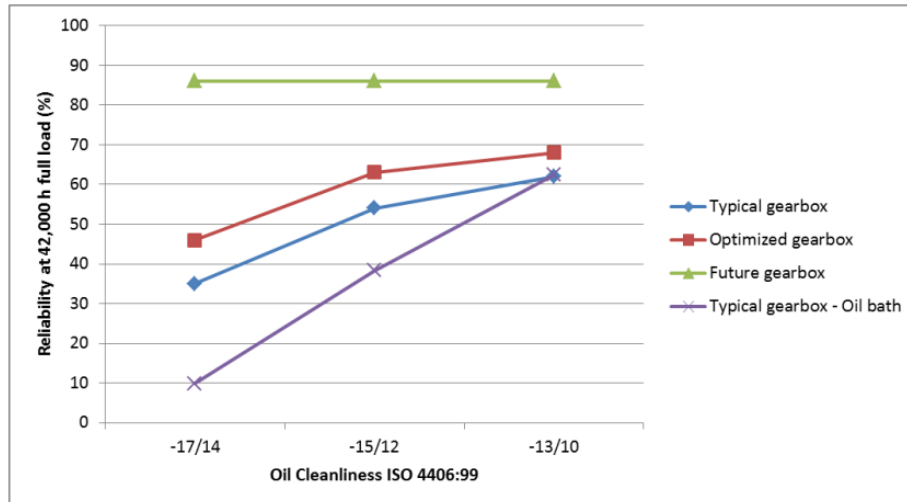
KUVA 25. Planeettavaihteiston rakenne kolmella rullaavalla laakeroinnilla (Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista – viitattu 3-2024)

Tyypilliset vaihdelaatikat sisältävät 3 vaihteistotilaa, jotka vastaa melko hyvin Energiaviraston syöttötariffien alla olevien voimalaitosten teknisestä toiminnasta löytynyttä tietoa. Saman tutkimuksen mukaan noin 2 MW:n vaihteiston paino on noin 15 tonnia.

Ruotsalaisen Energiforskin tutkimuksessa vaihdelaatikoista käsiteltiin niiden luotettavuutta. Luotettavuuden kannalta olennaisimpia asioita olivat öljyn puhtaus ja vaihdelaatikon lämpötila (Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista – viitattu 3-2024)

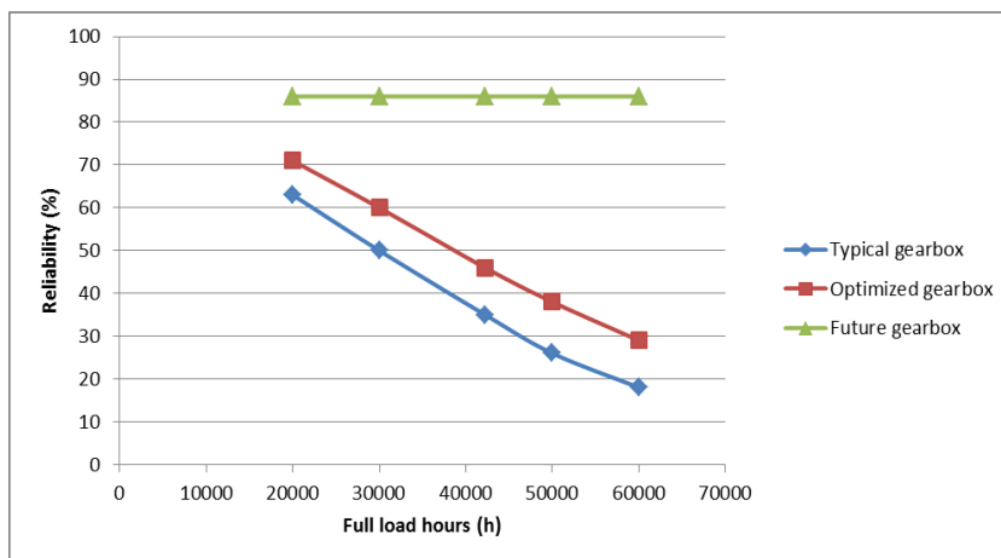
Keskimääräinen korjaustarve tuon tutkimuksen perusteella on vaihdellut 0,5...1,5 välillä 20 vuoden operoinnin aikana, eli keskimäärin vähintään kerran laitteiston käyttöiän aikana. Tutkimuksen mukaan luotettavuuden parantamiseen on olemassa hyvin merkittävä potentiaali uudentyyppisille vaihdelaatikon suunnitellulla, jolla keskimääräinen korjaustarve olisi pienennettävissä 0,15 korjauskertaan 20 operointivuoden aikana. Tämä saavutetaan pääasiassa laakeroinninkehittämisellä sekä kriittisten komponenttien määrän vähentämisellä. Allekirjoittanut kokee tämän tyyppisen teknisen kehityksen täysin mahdolliseksi. Kun verrataan historiallisesti luotettavuuden kehittymistä esimerkiksi autojen voimalinjoissa, on siellä tapahtunut täysin vastaavia kehityskulkuja.

Kuvio 5 esittää öljyn puhtauden vaikutusta käyttöikään ja luotettavuuteen. Kuviosta on havaittavissa partikkelimäärän lisääntymisen vaikutus käytettävyyden heikentymiseen. Tutkimuksen mukaan kuitenkin perinteiset hydraulikan nyrkki-säännöt ISO-luokkien vaikutuksesta elinikään on huomattavasti turvallisemmalla puolella oleva arvio.



KUVIO 5. Öljyn partikkelimäärän vaikutus luotettavuuteen (Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista – viitattu 3-2024)

Kuvio 6 kuvaa käyttötuntien vaikutusta luotettavuuteen. Kuvion dataan tulee suhtautua skeptisesti, koska aiheeseen liittyvät taustatiedot eivät tule esille. Esimerkiksi puutteiksi jäivät huolto-ohjelmien ja erilaisten kunnonvalvontaohjelmien sisällöt.



KUVIO 6. Käyttötuntien määrän vaikutus luotettavuuteen (Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista – viitattu 3-2024)

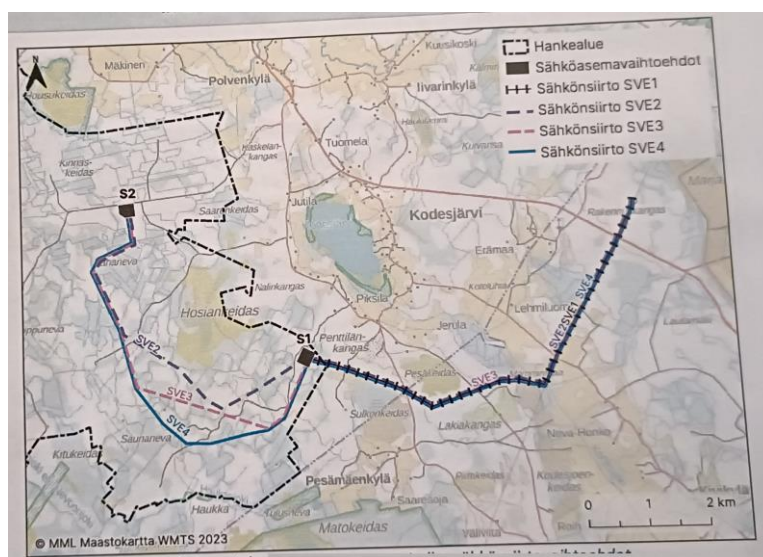
Tutkimuksen mukaan myös pääsääntöisesti tuulivoimaloiden vaihteistojen ongelmat johtuvat niiden rakenteen alimitoittamisesta, erityisesti niiden laakeroinnin osalta. (Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista – viitattu 3-2024)

3.1.2 Generaattoreiden jännitteet ja sähkön siirto kantaverkkoon

Myöhemmin tulevassa materiaalin käsittelyssä ja haastatteluissa tulee vastaan tieto, jossa todetaan tuulivoimalaitoksien generaattoreiden jännitteen olevan pääsääntöisesti pienjännitettä. Suurten voimalaitosten tehonsiirron kannalta tämä ei mahdollista pitkää siirtoa, joten jännitetaso on nostettava vähintään keskijännitteeksi, jotta se on siirrettävissä kantaverkkoon.

Tuulivoimalaitosten muuntajat ovat pääsääntöisesti olleet kuivamuuntajia, jotka on sijoitettu tornin alaosaan, mutta trendinä on muuntajien muuttuminen öljymuuntajiksi ja niiden tuominen naselliin. Tämä muutos mahdollistaa keskijännitteellä tapahtuvan siirron itse tuulivoimalan sisällä.

Kuvassa 26 on ote hankesuunnittelusta Isojoen Kolmihaaran tuulipuistosta.



KUVA 26. Kolmihaaran puiston ajatellut liittymävaihtoehdot (Kolmihaaran hankkeen suunnitelma 2024)

Hankesuunnitelmassa kuvataan sähkönsiirron kannalta neljää eri toteutusvaihtoehtoa:

Kaikissa sähkönsiirtovaihtoehtoissa hankealueen sisäinen sähkönsiirto tuuli- ja aurinkovoimaloilta sähköasemalle toteutetaan maakaapeleilla, ja liityntä valtakunnanverkkoon tapahtuu uudella ilmajohdolla Marjakeitaan tuulivoimapuiston alueelle rakennettavan uuden sähköaseman kautta.

Sähkönsiirto SVE1: Hankkeen sähkönsiirtoa varten hankealueen kaakkoisosaan rakennetaan sähköasema (S1). Sähkönsiirron liityntää varten rakennetaan 400 kV:n voimajohto Pesäkeitaan eteläpuolitse Mämminmaalle, jonka jälkeen johto sijoittuu Fingrid Oyj:n voimajohdon länsipuolelle, jatkaen sen linjaa myötäillen Marjakeitaalle. Rakennettavan sähkönsiirtoreitin pituus on noin 7,9 km.

Sähkönsiirto SVE2: Hankkeen sähkönsiirtoa varten hankealueen itäosaan rakennetaan sähköasema (S2). Sähkönsiirron liityntää varten rakennetaan 400 kV:n voimajohto, jonka reitti kiertää hankealueella Hosiankeitaan sen eteläpuolelle sijoittuvan Puolivälinnevan kankaan kautta ja jatkuu hankealueen ulkopuolella Pesäkeitaan eteläpuolitse Mämminmaalle. Mämminmaalla johto sijoittuu Fingrid Oyj:n voimajohdon länsipuolelle, jatkaen sen linjaa myötäillen Marjakeitaalle. Rakennettavan sähkönsiirtoreitin pituus on noin 14,5 km.

Sähkönsiirto SVE3: Hankkeen sähkönsiirtoa varten hankealueen itäosaan rakennetaan sähköasema (S2). Sähkönsiirron liityntää varten rakennetaan 400 kV:n voimajohto, jonka reitti kiertää hankealueella Hosiankeitaan ja sen eteläpuolelle sijoittuvan Varsaharjun pohjoispuolitse ja jatkaa hankealueen ulkopuolella Pesäkeitaan eteläpuolitse Mämminmaalle. Mämminmaalla johto sijoittuu Fingrid Oyj:n voimajohdon länsipuolelle, jatkaen sen linjaa myötäillen Marjakeitaalle. Rakennettavan sähkönsiirtoreitin pituus on noin 15,3 kilometriä.

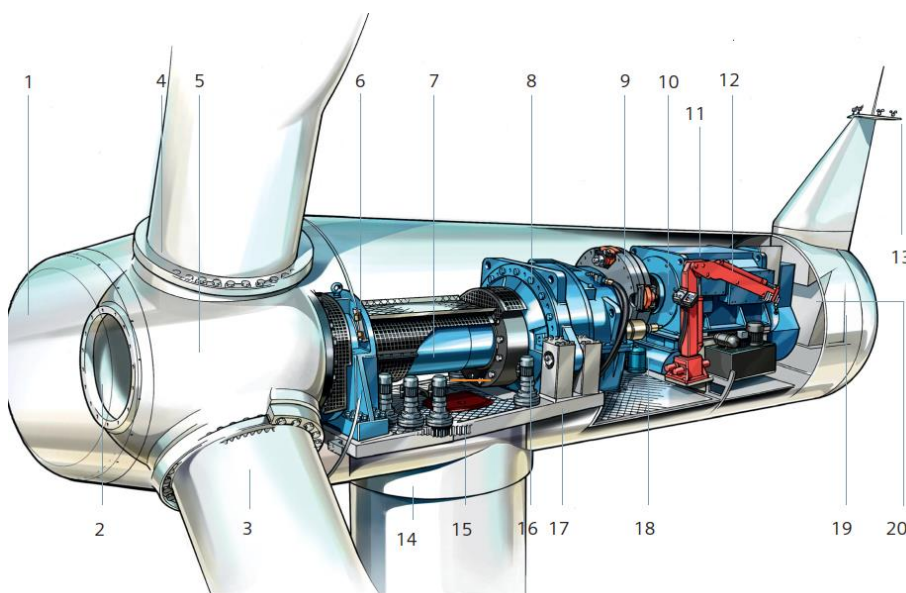
Sähkönsiirto SVE4: Hankkeen sähkönsiirtoa varten hankealueen itäosaan rakennetaan sähköasema (S2). Sähkönsiirron liityntää varten rakennetaan 400 kV:n voimajohto, jonka reitti kiertää hankealueella Hosiankeitaan sen eteläpuo-

lelle sijoittuvan Varsaharjun eteläpuolitse ja jatkaa hankealueen ulkopuolella Pesäkeitaan eteläpuolitse Mämminmaalle. Mämminmaalla johto sijoittuu Fingrid Oj:n voimajohdon länsipuolelle, jatkaen sen linjaa myötäillen Marjakeitaalle. Rakennettavan sähkönsiirtoreitin pituus on noin 15,7 kilometriä.

(Isojoen Kolmihaaran tuulivoimahankkeen kuvaus)

3.1.3 Siemensin SWT-2.3-108 rakenne

Siemensin SWT tuuliturbiinin nasellin rakenne on avattu kuvassa 27



KUVA 27. Siemensin rakenne (Siemens katalogi: Siemens_Wind_Turbine_SWT-2_3-108_EN)

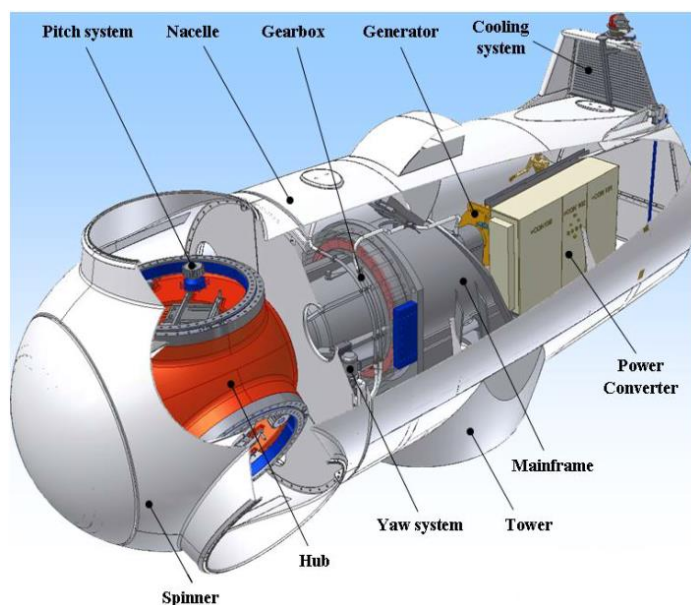
Jossa:

- | | |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Roottorin keskiö | 11. Generaattori |
| 2. Roottorin keskiön kiinnitys | 12. Huoltonosturi |
| 3. Roottorin lapa | 13. Meteorologiset anturit |
| 4. Pitch säädön laakerointi | 14. Torni |
| 5. Roottorin hub | 15. Kääntömekanismi |
| 6. Päälaakerointi | 16. Kääntömekanismin vaihdelaatikko |
| 7. Pääakseli | 17. Nasellin pohjatuki |
| 8. Vaihdelaatikko | 18. Öljyn suodatin |
| 9. Jarrulevy | 19. Kotelointi |
| 10. Coupling | 20. Generaattorin tuuletin |

Siemensin SWT- voimalaitoksen katalogilehden kuvankaappaus kuvaa DFIG-generaattorilla varustetun voimalaitoksen rakennetta. Rakenteessa erottuvat hyvin voimalaitoksen vaihteisto ja sen välittämä teho generaattorille.

3.1.4 Hyundai HQ2000 datalehti

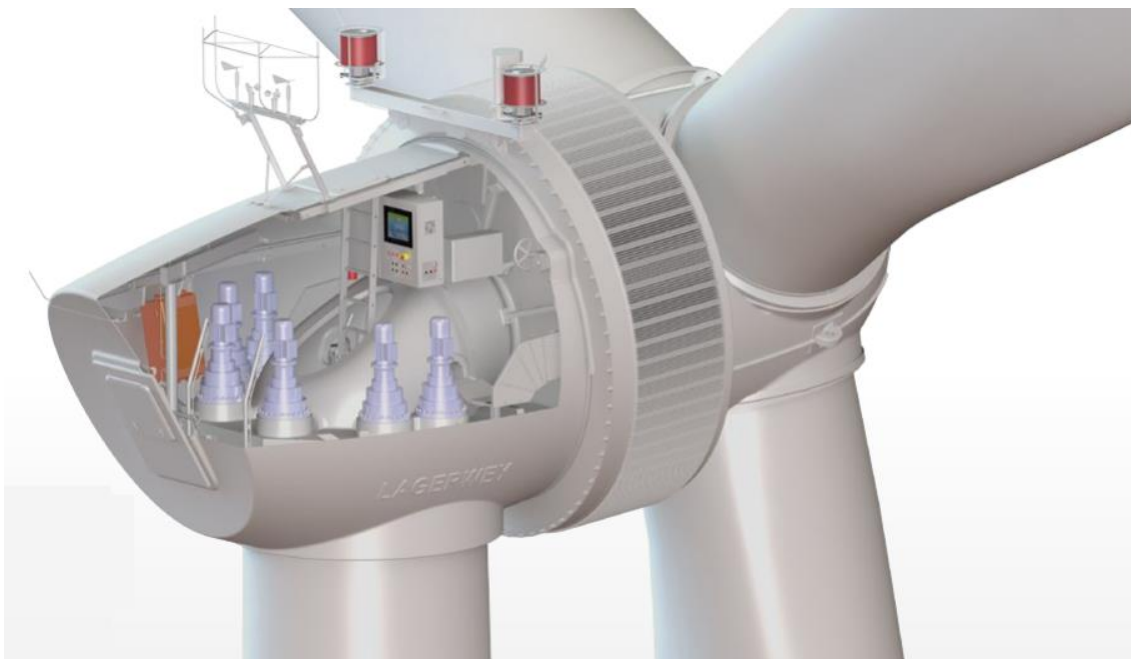
Hyundailla on Suomessa syöttötariffijärjestelmän mukaan muutama HQ2000 DFIG turbiini. Kuva 28 kuvaa Hyundain HQ2000 nasellia.



KUVA 28. Hyundain HX2000 DFIG-generaattorilla varustetun nasellin rakennetta (Hyundai HQ2000 turbiinin tekninen lehti)

3.1.5 Lagerwey L100 2.5 MW datalehti

Lagerwey on syöttötariffijärjestelmän mukaan valmistanut pienen määrän voimalaitoksia Suomeen. Niiden erikoisuutena on suoravetoisuus, eli niissä ei ole vaihdelaatikkoa. Kuvassa 29 on esimerkki nasellin rakenteesta Lagerweyn L100 voimalaitoksesta, joka poikkeaa merkittävästi edellä kuvatuista tuulivoimaloista.



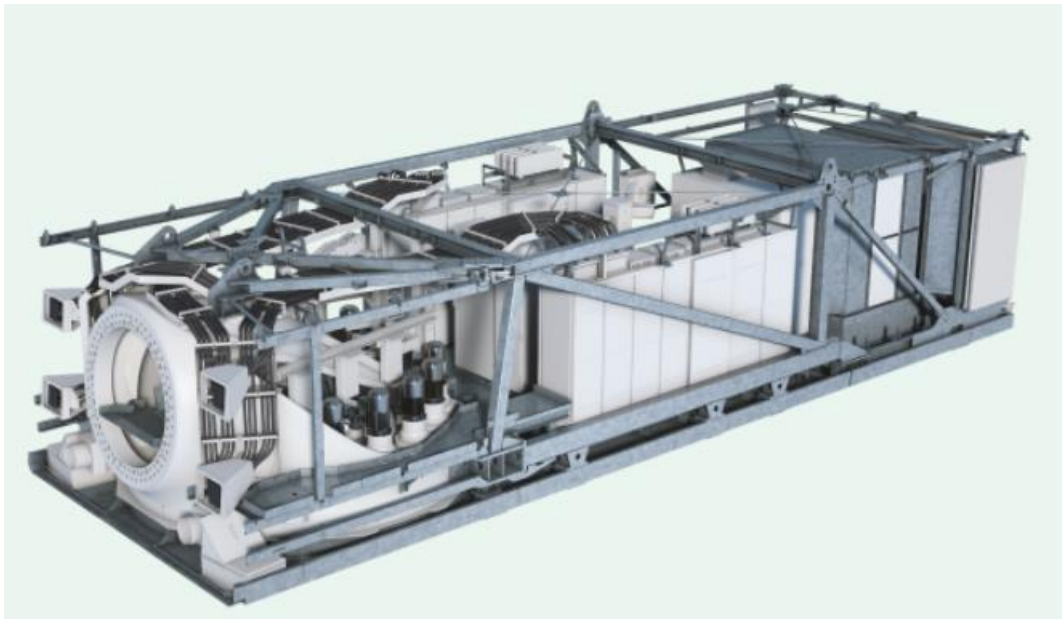
KUVA 29. Lagerweyn suoravetoisen voimalaitoksen nasellin esimerkkirakenne (Lagerweyn L100 voimalaitoksen datalehden kuva nasellin rakenteesta)

3.1.6 Enerconin käyttämä tekniikka

Enercon on Suomen mittakaavassa pienivolyyminen tekijä, mutta heidän tekninen toteutus poikkeaa vaihteistollisista tuulivoimaloista. Enerconin tuuliturbiinin rakennetta on kuvattu kuvissa 30 ja 31.



KUVA 30. Enerconin roottorin asennus (Enerconin tuuliturbiinien teknologia <https://www.enercon.de/en/wind-turbines/technology>)



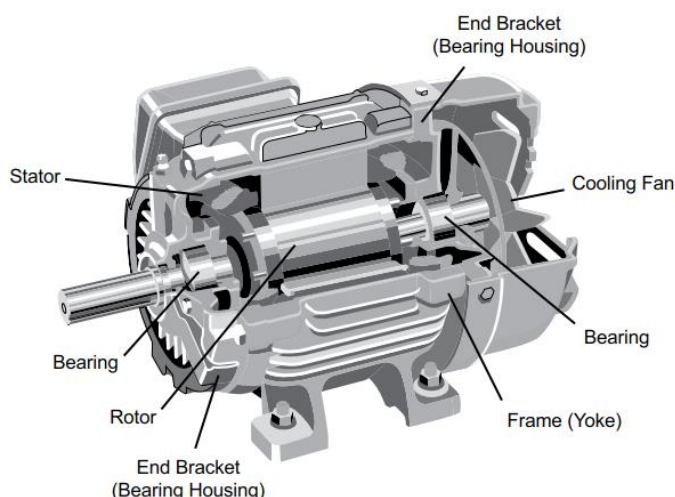
KUVA 31. Enerconin nasellin modulaarisen rakenteen osia (Enerconin tuuliturbiinien teknologia <https://www.enercon.de/en/wind-turbines/technology>)

3.2 Pyörivän sähkökoneen rakenne

Tämän hetken markkinoilla olevat pyörivät sähkökoneet perustuvat kaikki sähkömagneettiseen induktioon. Laitteiden perusrakenteessa perusosia on hyvin vähän. Näiden tiettyjen perusosien vuorovaikutus ja energian virtaussuunta määrävät, toimiiko pyörivä kone generaattorina tai moottorina.

Sähkökone on yksinkertaisimmillaan jaettavissa kiinteästi paikallaan olevaan osaan ja pyörivään osaan. Yleisin rakenne on, että roottori sijaitsee staattorin sisäpuolella, mutta tästä rakenteesta poikkeaminenkaan ei ole harvinaista.

Kun edellä mainittuihin osiin lisätään joko yhdessä tai yksin keloja, magnetoituva tai magneettinen rakenne sekä magneettikenttää johtava rakenne, saadaan johdettua kaikki pyörivien sähkökoneiden perusrakenteet. Tämän lisäksi rakenteeseen voivat kuulua esim. kommutaattori sekä erinäisiä lisälaitteita. Peruskäsitteilyn kannalta jokaista konetta kannattaa lähestyä näiden muutamien osien kautta, jolloin käytännössä kaikkien pyörivien koneiden toiminnallisuus on johdettavissa näistä perusteista. Kuvassa 32 oikosulkumoottorin rakenteen periaatteellinen kuva.



KUVA 32. Oikosulkumoottorin perusrakenteen kuva (Siemens – Basics of AC Motors opas)

3.2.1 Sähkömagneettinen induktio ja sen aiheuttamien voimavaikutusten fysikaalinen perusta

Pyörivien sähkökoneiden toiminnan perustana on suhteellisesti paikallaan olevan staattorin ja pyörivän roottorin magneettikenttien välinen vuorovaikutus. Aivan kuten yleisimpien tuulivoimalaitosten lapojen rakenne, on myös sähkökoneet rakennettu kolmivaihejärjestelmän kautta pyörähdyssymmetrisiksi. Tällöin pyörivä mekaaninen liike saadaan kustannustehokkaimmin ja pienimmillä häviöillä sovellettua käyttöön.

Sähkömagneettinen induktio perustuu Faradayn induktiolakiin (Pyrhönen J– Design of Rotating Electrical Machines 2013). Faradayn induktiolaki voidaan kuvata kaavalla

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \frac{d}{dt} \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (7)$$

jossa E on sähkökentän voimakkuus, Φ on magnetismin määrää kuvaava suure, magneettivuon tiheyden vuo tietyn pinnan läpi. Pyörivissä sähkökoneissa induktiolakia hyödynnetään siten, että moottoreissa syötetyn sähköön avulla saadaan aikaiseksi pyörivä magneettinen kenttä, joka taas aiheuttaa pyörivän mekaanisen liikkeen. Generaattoreissa sama periaate tapahtuu toisinpäin.

Kaavan osalta olennaisinta ymmärtää on periaate, jossa magneettivuon muutos ajan suhteen luo jännitteen. Kaavan ensimmäinen integraali tarkoittaa suljettuun silmukkaan syntyvää jännitettä. Toinen integraali tarkoittaa silmukan sisälle jäävän pinnan lävistävän magneettivuon muutosta ajan suhteen.

Kela on olennaisin sähkötekkinen komponentti moottorin kannalta ymmärtää. Sen ylitse vaikuttavaa jännitettä ajan suhteen voidaan kuvata funktiolla

$$u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (8)$$

jossa $i_L(t)$ kuvaa virran funktiota ajansuhteen ja L kelan induktanssia. Virtapiirissä esiintyvän virran hyödyntämistä magneettikentäksi ϕ voidaan kuvata funktiolla

$$\phi = L \cdot I \quad (9)$$

jossa L on kelan induktanssia kuvaava termi (sähköenergian muutosvoiman suuruutta kuvaava termi). Kun yhtälöt 8 ja 9 yhdistetään, saadaan jännitteen funktioksi ajan suhteen

$$u_L(t) = \frac{\phi}{I} \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (10)$$

Muodostuneesta yhtälöstä havaitaan, että kelarakenteessa vuolla ja virranmuutoksella on yhteys jännitteen indusoitumiseen.

Magneettivuohon vaikuttaa kelan rakenteessa myös sen kelan kierrosmäärä, jolloin se voidaan huomioida kaavalla:

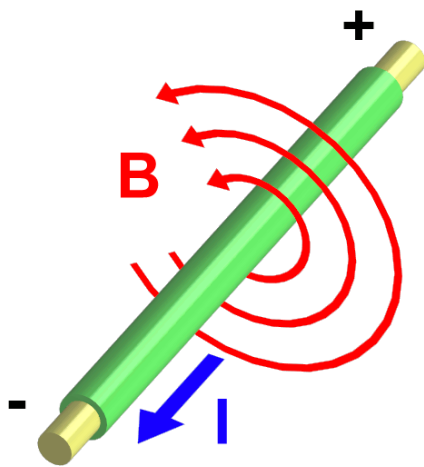
$$E = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (11)$$

Kaavan mukaisesti siis muuttuva vuo ajan suhteen aiheuttaa niin suuren jännitteen, kuin kelassa on kierroksia. Kaava tarkoittaa myös toisaalta sitä, että muuttuva vuo, joka kulkee kelarakenteen läpi, indusoi siihen jännitteen. Tämä on generaattorin toiminnan perusta. // Sähköalan perusoppi 3 – Tuomo Leppihalme //

Mikäli jännitteinen sähköinen piiri tehdään suljetuksi, saadaan aikaiseksi virtapiiri. Virtapiirissä taas pätee Maxwellin yhtälöistä Amperen laki

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 I_{enc} \quad (12)$$

jossa \mathbf{B} on magneettivuon tiheys, $d\mathbf{l}$ on pieni alkio (differentiaali) suljetusta käyrästä C , I_{enc} on käyrän C sisäänsä sulkeman alueen läpi kulkeva virta (virrantiheyden pintaintegraali), μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti. (University Physics. s1026). Kuva 33 visualisoi Amperen lakia.



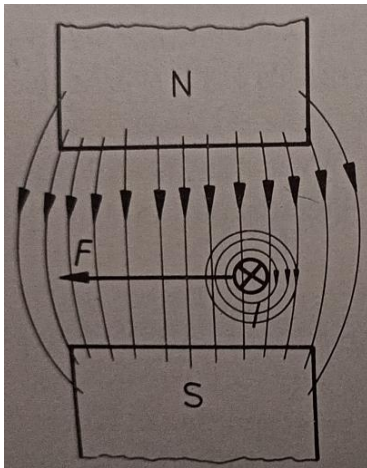
KUVA 33. Amperen laki visualistoituna (Wikipedia – Amperen lain visualisointi https://fi.wikipedia.org/wiki/Amp%C3%A8ren_laki)

Pohjimmiltaan kaava tarkoittaa kuvan 33 mukaista tilannetta, jossa piirissä kulkeva virta aiheuttaa aina ympärilleen magneettikentän.

Kun edellä olevat teoreemat yhdistetään fyysiseen voimavaikutukseen, ne saadaan sidottua yhteen kaavalla:

$$F = B I \sin \alpha \quad (13)$$

Kaavaa visualisoi kuva 34, joka esittää magneettikentässä olevaan virralliseen johtimeen vaikuttavaa mekaanista voimaa. Johtimen virta kulkee katsojasta pois päin, jolloin ylhäältä alas vaikuttaa magneettikentän luoma voimavaikutus on 90 asteen kulmassa kenttään nähden vasemmalle. Tätä samaa ilmiötä kuvataan fyysikassa magnetismin oikean käden säännöllä.

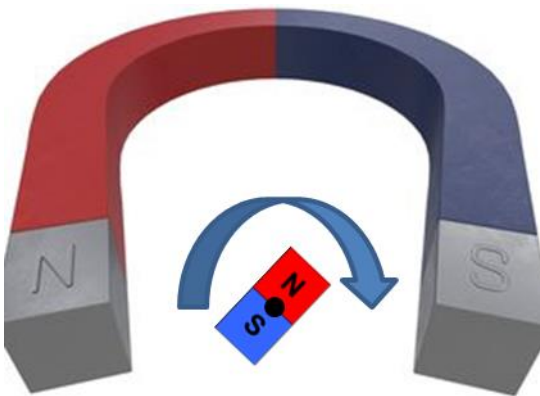


KUVA 34. Virrallinen johdin magneettikentässä (Leppihalme T 1981 – sivu 26)

Hyödyntämällä teorioita edellä kuvattujen kaavojen avulla, on mahdollista ymmärtää käytössä olevien pyörivien sähkökoneiden toimintaperiaatteet.

3.2.2 Yksinkertainen generaattori magneettisten vuorovaikutuksien alaisena

Ajatellaan kuvan 35 mukaisesti edellä mainittujen voimavaikutusten periaatteella muodostuvaa kahta magneettia. Näistä ensimmäinen on suuri paikallaan oleva hevosenkengän mallinen magneetti ja toinen keskeltään kiinnitetty ja akseloitu sauvamagneetti, joka pääsee vapaasti pyörimään.

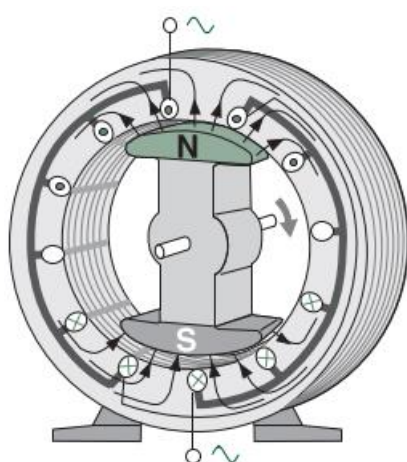


KUVA 35. Generaattorin voimavaikutusten periaate (Heikkilä S. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi Syksy 2023 5S00DY06-3003)

Keskellä pyörivä sauvamagneetti pyrkii aina asettumaan paikallaan pysyvän vastakkaisen navan vastaiseksi. Mikäli magneettia pyöritetään, vastustavat magneettikenttien voimat pyörimisliikettä.

Mikäli haluamme hyödyntää magnetismin synnyttävän vastavoiman työnä, voimme korvata hevosenkenkämagneetin kelalla, joka reagoi pyörivään roottoriin.

Kuvassa 36 pyörittämällä roottoria, saadaan staattorille aikaiseksi Amperen lain mukaan virtapiiri, mikäli käämitys suljetaan galvaanisesti. Koska magneetit etääntyvät ja lähestyvät koko pyörimisliikkeen ajan samalla frekvenssillä staattorin käämejä, muodostuu jännitteestä sinimuotoinen.

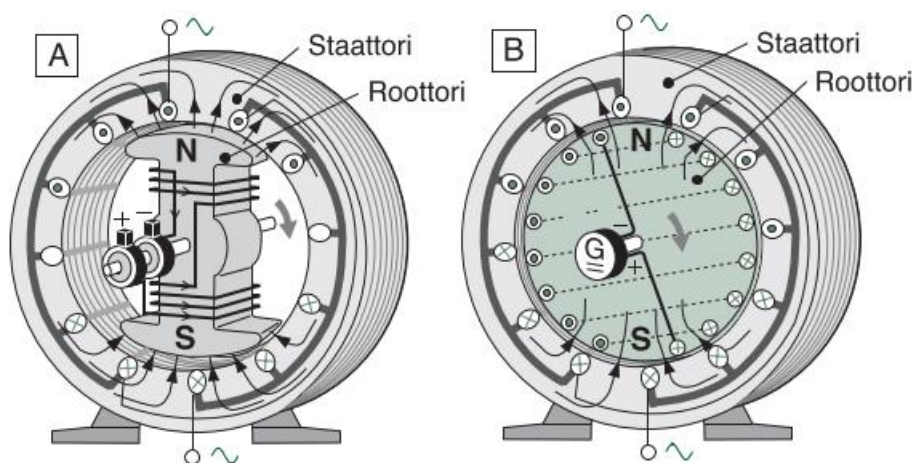


KUVA 36. Yksinkertainen kestopagneetti generaattori (Ahoranta 2017 Sähkötekniikka – s 266)

Olettaen roottorin ja staattorin pinnan olevan koko ajan yhtä etäällä, on muodostuvan jännitteen taso verrannollinen roottorin kestopagneettien luoman magneettikentän ja staattorin käämien osalta vaikuttavaan magneettikentän leikkausnopeuteen. Toisin sanoen muodostuvan jännitteen amplitudi on verrannollinen roottorin pyörimisnopeuteen.

Generaattorin tuottaman virran määrää kuormitus. Suurempi kuorma pyrkii saamaan generaattorilta energiaa sen magneettikentästä. Mikäli magneettikenttä pystyy välittämään pyörivän voiman ja voimalaitteen tuottaman momentin eteenpäin, säilyy magneettikenttä yhtä suurena ja jännite ei romahda. Mikäli taas magneettikentän voimavälitys kyky loppuu, jännite romahtaa, aivan kuten muuntajassakin vastaavassa tilanteessa.

Mikäli taas halutaan säätää muodostuvaa jännitteen tasoa, voidaan roottorin kes-
tomagneetit vaihtaa magnetoinnin kannalta säädettäväksi magnetoinnin läh-
teeksi, kuten alla kuvassa 37 on esitetty.



KUVA 37. Harjamagnetoitu ja harjattomasti magnetoitu roottorirakenne generaattorissa. (Ahoranta 2017 Sähkötekniikka – s 266)

Yllä kuvatussa vierasmagnetoidussa generaattorissa saadaan roottorissa olevalla kelalla luotua säädettävä magneettikenttä. Lisäämällä roottorille ohjattavaa jännitettä, voidaan vaikuttaa muodostuvan magneettikentän suuruuteen.

Tämänkaltaisessa rakenteessa kuormituksen mukaan säädetään roottorin magnetointia, jolla pyritään pitämään generaattorin napajännite halutun suuruisena. Koneen roottoria pyörittävän vääntömomentin suuruudella säädellään koneen virran tuoton kykyä.

Näiden lisäksi on mahdollista rakentaa sellainen konetyyppi, joka toimii yhtä aikaa sähköä kuluttavana ja tuottavana laitteena verkon kannalta. Tällöin konetyypinä on epätahtikoneet/induktiokoneet, joissa kone magnetoit itsensä verkosta ottamallaan teholla staattorinsa kautta roottorin häkkikäämityksen, kun taas pätöteho osuus saadaan syötettyä sähköverkkoon roottoria pyörittämällä.

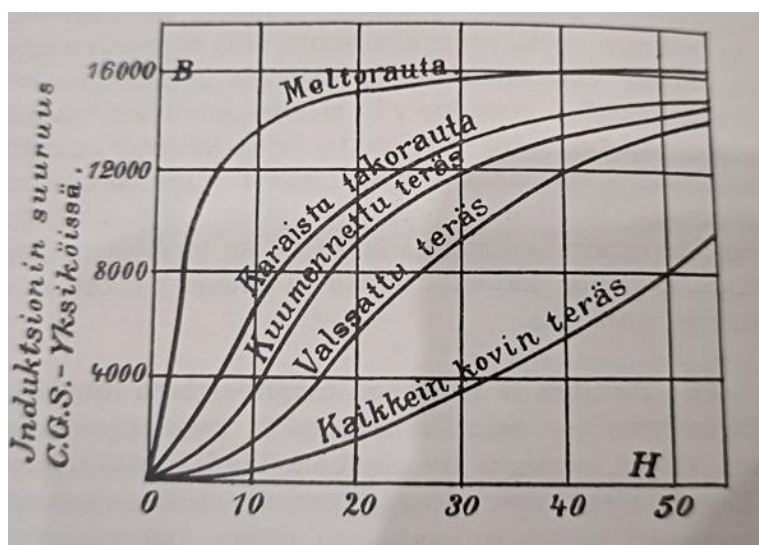
Käytännössä koneet syöttävät aina kolmivaiheverkkoa. Edellä esitettyihin esimerkkeihin verraten on erona koneiden staattoreiden käämityksen rakenne, jossa jokaiselle vaiheelle tuodaan symmetrisesti staattorille jaetut käämitykset.

Koneen magneettikentän pyörimisnopeuteen voidaan vaikuttaa lisäämällä magneettisia napoja roottorille ja staattorille, jolloin voidaan vaikuttaa tarvittaviin pyörimisnopeuksiin ja momentteihin.

Koneiden tekniisiin rakenteisiin liittyy huomattavasti muitakin teknisiä yksityiskoh-
tia. Perustoiminnan ymmärtämisen kannalta eri konetyyppien välillä, päästään
näillä tekijöillä käsittelemään yksittäisten koneiden perusominaisuuksia parem-
min.

3.2.3 Magneettivuon määrä eri materiaaleissa

Magneettisten voimien kulkeminen materiaaleissa on hyvin samankaltaista kuin sähkövirran kulku johtimessa tai eristeessä. Erilaiset materiaalit mahdolltavat itseensä eri määrän magneettivuota, jolloin sähkökoneen suunnittelussa käytetyn rautaseoksen laatu määrää sen, kuinka paljon rakennetta voidaan magnetoida. Käytettynä yhdisteenä on yleisesti rauta, johon on seostettu piitä. Paikallaan olevissa sähkökoneissa piin osuus on suurempi, jolloin seos on hauraampaa, mutta se johtaa erittäin hyvin magneettivuota. Pyörivissä koneissa piin osuus on pienempi, jolloin syntyvä seos on joustavampaa, mutta johtaa magneettivuota hie-
man heikommin. (T Schwartche Sähkötekniikan Perusteet 1905). Erilaisilla materiaaleilla on eri tavoin magneettivuota johtavia ominaisuuksia, joita kuvaa kuva 38.



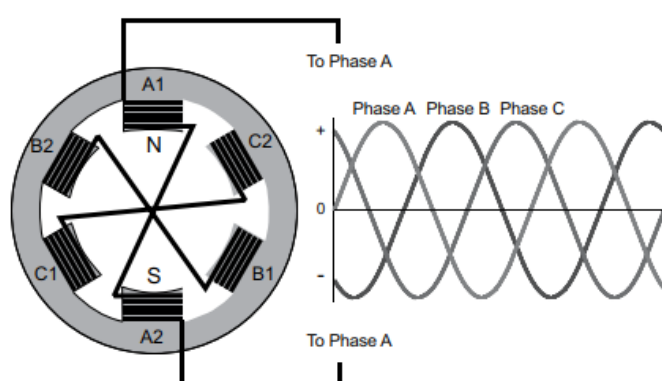
KUVA 38 Erilaisten materiaalien vertailua magneettivuon johtamisen osalta (Schwartz 1905 – sivu 76)

3.3 Kolmivaihekoneiden perusteet

3.3.1 Kolmivaihekoneen staattorin perusrakenne

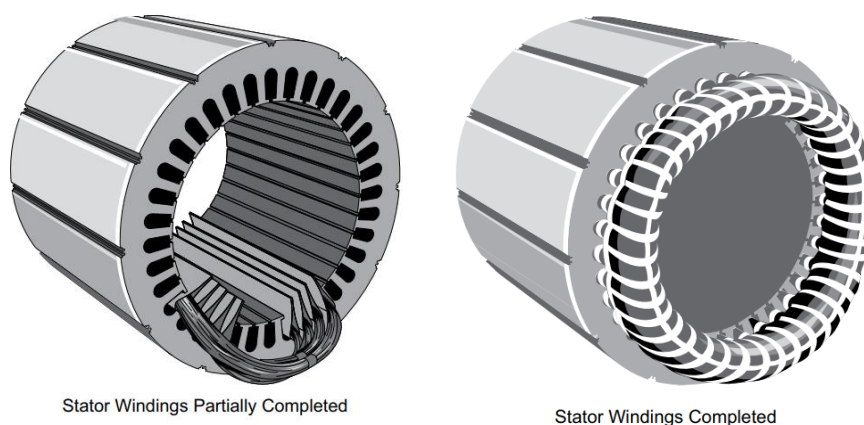
Koska käytössä olevien koneiden staattorien perusrakenteet ovat suurilta osin samankaltaiset, käsitellään ne yhtenä kokonaisuutena tämän kappaleen alla.

Epätahtikone on ulkoiselta rakenteeltaan kuvan 29 mukainen. Ja sen roottorin rakenne on kolmivaihekoneessa kuvan 39 mukainen:



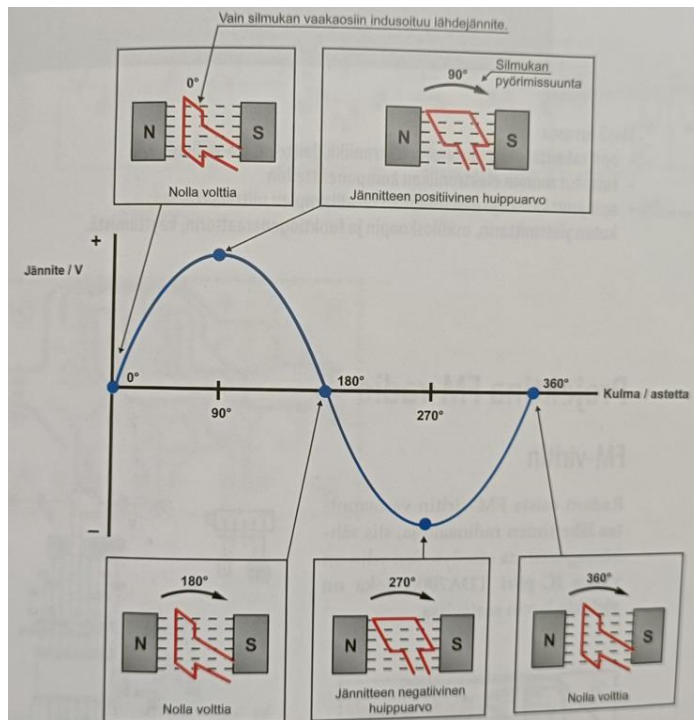
KUVA 39. Yksinkertaistettu oikosulkukoneen staattorin rakenne (Siemens – Basics of AC Motors opas)

Käämitykset ovat käytännössä asennettu staattorissa omiin uriinsa, fyysisen tilantarpeen sekä laitteen käytännön valmistettavuuden vuoksi. Staattorin fyysistä perusrakennetta kuvataan kuvassa 40.



KUVA 40. Staattorin käämityksien rakenteen periaate (Siemens – Basics of AC Motors opas)

Kun yllä olevaan kolmivaihekoneeseen saadaan jollain ratkaisulla magneettikenttä pyörimään sen roottoriin, on mahdollista kytkeä sen staattorin kelat sähköverkkoon ja ottaa niistä tehoa kolmivaiheiseen järjestelmään. Käsiteltäessä tilannetta yhden käämin kannalta, muodostuu jännite kuvan 41 mukaisesti.

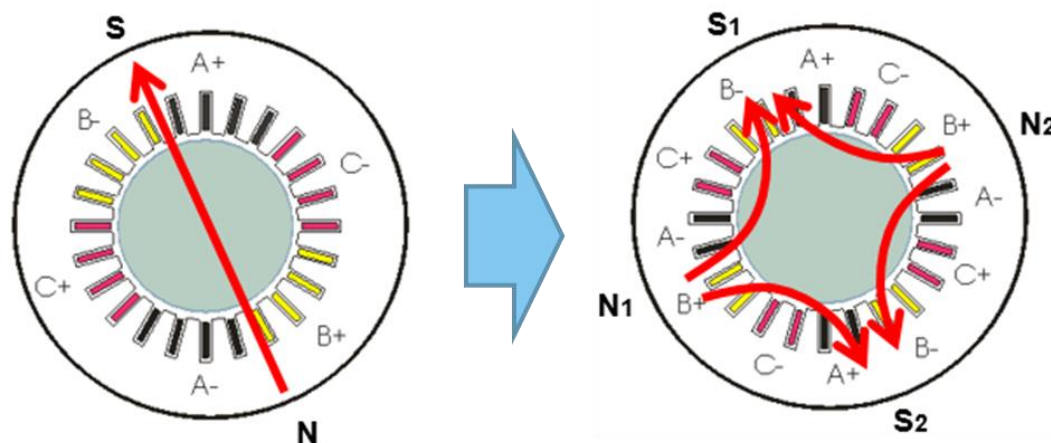


KUVA 41. Jännitteen muodostuminen magneettikenttien vuorovaikutuksessa (Heikkilä S. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi Syksy 2023 5S00DY06-3003)

Asettamalla vaiheet 120 asteen vaihesiirtoon ja tähtikytkemällä ne, saadaan niiden potentiaalit sidottua toisiinsa. Tähtikytkentä maadoitetaan laajaan maadoitusjärjestelmään, jolloin potentiaalin suuruus säilyy hallitusti verrannollisena muihin laitteisiin sähköverkossa.

Kuvan 39 käämityksen rakenteella on mahdollista luoda 50 Hz taajuus, mikäli pyörähdykseen kuluu 20 ms. Tällöin roottorin pyörimisnopeus on minuutissa 3000 rpm. Mikäli magneettiset navat jaetaan pienempiin osiin, on mahdollista tuottaa sama taajuus pienemmällä pyörimisnopeudella.

Kuvan 42 oikean puoleisella staattorirakenteella on yhden sähköisen jakson aikaansaamiseksi pyöritettävä roottoria 180 astetta. Tällöin 50 Hz:n taajuuden aikaansaamiseksi pyörimisnopeus puolittuu 1500 rpm tasolle.



KUVA 42. Staattorin käämityksen jakaminen useampaan napapariin (Heikkilä S. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi Syksy 2023 5S00DY06-3003)

3000 ja 1500 rpm rakenteiset, eli 2- ja 4-napaiset staattorit ovat yleisimpiä ja edullisimpia staattorirakenteita. Kun rakennetta jaetaan yhä pienempiin pyörimisnopeuksiin, kasvavat rakenteen monimutkaisuus ja hinta.

Tämä staattorirakenne pääkäämityksien osalta toistuu hyvin lähelle tämän mallisena kaikissa koneissa. Mahdolliset poikkeavuudet syntyvät erilaisista magnetointiratkaisuista sekä lisälaitteista.

Kaikki rakenteet sähkökoneissa, joissa magneettivuolle on tarjottu kulkureitti, pyritään tekemään eristettyinä levyrakenteina. Tämä johtuu pyörrevirtojen rajoituksesta, jotka muuten aiheuttaisivat tarpeetonta lämpenemää koneen osille.

Pyörrevirrat johtuvat edellä mainituista fysiikan laeista, kun vuolle tarjotaan kulkureitti koneen rautarakenteessa, se indusoi pyörrevirrat kaikkialle kulkureitillään. Mikäli virran kulkureitin resistanssi on pieni, syntyy suuret lämpöhäviöt. Levyrakenteella saadaan lämpenemää pienemmäksi, jolloin koneikko saadaan käymään viileämpänä.

3.3.2 Nimellistehon määritelmä

Sähkökoneiden nimellisteho kuvaa tilannetta, jossa kone on termisessä tasapainossa ympäristönsä kanssa standardiolosuhteissa. Esimerkiksi oikosulkukone on tyypillisesti ylikuormitettavissa 2...3-kertaisella kuormitusmomentilla, mutta tämä johtaa sen ylikuumentumiseen pitkässä käytössä. Ylikuormitusvara vaihtelee merkittävästi konetyypeittäin.

Lämpenemän likimääräistä vaikutusta voi arvioida virran tai kuormitusmomentin neliöllisellä suhteella nimelliseen. Tällöin staattisten tai ekvivalenttisten tilanteiden arvioinnissa päästään kiinni koneen lämpenemään ympäristöön nähden.

3.4 Epätahtikone

Epätahtikoneen keksijänä pidetään usein virheellisesti Nikola Teslaa, joka on saanut tarpeettoman suuren kunnian koneeseen liittyen hänen oltuaan poliittisesti ja kaupallisesti sopiva henkilö historian kirjoitukseen. Varsinainen historia tämän konetyypin takana on monimutkaisempi. 1824 ranskalainen fyysikko Francois Arago esitti teorian pyörivistä magneettikentistä, jonka demonstroi käytännössä Walter Baily 1879. Ensimmäinen kommutaattorista vapaan induktiomootorin kehitti taas unkarilainen Otto Blathy yksivaiheisena mallina.

Varsinaiset monivaiheiset induktiomootorit keksittiin kutakuinkin samaan aikaan italialaisen Galileo Ferrarin ja serbialaisen Nikola Teslan toimesta vuonna 1885 ja 1887. Erona näissä henkilöissä oli se, että Ferrari ei uskonut keksinnöllään olevan kaupallista potentiaalia, mutta Tesla näki tämän ja patentoi rakenteen. Teslan alkuperäinen patentti ja hänen kehittämänsä rakenne oli kaksivaiheinen. Teslan moottori rakenne oli kuitenkin siis vielä patenttinsa rakenteeltaan puutteellinen, kun sitä vertaa epätahtikoneisiin, jotka tänä päivänä tunnemme. Venäläinen fyysikko Mikhail Dolivo-Dobrolovsky AEG:lla kehitti nykyisin tunnetut tähti- ja kolmiokytkennät kolmivaihemoottoreihin ja käytännössä loi tarvittavat yksinkertaiset perusratkaisut kolmivaihejärjestelmälle. Tesla oli tosin esittänyt patentissaan myös kolmivaiheisen induktiomootorin, mutta se oli toteutettu 6-johtimisena, jolloin kolmivaihejärjestelmä menettää merkittävimmän hyötynsä tehon siirrossa.

Käytännössä Dolivo-Dobrolovsky mahdollisti omalla työllään järkevimmän ja kustannustehokkaimman rakenteen, mukaan lukien pyörrevirtoja vähentävän levyrakenteen induktiokoneen roottorin häkkiin. Englantilainen Silvanus Thompson sattui julkaisussaan 1895 viittaamaan Dobrolovksyn häkkirakenteeseen termillä squirrel cage ja siitä lähtien rakennetta on kutsuttu tuolla nimellä.

Tämän kehityskulun seurauksena käytämme nykyisen mallisia induktiomootto-reita, jossa Tesla oli vain yksi osatekijä tässä kehityksen kokonaisuudessa. (Kathy Loves Physics Youtube luennot- <https://www.youtube.com/c/Kathy-LovesPhysicsHistory>)

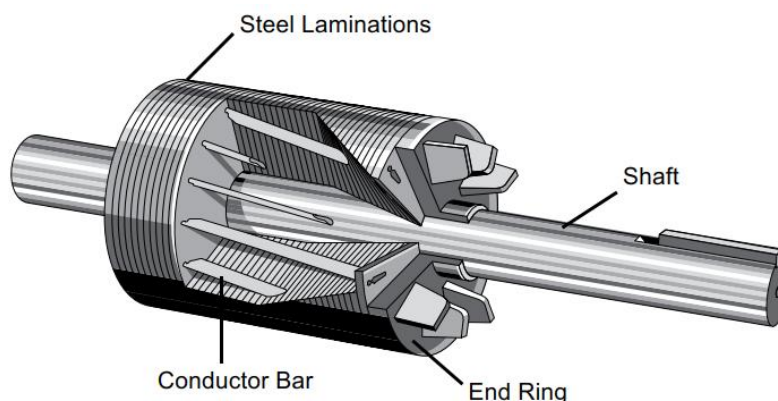
3.4.1 Epätahtikoneen periaate tuulivoimaloissa

Epätahtikonetta käytettiin tuulivoimaloiden rakentamisen alkuaikoina vakionopeuksisissa tuulivoimaloissa ns. tanskalaisena konseptina. Se oli kohtuullisen yksinkertainen rakenteeltaan ja mahdollisti tuulivoimaloiden ensimmäisen aallon, kunnes rakenteet kehittyivät teknisesti paremmiksi.

Epätahtikoneen puutteet generaattorikäytössä liittyvät sen perusluonteeseen, jossa generaattorikäyttö on sidottu hyvin pienelle pyörimisnopeusalueelle. Tämä asettaa vaatimuksia käytännön roottorin pyörimisnopeuden pitämiseen mahdollisimman vakiosuuruisena.

3.4.2 Epätahtikoneen perusrakenne

Koneen staattori on suoraan yleisen kolmivaihekoneen staattorin rakenteen mukainen. Koneen roottori muodostuu oikosuljetusta häkkikäämityksestä kuvan 43 mukaan.



KUVA 43. Oikosulkukoneen roottorin perusrakenne (Siemens – Basics of AC Motors opas)

Roottori muodostuu häkistä, joka on pienemmissä koneissa alumiinia, suuremmissa kuparia häviöiden pienentämiseksi. Häkin kalterit ovat oikosuljettu päistään, jolloin häkin kalterit muodostavat yhden kierroksen omaavia keloja koko roottorille. Häkki on täytetty toisistaan eristetyillä levyillä, jotka johtavat magneettivuota hyvin.

Epätahtikoneen käyttö generaattorina on helpompi käsitellä ajatteleamalla kone alkuun moottorikäyttönä, koska myös generaattorikäytössä kone ottaa osan tehostaan sähköverkosta. Koneeseen syötetään kolmivaiheinen sähkönsyöttö staattoriin kolmivaiheverkosta, joka saa staattorin käämityksien kautta aikaseksi pyörivän magneettikentän.

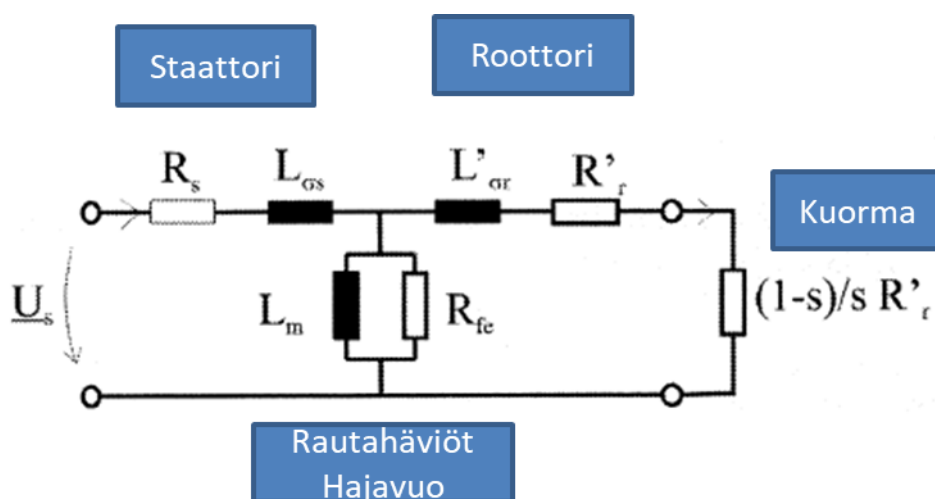
Pyörivän magneettikentän leikatessa roottorin häkin sauvoja, muodostuu niihin Faradayn induktiolain perusteella jännite. Koska häkin sauvat ovat oikosuljettuja päistään, ne muodostavat myös virtapiirin. Virran kulkiessa roottorissa ne aiheuttavat myös voimavaikutuksen kentän suuntaan.

Voimavaikutuksen muodostuttua, roottori lähtee pyörimään ja se pyrkii nopeudeltaan lähestymään staattorin pyörivän kentän nopeutta. Roottorissa vaikuttaa aina sen perusrakenteen vuoksi häviöitä ja kitkavoimia. Roottorin nopeuden ollessa lähes staattorin pyörintänopeuden tasolla, on pyörivän staattorikentän ja roottorin käämirakenteen pienen pyörimisnopeuden vuoksi indusoituva magneettivuoto hyvin heikko. Mikäli pyörimisnopeuseroa ei ole, ei tapahtuisi indusointia roottoriin, jolloin myös syntyvä virtapiiri ei synnyttäisi virtaa ja syntyvä momentti olisi nolla.

Tällöin roottori jää pyörimään nopeudella, jonka sen luontaiset vastusvoimat siihen luovat hyvin lähelle staattorin pyörimisnopeutta. Tätä nopeutta kutsutaan synkroninopeudeksi. Koneesta käytettävä nimitys epätahtikone, johtuu sen perusluonteesta, jossa staattorin ja roottorin kentät pyörivät aina epätahdissa.

3.4.3 Epätahtikoneen ekvivalenttipiiri

Epätahtikoneen ekvivalenttipiiri esitetään suomalaisessa kirjallisuudessa pääsääntöisesti staattorin syötön kannalta redusoituun ja galvaanisessa yhteydessä olevaan staattiseen malliin. Oikosulkumootorin staattisen tilan sijaiskytkentämalli, joka on redusoitu staattoriin, voidaan esittää kuvan 44 mukaisena.



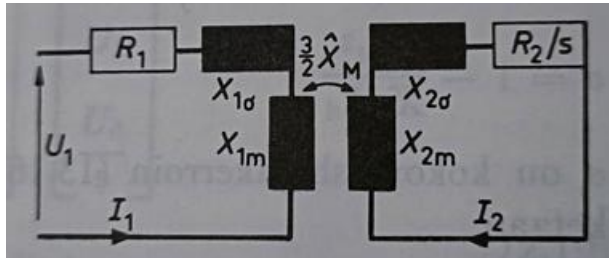
KUVA 44. Epätahtikoneen staattoriin redusoitu yksivaiheinen piiri (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

Redusoitu piiri käsittää staattorin resistiiviset ja induktiiviset häviöt, roottorin vastaavat redusoituna staattoriin galvaanisesti, sekä koneen rautahäviöt ja hajavuo. Koneen kuormitus kuvataan yhdellä resistanssilla oikealla laidalla jättämän ja roottoriresistanssin kautta.

Malli on yksinkertaistus koneen toiminnasta, mutta auttaa hahmottamaan koneen yleistä toiminnallisuutta kohtuullisen hyvin. Virheet mallissa liittyvät induktanssien muuttumiseen käytännön tilanteissa, sekä lämpötilan aiheuttamiin resistanssien muutoksiin.

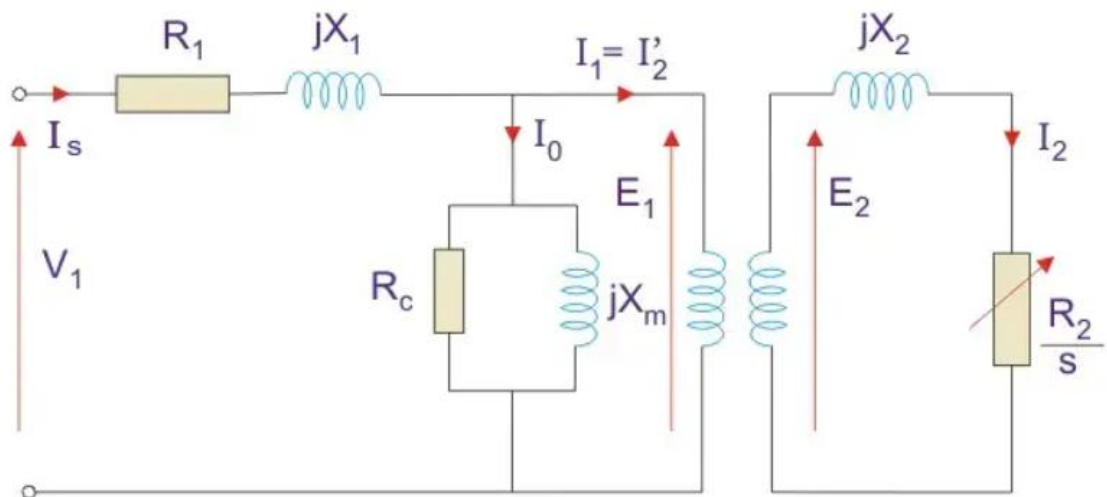
Generaattorikäytön kannalta piiriä onkin parempi käsitellä galvaanisesti erotettuna mallina, jossa roottorin toiminta tulee selkeämmin esille:

Tauno Pöykärin Sähkökoneoppi kuvaa sijaiskytkennän kuvan 45 mukaisena.



KUVA 45. Tauno Pöykärin Sähkökoneopin sijaiskytkentä epätahtikoneelle (Pöykäri T 1971 – s 332)

Malli yksinkertaistaa koneessa vaikuttavat resistanssit ja induktanssit liiaksi, jolloin ymmärryksen kannalta mallina toimii paremmin keskinäisinduktanssia ja eri elementtejä korostava sijaiskytkentä kuvan 46 mukaisesti.

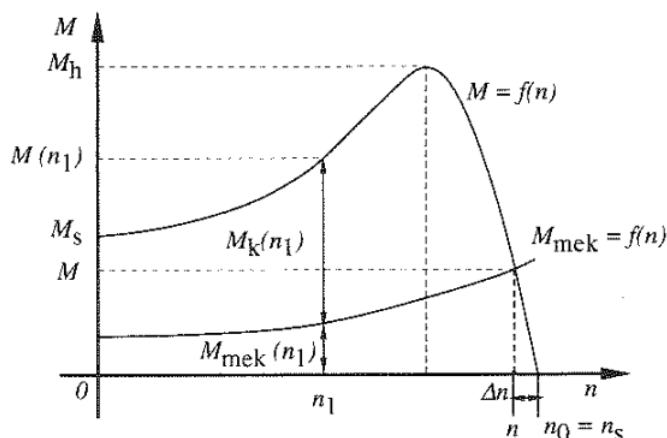


KUVA 46. Sijaiskytkentämalli epätahtikoneelle keskinäisinduktanssia korostaen (Equivalent circuit for an induction motor - <https://www.electrical4u.com/equivalent-circuit-for-an-induction-motor/>)

Kuvan 46 sijaiskytkentä toimii myös erinomaisesti kuvaamaan DFIG-koneen toimintaa, jolloin ymmärrys molempien koneiden toiminnasta on luotavissa samalla sijaiskytkennällä.

Kuvassa 46 esiintyvä keskinäisinduktanssi kuvaa voimavaikutusta staattorin ja roottorin välillä. Kun staattoriin syötetään moottorikäytössä jännite, vaikuttaa se staattorin käämityksen kautta roottoriin. Kun roottoriin lisätään kuorma (R_2/s), saadaan mallinnettua koneen käyttötilanteita. Tarkemmat mallit koneesta lisäävät malliin lisäksi vastajännitelähteet ja muuttuvat induktanssit, mutta perusymmärryksen kannalta tämä malli on riittävä. Kehittyneemmät mallit palvelevat enemmänkin monimutkaisempaa koneen ohjausta ja säätöä.

Ekvivalenttipiirissä esiintyvä R_2/s tai kuvassa 44 esiintyvä $(1-s)/s \cdot R'_f$ kuvaavat jättämän s vaikutusta kuormitukseen, suhteutettuna roottoriresistanssiin. Jättämä on terminä helpoiten ymmärrettävissä kuvan 47 periaatteellisesta oikosulkumoottorin vääntömomenttikäyrästä.



KUVA 47. Oikosulkukoneen tyypillinen vääntömomenttikäyrä (Aura-Tonteri 1996 s149)

Kuvassa:

M_s	Käynnistysmomentti
M_h	Huippumomentti
M_k	Kiihdyttävämomentti
n_s	Synkroninopeus
n	Nopeus nimellisellä kuormalla
M	Nimellinen kuormamomentti

Epätahtikoneen toimiessa moottorina on sen pyörimisnopeus riippuvainen sen kuormituksesta ja pyörimisnopeuksien eroa synkroninopeuteen kuvataan jättä-

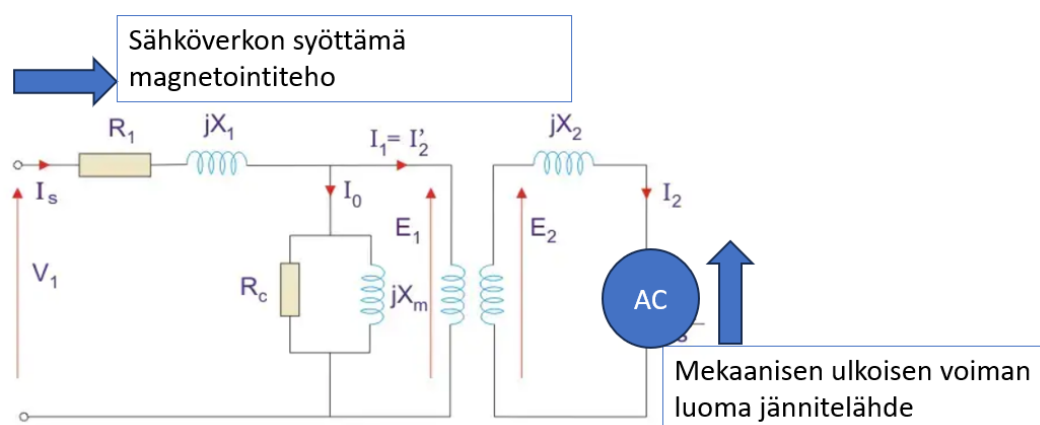
mällä. Kone pyöriessään asettuu tasapainoon momenttikäyrällä vaaditun kuormitusmomentin ja pyörimisnopeuden suhteen. Jättämä on tyypillisesti alle 5 % koneiden synkroninopeudesta.

Sijaiskytkennän kannalta olennaista on muuttuvan pätötehokomponentin suuruus ja sen vaikutus jättämään. Tämä vaikuttaa koneen ottamaan virtaan.

3.4.4 Epätahtikone generaattorina

Kun moottorikäytössä epätahtikone toimii energiankulkunsa kannalta siten, että syöttöverkko syöttää ekvivalenttiseen piiriin tarvittavan pätö- ja loistehon, on ekvivalenttisen piirin kautta helposti nähtävissä generaattorikäytön sovellus. Koska mekaaninen pyörimisliike aiheuttaa koneelle resistiivisen kulutuksen, niin koneen käyttäminen generaattorina vaatii pätötehon syöttämisen roottorin kautta staattorille. Tämä tapahtuu käytännössä sitä mekaanisesti pyörittämällä, mutta samanaikaisesti tarvitaan magnetointiteho verkosta, eli kone samanaikaisesti tuottaa ja ottaa tehoa sähköverkosta.

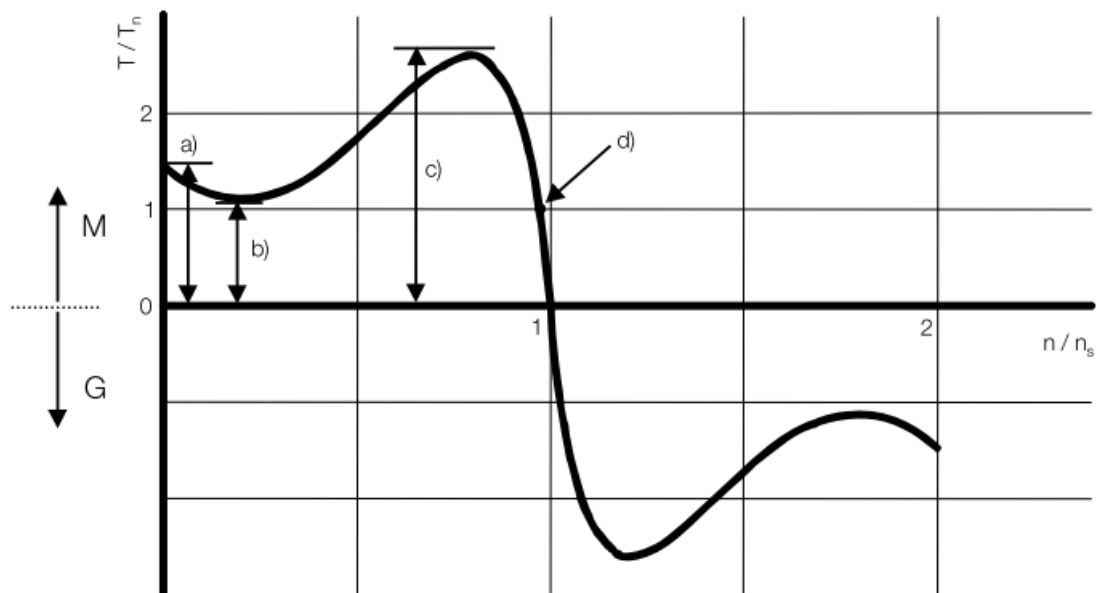
Virran suunnan sähköpiireissä määrää potentiaali eli jännite, suurempi jännite työntää virtaa kohti matalampaa jännitettä. Kuva 48 esittää tilannetta, jossa epätahtikoneen kuormitusta mallintava vastus esitetään jännitelähteenä.



KUVA 48. Epätahtikone generaattorina (Equivalent circuit for an induction motor - <https://www.electrical4u.com/equivalent-circuit-for-an-induction-motor/> - Muokattu)

Generaattorikäytössä sähköverkon kautta magnetoidaan epätahtikone. Mikäli taas ulkopuolinen voima pyörittää roottoria nopeammin kuin staattorin kenttä, syntyy tilanne, jossa pätötehon tuotanto on suurempaa roottorissa kuin kulutus. Roottorin kannalta sen keskinäisinduktanssiin vaikuttava jännite muodostuu suuremmaksi kuin staattorin sähköverkon päässä oleva puoli. Tämä aiheuttaa potentiaalieron vuoksi koneelle tarpeen tasoittaa potentiaaliero, aivan kuten korkeaja matalapaineen tapauksessa. Sähköteknisesti tämä näkyy siten että tuotettu pätötehofunktion lähtee virtaamaan verkkoa kohden, mutta tarvittava magnetointiteho virtaa verkon puolelta induktansseihin.

Koneen momenttikäyrän kannalta tilannetta käsitellen, käyrä peilautuu X-akselin toiselle puolelle pyörimisnopeuden jatkaessa kasvuaan, kuten kuva 49 esittää.



KUVA 49. Oikosulkukoneen momenttikäyrä suhteutettuna sen synkroninopeuteen (ABB – Sähkökäytön mitoitus)

Oikosulkukone on käytettävissä generaattorina sen nimellisellä jättämällä ja sen ympärillä olevilla pyörimisnopeusalueilla, joissa se ei pääse ylikuumenemaan. Tyypillisesti tämä alue on hyvin pieni, josta johtuu myös osittain sitä hyödyntävien tuulivoimakonseptien nimi, vakionopeuksiset tuulivoimalat.

Tämän tyyppisissä voimalaitoksissa esiintyvät oikosulkugeneraattorit pyritään pitämään käänteisen jättämänsä osalta sellaisessa nopeudessa, että ne säilyvät

lämpenemänsä osalta tasapainossa. Pyörimisnopeuden noustessa liian suureksi, passiivinen sakkaussäätö leikkaa pyörimisnopeuden nousun eikä generaattori pääse nostamaan nopeuttaan liian suureksi.

3.4.5 Epätahtigeneraattorin koonti tuulivoimakäytössä

Epätahtigeneraattori tarvitsee toimiakseen olemassa olevan sähköverkon, jota se seuraa. Generaattori seuraa staattorinsa kautta syöttävää verkkoa ja ottaa verkosta tarvitsemansa magnetointitehon. Se siis syöttää verkkoon ainoastaan pätötehoa.

Epätahtigeneraattorin verkkoa seuraava ominaisuus ei luo verkon kannalta sille suoraa inertiaa, staattorin seuratessa suoraan verkon taajuutta. Epäsuorasti syntetettisen inertian luominen on mahdollista, mikäli tuulivoimalaitoksen lapasuunnittelu on toteutettu siten että kohtauskulma on säädettävissä. Tällöin voimalaitosta ajettaisiin aina vajaatehoisena käytössä ja verkon taajuuden ollessa laskevan suuntainen, ajetaan voimalaitos täydelle teholle.

Edellä kuvatun mallisen säädön nopeus riippuu voimalaitoksen mekaniikasta ja on hidasta. Tällä säädöllä lienisi mahdollisuus osallistua säätöön noin minuuttien aikaviiveellä, jolloin inertian kannalta tämä säätötapa on liian hidas.

Epäsuorasti verkosta otettavaa tehoa voitaisiin pienentää käyttämällä paikallista loistehon tuotantoa kondensaattoreilla apuna. Mikäli konetta normaalisti ajettaisiin verkosta otettavalla loisteholla ja tulisi inertian kytkennän tarvetta, kytkettäisiin kondensaattorit tuottamana koneen magnetointia. Tällöin koneen ottama magnetointiteho verkosta putoaisi ja epäsuorasti tuettaisiin verkon teho epätasapainon ongelmaa. Tämän tyyppisen säädön nopeus lienee riittävä.

Epätahtigeneraattorin käyttö hyvin rajatulla pyörimisnopeusalueella rajaa sen käyttöä merkittävä osa tuulen kineettisestä energiasta jää hyödyntämättä. Rakenteena epätahtigeneraattori on hyvin yksinkertainen ja luotettava teknisesti.

3.5 DFIG-generaattori

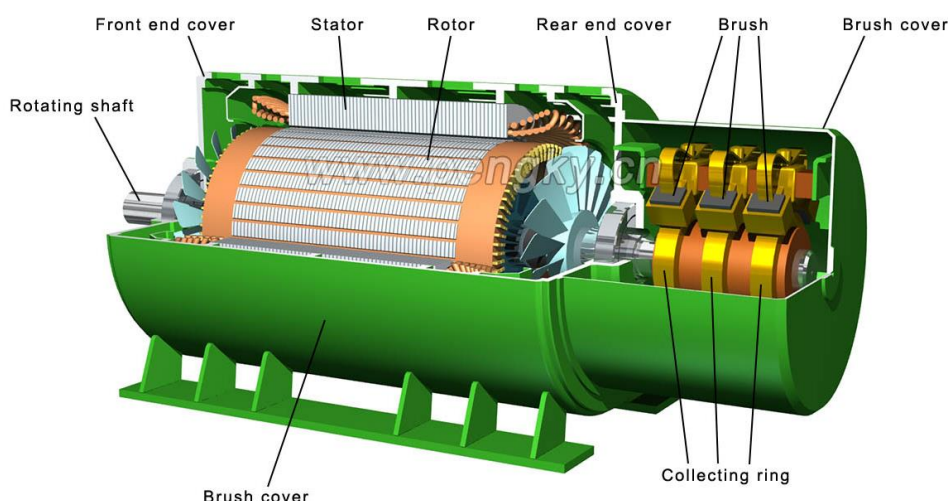
DFIG-generaattori on oikosulkukoneen jatkokehitelmä, joka mahdollistaa koneen käytön laajemmalla nopeusalueella, tyypillisesti $\pm 30\%$ sen nimellisnopeudesta. Koneen perusrakenne pohjautuu liukurengaskoneen yhdistämiseen tehoelektroniikkaan. Sen sähköntuotannon perusteoria säilyy yhtenevänä epätahtikoneen perusteiden kanssa ja sen toiminta on ymmärrettävissä epätahtikoneen sijaiskytken kautta.

DFIG-koneessa on sen staattorin rakenne yleisen oikosulkukoneen rakenteen mallinen, mutta sen roottorin rakenne ja ohjaus poikkeaa tästä.

DFIG lyhenne tulee sanoista *Doubly-Fed Induction Generator*, eli kaksoissyötetty induktiogeneraattori. Ajatus nimeämisen takana selviää, kun käydään läpi koneen tekninen toiminta.

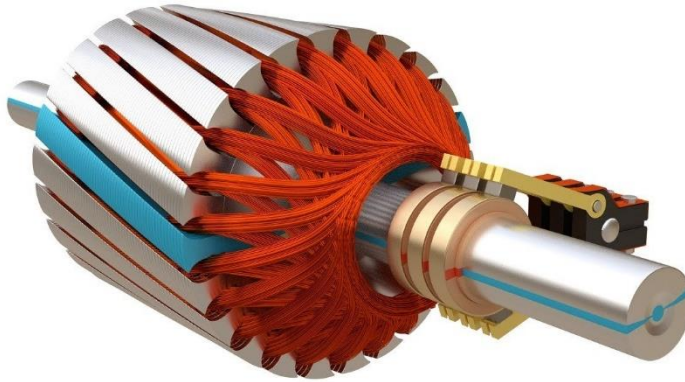
3.5.1 Liukurengasmallisen roottorin rakenne

Liukurengaskoneessa merkittävä rakenteellinen ero oikosulkukoneeseen on esitetty kuvassa 50.



KUVA 50. DFIG-koneen rakenne (<https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/13-doubly-fed-wind-turbine-principle/doubly-fed-wind-turbine-principle.html> //)

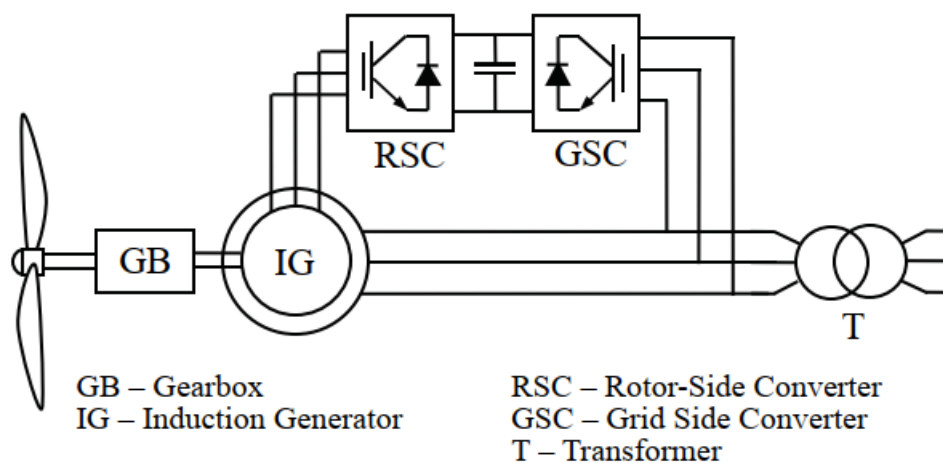
Koneen rakenteessa on havaittavissa sen päädyssä olevat harjat, jotka on kytketty koneen roottoriin. DFIG-koneen roottori poikkeaa oikosulkukoneesta siten, että sen häkkikäämitys koostuu erillisestä käämityksestä ja se on kytketty harjojen kautta ulkopuoliseen teholähteeseen. Kuva 51 esittää roottorin rakennetta DFIG-koneessa.



KUVA 51. DFIG koneen roottorin periaatteellinen rakenne (Learn Engineering - <https://www.youtube.com/watch?v=JPn5Ou-N0b0>)

3.5.2 Verkkoon kytkentä ja toimintaperiaate

DFIG-kone lisää roottorin magnetoinnille oman säätöpiirinsä. Periaatteena verkkoon kytkennässä on kuvan 52 mukainen tilanne.

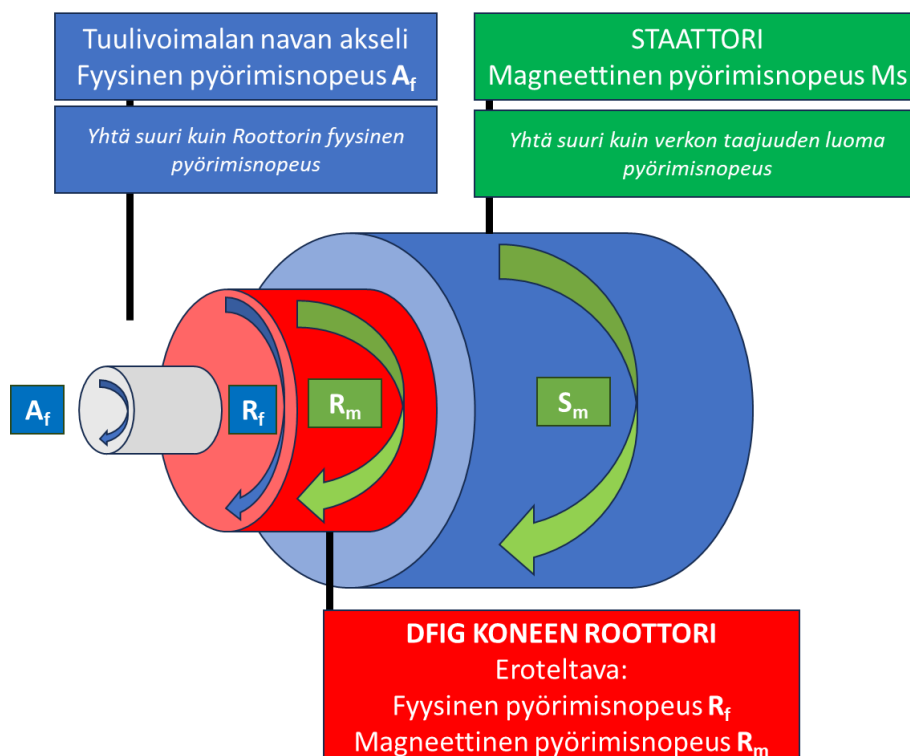


KUVA 52. DFIG-koneen kytkennän periaatteellinen kuva (Fletcher & Yang, 2010)

Syöttöverkko on kytketty muuntajan kautta suoraan koneen staattoriin ja taajuusmuuttajan kautta koneen roottoriin. Koneen toiminnan ymmärtäminen vaatii ymmärryksen epätahtikoneen toiminnasta, sekä vaikuttavista eri tavoin pyörivistä osista tuulivoimalassa. Olennaista on, että epätahtikoneen peruseriaate sähköntuotannon kannalta ei ole poistunut, vaan roottorin magneettikentän on pyörittävä suuremmalla nopeudella kuin staattorin magneettikenttä.

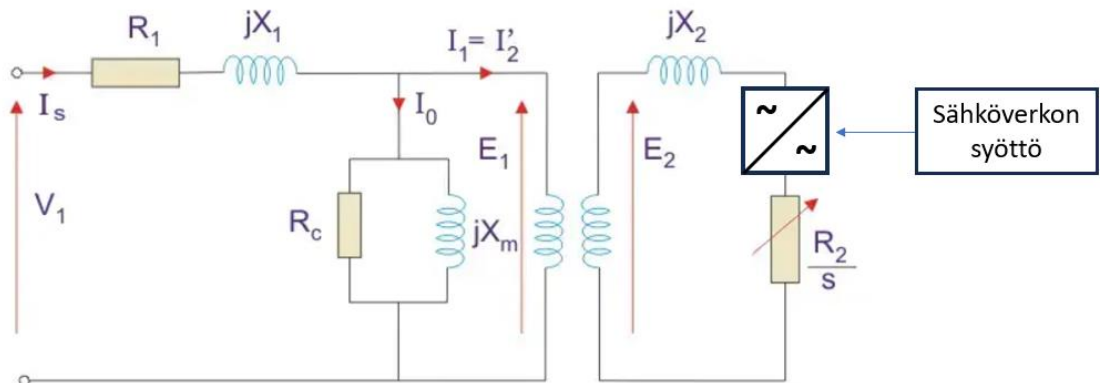
Kineettisen energian lähde on DFIG-koneessa edelleen kiinteällä muuntosuhteella oleva vaihteisto. Koneen akselin pyörimisnopeus on tällöin se, mitä on tarjolla.

Sähköntuotannon kannalta roottorin kenttä on saatava pyörimään nopeammin kuin staattorin kenttä. Tällä kytkentäkonseptilla tulee vaikuttaa roottorin magneettikenttään kahdella eri alueella eri tavoin, alisykronisella nopeudella- ja ylisykronisella nopeudella. Sijaiskytkennässä on lisäksi ajateltava useamman eri taajuuden lähteitä. Erilaisia pyöriviä tekijöitä kuvataan kuvassa 53.



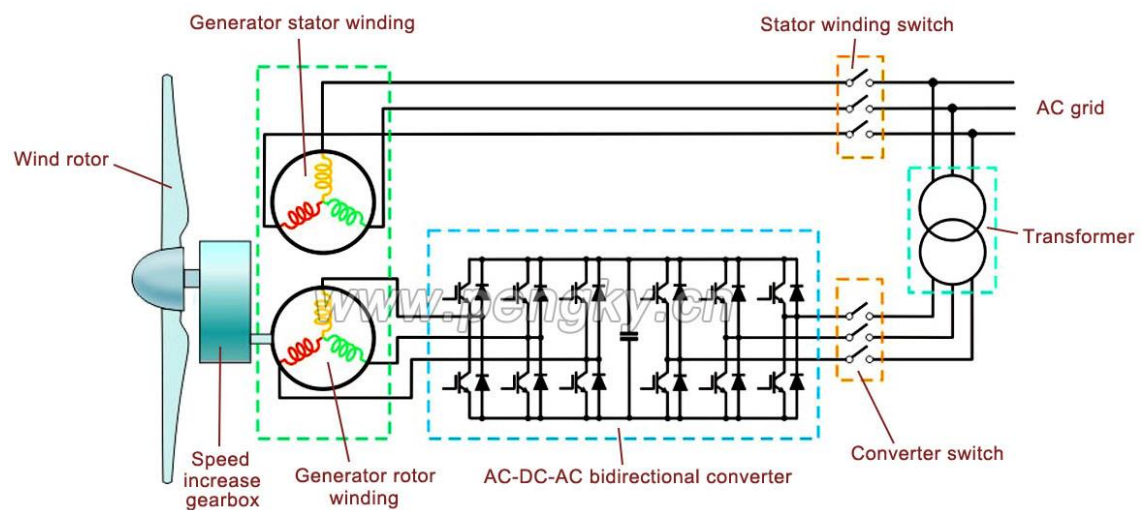
KUVA 53. DFIG-koneen erilaiset mekaanisesti ja magneettisesti pyörivät tekijät, jotka vaikuttavat sähköntuotantoon

Käsiteltäessä nyt sijaiskytkennän kautta tilannetta, tuodaan kuvan 54 sijaiskytkentään mukaan taajuusmuuttaja joka on kytketty roottoriin:



KUVA 54. Muokattu epätahtikoneen sijaiskytkentä, jossa DFIG:n roottori on mallinnettu. (Equivalent circuit for an induction motor - <https://www.electrical4u.com/equivalent-circuit-for-an-induction-motor/> - Muokattu)

Roottoriin kytketyn taajuusmuuttajan toiminta on pohjimmiltaan hyvin yksinkertainen, se toimii magneettikentän hidastimena tai nopeuttajana. Kuva 55 kuvaa staattoriin kytkeytyvän taajuusmuuttajan rakennetta.



KUVA 55. Periaatteellinen järjestely eräästä DFIG-generaattorista (<https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/13-doubly-fed-wind-turbine-principle/doubly-fed-wind-turbine-principle.html>)

Toimittaessa *alisynkronisella nopeudella*, otetaan kuvassa 52 tehoa syöttöverkosta ja muokataan sopivalla aaltomuodolla roottorissa vaikuttavan kentän nopeus suuremmaksi. Esimerkiksi: Tuulivoimalaitoksen roottori pyörii nopeudella,

joka vastaisi 30 Hz:n nopeutta DFIG:n kannalta. Oikosulkukone käyttäytyisi tällöin moottorina ja se pyrkisi kiihdyttämään roottorin syöttämänsä verkon taajuuteen. Nyt roottoripiirissä vaikuttaa alussa 30 Hz ja staattorissa 50 Hz, mikäli olemme ajanhetkessä nolla. Kuvassa 52 olevaa taajuusmuuttajaa ohjataan siten että se syöttää roottorille sen kaltaisen tehosihtäalin, joka muokkaa 30 Hz:n taajuuden ylitse 50 Hz sinimuotoiseksi. Tällöin roottorin magneettikenttää kiihdytetään ylitse staattorin kentän. Kun DFIG on lähtenyt toimimaan generaattorina, pystyy se itse tuottamaan tarvitsemansa energian taajuusmuuttajalle staattorinsa kautta.

Toimittaessa *ylisynkronisella nopeudella*, tilanne olisi taas roottorin pyörivän kentän kannalta sen kaltainen, että se pyörii liian suurella nopeudella. Tällöin taas kenttää on hidastettava vastaavasti staattorin energialla, jotta kone asettuisi momenttikäyrällään sellaiseen toimintapisteeseen, jossa se säilyttää lämpötasapainon.

Koska tehoelektroniikka roottorin taajuuden ohjaamisessa välittää läpi vain osan koneen energiasta, se voidaan mitoittaa merkittävästi pienemmäksi kuin täystehokonverttereissa. Tyypillisesti se jää noin 30% tasolle koneen nimellistehosta. (Fletcher & Yang – 2010)

3.5.3 DFIG-generaattorin koonti

DFIG-generaattorilla ei ole luonnostaan inertian luontikykyä verkkoon. Tosin käyttämällä konetta tietyin ohjausperiaattein, on mahdollista generoida synteettistä inertiaa tilanteessa, jossa verkon taajuus lähtee kasvamaan. Tällöin käyttämällä osittain syöttävää tehoa nostamaan roottorin magneettikentän pyörimisnopeutta, luodaan verkkoon koneen lämpenemän rajoissa lisää tehoa, jolloin sen taajuuden muutos hidastuu. Käytännössä tämän kaltainen ohjaus tulisi laukaista taajuuden derivaattaa seuraamalla. (Zhang, Wei, Gao 2022)

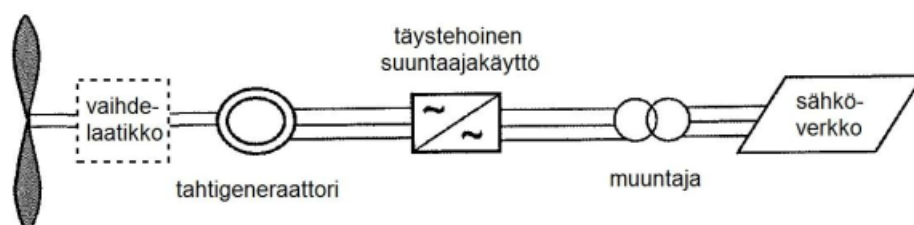
Tämän tyyppiseen inertian luontiin joka toimii derivaattaperustaisesti ei voida suhtautua pelkästään yhdellä toimivalla derivaatan arvolla. Synteettisen inertian luonnissa derivaattaan perustuvien ohjauksien toimintaan tulee lisätä satunnaisuutta, jotta verkkoon luotu synteettisen inertian käyttöönotto ei tapahtuisi liian

suurilla askelilla vaan epäsäännöllisesti. Tämä ohjaustapa mahdollistaisi muutoksen hidastamisen siten, että se tapahtuisi kontrolloidusti ilman liian suuria useampia hallitsemattomia tehon muutoksia suuntaan tai toiseen säätimien osalta.

DFIG-konsepti tarjoaa mahdollisuuden käyttää generaattoria osin muuttuvalla nopeusalueella, tai sitten vajaatehoisena myös erittäin pienillä nopeusalueilla, kun roottorin taajuus kiihdytetään sähköä tuottavaksi. DFIG on yleinen tuulivoimaloiden generaattorityyppi (tätä käsitelty tilastoissa Energiavirastolta) ja se tarjoaa hyvän teknistaloudellisen tuotantokoneiston sähkölle. Koneen perusrakenne on hyvin koeteltua tekniikkaa ja se on toimintavarma.

3.6 Vierasmagnetoitu tahtigeneraattori tuulivoimalassa

Tahtigeneraattori tuulivoimalassa perustuu aina täysitehoiseen konvertterikäyttöön, mutta se mahdollistaa myös kaikista laajimman tehonsyötön hyödyntämisen. Kuva 56 kuvaa tahtigeneraattorin käyttöä täystehoisen suuntaajan kanssa tuulivoimalassa.



KUVA 56. Tahtigeneraattori tuulivoimalaitoksen tehontuotannossa (Korpela A – luento Tuulivoimajärjestelmät 2023)

Tahtikone voi olla vierasmagnetoitu tai kestopagneeteilla varustettu. Tämä osa työstä käsittelee vierasmagnetoidun tahtikoneen käyttöä sähköntuotannossa.

3.6.1 Tahtikoneiden toimintaperiaate

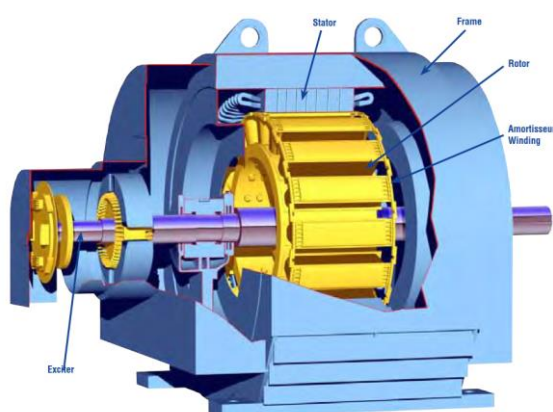
Epätahtikoneiden nimeämisen perusteena toimi eri nopeudella pyörivät staattorin ja roottorin magneettikentät. Tahtikoneessa taas roottorin ja staattorin pyörimisnopeudet ovat yhtä suuret.

Tahtikoneiden staattorin rakenne on yleisen kolmivaihekoneen rakenteen mukainen, lisäten sinne tilan tai kytkentäpisteet roottorin magnetoimiseen liittyen. Tahtikoneessa roottorin magnetointi tapahtuu DC:llä, jolloin siinä vaikuttaa jatkuvasti saman suuntainen magneettikenttä. Tämä magneettikenttä seuraa staattorin pyörivää kenttää.

3.6.2 Tahtikoneiden roottorien rakenteet

Tahtikoneet jaetaan pyörimisnopeutensa kautta kahteen pääluokkaan, turbogeneraattoreihin ja avonapageneraattoreihin. Turbogeneraattorit ovat 2- tai 4-napaisia (3000rpm / 1500rpm) pyörimisnopeudeltaan olevia koneita, kun taas avonapaiset koneet ovat 4-napaisia tai useampia (1500rpm ja alle). Näiden koneiden roottoreiden mekaaninen rakenne myös poikkeaa merkittävästi toisistaan.

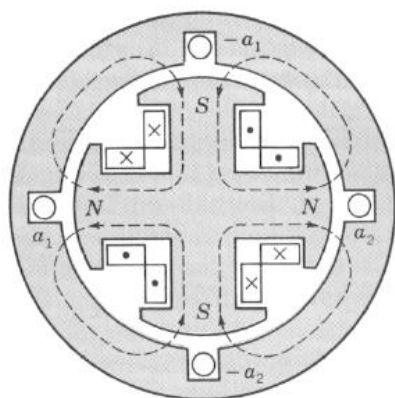
Avonapainen kone on rakenteeltaan kuvan 57 mukainen.



KUVA 57. Wegin esimerkki avonapaisesta tahtikoneesta (WEG - The ABC of Synchronous motors)

Koneen käämitykset ovat rakennettu roottorin varsien ympärille, joka tekee roottorirakenteesta monimutkaisen ja keskipakoisvoimien osalta vaativan. Mitä suurempi on koneen napaluku, sen suurempi määrä roottorissa on käämityksiä varten olevia ”tolppia”. Nämä johtavat monimutkaiseen rakenteeseen, joka toimii optimaalisemmin pienillä pyörimisnopeuksilla. Suuren napaluvun omaavat tehokkaat tahtigeneraattorit tulevat myös fyysiseltä kooltaan nopeasti hyvin suuriksi ja

niitä käytetään tyypillisesti esimerkiksi vesivoimalaitoksissa. Fyysistä kokoluokkaa määrää kuitenkin myös merkittävästi koneen nimellisteho. Suuren roottorin merkittävä etu on sen verkkoon tuoma inertia sen suuren pyörivän massan kautta. Kuva 58 kuvaa avonapaisen tahtikoneen perusrakennetta.



KUVA 58. Nelinapaisen tahtikoneen roottorin rakenne (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

Turbogeneraattori on taas malliltaan hyvin paljon DFIG-koneen roottoria muistuttava roottorirakenne. Niitä käytetään laajasti sähköntuotannossa ja ovat käytössä esimerkiksi höyryvoimalaitoksissa. Maailman suurin yksittäinen höyryturbiinin avulla pyörimisliikkeen saava tahtigeneraattori on kirjoitushetkellä Olkiluodon uuden turbiinihallin turbogeneraattori.

Olkiluoto kolmosen generaattori on teholtaan 1992 MVA:n vetyjäähdytteinen generaattori, joka on nimellisjännitteeltään 27 kilovoltia. Tämän kokoisen koneen magnetointivirta on suuruudeltaan jo 9 471 Ampeeria.

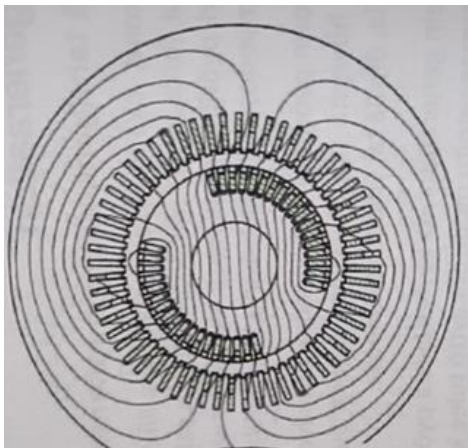
(TVO OL3 Tekninen esite 12.3.2024 - https://tvo.fi/material/sites/vanhattvo/20220825132746/7bmHsNHjV/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf)

Generaattorit tuulivoimaloissa ovat valmistajien esitteiden mukaisesti pääsääntöisesti ilmajäähdytteisiä niiden pienen yksittäisen kokoluokan vuoksi. Myös niiden nimellisjännitteiden taso on käytännössä alle kilovoltin tasolla, jolloin laitteistojen rakenne on hyvin erityyppinen. Yleisesti suurien turbogeneraattoreiden rakenne muistuttaa kuvan 59 mukaista rakennetta.



KUVA 59. Suuri GE:n turbogeneraattori, jossa näkyy sisällä umpinapainen roottorirakenne (<https://www.gevernova.com/steam-power/products/generators/gi-gatop-4-pole>)

Poiketen kuvan 58 rakenteesta, on turbogeneraattorin roottori rakenteeltaan toisenlainen. Roottori on tehty toimimaan suuremmilla pyörimisnopeuksilla ja tätä rakennetta kuvaa kuva 60.



KUVA 60. Turbogeneraattorin 2-napaisen roottorin magneettikenttien rakenne (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

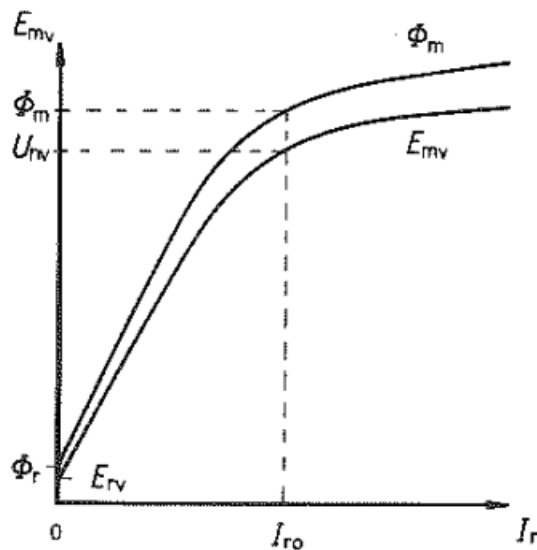
3.6.3 Tahtikoneen roottorin ja staattorin yhteistoiminta

Tahtikone poikkeaa epätahtikoneista erityisesti siltä osin, että se ei tarvitse ulkoista verkkoa toimiakseen. Koneen roottorin luoma pyörivä magneettikenttä indusoi jännitteen staattorin käämityksille, jonka taajuus riippuu roottorin pyörimisnopeudesta. Kone voidaan käynnistää ilman olemassa olevaa verkkoa, jolloin

kone kykenee luomaan oman verkkonsa. Kun verkkoon kytketään lisää tahtigeneraattoreita, ne tulee tahdistaa toimimaan verkon kanssa samalla taajuudella ja ajankohdalla.

Tahtikoneiden käyttö perinteisessä voimantuotannossa tehdään pitämällä roottorin pyörimisnopeus tarkasti 50 Hz:iä tuottavana. Tuulivoimalaitoksen muuttuva pyörimisnopeus ei mahdollista täten tahtikoneen kytkemistä suoraan sähköverkkoon. Tehoelektroniikka, joka on kytketty staattorin käämien ja syöttöverkon väliin, vaihtosuuntaa tahtikoneen tuottaman sähkön 50 Hz:iin syöttöverkkoon, kunhan tahtigeneraattorin tuottama jännite on riittävä sen suuntaussilloille.

Tahtigeneraattorin tuottama jännite on kutakuinkin lineaarisesti verrannollinen sen magnetointijännitteeseen, kunnes saavutaan magneettisen kyllästyksen alueelle. Lineaarisen magnetoinnin ja kyllästymisalueen tilannetta kuvaa kuva 61.



KUVA 61. Tahtikoneen periaatteellinen magnetointikäyrä (Aura -Tonteri 1986)

Tahtikone tarvitsee toimiessaan jatkuvan säädön sen magnetoinnille, jonka suuruuden tarve vaihtelee kuormituksesta riippuen. Magnetointi tapahtuu kutakuinkin lineaarisesti kohti kyllästymispistettä, josta eteenpäin magnetointi vaatii huomattavan suuren virran napajännitteen ylläpitämiseen. Kun konetta käytetään sen nimellisnopeudella, voidaan sen päälähdejännite laskea kaavalla:

$$E_s = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_k \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m \quad (14)$$

Jossa

f_k = käämityskerroin

f = taajuus

N = staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkierrokset

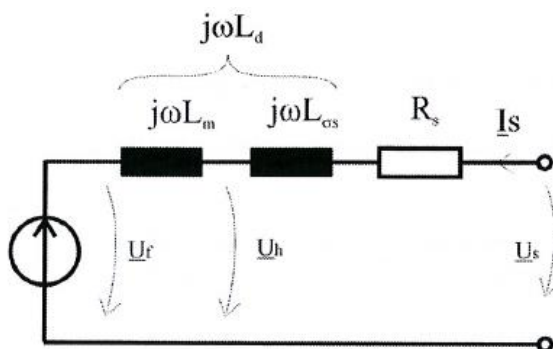
Φ_m = yksittäisen magneettinavan päävuoto, tämä on yhtenevä staattorivyöhyden maksimivuon kanssa δ_m

Yllä olevaa kaavaa yksinkertaistaen voidaan todeta nimellisnopeudella toimiessa kaikkien tekijöiden olevan vakioita päävuota Φ_m lukuunottamatta, jolloin kaava nähdään usein yksinkertaistettuna alla olevaan muotoon: (Heikkilä S. 2007)

$$E_s = k \cdot \Phi_m \quad (15)$$

Yllä olevalla kaavalla kuvataan koneen käyttäytymistä magnetoinniltaan vakio-alueella ja se auttaa ymmärtämään myöhemmin kestopagneettigeneraattorin toiminnan.

Tahtikonetta voidaan mallintaa kuvan 62 laajemmalla sijaiskytkentämallilla.



KUVA 62. Vierasmagnetoidun tahtikoneen laaja sijaiskytkentä (Virtanen K. Kursimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

Jossa:

L_m Käämityksen induktanssi

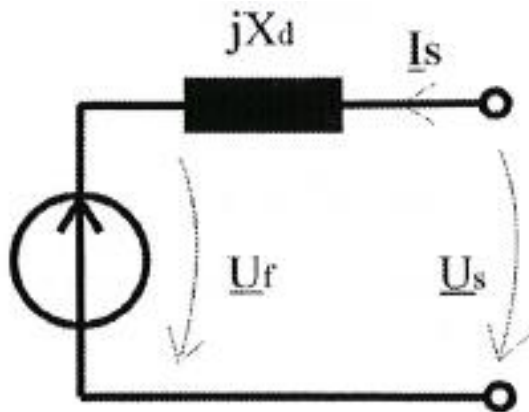
L Magnetointi- ja hajainduktanssikomponentit

R_s Käämityksen resistiiviset häviöt staattorissa

U_f Laskennallinen Lähdejännite

U_s Napajännite staattorin käämin navoissa

Verkostolaskennan tarpeisiin malli yksinkertaistetaan yleensä ainoastaan jännitelähteen ja sarjareaktanssin sarjakytkentään, koska muut komponentit ovat suhteellisesti hyvin pieniä. Tämä malli on riittävä tarkkuudeltaan verkon kannalta tilanteen tarkasteluun, mutta koneen ohjauksen kannalta tarkemmin on tarpeen käyttää tarkempaa mallia. Verkostolaskennassa käytetty sijaiskytkennän malli esitetty kuvassa 63.

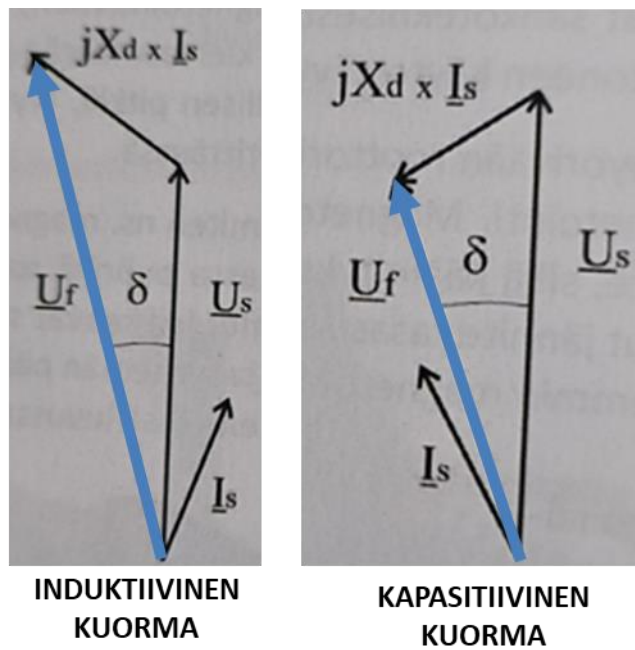


KUVA 63. Verkostolaskennan tarpeisiin yksinkertaistettu sijaiskytkentämalli tahtigeneraattorista (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

Tätä mallia voidaan hyödyntää magnetoinnin kannalta lineaarisella alueella. Tällöin magnetoinnin säätö vaikuttaa lineaarisesti ekvivalenttikytken lähdejännitteeseen.

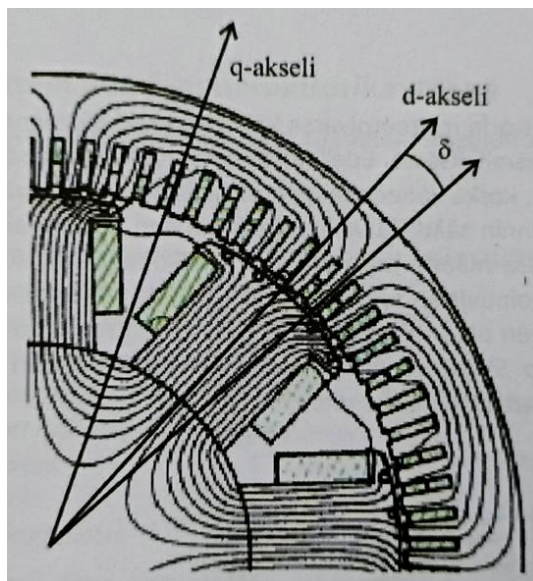
Perusominaisuutena tahtigeneraattorilla oleva loistehon tuottaminen ja kompensointi saadaan toteutettua konetta joko yli- tai alimagnetoimalla, jolloin sijaiskytkentämallin osalta nostetaan tai lasketaan lähdejännitettä. (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

Magnetoinnin säädön vaikutus näkyy kuvassa 64 vektorina U_f , Mikäli verkosta halutaan ottaa magneointiin tarvittava teho, tulee kone alimagnetoida. Tilanteessa, jossa induktiivista loistehoa halutaan tuottaa verkkoon, kone on ylimagnetoitava.



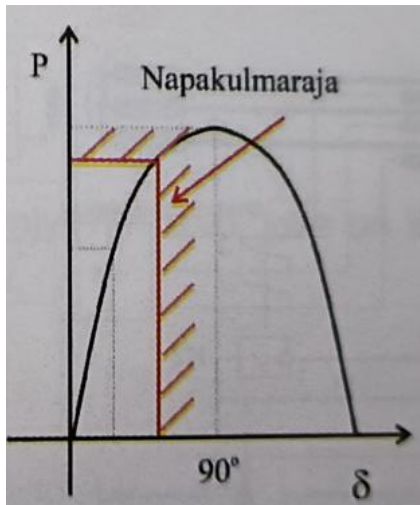
KUVA 64. Tahtigeneraattorin magnetoinnin säädön vaikutus tuotettuun loistehoon (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010 - muokattu)

Sijaiskytkennässä esiintyvä napakulma δ kuvaa tahtikoneen kuormitustilannetta, jossa staattorin ja roottorin välisten magneettikenttien väliin syntyy kulmaero kuormituksen suuruudesta riippuen. Kuva 65 kuvaa napakulmaa avonapaisessa tahtikoneessa kuormitustilanteessa.



KUVA 65. Avonapaisen tahtikoneen kuormittuminen (Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010)

Mitä suurempi on tahtikoneen kuormitus, sen kauemmaksi magneettiset navat ajautuvat toisistaan. Napakulman ja tehon yhteyttä kuvataan kuvalla 66.



KUVA 66. Napakulmarajan kuvaaminen tehon suhteen (Kauppinen 2020)

Mikäli napakulmaraja ylittää 90 astetta, irttaa kone tahdistusta ja se tulee irrottaa verkosta. Tällaisessa tilanteessa kone alkaa käydä vuorotahtiin generaattorina ja moottorina, jolloin se toimii hyvin epävakaana elementtinä sähköverkossa.

Pääsääntöisesti kaikki modernit tahtigeneraattorit omaavat harjattoman magneetoinnin, jolloin koneessa on yksi mekaanisesti kuluva osa vähemmän.

3.6.4 Tahtigeneraattorin yhteenveto

Tahtigeneraattoria tulee tuulivoimaloissa käyttää täystehokonvertterin kanssa. Se mahdollista tehon tuoton sähköverkkoon erittäin laajalla käyttöalueella sekä tarjoaa laajaa säädettävyyttä.

Koneen ollessa taajuusmuuttajan kautta kytkettynä syöttöverkkoon, se ei tarjoa suoraa mekaanista inertiaa verkkoon, mutta välillisesti tämä on tuotettavissa käyttäen tietynlaista ohjaustapaa. Verkon kannalta esimerkiksi ajetaan konetta vajaakuormitettuna, jolloin koneella on säätövaraa sekä ylös- että alaspäin syöttöverkon kannalta. Täystehoinen vaihtosuuntaus mahdollistaa myös erinäisin ohjaustavoin loistehon tuottamisen sähköverkkoon.

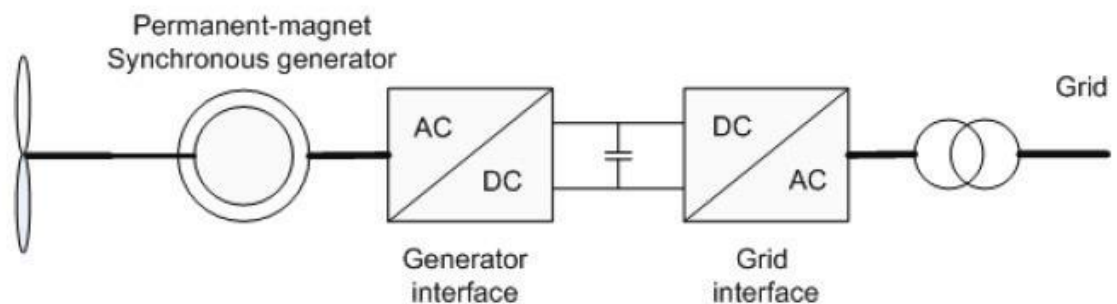
Kustannuksia nostava tekijä tahtigeneraattorin käytössä on sen vaatima täysitehoinen taajuusmuuttajasilta. Generaattori on myös itsessään kalliimpi rakenteeltaan verrattuna DFIG-generaattoriin.

Vierasmagnetoituja tahtigeneraattoreita ei tuulivoimaloissa juurikaan ole, muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta, joita syöttötariffijärjestelmän tietokanta ilmaisi.

3.7 Kestomagneettigeneraattorin käyttö tuulivoimalassa

Kestomagneettitahtigeneraattoria käytetään tuulivoimaloissa sekä vaihteettomissa että vaihteellisissa voimalaitosmalleissa. Vaihteettomissa rakenteissa voidaan kestopagneettigeneraattorilla hyödyntää suurinapaisena pienet pyörimisnopeudet tehokkaasti.

Käsiteltäessä kestopagneettigeneraattoreita työn myöhemmässä vaiheessa, niihin viitataan yleisellä lyhennöksellä SyncPM (Synchronous Permanent Magnet). Kuva 67 kuvaa tuulivoimalassa käytetyn kestopagneettikoneen kytkennän periaatetta.



KUVA 67. PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) tuulivoimalassa (Brahim 2014)

Järjestely säästää huomattavasti tilaa tuulivoimalan nasellista vaihdelaatikon puuttumisen kautta, mutta rakenne vaatii täystehokonvertertin.

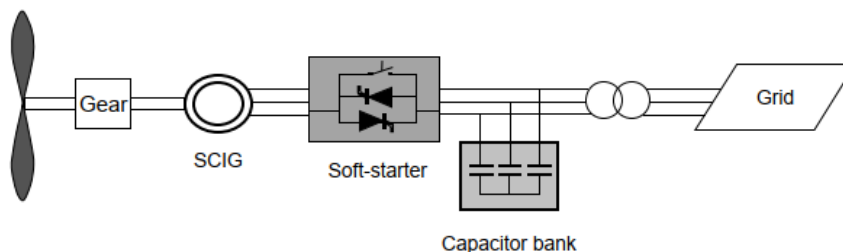
Generaattorin luodessa vakiomallinen magneettikenttä kestopagneeteilla, poistetaan magnetointirakenteen tarve ja kone on rakennettavissa fyysisesti pienempikokoiseksi. Tämä tekee suoravetoisen tuulivoimalaitoksen nasellista vanhem-

missä malleissa hieman ”kananmunamaisen” muotoilultaan. Tosin muitakin teknisiä ratkaisuita löytyy, jotka mahdollistavat huomattavasti siromman nasellin rakenteen.

Kestomagneettigeneraattorin tuottama jännite on verrannollinen sen pyörimisnopeuteen edellisen kappaleen kaavan 14 mukaisesti.

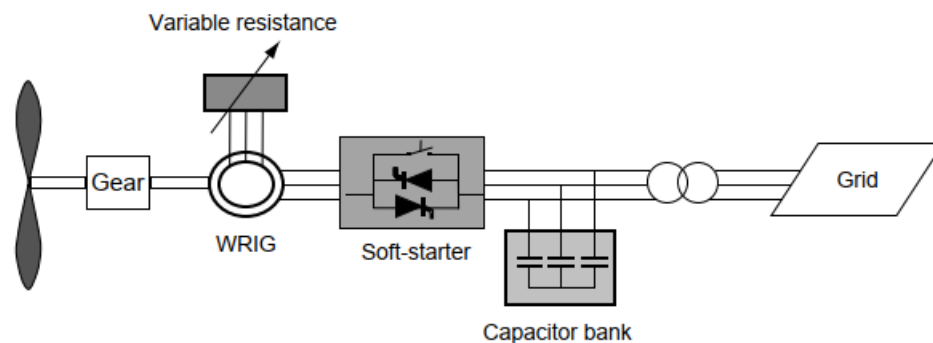
3.8 Muut – ei käsiteltävät generaattorirakenteet

Kuvan 68 rakenteessa on kyseessä vakionopeusgeneraattori, joka kytketään pehmostartilla syöttävään verkkoon. Pääosa sen magnetointitehosta tuotetaan paikallisesi kondensaattoreilla.



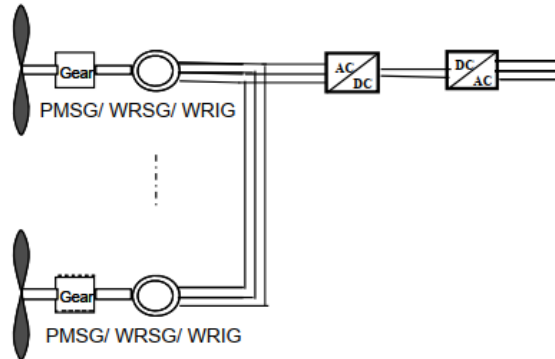
KUVA 68. Vakionopeuskäyttöinen epätahtigeneraattori (Ackermann 2012 s142)

Kuvan 69 rakenteessa kuvataan vastussäädettyä liukurengaskonetta. Tässä generaattorityypissä DFIG-rakenteesta poiketaan siten, että käyttötapa muistuttaa perinteistä liukurengasmootoria, jossa roottoriresistanssia säädetään muuttuvalla vastuksella. (Ackermann 2012)



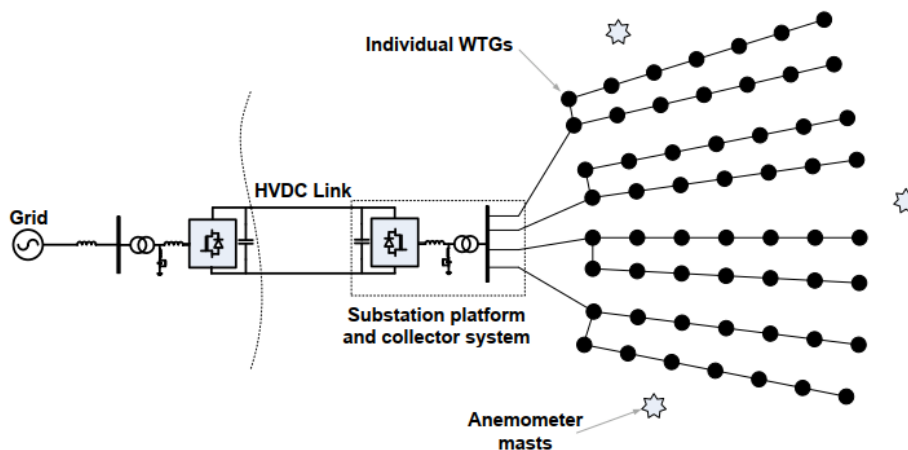
KUVA 69. Liukurengasgeneraattori vakionopeuskäyttöisessä tuulivoimalassa ilman tehoelektroniikkaa (Ackermann 2012 s142)

Kuvassa 70 esitellään kestopagneettikoneilla tehtävää konseptia, jossa generaattorit tuottavat tehoa yhteen verkkoon joka ei vielä ole varsinainen syöttöverkko. Tämän jälkeen kaikki syötetty sähkö vaihtosuunnataan sähköverkkoon.



KUVA 70. Suurten tuulipuistojen mahdollinen konsepti (Ackermann 2012 s167)

Kuvan 70 mukaisen konseptin merkittävin etu tulee suurissa tuulipuistoissa myös DFIG-generaattoreilla. Tuuliolosuhteiden ollessa puiston alueella kutakuinkin samansuuruiset, on mahdollista mitoittaa DFIG:iden roottoreiden konvertterit pienemmäksi ja ajaa tuotettua sähköä puiston sisäisessä verkossa keskitetysti. Tämän jälkeen suuremmalla konvertterilla vaihtosuunnataan sisäisen verkon sähkö valtakunnan verkkoon. (Muljadi, Singh, Gevorgian, 2012). Tuulipuistossa toteutettuna tätä rakennetta kuvataan kuvassa 71.



KUVA 71. Offshore sovellus kahden verkon rakenteella, jossa on mahdollisuus pienentää DFIG:iden konvertterien kokoa (Muljadi, Singh, Gevorgian, 2012)

4 KERÄTTYÄ DATAA TUULIVOIMALAITOKSISTA

Tuulivoimalaitoksien generaattoreista on kerätty dataa Energiaviraston syöttötariffijärjestelmästä, sekä anonymisoidulta suurelta suomalaiselta toimijalta tuulivoima-alalla. Tuulivoimayhdistykseltä tiedusteltiin myös teknistä tilastotietoa voimalaitoksista, mutta he eivät olleet keränneet tähän liittyen tietoa. Tuulivoimayhdistyksen muut tilastot mahdollistivat epäsuoran vertailun syöttötariffien tietoihin, jolloin verifioimalla tiettyjä olettamuksia, voidaan näitä tilastoja käyttää hyödyksi tiettyjen teknisten rakenteiden arvioinnissa.

Toimijalle esitetyt kysymykset esitettiin sähköpostitse. Ne ovat anonymisoitu sekä muotoiltu tavalla, jossa toimija on vähemmän tunnistettava.

4.1 Toimijan yksi haastattelun tietoja

4.1.1 Toimijan kanssa tehty erillinen haastattelu

Ensimmäinen kysymys liittyi käytettyihin generaattoriratkaisuihin toteutetuissa hankkeissa. Toimija kertoo heidän toteuttaneen enemmän DFIG-generaattoreilla tuulivoimaloita ja käyttävän pääsääntöisesti Nordexia, Vestasia ja GE:tä. Käytössä heillä on myös täystehokonverttereita mutta tarkempaa suhdelukua aiheesta ei ole.

Kysyttäessä onko voimantuottoon liittyvillä ratkaisuilla merkittäviä vaikutuksia tuulivoimaloiden ylläpitoon tai luotettavuuteen, toimija kertoi vaihdelaatikoiden olleen perinteisin ja hankalin vikapaikka, mikäli ongelmia komponentin kanssa vastaan tulee. Tällä hetkellä heillä on ongelmia eniten pitch-säädössä sekä tehoelektroniikan luotettavuudessa.

Kysyttäessä suhteellisesta kustannusvaikutuksesta erilaisista teknisistä ratkaisuista, vastauksessa tuli ilmi, että tämä ei varsinaisesti näy isossa kuvassa voimalahankkeiden monimutkaisuuden vuoksi. Jokainen kilpailutus on uniikki tapahtuma, joissa hinnat eivät ole keskenään vertailukelpoisia, erityisesti mikäli hankintamäärät vaihtelevat ja on olemassa olevia raamisopimuksia. Yleisesti ottaen

full scale-konvertteri-voimaloissa tehoelektroniikka on toki kalliimpaa, mutta kokonaisuus muodostuu hyvin paljon monesta useammastakin osatekijästä.

Toimijalta kysyttiin tarkastelua varten heidän näkemystään tuulivoimaloiden valmistajien julkisesti saataviin tietoihin voimalaitoksista. Kysymyksenä esitettiin, että jos tuulivoimaloiden valmistajien sivuja tarkastellaan, kuinka paikkansa pitäviä kyseiset tiedot ovat. Vastauksessa kerrottiin voimaloiden olevan hyvin pitkälti samoja. Tiettyjä variaatioita esiintyy aina saman tyyppin voimalaitoksissa mutta teknisesti ne ovat hyvin samanlaisia, esimerkiksi vain teholuokka vaihtelee. Perinteisesti voimalavalmistajat tuovat markkinoille teholuokaltaan lattiataason voimalan (joka tosin todennäköisesti on kuitenkin teholuokassaan jo markkinoiden yläpäättä ellei suurin) ja tämän jälkeen samasta tyyppistä julkaistaan tehokkaampia versioita. Esimerkiksi 6.0 MW → 6.8 MW. Yleisesti saman mallin rakenteet oletetaan hyvin samankaltaisiksi.

Kysyttäessä onko voimaloiden kehityksessä havaittavissa joitain muita yleisiä trendejä, esimerkiksi muuntamoiden sijoituksissa tai jännitetasoissa. Vastauksena kerrottiin, että voimaloiden muuntajia tunnutaan tänä päivänä sijoitettavan aina naselliin myös niiden toimijoiden osalta, jotka ennen sijoittivat sen voimalaitoksen juurelle ja toivat sähköön pienjännitteellä alas noin sadan metrin matkan. Todennäköisesti kyse on tehohäviöiden optimoinnista sekä siitä, että aiemmin kellarissa sijainneet kuivamuuntajat eivät enää mahdu ulos oven kautta. Myös aiemmin nämä kellarissa sijainneet kuivamuuntajat ovat vaihtuneet perinteisiin öljyeristeisiin muuntajiin nasellissa. Jännitetasoissa on pitkään oltu KJ-puolella 33 kV, mutta tulevaisuuden kannalta huhuja on liikkunut myös 45, 66 ja 75 kV jännitetasoista. Pullonkaulana tässä kokonaisuudessa on myös turbiinipuoli, koska siellä ei ole vielä tarjolla esimerkiksi 45 kV vaihtoehtoa ja jos vain yhdellä olisi, niin kilpailuasetelmat eivät olisi kovin hyvät. Käytännössä kaikki valmistavat 33 kV:lla, mutta kuinka kauan, on hyvä kysymys.

Kysyttäessä onko valinnoissa muodostunut jotain teknistä ratkaisua, joka koettaisiin ylivoimaisena tietyiltä osin muihin malleihin nähden, niin vastauksena: Suoravetokoneet ilman vaihdelaatikkoa. Ne ovat kalliita, mutta erittäin luotettavia, mutta eivät kuitenkaan hintansa osalta pärjää suuressa kuvassa. Käytännössä kaikki tämän toimijan voimalaitokset ovat vaihdelaatikolla varustettuja.

4.1.2 Toimijan haastattelun tuloksia Tuulivoimajärjestelmät-kurssin yhteydessä

Nämä kyselyt tehtiin marraskuussa 2022 Tampereen Ammattikorkeakoulun älykkään ja uusiutuvan sähköenergiatuotannon ylemmän tutkinto-ohjelman Tuulivoimajärjestelmät-kurssin yhteydessä.

Toimijalle esitettiin kysymys tuulisuuden mittaukseen sodareilla ja lidareilla. Sodar on äänitutka ja lidar on valotutka, joilla tehtäviä mittauksia on käytetty tuulisuuden mittaamiseen. Kysymyksessä tiedusteltiin, onko tuulisuuden mittaukset toteutettavissa pelkästään niillä, standardin / laadukkaan mittauksen näkökulmasta. Vastauksena viitattiin standardiin IEC 1400-4-1, joka antaa mahdollisuuden suorittaa mittaukset käyttäen pelkästään lidaria. Tämä kuitenkin lisää merkittävästi epävarmuuksia mittauksessa, joka taas vaikuttaa projektin tuotto-odotuksiin. Tähän mennessä mittausmasto onkin ollut aina pakollinen. Lisäksi lidar tulisi joka tapauksessa validoida mastoa varten, joten mastolla tehtävistä mittauksista ei päästä täysin eroon.

Kysyttäessä sääpallojen käyttöpotentialista mittamastojen korvaamiseen, toimija vastasi näiden käytön keskittyvän korkeammalle ilmakehässä tapahtuvaan havainnointiin, eikä niinkään rajakerroksiin. Ankkuroidun pallon haasteena tulee olemaan joka tapauksessa sen tyyppinen ankkurointi, että vaaka- ja pystysuuntainen liike on estetty tai laskennallisesti poistettavissa tuloksista.

Kysyttäessä mahdollisesti tehdystä yhteistyöstä Ilmatieteenlaitoksen kanssa tuulimittauksien osalta, oli vastauksena, että Ilmatieteenlaitos tarjoaa omia mittauspalveluitaan. Varsinaista mittautiedon jakamista ei ole tapahtunut.

Kysyttäessä yleisimmistä tuotannon keskeyttävistä vioista tuulivoimaloissa, vastauksena oli anturiviat. Automaation valvoessa voimalan toimintaa, voivat siihen liittyvien mittausanturien rikkoutumiset aiheuttaa voimalan pysähtymisen.

4.2 Energiaviraston tilastotiedot syöttötariffin tietokannoista

Energiavirastolta tehtiin tietopyyntö liittyen syöttötariffijärjestelmän alla oleviin voimalaitoksiin. Syöttötariffijärjestelmän piiriin oli mahdollista päästä vuodesta 2011 vuoden 2017 marraskuuhun, jona aikana käytännössä kaikki uudet tuulivoimatoimijat hakivat syöttötariffijärjestelmän piiriin. Tukea pystyi saamaan 12 vuoden ajan. Järjestelmä takasi investoijalle tavoitehinnan ja markkinahinnan mukaista tukea, määritelty tavoitehinta oli 83,5 €/MWh. (Syöttötariffi 3.3.2024 - https://www.motiva.fi/ratkaisut/ohjauskeinot/syottotariffi_eli_takuuhintajarjestelma)

Tietopyynnön perusteella saatiin tietoa 600:sta tuulivoimalaitoksesta tuolta ajalta. Näiden voimalaitosten yhteisteho on 2,255 GW. Materiaalin sisältämät voimalaitokset sijoittuvat hieman syöttötariffia laajemmalle ajanjaksolle 2009...2018. Materiaalissa eritellään voimalaitoksen valmistaja, malli, napakorkeus sekä nimellisteho.

Materiaali täydennettiin jokaisen voimalaitoksen teknisillä tiedoilla. Näillä täydennyksillä oli mahdollista saada lisättyä pääosaan tuulivoimaloista generaattorityyppi. Voimalaitokset, joista tietoa ei mitään kautta löytänyt, suodatettiin pois. Kokonaismääräksi jäi materiaalista hyödynnettäväksi 568 tuulivoimalaa. Kattavuus täten verrattuna 600:aan voimalaitokseen on 94,7 %.

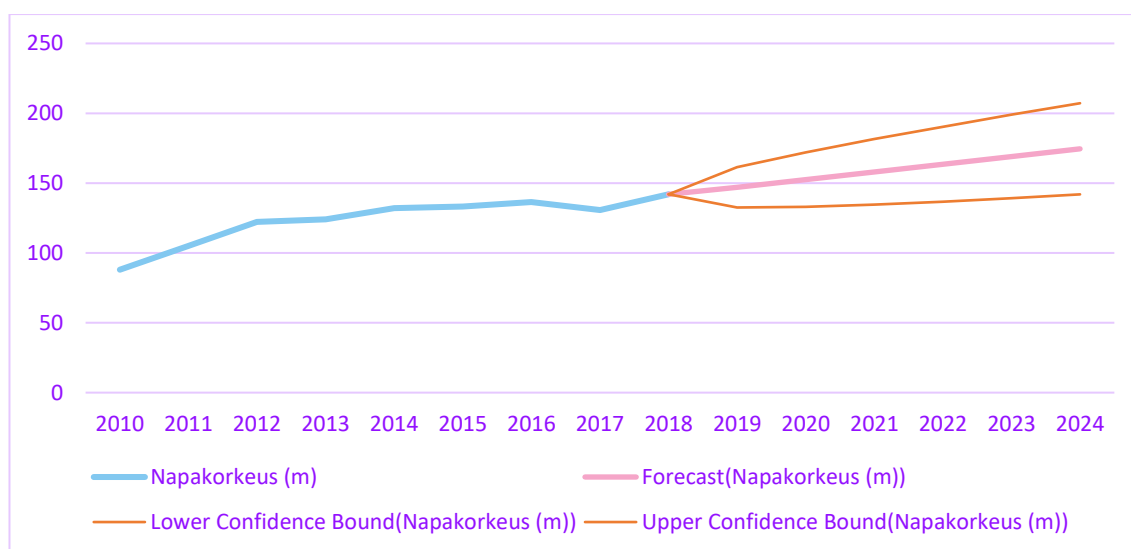
Valmistajien generaattorityyppien tietojen käyttäminen perustui tehtyjen tuulivoimalatoimijoiden haastatteluihin. Haastatteluissa oli todettu, että päälinjat voimaloiden teknisistä ratkaisuista ovat samat mallien sisällä, joten materiaalin käsittelyssä on oletettu valmistajien mallien generaattoreiden olevan valmistajan datan mukainen.

Tätä kautta muodostetusta materiaalista pyritään tunnistamaan erilaisia mahdollisia trendejä ja kvantitatiivisia tietoja. Myöhemmin työssä vastaan tuleva tuulivoimayhdistyksen tilastomateriaali hyödynnetään ristiin vertailuna ennusteiden toteutumisen todentamiseen. Myöhemmällä ristiin vertailulla pyritään myös toden-

tamaan, olisiko tämän saman metodiikan käyttäminen myös myöhemmin tehtävänä seurantatapana riittävän tarkka tapa tuottaa ennusteita tietyin rajoin oletusta kehityssuunnasta.

4.2.1 Syöttötariffin perusteella tehtävä korkeusennuste

Vuosien 2011 ja 2017 välillä tuulivoimaloiden napakorkeus vaihteli 73:n ja 147 metrin välillä. Tilastomateriaaliin tehtiin ennusteanalyysi Excelin Forecastilla, joka perustuu lineaarisen regression käyttämiseen. Lähtötietoina ennusteessa käytettiin pystytysvuosia ja napakorkeutta. Kuviossa 17 näkyy keskimääräinen napakorkeuden kasvu sekä tällä perusteella tehty ennuste napakorkeuden kehittymisestä.



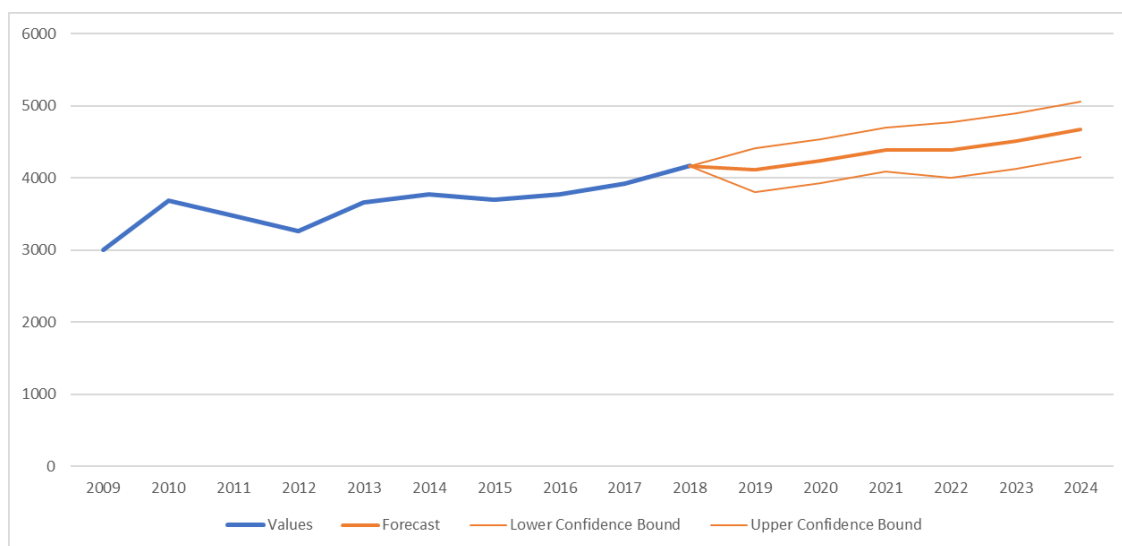
KUVIO 7. Ennuste tilaston perusteella tapahtuvasta kehityksestä keskimääräisessä napakorkeudessa.

Trendinä syöttötariffissa on havaittavissa napakorkeuden odotettavissa oleva nousu.

4.2.2 Syöttötariffin perusteella ennakoitava tehotason kasvun ennuste tuulivoimaloissa

Yksittäisen voimalan tehotaso on vaihdellut 3000 ja 4000 MW:n välillä tarkasteluajanjaksona nousevalla trendillä.

Huomioitavaa on, että syöttötariffin aikaiset voimalaitokset ovat maalle pystytettyjä voimalaitoksia, kun tulevaisuudessa mukaan tulevat myös merelle nousevat tuulivoimalaitokset joiden tehotaso voi olla yli 10 MW. Tällöin tarkastelun kohteena olevien voimalaitosten verrattavuus muuttuu toisenlaiseksi. Kuvio 8 sisältää keskimääräisen tehotason voimalaitoksissa, sekä ennustaa tämän perusteella tehotason kehittymistä.

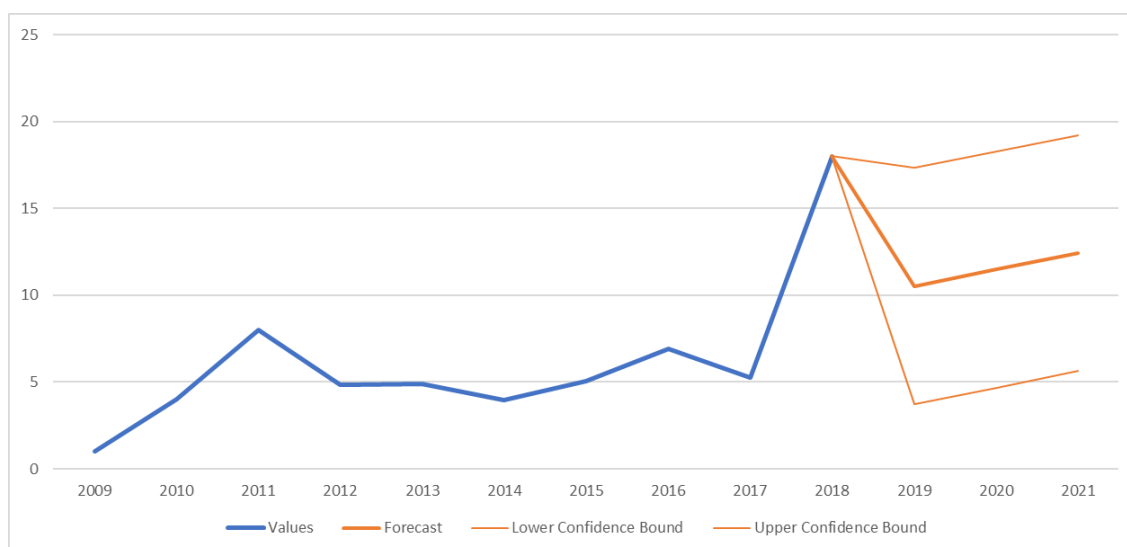


KUVIO 8. Tehotason kehittyminen ja kasvun ennuste

Keskimääräinen tehotasojen nousu on syöttötariffin datassa nähtävissä. Tämä korreloi luvun 4.2.1 kanssa, koska yleisesti tuulivoimalan korkeuden kasvu liittyy myös sen tehotason kasvuun.

4.2.3 Syöttötariffin perusteella ennustettava tuulipuistojen voimalaitoksien määrä

Syöttötariffitilastot linkittivät tuulivoimalat yksittäisiin tuulipuistoihin. Kun nämä niputettiin yhteen ja verrattiin määrää vuosilukuihin, pyrittiin hakemaan vastaavuutta näiden välillä. Kuvio 9 kuvaa tuulivoimalaitosten määrää yksittäisillä voimalaitosalueilla ja tällä perusteella on lineaarisella regressiolla haettu kehittymisen trendejä.



KUVIO 9. Tuulivoimaloiden määrä tuulipuistoissa ajansuhteen

Tilastosta näkyy kasvava trendi pitkällä aikavälillä generaattorien määrässä tuulipuistoissa. Viimeisen vuoden poikkeama liittyy toimijoiden haluun päästä vielä syöttötariffijärjestelmään sisään tuulipuistoillaan.

Yleisesti ottaen tilastossa oleva vaihteluväli on hyvin merkittävä. Trendi tuntuu joka tapauksessa osuvan kohdalleen aiheen ympärillä käytävään ”yleiseen keskusteluun”, jossa tuulipuistojen koon koetaan keskimäärin kasvavan.

4.2.4 Generaattorien tyypit syöttötariffin sisällä

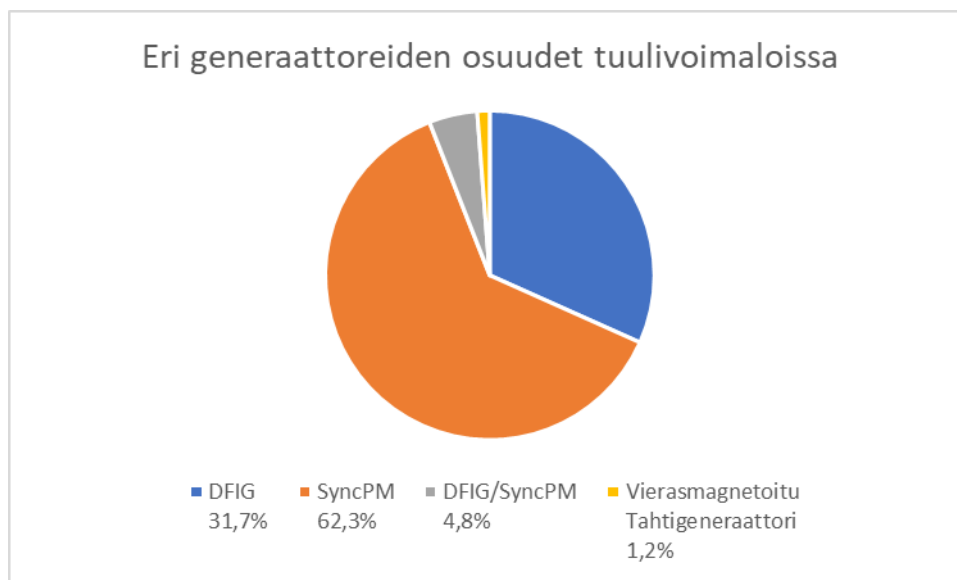
Tässä tarkastelussa eroteltiin lisätystä tiedosta generaattorityyppien esiintyvyys vuosittain. Jaon perusteena on DFIG-konsepti, SyncPM (kestomagneetti-generaattori) (termin muotoilu pohjaa www.thewindpower.net ilmoitustapaan). Tämä termi ei erottele vaihteettomia ja vaihteellisia voimalaitoksia. Mikäli voimalaitostyyppi oli saatavilla molemmilla, sai tämä oman sarakkeensa, sekä vieras-magnetoitu tahtigeneraattori sai myös oman sarakkeensa.

TAULUKKO 2. Generaattorityypit vuosina 2009...2019

VUOSI	GENERAATTORITYYPPI			
	DFIG	SyncPM	DFIG/SyncPM	Vierasmagnetoitu Tahtigeneraattori
2009		1		
2010		4		
2011				
2012		24	5	
2013	22	27		3
2014	14	31		
2015	48	68		2
2016	63	98	22	
2017	33	65		2
2018		36		
SUMMA	180	354	27	7

Datan perusteella kestopagneettimoottorit ovat olleet vallitseva tyyppi, vastaten noin 2/3 kokonaisuudesta, kun DFIG:t muodostavat toisen kolmanneksen. Vierasmagnetoitujen tahtigeneraattoreiden osuus on kokonaisuudesta pieni.

Alla oleva kuvio 10 visualisoi syöttötariffin sisällä olevien generaattoreiden esiintymisen ilman vuosittaista jakoa.



KUVIO 10. Eri generaattorityyppien osuudet kokonaisuudessaan syöttötariffissa

4.2.5 Syöttötariffijärjestelmässä olevien valmistajien volyymit

Syöttötariffin tilastoissa dominoi Vestas hieman yli 50 % markkinaosuudellaan, toisena on Nordex noin neljänneksen osuudella. Nämä kaksi tekijää muodostavat suurimman määrän tuulivoimalaitoksista Suomessa syöttötariffijärjestelmässä.

TAULUKKO 3. Valmistajien voimalaitosten lukumäärä Suomessa

VALMISTAJA	LUKUMÄÄRÄ	MÄÄRÄ
<i>Alstom</i>	16	2,7 %
<i>Dongfang</i>	3	0,5 %
<i>Enercon</i>	8	1,3 %
<i>Gamesa</i>	26	4,3 %
<i>Hyundai</i>	5	0,8 %
<i>Lagerwey</i>	16	2,7 %
<i>Nordex</i>	157	26,2 %
<i>Siemens</i>	40	6,7 %
<i>Siemens/Gamesa</i>	8	1,3 %
<i>Vestas</i>	316	52,7 %
<i>WinWinD</i>	5	0,8 %

4.2.6 Voimalaitosten jännitetaso

Jännitetasoihin liittyen kaikki generaattorit toimivat alle pienjännitteellä, joka tarkoittaa alle 1000 Voltin laitteistoja. Tilastot viittaavat todennäköisesti 690V laitteiden käyttöön perussuunnittelussa.

TAULUKKO 4. DFIG-koneiden napajännitteet

DFIG-GENERAATTORIT	
Jännite	Määrä
660 V	155
690 V	14
1000 V	16

TAULUKKO 5. Sync PM-generaattoreiden napajännitteet

SYNC PM - GENERAATTORIT	
Jännite	Määrä
676 V	15
690 V	58
710 V	236
800 V	36

4.2.7 Valmistajien käyttämät generaattorit syöttötariffin piirissä olevissa voimalaitoksissa

Valmistajat ovat näiden tilastojen mukaan hyvin vahvasti kiinni tietynmallisissa generaattoreissa. Mikäli suurimpien volyymin kautta lähestyy asiaa, niin Vestas käyttää pääsääntöisesti kestopmagnetoitua generaattoria, kun taas Nordex DFIG:tä.

TAULUKKO 6. Valmistajakohtaisesti käytetyt generaattorit

Valmistaja	Generaattorityyppi	Huomiot
<i>Alstom</i>	DFIG	
<i>Enercon</i>	Tahtigeneraattori	
<i>Gamesa</i>	Sync PM	
<i>Lagerwey</i>	Sync PM	
<i>Hyundai</i>	DFIG	
<i>Nordex</i>	DFIG	
<i>Siemens</i>	6 DFIG	
	27 Sync PM	
<i>Vestas</i>	3 DFIG	Vain V90 malli 2 MW
	22 DFIG/SyncPM	Vain V117 malli
	280 SyncPM	
<i>Winwind</i>	SyncPM	

4.3 Suomen tuulivoimayhdistyksen julkiset tilastot vuoden 2023 tilanteesta

Suomen tuulivoimayhdistys tarjoaa joitain tilastoja sivuillaan tuulivoiman tämän hetken tilasta Suomessa. Alla olevat tilastot ovat kerätty Tuulivoimayhdistyksen vuoden 2023 tilastoista, jotka ovat saatavilla Tuulivoimayhdistyksen sivuilta.

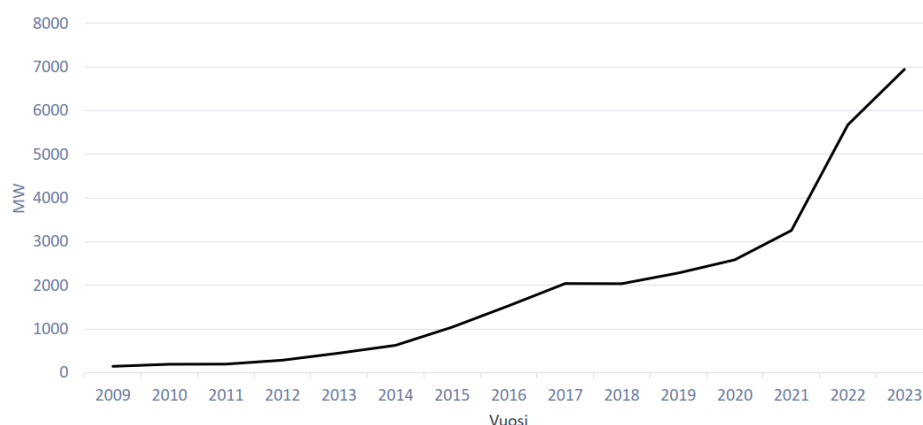
4.3.1 Tuulivoimayhdistyksen tilastot

Taulukon 7 mukaisesti Suomen nimellistehoinen tuulivoimakapasiteetti on hie-
man alle 7 GW vuoden 2023 lopussa. Tuulivoiman rakentamisen tahti on ollut
hyvin merkittävää, nimellisteholla mitattua sähköntuotantoa on rakentunut 1,2
GW vuonna 2023. Vertailun vuoksi, syöttötariffijärjestelmän piiriin pääsyn loppu-
aikoina, oli kokonaistuotanto noin 2,4 GW.

TAULUKKO 7. Suomen tuulivoimatuotannon yleiskuva 2023 hetkellä.

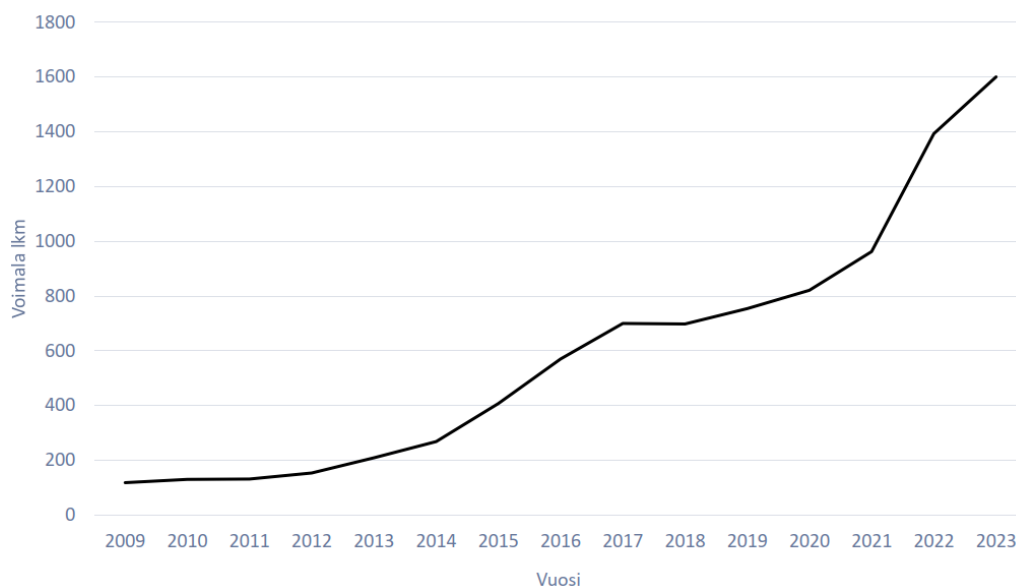
Asennettu tuulivoimakapasiteetti		
2023		
Asennetut tuulivoimalat	212	WTG
Asennettujen tuulivoimaloiden nimellisteho yhteensä	1 278	MW
Puretut tuulivoimalat	4	WTG
Purettujen tuulivoimaloiden nimellisteho yhteensä	12	MW
Voimaloiden lukumäärä - kumulatiivinen (WTG)	1 601	WTG
Kapasiteetti - kumulatiivinen (MW)	6 946	MW
Tuulisähkön tuotanto (TWh)*	14,467	TWh

Kuvio 11 kuvaa Suomeen kumulatiivisesti asennettua tuulivoimakapasiteettia. Kun sitä käyttää ristiin vertailuna syöttötariffien alla oleviin voimalaitoksiin, voidaan todeta tuotantolukujen vastaavan toisiaan. Täten syöttötariffijärjestelmään perustuvaa dataa voidaan pitää kokonaistuotannon kannalta melko tarkkana tietona esiintymisvuosiensa osalta. Hyvin merkittävää kasvua kapasiteetissa on havaittavissa noin vuodesta 2020 eteenpäin, jonka jälkeen muutoksen kulmakerroin jyrkkenee huomattavasti.



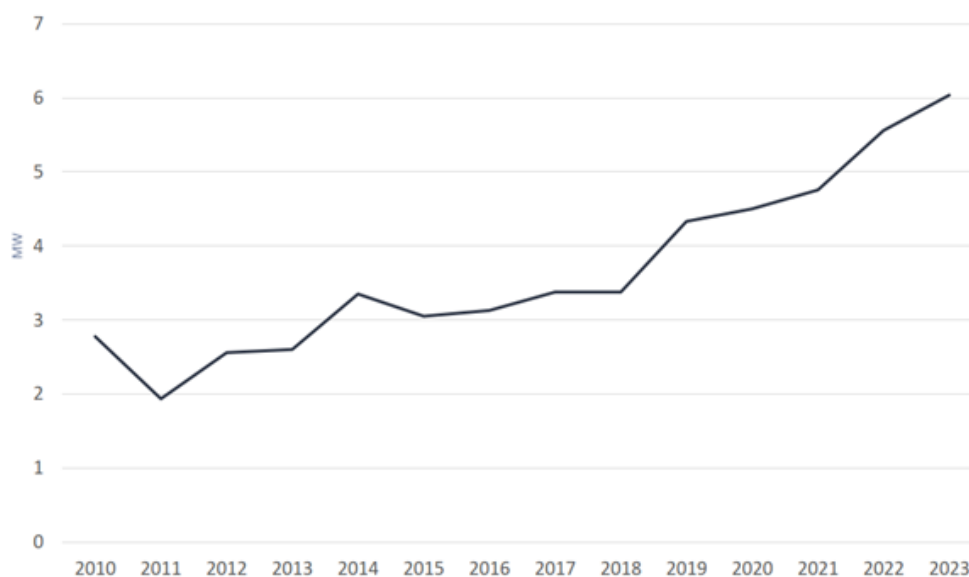
KUVIO 11. Suomeen asennettu kumulatiivinen tuulivoimakapasiteetti

Kuvio 12 kuvaa taas voimaloiden kumulatiivista määrää. Verraten tätä myös syöttötariffijärjestelmässä esiintyneisiin voimalaitosten lukumääriin, voidaan todeta myös vastaavuuden olevan noin 10 % tarkkuudella sama.



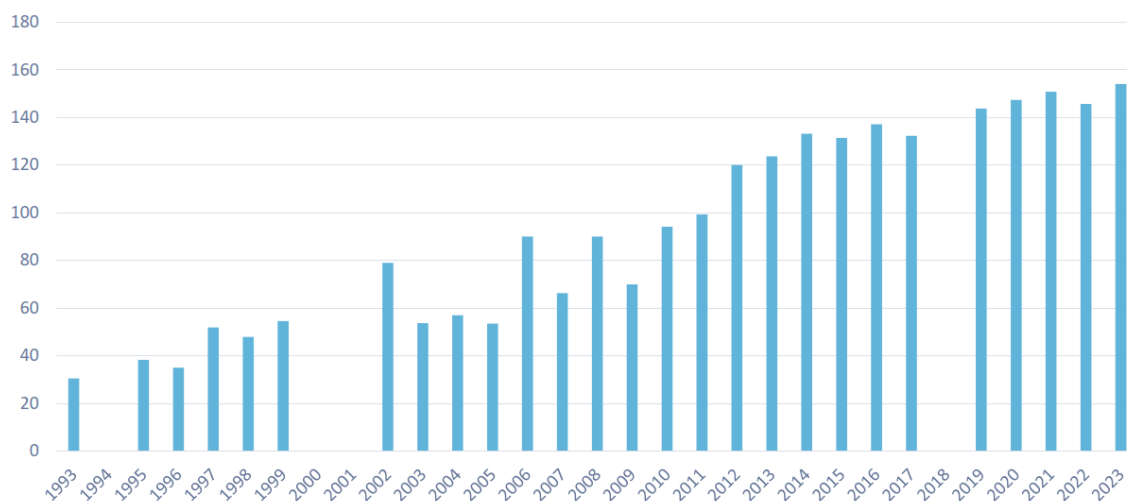
KUVIO 12. Asennettujen voimaloiden kumulatiivinen lukumäärä vuosina 2009-2023

Kuviota 13 voi ristiin verrata syöttötariffista tehtyyn ennusteeseen voimaloiden keskimääräisestä kokoluokasta ja sen ennusteesta. Tästä on todettavissa ennusteen olleen oikean suuntainen, mutta voimalaitosten koon kasvu on ollut huomattavasti ennustetta suurempaa.



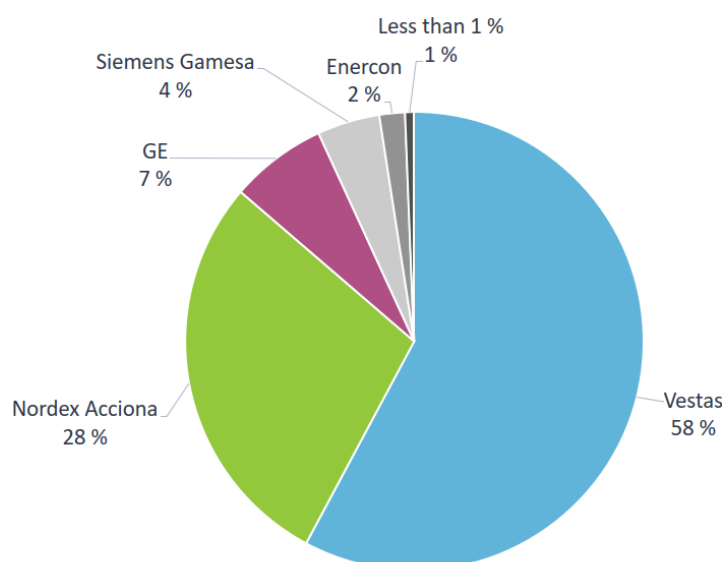
KUVIO 13. Asennettujen voimaloiden keskimääräinen koko (MW)

Toteutuneiden napakorkeuden ennusteiden osalta tuulivoimayhdistyksen data näyttää melko hyvin pitävän paikkansa syöttötariffijärjestelmän ennusteen kanssa kuviossa 14.



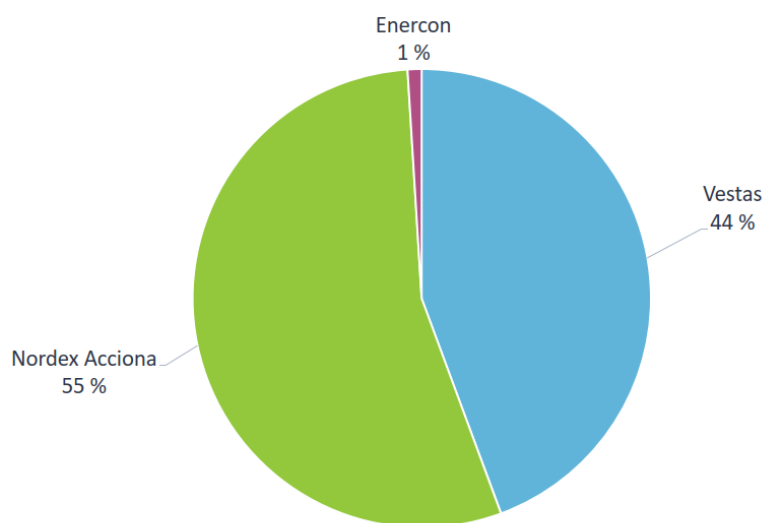
KUVIO 14. Asennettujen voimaloiden keskimääräinen napakorkeus (m)

Kumulatiivista kapasiteettia verratessa valmistajiin ja syöttötariffin aikoihin, on markkinajako säilynyt kutakuinkin samansuuruisena kuviossa 15. Kehityssuuntana on havaittavissa, että Vestas ja Nordex hallitsevat tehollisesti entistä suurempaa osaa kokonaisuudesta.



KUVIO 15. Tuulivoimalavalmistajien osuus kumulatiivisesta kapasiteetista (MW)
31.12.2023

Kuvio 16 kuvaa vuonna 2023 valmistuneiden tuulivoimaloiden valmistajia. Se korostaa selvästi Nordexin ja Vestasin kasvavaa suhteellista osuutta Suomen tuulivoimaloissa.



KUVIO 16. Tuulivoimavalmistajien osuus vuoden 2023 valmistuneesta kapasiteetista

Kuvion 17 mukaisesti voi tulkita keskimääräisten voimala-alueiden koon kasvavan. Kasvu on investointipäätösten perusteella edelleen vahvaa, mutta tilanne tästä eteenpäin voi mahdollisesti muuttua.

Maailmanpoliittinen tilanne voinee vaikuttaa jollain tavalla tuleviin kehityskulkuihin, mutta myös mahdolliset suuret merelle rakennettavat tuulivoimalaprojektit sekä kantaverkon kapasiteettirajoitteet.



KUVIO 17. Tuulivoimalarakentamisen kokonaiskapasiteetti ja ennuste

5 POHDINTA

5.1 Kerätyn tiedon hyödyntäminen ristiin vertailulla

Kerätyn tiedon voi suurimmilta osin jakaa syöttötariffin aikaiseen tarkkaan tietoon tuulivoimalakohtaisesti, sekä tuulivoimayhdistyksen yleiseen tilastotietoon. Kun näitä materiaaleja vertailee, on havaittavissa niissä merkittävästi samankaltaisuuksia. Tällä perusteella voinee tehdä johdettuja päätelmiä tiedoista. Päätelmässä on aina virheen mahdollisuus uusien mallisarjojen, sekä mahdollisten merkittävien infrastruktuurimuutoksien kautta tulevaisuudessa. Tällä hetkellä tiettyjä yksinkertaistuksia on tehtävissä ja tulosta voi pitää kohtuullisen luotettavana, mutta merituulivoima saattaa muuttaa tarkastelutavan tarvetta.

DFIG-konseptin osuuden voi arvioida olevan noin 25...33% Suomen tuulivoimaloista. Pääsääntöisesti generaattorit ovat kestopagneettigeneraattoreita ja puh-
taat vierasmagnetoidut tahtigeneraattorit jäänevät prosentin tai kahden määrään. Tämän arvion voi tehdä Vestasin ja Nordexin volyymeista ja heidän toteutuneista voimalaitosten generaattorityypeistä.

Syöttötariffien pohjalta tehdyt ennusteet pitävät kohtuullisen hyvin paikkansa, kun tilannetta vertaa Tuulivoimayhdistyksen toteutumiin perustuviin tilastoihin. Tätä kautta ajatellen, mikäli olisi kerättävissä syöttötariffin sisältöistä dataa tuulivoimalaitosten projekteista, olisi mahdollista saada vastaavaa ennustettavuutta tulevaisuuteen. Ennustamisessa tulee eritellä merituulivoiman ja maatuulivoiman rakentaminen, niiden erilaisen luonteen vuoksi.

5.2 Vaikutus opetukseen

Tilastokeskuksen mukaan tuulivoima vastasi vuonna 2023 noin 17 % Suomen sähköntuotannosta. Mikäli hieman yksinkertaistaen jakaa koko sähköntuotannon eri generaattorityyppeihin, niin yksinkertaistuksella hieman yli 80 % Suomen sähköntuotannosta perustuu vierasmagnetoiuihin tahtigeneraattoreihin. Noin 10 % kestopagneettigeneraattoreihin, ja noin 7 % DFIG-konseptiin. Tämä laskenta ei huomioi aurinkovoimaa tai vientiä/tuontia, mutta antaa arvion suuruusluokista.

Sähköntuotannosta jää tässä kokonaisuudessa puuttumaan täysin käyttöjen takaisinsyötöt, sekä oikosulkugeneraattorit. Nämä ovat kuitenkin hyvin merkittäviä sovelluksia asioita tarkasteltaessa energiatehokkuuden kannalta. Lisäksi erityyppiset akustot jäävät myös ulkopuolelle, jolloin arvioon tulee suhtautua yksinkertaistuksena.

Puhtaiden volyyymien lisäksi vertailua voidaan tehdä tällä hetkellä Suomeen tehtävien investointien kautta. Tällöin verrataan tekniikoita, jotka keräävät eniten investointeja. Tätä kautta ne luovat merkittävästi työpaikkoja ja uuden osaamisen tarvetta. Tämänkaltaisessa tarkastelussa tuulivoimaloiden luomat tarpeet ovat hyvin vahvoilla. Tosin tämäntyyppiseen tarkasteluun tulisi ehdottomasti huomioida myös aurinkovoimalaitokset sekä erityyppiset energian varastointiratkaisut.

Tampereen ammattikorkeakoulussa uudistui opintosuunnitelma sähkövoimatekniikan puolella syksyille 2024 aloittavilla opiskelijoille. Uudistus lisäsi kurssisisältöä pyöriviin sähkökoneisiin. Edellisen opintosuunnitelman haaste on ollut pyörivien koneiden osalta tahtikoneiden käsittelyyn varattu aika, joka on jäänyt niiden tärkeyteen suhteutettuna liian pieneksi. Verratessa tapahtuvien investointien määrää eri generaattorityypeittäin ja syntyvien uusien työpaikkojen osalta, on opintosuunnitelmauudistuksessa olevat painotukset tämän suhteen oikean suuntaisia ja tukevat alan tarpeita.

Toiset uudistukset opintosuunnitelmassa ovat muun muassa eräiden projekti- maisten kurssien rakentaminen niin sähkövoimatekniikan kuin automaation yhteistoteutukseksi. Myös tämä on tuulivoiman ollessa aihealueena erittäin hyvän suuntainen askel, vastaten alan tarpeisiin.

5.3 Tiedonkeruun haasteet

Valmista tietoa tähän aiheeseen liittyen oli haastava kerätä suomalaisilta toimijoilta. Tarkastelematta jäi Internet-sivusto <https://www.thewindpower.net> , jota kautta olisi ostettavissa 80€:n hintaan tilastotietoa, joka heidän näytekalasteensa mukaan sisältää:

- Voimalaitoksen nimen ja sijainnin
- Valmistajan

- Turbiinin tyyppi, korkeus, määrä ja yhteisteho
- Kehittäjän
- Omistajan
- Ajantasaisen käyttötilanteen

Tähän lähteeseen ei työn puitteissa tutustuttu tai tehty sille vertailua muuhun saatavilla olevaan tietoon. Tämän sivuston ostettu data vaikuttaisi hyvin potentiaaliselta tavalta luoda jatkuvasti päivittyvä tilannekuva tuulivoimalaitosten teknisistä tiedoista.

Windpower.net-sivustolta on saatavilla listaus heidän keräämän tietokannan datan määrän tarkkuudesta. Tämä listaus on esitetty taulukossa 8. Taulukon mukaan esimerkiksi voimalaitosten valmistajien kattavuus on noin 90 % ja mallikohmainen kattavuus on 78 %. Tätä määrää voi pitää riittävänä yleiskuvan muodostamiseksi, mutta tässä tulee edelleen tiedostaa tietyt epätarkkuudet. Lisäksi tulevaisuuden mahdolliset kehityskulut merituulivoiman ja uusien voimalaitosmallien osalta, vaativat erillistä tarkastelua. Mikäli uusissa voimalaitosmalleissa on poikkeamia totutuista säännönmukaisuuksista generaattoreissa, aiheuttaa tämä virhettä kokonaisuuteen.

TAULUKKO 8. Windpower.netin datan tarkkuus Suomen tuulivoimaloista 1.3.2024

Fill rates

	Entries	Fill rate
Number of entries	308	/
Number of wind farms	287	/
Location		
Zone/District	308	100 %
City	262	85 %
WGS84 coordinates (approximate)	87	28 %
WGS84 coordinates (accurate)	219	71 %
Turbines		
Manufacturer	276	90 %
Turbine model	239	78 %
Hub height	236	77 %
Number of turbines	288	94 %
Total power	306	99 %
Players		
Developer	138	45 %
Operator	161	52 %
Owner	253	82 %
Status data		
Status	308	100 %
Commissioning date	275	89 %
Decommissioning date	31	72 %
Direct link to The Wind Power datasheet	308	100%

5.4 Poikkeamat ennakko-olettamista

Datan keruun kannalta yllättävää oli DFIG-koneiden oletettua pienempi osuus. Yleisesti käytäväkeskusteluiden ja erinäisten muiden keskusteluiden perusteella oli muodostunut mielikuvaksi niiden huomattavasti suurempi osuus kokonaisuudesta.

Tuulivoimaloiden valmistajien määrä vaikuttaa myös vähentyneen Suomessa huomattavasti syöttötariffijärjestelmän ajoista tähän päivään. Nordex ja Vestas hallitsevat markkinoita. Tämä johtunee myös samalla kasvavista voimalaitosten kokoluokista, jolloin toiminnan kasvaessa teollisuudessa toiminta tuntuu usein keskittyvän muutamien suurien toimijoiden käsiin.

5.5 Maailmanpolitiikan vaikutus kehityskulkuihin

Mielenkiintoista on tulevaisuudessa nähdä maailmanpolitiikan vaikutus valittuihin tekniikoihin. Merkittävät uusiutuvan energian investoinnit perustuvat teknisesti erittäin vahvasti kiinalaisiin avainmateriaaleihin. Sähköautoissa tämä näkyy akuissa ja tuulivoimaloissa taas käytetyissä kestopagneeteissa. Teknistä kehitystä tapahtuu jatkuvasti sähköautojen moottoreissa, joissa pyritään vähentämään niiden riippuvuutta harvoista lähteistä saataviin materiaaleihin. Esimerkiksi BMW ja Renault ovat ilmoittaneet käyttävänsä perinteistä vierasmagneetoitua harjallista tahtikonetta sähköautoissaan ja suuret valmistajat kuten Tesla pyrkivät tuotekehityksen kautta vähentämään harvinaisia maamineraaleja moottoreissaan. Tätä tilannetta vasten, olisi mielenkiintoista jatkaa tutkimusta kestopagneettimateriaalien kehittymisestä ja niihin liittyvistä hankinta- ja tuotantopoluista. Myös mahdollisien poliittisten ohjauksien rakentuminen aihealueen ympärille saattaa ohjata ratkaisuita osin pois kestopagneetteihin perustuvasta tekniikasta.

Tämän pohdinnan perusteella pitäisin itse tärkeänä, että länsimaiset valmistajat säilyttävät laajaa osaamistaan erityisesti DFIG- ja vierasmagneetoitujen tahtigeneraattorien hyödyntämisessä ja tuotteistamisessa. Suomen sisällä on nähtävissä jo vahvasti suurien toimijoiden korostuminen tuulivoima-alalla. On hyvä, että he luottavat kahteen erityyppiseen perustekniikkaan generaattoreissaan.

Tulevaisuuden kehityskulut ovat aina arvauksia ja käynnissä oleva energiamurros ei tule ainakaan yksinkertaistamaan energiajärjestelmäämme. Teemmekö uuden järjestelmän riippuvaiseksi joistain tietyistä avainmateriaaleista tai tekniikoista, on taas mielestäni pitkälti poliittinen valinta.

5.6 Havaintoja suuren yleisön ymmärryksen ja mielikuvien luomista haasteista tuulivoima-alalla

Työn aikana kävin useita keskusteluita eri henkilöiden kanssa. Heitä oli usealta erilaiselta aatesuunnalta sekä hyvin vaihtelevilta taustoilta. Heidän kiinnostuksen tasonsa myös yhteiskunnallisiin asioihin oli vahvasti vaihtelevaa. Lisäksi pyrin seuraamaan erityyppisiä keskustelufoorumeita sosiaalisessa mediassa, jotka perinteisesti edustivat keskustelijoiden mielipiteiden ääripäitä.

Energiamurrokseen liittyvät teemat ja niitä käsittelevä keskustelu on vahvasti värittynyttä niin sosiaalisessa mediassa, kuin mediassa muutenkin. Kun keskusteluihin syntyy ääripäitä, tapaa yleensä itse keskustelun taustalla vaikuttavat faktuaaliset tekijät vääristyä tai niitä hyödynnetään sopivina osittaistotuuksina omiin tarkoituksiin.

Mielestäni tuulivoima-alalla energiatuotannon murrokseen liittyvä keskusteluilmapiiri tulisi saada irrotettua osaltaan erityisesti ilmastonmuutoksen vastaisesta taistelusta. Tilalle tulisi tuoda ajatuksia sen vaikutuksesta kansantalouteen ja yleisesti omavaraisuuteen sekä turvallisuuteen. Tämä järkevöittäisi julkista ja sosiaalisen median keskustelua, samalla luoden ilmapiirin, jossa vastakkainasettelussa keskustelun ääripäät menettäisivät omaa argumentointikykyä. Laajempi faktuaalinen pohja tarjoaisi järkevämmän keskusteluilmapiirin keskitien kulkijoille, joille molemmat ääripäät edustavat jotain, mihin he eivät halua samaistua. Teknillinen faktaperustainen keskustelu on julkisessa keskustelussa yleensä ”niin tylsän neutraalia”, että se johtaa myös neutraaliin käsittelytapaan.

5.7 Havainnot saatavilla olevasta opintomateriaalista

Suomessa korkeakouluihin soveltuvien teknisten kirjojen tuotanto on erittäin pientä. Tällä hetkellä elämme uusiutuvien energiantuotantomuotojen ja vihreän siirtymän osalta vahvasti kehittyvässä maailmassa, jossa uudet tekniikat ovat jo markkinoilla.

Suomenkielisen kirjallisuuden osalta uusien teknisten sovelluksien käsittelylle uskoisin löytyvän tilausta. Hyvin moni opetus teknillisillä aloilla pohjautuu saatavilla olevaan suomenkieliseen kirjallisuuteen, jota on tehty pääsääntöisesti ennen energiamurroksen vauhtiin pääsemistä. Kirjallisuuden puutteet tällä aihealueella voivat johtaa puutteelliseen opetuksen sisältöön.

Materiaalia aiheeseen liittyen löytyy englanninkielisenä, mutta sen hyödyntäminen suomalaisessa opetusympäristössä ei ole suoraviivaista. Tämän hetken tekninen kehitys vaatiikin vahvaa uudistumista ja halua oppia uutta aihetta koulutavilta henkilöiltä. Ajantasainen koulutus on meidän merkittävimpiä kansainvälisiä kilpailuvaltteja.

Onneksemme todennäköisesti myös monet muut maat ovat saman haasteen edessä opetuksensa kehittämisessä. Tässä kilpajuoksussa on kansainvälisen kilpailuasetelman vuoksi pysyttävä ehdottomasti kärjessä, jotta suomalainen insinööriosaminen säilyy korkealaatuisena.

5.8 Työ yleisesti

Työtä tehdessä tiedon keruun ja sen käsittelyn haastavuus yllättivät. Vaikkakin ala on hyvin vahva tällä hetkellä ja siitä löytyy tietoa, on sen selväkielinen käsittely haastavaa. Kun halutaan mennä sopivasti pintaa syvemmälle menemättä puhtaasti pelkkiin differentiaaliyhtälöihin, muuttuu tiedon keruu haastavaksi.

Erityisen yllättävää oli selkokielisen ja selvän materiaalin löytämisen haasteet DFIG-konseptista. Vertasin työtä tehdessä mielenkiinnosta kymmeniä erinäisiä lopputöitä, joissa oli käsitelty DFIG-konseptia. Pääosasta jäi se tunne, että kirjoittaja ei itse ymmärtänyt koneen toimintaa.

Syöttötariffijärjestelmään liittyvien tietokantojen hyödyntäminen oli työtä tehdessä avainasemassa. Se tarjosi avainelementin analyysihin ja tarjosi myös tietopaketin, jolla voitiin todentaa tiedon hyödyntämisen tapoja ja todentaa ennusteiden toimivuutta. Tämän tietokannan käsittely ja tietojen yhdistäminen erilaisista lähteistä mahdollisti mielestäni ensimmäistä kertaa tämän kaltaisen tiedon tuomisen julkiseksi.

Oppimisen haasteet lisääntyvät jatkuvasti ja ihmiset ovat hyvin vahvasti visuaalisten ärsykkeiden parissa älypuhelimien käytön ääressä. Meidän tulisi ehdottomasti pyrkiä panostamaan oppimismateriaalien ajankohtaisuuden lisäksi myös asioiden yksinkertaiseen esitystapaan. Tämä työ käy hyvin laajasti aiheita läpi ja yksinkertainen opetusmateriaali tulee rakentaa erityyppisesti, mutta työ pyrkii antamaan idean yksinkertaiseen lähestymistapaan ammattikorkeakouluihin erityisesti DFIG-konseptin käsittelyssä.

Haluan kiittää erityisesti työn ohjaajaa ja samalla hyvää kollegaa, joka on toiminut myös suurelta osin inspiraationa työn aiheille ja sisällölle. Lisäksi suuret kiitokset pienelle (omasta mielestään jo isolle) 4-vuotiaalle Eino-pojalle, joka on ollut kovana apuna työtä tehdessä. Lisäksi kiitokset paremmalle puoliskolleni Elinalle, joka on välillä pitkään iltaan töitä tehdessä jaksanut olla liikaa välittämättä pienestä kiukustumisesta joidenkin aiheiden ympärillä.

LÄHTEET

Korpela A –luentomoniste TTY 2014

Korpela A. Tuulivoiman Perusteet 2016. Tammertekniikka

Tuulivoimayhdistys 1.3.2024 <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/mita-tuuli-on-2/mita-tuuli-on ///>

Korpela A – Luento Tuulivoimajärjestelmät - Syksy 2023 5U00FT66-3002 - YAMK kurssi

[SL pressure Europe - Forecast maps - weather forecast \(weatheronline.co.uk -\)](https://www.weatheronline.co.uk/)

Omat valokuvat

Valokuvat: Mika Lehtola – Väyrävirasto 2022

Kauppinen J. - Turbiinitekniikka – Käyttö, huolto ja kunnossapito 2018. Tammertekniikka

Huhtinen M, Korhonen R, Pimiä T, Urpalainen S – Voimalaitostekniikka 2013. Opetushallitus

Kolmihaaran tuuli- ja aurinkovoimahanke, Isojoki – Hankkeen kuvaus dokumentti 2-2024

Vestaksen V126 turbiini

https://www.thewindpower.net/turbine_en_865_vestas_v126-3000.php

Nordexin N131-3900 voimalaitoksen turbiinin asennustilanne //

<https://www.nordex-online.com/en/product/n131-3900/>

ABB Wind Power Industry – Installation Products Division – May 2021 – viitattu 1.3.2024:

https://electrification.us.abb.com/publibrary/product/line-power/presentations?items_per_page=25&order=field_public_number&sort=asc&field_public_type%5B0%5D%5Btarget_id%5D=1041&field_public_product=0&field_public_category=&field_public_category_family=&field_public_service_category=&page=17

Energiforskin tutkimusraportti tuulivoimalaitosten vaihdelaatikoista

<https://energiforsk.se/en/programmes/wind-power-industry-network/reports/wind-turbine-gearboxes/>

Siemens katalogi: Siemens_Wind_Turbine_SWT-2_3-108_EN
https://www.siemens.com/tr/i/Assets/Enerji/yenilenebilir_enerji/Siemens_Wind_Turbine_SWT-2_3-108_EN.pdf

Hyundain HQ2000 turbiinin yleiset tekniset tiedot
http://www.nwesales.fi/windpower/data/uploads/HQ2000_General_Specification.pdf

Lagerweyn L100 voimalaitoksen datalehti
https://www.lagerweywind.nl/wp-content/uploads/2018/02/7105-LW-Leaflet-L100-ENG_WEB.pdf

Enerconin tuuliturbiinien teknologia
<https://www.enercon.de/en/wind-turbines/technology>

Siemens – Basics of AC Motors opas

Pyrhönen J, Jokinen T, Hrabovcova V – Design of Rotating Electrical Machines 2013. Wiley

Amperen lain visualisointi
https://fi.wikipedia.org/wiki/Amp%C3%A8ren_laki

Leppihalme Tuomo - Sähköalan perusoppi 3. Otava. 1981

Young Hugh, Freedman Roger, Sandin T, Ford A. Sears and Zemansky's University Physics with Modern Physics. 1999

Heikkilä S. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi Syksy 2023 5S00DY06-3003

Ahoranta Jukka – Sähkötekniikka. 2017. SanomaPro.

Schwartze T – Sähkötekniikka. 1905. Suomalaisen kirjallisuuden seuran kirjapainon osakeyhtiö.

Kathy Loves Physics – Youtube luennot
<https://www.youtube.com/c/KathyLovesPhysicsHistory>

Virtanen K. Kurssimateriaali TAMK Sähkökoneet kurssi 2020 5S00BL96-3010

Pyökäri Tauno – Sähkökoneoppi. 1971. Weilin+Göös

Oikosulkumoottorin ekvivalenttinen piiri
<https://www.electrical4u.com/equivalent-circuit-for-an-induction-motor/>

Aura L, Tonteri A – Sähkökoneet ja Tehoelektroniikan perusteet. 1996. WSOY

ABB – Tekninen Opas 7 – Sähkökäytön Mitoitus

DFIG-koneen rakenne

<https://www.pengky.cn/zz-horizontal-axis-turbine/13-doubly-fed-wind-turbine-principle/doubly-fed-wind-turbine-principle.html> //

Learn Engineering – Slip Ring

<https://www.youtube.com/watch?v=JPn5Ou-N0b0>

Ritaranta, S. 2010. Suojaimet. Työterveyslaitos. Luettu 29.3.2011.

<http://www.ttl.fi/fi/toimialat/rakennus/rats/sivut/suojaimet.aspx>

Fletcher John Dr, Yang Jin - *Introduction to Doubly-Fed Induction Generator for Wind Power Applications University of Strathclyde, Glasgow United Kingdom. 2010.*

Impact of inertia response control strategy based doubly fed induction generator on frequency stability of power system – Jialin Zhang, Ping Wei & Xin Gao. 2022

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722024702> //

WEG The ABC of Synchronous motors //

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hfe/hf4/WEG-the-abcs-of-synchronous-motors-usaem200syn42-brochure-english.pdf>

TVO OL3 Tekninen esite - https://tvo.fi/material/sites/van-hattvo/20220825132746/7bmHsNHjV/ydinvoimalaitosyksikko_ol3_fin.pdf - 12.3.2024

GE:n turbogeneraattori katalogi

<https://www.gevernova.com/steam-power/products/generators/gigatop-4-pole>

Aura L, Tonteri A – Sähkömiehen Käsikirja 2 - Sähkökoneet 1986. Werner Söderstrom Osakeyhtiö

Heikkilä S 2007 - Vierasmagnetoitu generaattori muuttuvakierroksisena käytönä

<https://www.theseus.fi/handle/10024/9839>

Kauppinen J, Wikström R – Hietalahti L – Generaattorit käyttö, huolto ja kunnossapito. 2020. Tammertekniikka

Berbaoui Brahim - Permanent Magnet Synchronous Generator Driven Wind Energy Conversion System Based on Parallel Active Power Filter. 2014

https://www.researchgate.net/publication/273831133_Permanent_Magnet_Synchronous_Generator_Driven_Wind_Energy_Conversion_System_Based_on_Parallel_Active_Power_Filter

Ackermann Thomas. Wind Power in Power Systems. 2012. Wiley

Muljadi E, Singh M, Gevorgian V – Doubly Fed Induction Generator in an Off-shore Wind Power Plant Operated at Rated V/Hz. 2012

<https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/55573.pdf>

Tuulivoimayhdistyksen vuoden 2023 tilastot

https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2023-3.pdf

The Windpower – Wind Energy Market Intelligence

<https://www.thewindpower.net>