



Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon

Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

Saara Varjakoski

Opinnäytetyö, AMK

Toukokuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma (AMK)

Varjakoski, Saara

Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon.

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Toukokuu 2024, 90 sivua

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: kyllä

Tiivistelmä

Uusiutuvien energiatuotantotapojen lisääntyminen sähköntuotantojärjestelmissä tarvitsee ajankohtaista säätelyä ja standardoimista. Verkkosäännöt, IEC-standardit, Suomen lait ja asetukset sekä EU-komission asetus määrittelevät tuulivoiman sähköverkkoon liittymisen säätelystä.

Toimeksiantaja tarvitsi yleiskatsauksen tuulivoimaloiden sähköverkkoon liittämisestä laitetasolla. Tavoitteena oli tarjota opiskelijoille tietoa ja pohdintaa tuulivoiman liittämisestä sähköverkkoon ja siihen liittyvistä haasteista.

Aineisto opinnäytetyöhön kerättiin kuvailevalla kirjallisuuskatsauksella. Kirjallisuushaku tehtiin tuulivoimasta osana sähköverkkoa, tuulivoimalan keskeisimmistä komponenteista ja suojausjärjestelmistä sekä sähköverkon stabiilisuudesta ja verkkomääräyksistä. Kirjallisuushaku suoritettiin kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä kirjallisuushaussa haettiin opinnäytetöitä, kandidaatin töitä, maisterin töitä, väitöskirjoja, teknisiä ohjeita avoimesta internetistä ja oppikirjoja tuulivoiman kytkemisestä sähköverkkoon sekä tuulivoimalaitoksen generaattorityypeistä. Toisessa kirjallisuushaussa haettiin tietoa samalla tavalla, kuin ensimmäisessä haussa tuulivoiman generaattorin vaikutuksista sähköverkon stabiilisuuteen. Kolmannessa haussa haettiin tietoa avoimesta internetistä verkkosäännöistä sekä IEC-standardeista ja EU-komission asetuksista.

Kirjallisuuskatsauksen tietokantahaussa ei löytynyt tutkimuksia, joissa tuulivoimaloiden kytkemistä sähköverkkoon olisi käsitelty kokonaisuutena.

Työn tuloksena saatiin selvitys, jota opiskelijat voivat hyödyntää tuulivoimaan liittyvissä opinnoissaan. Työn avulla opiskelijat saavat käsityksen yleisimmästä käytössä olevasta tuulivoimageneraattorityypistä, suuntaajakytkettyjen laitosten verkkoon liittämisestä, tuulivoimaloihin liittyvästä relesuojauksesta, tuulivoimaloitten sähköasemien kompensoimislaitteista ja tuulivoimaloissa käytettävästä sähköasema-automaatiosta.

Avainsanat (asiasanat)

Taajuusmuuttaja, IEC-standardit, liittäminen, muuntajat, sähköasemat, kytkinasemat, tuuligeneraattorit, sähkömarkkinalaki

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Varjakoski, Saara

Integrating Wind Power into the Electrical Grid

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, May 2024, 90 pages

Degree Programme in Electrical and Automation Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The increasing adoption of renewable energy generation methods in power production systems requires timely regulation and standardization. Grid rules, IEC standards, Finnish laws and regulations, as well as EU Commission regulations, define the regulation of wind power integration into the electrical grid.

The client needed an overview of wind turbine grid integration at the device level. The goal was to provide students with information and discussion on the integration of wind power into the electrical grid and the associated challenges.

The material for the thesis was collected through a descriptive literature review. Literature searches were conducted on wind power as part of the electrical grid, the key components of wind turbines and protection systems, as well as electrical grid stability and grid regulations. The literature search was conducted in three phases. In the first literature search, the focus was on retrieving theses, bachelor's theses, master's theses, dissertations, technical guidelines from the open internet, and textbooks on connecting wind power to the electrical grid and wind turbine generator types. In the second literature search, information was sought on the impact of wind turbine generators on electrical grid stability in the same manner as in the first search. In the third search, information on grid rules, IEC standards, and EU Commission regulations was sought from the open internet.

The literature review database search did not yield studies that comprehensively addressed the integration of wind turbines into the electrical grid.

As a result of the study, an overview was obtained which students can utilize in their studies related to wind power. Through this work, students gain an understanding of the most common type of wind turbine generator in use, regulation of grid integration for doubly fed induction generator (DFIG) systems, relay protection associated with wind turbines, compensating devices for wind turbine substations, and substation automation used in wind turbines.

Keywords/tags (subjects)

Frequency converter, IEC-standards, integration, transformers, substations, switchgear, wind generators, electricity market law

Miscellaneous (Confidential information)

Sisältö

| | |
|---|-----------|
| Sanasto | 5 |
| Lyhenteet | 6 |
| 1 Johdanto | 8 |
| 1.1 Tuulivoiman rakentamisen kasvu..... | 8 |
| 1.2 Työn rajaukset ja rajauksen perustelut | 9 |
| 1.3 Opinnäytetyön tarkoitus, tavoite ja tutkimuskysymykset..... | 10 |
| 2 Opinnäytetyön teoreettiset lähtökohdat | 11 |
| 2.1 Verkkoon liitännän verkkosäännöt..... | 11 |
| 2.1.1 Yleiset liittymisehdot (YLE)..... | 13 |
| 2.1.2 Kytkinlaitosliityntä | 14 |
| 2.1.3 Voimajohtoliityntä..... | 15 |
| 2.1.4 Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset (VJV)..... | 16 |
| 2.1.5 Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus..... | 18 |
| 2.1.6 Verkkosäännöt | 19 |
| 2.1.7 Automaattinen ali- ja ylitaajuussuojausjärjestelmä Suomessa | 20 |
| 2.2 Tuulivoiman IEC- standardit ja EU-komission asetus tuottajien verkkoliitântävaatimuksia koskevista verkkosäännöistä | 20 |
| 2.2.1 Tuulivoiman IEC standardit 61400 | 20 |
| 2.2.2 Komission asetus (EU) 2016/631..... | 21 |
| 2.3 Tuulivoimarakentamiseen sovellettavat lait ja luvat | 23 |
| 2.4 Turbiinin, generaattorin suojausjärjestelmän ja tuulipuiston sisäisen sähköjärjestelmän keskeisimmät komponentit | 23 |
| 2.4.1 Tuuliturbiinin komponentit..... | 23 |
| 2.4.2 Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori DFIG..... | 25 |
| 2.4.3 DFIG taajuusmuuttajan konvertterit | 27 |
| 2.4.4 Generaattorin tehoelektronikan suojaus | 28 |
| 2.4.5 Harmonisten yliaaltojen suodatus LCL-suodattimella..... | 30 |
| 2.4.6 Generaattorin suojaus | 31 |
| 2.4.7 Tuuliturbiinin muuntaja | 34 |
| 2.4.8 Tuulivoimapuiston sisäinen kaapelointi | 34 |
| 2.4.9 Muuntamokojeisto (Ring main unit RMU)..... | 36 |
| 2.5 Tuulipuiston sähköaseman laitteet | 39 |
| 2.5.1 Sähköasemien toiminta | 39 |
| 2.5.2 Keskijännitekojeisto..... | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 2.5.3 | Tuulipuiston tehomuuntaja | 43 |
| 2.5.4 | Ulkokytkinlaitos | 44 |
| 2.5.5 | Kytkinlaitteet | 49 |
| 2.5.6 | Erottimet | 50 |
| 2.5.7 | Mittamuuntajat | 51 |
| 2.5.8 | Loistehon kompensointi staattisella SVC:llä | 52 |
| 2.5.9 | Loistehon säätö staattisella synkronikompensointilla eli STATCOM:illa | 53 |
| 2.5.10 | Rinnakkaiskondensaattoriparistot ja sarjakondensaattorit | 54 |
| 2.5.11 | Venttiilisuojat, varokkeet ja varokeautomaatit | 57 |
| 2.6 | Relesuojaus | 58 |
| 2.6.1 | Sähköverkon relesuojaus | 58 |
| 2.6.2 | Virtareleet | 59 |
| 2.6.3 | Distanssireleet ja differentiaalireleet | 59 |
| 2.6.4 | Muut tuulipuistossa käytettävät sähköiset releet | 59 |
| 2.6.5 | Tehomuuntajan suojaus | 60 |
| 2.6.6 | Sähköasema-automaatio | 61 |
| 2.7 | Tuulivoima osana sähköjärjestelmää | 64 |
| 2.7.1 | Sähköjärjestelmän tasapaino | 64 |
| 2.7.2 | Mitä on inertia..... | 65 |
| 3 | Kuvaileva kirjallisuuskatsaus | 66 |
| 3.1 | Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen määritelmä..... | 66 |
| 3.2 | Aineiston keruu | 67 |
| 3.3 | Aineiston valinta | 67 |
| 3.3.1 | Tuulivoimalat osana sähköverkkoa | 67 |
| 3.3.2 | Suojausjärjestelmät ja tuulivoimalan keskeisimmät komponentit | 69 |
| 3.3.3 | Sähköverkon stabiilisuus ja verkkomääräykset | 70 |
| 4 | Johtopäätökset | 71 |
| 4.1 | Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen tulokset | 71 |
| 4.2 | Tuulivoimaloiden sähköverkkoon liittämisen säätely | 71 |
| 4.3 | Turbiiniteknologia ja tuulipuiston sisäinen sähköjärjestelmä | 72 |
| 4.4 | Tuulipuistojen sähköasemien laitteisto | 72 |
| 4.5 | Sähköverkon tasapaino..... | 73 |
| 5 | Pohdinta | 73 |
| 5.1 | Tulosten arviointi ja hyödynnettävyys..... | 73 |
| 5.2 | Luotettavuus | 74 |
| 5.3 | Eettisyys | 74 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| 5.4 | Jatkotutkimusehdotukset | 75 |
| Lähteet | | 76 |
| Liitteet | | 84 |
| Liite 1. | Tuulivoimarakentamiseen sovellettavat lait ja luvat | 84 |
| Liite 2. | Aineistona käytetyt artikkelit ja tutkimukset | 87 |
| Kuviot | | |
| Kuvio 1. | Suomen sähkösiirtoverkko | 13 |
| Kuvio 2. | Kytkinlaitosliityntä | 15 |
| Kuvio 3. | 110 kV voimajohtoliityntä | 16 |
| Kuvio 4. | Tuuliturbiinin komponentit | 24 |
| Kuvio 5. | Kuva DFIG:stä..... | 25 |
| Kuvio 6. | DFIG:n ylisynkroninen ja alisykroninen pyörimisnopeus | 26 |
| Kuvio 7. | Kaksoissyötetty järjestelmä..... | 27 |
| Kuvio 8. | DFIG:n konvertterit | 28 |
| Kuvio 9. | Transientin virran käyrämuoto | 29 |
| Kuvio 10. | Katkosuoja kytkettynä rinnan roottorin ja roottorin puoleisen konvertterin väliin . | 30 |
| Kuvio 11. | LCL-suodatin sarjassa | 31 |
| Kuvio 12. | Turbiinin oikosulkukohtat..... | 33 |
| Kuvio 13. | 36 kV tuulipuistokaapeli AHXAMK-W 19/33 | 35 |
| Kuvio 14. | Tuulivoimapuiston periaatekuva | 36 |
| Kuvio 15. | Tuulivoimapuiston säteittäis- ja silmukoitu verkko..... | 37 |
| Kuvio 16. | Muuntajakojeiston kytkentä | 38 |
| Kuvio 17. | CCF RMU-kojeisto kahdella kuormanerotimella ja muuntajayhteyden varokekuormanerotimella | 38 |
| Kuvio 18. | Keskijännitekojeisto | 40 |
| Kuvio 19. | Tehomuuntajan käämikytkin..... | 43 |
| Kuvio 20. | 110 kV ulkokytkinkentän kaksoiskisko- apukiskojärjestelmän sivuprofiili | 45 |
| Kuvio 21. | Sivuprofiili avorakenteisesta 400 kV ulkokytkinlaitoksesta | 46 |
| Kuvio 22. | Tuulivoimapuiston sähköasema | 47 |
| Kuvio 23. | Erilaisia yksittäiseen johtoon (110 kV) liittyvien asemien perusratkaisuja..... | 48 |
| Kuvio 24. | 110 kV katkaisija | 49 |
| Kuvio 25. | Pantografi saksierotin | 50 |
| Kuvio 26. | Staattinen loistehon kompensattori SVC | 53 |

| | |
|---|----|
| Kuvio 27. Hybridi STATCOM | 54 |
| Kuvio 28. Sarjakompensoitu verkko korostettuna keltaisella | 56 |
| Kuvio 29. Suomen tuulivoimaloiden kappalemäärät maakunnittain 12/2023 | 57 |
| Kuvio 30. Viestintäjärjestelmän rakenne | 63 |

Taulukot

| | |
|---|----|
| Taulukko 1. Keskijännitekojeiston kennot | 42 |
| Taulukko 2. Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon | 68 |
| Taulukko 3. Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit | 68 |
| Taulukko 4. Suojausjärjestelmät ja tuulivoimalan keskeisimmät komponentit hakusanat | 69 |
| Taulukko 5. Suojausjärjestelmät ja komponentit hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit | 70 |
| Taulukko 6. Sähköverkon stabiilisuus ja verkkomääräykset hakusanat | 71 |

Sanasto

| | |
|-------------------------------|--|
| Liipaisinpulssi | Tyristoriin johdettu virtapulssi, jolloin tyristori alkaa johtamaan myötäsuuntaan. |
| Liittymispiste | Liittymissopimuksen mukainen omistusraja |
| Master | Master/Slave (orja) järjestelmän osapuoli, joka kommunikoi usean orjan kanssa samanaikaisesti tai ohjaa yhtä tai useampaa niistä |
| Naselli | Tuulivoimalan konehuone, jossa sijaitsee voimansiirto ja muut elementit vaaka-akselisen tuuliturbiinin tornissa |
| Orja (Slave) | Master/Slave (orja) järjestelmän osapuoli, joka noudattaa masterilta tulevia käskyjä ja kommunikoi sille |
| Roottori | Tuulivoimalan napa ja lavat |
| Tyyppi 3 tuulivoimala | Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori DFIG |
| Suuntaajakytketty voimalaitos | Kaupallinen kokonaisuus, joka muodostuu sähköä tuottavasta yksiköstä tai yksiköistä, jotka on liitetty sähköverkkoon yhden liittymispisteen kautta ja liittyminen tapahtuu synkronoimattomasti tai tehoelektroniikan kautta. |
| Tuuliturbiinigeneraattori | Synonyymi koko tuulivoimalalle |
| Tuulivoimala | Pyörivä koneisto, joka muuttaa tuulen kineettisen energian toiseksi energiamuodoksi |
| Tuulipuisto | Samalla alueella sijaitsevat tuulivoimalat |

Lyhenteet

| | |
|---------|--|
| B2B | Back-to-Back Converter, kaksiasteinen tehomuuttaja |
| Crowbar | Katkosuoja |
| DFIG | Double fed induction generator, kaksoissyötetty induktiogeneraattori |
| FC | Harmonic Filter, yliaaltosuodatin |
| ESW | Ethernet switch, ethernetkytkin |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| IEEE | Institute of Electrical and Electronics Engineers |
| OLT | Optical line terminal, optinen johdon päätelaite |
| ONU | Optical network unit, optinen verkkopäätelyyksikkö |
| PMW | Pulse width modulation, pulssinleveysmodulaatio |
| RTU | Remote terminal unit, tietoliikenteen päätelaite |
| STATCOM | Static compensator, staattinen kompensointilaite |
| SCADA | Supervisory control and data acquisition |
| SVC | Static Var compensation, staattinen reaktiivitehon kompensointilaite |
| TCR | Thyristor controlled reactor, tyristoriohjattu reaktori |
| TSC | Thyristor switched capacitor, tyristori kytketty kondensaattori |
| TSR | Thyristor controlled reactor, tyristorikytketty reaktori |
| VSC | Voltage source converter, kolmivaihe jännitelähdemuunnin |

WT

Wind turbine, tuuliturbiini

1 Johdanto

1.1 Tuulivoiman rakentamisen kasvu

Kiihtyvän ilmastonmuutoksen aikakautena kestävien energianlähteiden tuotannon tarve kasvaa. Kestävien energialähteiden liittäminen sähköverkkoon vaatii uudenlaisia ratkaisuja. Näistä energianlähteistä tuulivoima on johtavassa asemassa johtuen sen runsaasta saatavuudesta, laajasta rakennettavuudesta ja teknologisesta kehityksestä. Tuulivoima on muodostunut taloudellisesti kannattavaksi tärkeäksi energian tuotantomuodoksi. Tuulivoiman rakentaminen luo useita positiivisia taloudellisia vaikutuksia. Suomeen suunnitellaan uusia teollisia investointeja edullisen päästöttömän sähkön houkuttelemana. Tuulivoimahankkeet työllistävät rakentamisen ja käytön aikana eri alojen ammattilaisia. Lisäksi tuulivoimaloitten rakentamisella on vaikutuksia kuntatalouteen maksetun kiinteistöveron muodossa.

Maailmanlaajuinen muutos kohti hiilidioksidittomien energiatuotantomuotojen tulevaisuutta riippuu pitkälti tuulivoiman onnistuneeseen liittämiseen sähköverkkoon. Tekniset rajoitukset sekä tarkka säännöstely tuovat haasteita ja monimutkaisuutta tähän prosessiin. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan tuulivoiman verkkoon liittämisen teknologiaa, säätelyä ja tuulivoiman vaikutuksia sähköverkkoon. Uusiutuvien energialähteiden liittäminen Suomen kantaverkkoon aiheuttaa teknisiä muutoksia. Tuulivoima on sääriippuvainen energian muoto, jonka tuotantopaikat sijaitsevat maantieteellisesti erillään kulutuspaikoista. Tuulivoiman alueellinen eriytyminen luo vaikutuksia sähköverkon tasapainoon. Lisäksi modernit tuulivoimalat ovat suuntaajakytkettyjä laitoksia, jotka liittyvät sähköverkkoon eri tavalla kuin perinteiset voimalaitokset.

Syöttötariffi käynnisti tuulivoimarakentamisen kiihtymisen Suomessa. Tuulivoimaan perustuvalla sähköntuotannolle maksettiin vuoteen 2017 asti tuotantotukea eli niin sanottua syöttötariffia. Syöttötariffia maksetaan 12 vuoden ajan siitä, kun oikeus syöttötariffiin alkaa. Perustukea maksetaan uusille tuulivoimalaitoksille 83,5 €/MWh, josta on vähennetty markkinahinnan erotus. Syöttötariffiin oikeutetun tuulivoimalan nimellistehon tulee olla 0,5 MVA ja generaattoreiden yhteistehon tulee olla yli 2500 MVA sekä tuotannon tulee ylittää hyväksymispäätöksessä vahvistettu määrä. Tukea ei makseta sähkön hinnan ollessa negatiivinen. (Tuotantotuki n.d; Energiavirasto 2019.) Valtioneuvoston asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta tuli

voimaan vuonna 2011 (Valtioneuvoksen asetus uusiutuvilla energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta 2010). Syöttötariffin voimaantulon jälkeen tuulivoimateknologia on kehittynyt voimakkaasti. Tuulivoimaloiden koko on kasvanut, lapojen aerodynamiikka on kehittynyt ja lapojen valmistusmateriaalit ovat kehittyneet. Vuodesta 2000 tuulivoimaloiden tehot ovat kasvaneet 1 MW:sta yli 10 MW:iin ja roottorin halkaisijat samassa ajassa 40 metristä merituulivoimaloiden yli 200 metriin. (Bošnjaković, Katinić, Santa & Marić 2022; Brøndsted, Nijssen & Goutianos 2023, 4–5.) Teknologian kehitys on tehnyt tuulivoimasta taloudellisesti kannattavaa syöttötariffin aikana. Viimeisimpänä rakennetut tuulivoimalat saavat tuotantotukea vuoteen 2030 saakka.

Tuulivoimalla tuotetun sähkön osuus on kasvanut merkittävästi syöttötariffin voimaantulon jälkeen. Vuonna 2023 tuulisähköä tuotettiin 14,467 TWh. Tuulisähköllä katettiin 18,1 % Suomen sähkönkulutuksesta ja tuulisähkön osuus Suomen sähköntuotannosta oli 18,5 %. Maatuulivoimahankkeita on tällä hetkellä yhteensä 68883 MW ja vastaavasti merituulivoimahankkeita 65570 MW. (Tuulivoima suomessa 2023 2023; Tuulivoimahankkeet Suomessa 2024). Kaikki suunnitellut hankkeet eivät kuitenkaan välttämättä etene toteutusvaiheeseen. Hyötytuulen Tuulivoima sivuston (n.d.) mukaan yksi tuulivoimala tuottaa sähköä noin 15000 MWh vuodessa. Nelihenkinen perhe, joka asuu omakotitalossa käyttää sähköä noin 20 MWh vuodessa, joten yhden tuulivoimalan sähköntuotanto riittää 750 sähkölämmitetylle omakotitalolle.

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Jyväskylän ammattikorkeakoulu ja tämä opinnäytetyö liittyy tuulivoimaosaamisen projektiin, jonka rahoittajana toimii Jatkuvan oppimisen ja työllisyyden keskus.

1.2 Työn rajaukset ja rajauksen perustelut

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin teollisen kokoluokan vaaka-akselisia tuulivoimaloita. Tuulivoimalatyypinä käsiteltiin tyyppin 3 tuulivoimalaa muuttavanopeuksisella osatehoisella suuntaajakäytöllä, jota kutsutaan kaksoissyötetyksi epätahtigeneraattoriksi. Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori soveltuu sekä maa- että merituulivoimaloihin. Tyyppin 3 tuuliturbiinigeneraattori tunnetaan myös nimellä kaksoissyötetty epätahtigeneraattori (DFIG) (Type 3 Wind Turbine Model 2018, 3.) Tyyppin 3 tuulivoimalat ovat tällä hetkellä yleisin tuulivoimalatyyppi (Energyabcs 2023; Korpela 2016, 80). DFIG tuuliturbiini on ollut vallitseva muuttavanopeuksinen teknologia markkinoilla yli 1,5MV malleissa (Anya-Lara, Campos-Gaona, Moreno-Goytia & Adam 2014).

Voimalaitostyyppinä käsiteltiin C ja D luokan voimalaitoksia. Mitoitustehot on määritelty kappaleessa 2.1.4. Modernien tuulivoimaloitten tuottama teho sisältyy näihin luokituksiin. Maatuulivoimaloiden teho on 5 MW ja merituulivoimaloiden teho yli 10 MW. Yhdessä maa tuulivoimapuistossa voi olla 6–20 voimalaa ja merituulivoimapuistoissa voi olla yli 100 tuulivoimalaa. (Tuulivoima Suomessa 2024; Tuulivoimatekniikka n.d.)

Loistehon kompensoinnin osalta käsiteltiin tuulivoimapuistojen modernimpia kompensoimislaitteita, jotka suodattavat tuulivoimaloitten tuottamat jännitteen ja loistehon muutokset. Tuulivoimapuistojen loistehon kompensoinnin kannalta tärkeimmät laitteet takaavat jännitteen tasapainon, taajuuden hallinnan, lähivikakestoisuuden ja toimivan vasteen näihin muutoksiin. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin muut jakeluverkkoon vaikuttavat tavat poistaa jakelujännitteessä tapahtuvia muutoksia.

Tuulivoimapuistojen sähköasemien laitteistoa käsiteltiin yleisellä tasolla, jotta lukija saa käsityksen sähköasemien yleisimmistä laitteista. Opinnäytetyöstä rajattiin pois sähköasemien maadoitukset ja pyläsmaadoitukset. Relesuojauksen osalta opinnäytetyössä käsiteltiin tuulivoimaloiden verkkoon liittämisen kannalta tärkeimmät relesuojaukset. Relesuojaukseen viitataan myös kompensointilaitteiston osalta, koska Fingrid Oyj on vuonna 2022 tarkentanut erityistarkasteluvaatimukset kaikille suuntaajakytketyille voimalaitoksille liittyen alisynkroniseen vuorovaikutusriskiin, jota on käsitelty tämän opinnäytetyön kappaleessa 2.5.10.

Tuulivoiman vaikutuksesta sähköjärjestelmään käsiteltiin mekanismeja, joilla vaikutetaan sähköjärjestelmän tasapainoon ja miten suuntaajakytketyt tuulivoimalat vaikuttavat järjestelmän tasapainoon. Tarkastelun ulkopuolelle jätettiin sähköjärjestelmän tasapainoon vaikuttavien markkinaehtoisten säätövoimajärjestelmien hinnan muodostuminen.

1.3 Opinnäytetyön tarkoitus, tavoite ja tutkimuskysymykset

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, miten teollisen kokoluokan tuulipuistot kytketään sähköverkkoon laite- ja komponenttitasolla turbiinissa ja sähköasemalla. Opinnäytetyössä selvitetiin mitä vallitsevia sääntöjä ja lakeja tuulivoiman sähköverkkoon liittämiseen liittyy ja millaisia vaikutuksia tuulivoimaloilla on sähköverkkoon. Tavoitteena oli tarjota opiskelijoille tietoa ja pohdintaa tuulivoiman liittamisestä sähköverkkoon ja siihen liittyvistä haasteista.

Tämän opinnäytetyön tutkimuskysymykset ovat:

1. Mitkä ovat vallitsevat verkkosäännöt Suomessa suuntaajakytketyille laitoksille
2. Mitkä ovat yksittäiset turbiinin sekä generaattorin suojausjärjestelmän ja tuulipuiston sisäisen sähköjärjestelmän keskeisimmät komponentit
3. Miten tuulipuistojen sähköasemien laitteisto ja suojaus eroaa muista sähköntuotantolaitoksista
4. Miten tuulivoimalaitokset vaikuttavat sähköverkon tasapainoon

Kirjallisuushaussa haettiin tietoa eri tietokannoista, manuaalisella haulilla ja avoimella internet-haulilla. Tietokantahaku vastaa kysymykseen kaksi, kolme ja neljä avoin internet-haku vastaa kysymykseen yksi. Kirjallisuushaun tuloksena koottiin kirjallisuushaun tulokset ja tehtiin selvitys tuulipuistojen kytkennästä sähköverkkoon.

2 Opinnäytetyön teoreettiset lähtökohdat

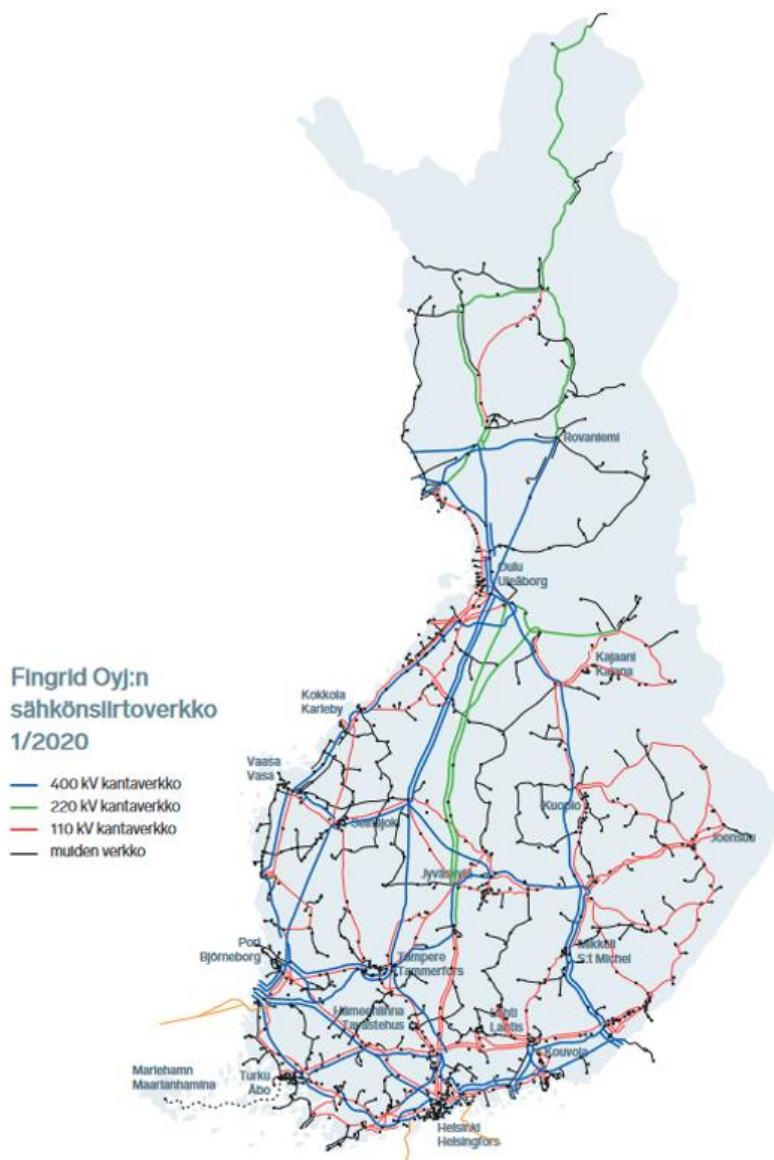
Opinnäytetyön teoreettiset lähtökohdat keskittyvät ymmärtämään tuulivoiman teknistä liittämistä sähköverkkoon. Teoreettisissa lähtökohdissa tarkastellaan muun muassa sähköverkkoon liittymisen teknisiä näkökohtia, generaattorin rakennetta ja verkkoinfrastruktuurin vaatimuksia, joita on otettava huomioon suunniteltaessa ja toteutettaessa tuulivoimalaitoksen liittymistä osaksi laajempaa sähköjärjestelmää.

2.1 Verkkoon liitännän verkkosäännöt

Suomen kantaverkko koostuu Fingrid Oyj:n (myöhemmin ”Fingrid”) 440 kV, 220 kV, 110 kV verkosta ja muiden jakeluverkkoyhtiöiden verkoista. Kuviossa 1. on esitetty Fingridin sähkönsiirtoverkko. Suomessa Kantaverkkoon liitettävän tuulivoimalaitoksen tulee täyttää samat vaatimukset kuin muidenkin voimalaitosten. Kantaverkkoliitännöiden tekniset vaatimukset on esitetty Fingridin yleisissä liittymisehdoissa (YLE). Liitettävien voimalaitosten tulee yleisten liittymisehtojen lisäksi täyttää Fingridin järjestelmätekniset vaatimukset (VJV) joilla varmistetaan järjestelmien tekninen yhteensopivuus. Kantaverkkoon liitettävien tuulipuistojen teho on yleensä yli 15 MW, pienemmän teholuokan tuulipuistojen kantaverkkoliitännät eivät ole tarkoituksen mukaisia. (Tuulivoimaliittymän opas n.d. 9.)

Suurjänniteliittymien suunnittelussa ja rakentamisessa tulee noudattaa Suomessa olevia lakeja ja asetuksia, viranomaismääräyksiä, sähköasennusstandardeja SFS 6000 ja SFS 6001 sekä kojeiden ja laitteiden osalta soveltuvia voimassa olevia SFS-EN-, -IEC ja SFS-standardeja (Suurjänniteliittymien tekninen ohje 2020, 3).

Tuotantolaitoksen kytkeminen on aina sähkötyötä, joten kytkennän voi tehdä vain ammattitaitoinen henkilö, jolla on asianmukaiset sähköasennusluvut. Verkkoon sähköä tuottavien laitteiden tulee täyttää niille asetetut tekniset vaatimukset, jotta sähkön laatu pysyy sellaisena, etteivät muut sähköverkkoon kytketyt laitteet häiriinny. Vaatimusten toinen syy on varmistaa sähkön käyttäjien ja sähköverkkojen parissa työskentelevien turvallisuus. Tuotantolaitoksen verkkoon kytkennälle tarvitaan aina sähköverkon haltijan lupa. (Heikkilä 2021, 1–3.)



Kuvio 1. Suomen sähkösiirtoverkko (Kantaverkkoon liittyjän opas 2022, 2)

2.1.1 Yleiset liittymisehdot (YLE)

Fingrid:n vuonna 2021 julkaisemassa dokumentissa Yleiset liittymisehdot (2021) määritellään sähköverkkoon liittyjille sähkölaitteiston yleiset liittymisehdot. Yleisillä liittymisehdoilla varmistetaan sähköverkkoon liitettävien verkkojen yhteensopivuus sekä käyttövarmuus. (Yleiset liittymisehdot 2021, 5).

Liittymistapa ja -paikka kantaverkkoon määritellään tapauskohtaisesti. Päätöksessä otetaan huomioon tekniset vaihtoehdot, toteutuksen kokonaiskustannukset, ympäröivän kantaverkon käyttövarmuus, siirtokyky sekä ympäristö- ja maankäyttökohdat. Pienitehoiset sähkölaitteistot on

liitettävä jakeluverkkoon tai suurjännitteiseen jakeluverkkoon kantaverkon käyttövarmuuden ja toiminnan varmistamiseksi. Sähköverkon käytettävyyttä ja käyttövarmuutta voidaan parhaiten hallita toteuttamalla liittynät kytkinlaitoksiin. Kytkinlaitosten väliset voimajohdot huolehtivat tarvittavan tehon siirtämisestä ja varmistamisesta eri käyttötilanteissa. Mikäli voimajohtoliittynän vaatimukset täyttyvät voidaan enintään 60 MW:n suuntaajakytketty voimalaitos liittää Fingridin 110 kV:n voimajohtoon. Suuntaajakytketyn voimalaitoksen voimajohtoliittynässä laitoksen oikosulkuvirta saa olla korkeintaan 1,2-kertainen voimalaitoksen nimellisvirtaan verrattuna 300 ms. vian alkamisesta. (Mts. 2021, 6–11.)

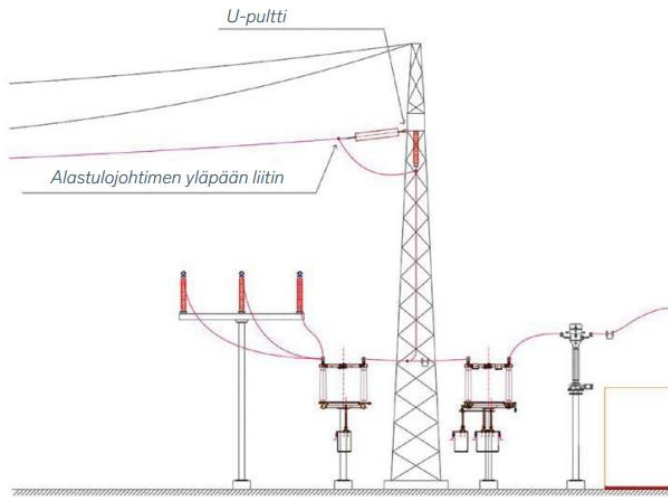
Sähköntuotantoa liitettäessä tulee huomioida pohjoismainen voimajärjestelmän ja Suomen voimajärjestelmän suurin askelmainen tehomuutos 1300 MW, jonka voimajärjestelmä kestää käyttövarmuutta vaarantamatta (Mts. 5).

Tilaa, jossa yksi tai useampi voimalaitos jää osaksi kantaverkosta erillään olevaa sähköverkkoa, kutsutaan saarekekäytöksi. Kantaverkon siirtoyhteydet eivät saa katketa saarekekäytössä eikä saarekekäyttöön siirtyminen saa häiritä muiden osapuolien mahdollisuutta käyttää kantaverkkoliittynöitä. (Mts. 9.)

2.1.2 Kytkinlaitosliittynä

Fingridin 400 kV, 220 kV tai 110 kV:n kytkinlaitoksen katkaisijakentässä tapahtuva sähkölaitteiston liittyminen on nimeltään kytkinlaitosliittynä. Kuviossa 2. on esitettyä kytkinlaitosliittynän sivuprofiili. Kytkinlaitosliittynällä liitettävän enimmäistehon määrä määritellään kytkinlaitoskohtaisesti, ottaen huomioon ympäröivän kantaverkon käyttövarmuus ja siirtokyky. Alle 250 MW:n sähköteholtaan olevat liittynät liitetään ensisijaisesti 110 kV tai 220 kV:n kytkinlaitokseen.

Sähköteholtaan 250 MW:n ja sitä suuremmat liittynät liitetään ensisijaisesti 400 kV:n kytkinlaitokseen (Yleiset liittymisehdot 2021, 6.)



Kuvio 2. Kytkeinlaitosliityntä (Kantaverkkoon liittyjän opas 2022, 5)

U-pultit ja alastulojohtimien yläpään liittimet ovat omistus- ja hallintaraja (Kantaverkkoon liittyjän opas 2022, 5).

2.1.3 Voimajohtoliityntä

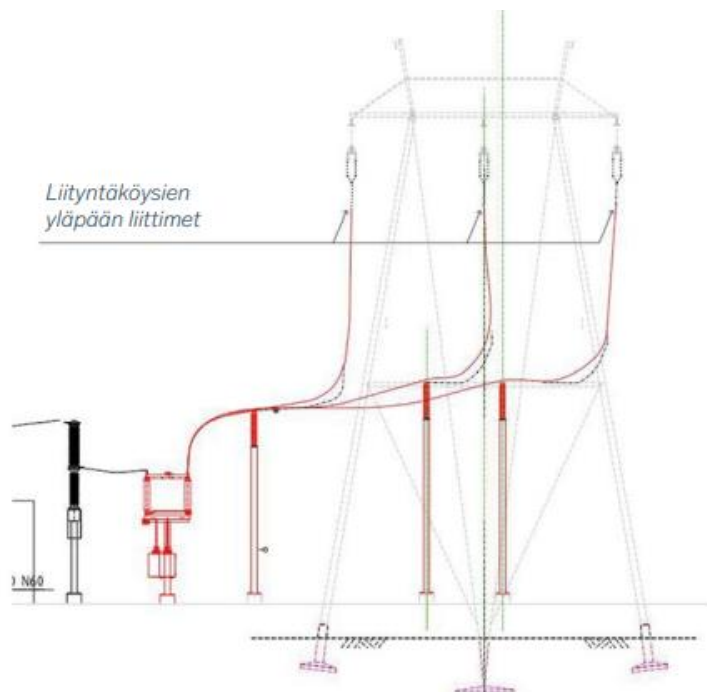
Voimajohtoliityntä tarkoittaa liityntätapaa, jossa sähköverkkoon liittyjän sähköasema tai voimajohto on kytketty Fingridin 110 kV:n voimajohtoon (Yleiset liittymisehdot 2021, 4). Kuviossa 3. on kuvattuna voimajohtoliityntän sivuprofiili. Suomen Tuulivoimayhdistyksen dokumentin (2022) Hyödyllistä tietoa tuulivoima-alueen maanomistajille mukaan suuruusluokaltaan yli 20 voimalan tuulipuistojen verkkoon liitettä saatetaan toteuttaa 110 kV tai 400 kV voimajohtolla. Voimajohtoja käytetään esimerkiksi Fingridin suurissa siirtolinjoissa pohjois- etelä suunnassa olevissa siirtolinjoissa. (Hyödyllistä tietoa tuulivoima-alueen maanomistajille 2022, 3.)

Liitynnät 110 kilovoltin voimajohtoon sallitaan tapauskohtaisesti. Liittymisessä on otettava huomioon voimajohtoon käytettävissä oleva siirtokapasiteetti ja muut tekniset ehdot. 400 ja 220 kilovoltin voimajohtoihin ei sallita voimajohtoliityntöjä käyttövarmuussyistä. (Kantaverkkoon liittyjän opas 2022, 5.)

Voimajohtoliityntään liitettävän muuntajan suurin sallittu nimellisteho on 40 MVA, ja pienin sallittu oikosulkureaktanssi on 48,0 ohmia. Kantaverkon voimajohtoon siirtokapasiteetin salliessa sa-

massa liittymispisteessä voidaan kytkeä enintään 65 MVA muuntokapasiteettia, ja liityntä voi kuormittaa enintään 60 MW asti. Eriksen määriteltyjen vaatimusten puitteissa on mahdollista käyttää myös yhtä korkeintaan 63/31,5/31,5 MVA kolmikäämimuuntajaa. (Mts. 5.)

Voimajohtoliityntään on mahdollista liittää pienitehoisia alle 5 MW tahtikonevoimalaitoksia tai enintään 30 MW suuntaajakytkettyjä voimalaitoksia. Näiden voimalaitosten kantaverkkoon syötämä oikosulkuvirta saa olla enintään 1,2-kertainen verrattuna voimalaitoksen nimellisvirtaan. Liityntä on varustettava eroonkytkennällä, jonka toteutustapa määritellään tapauskohtaisesti teknisin perustein. (Mts. 5.)



Kuvio 3. 110 kV voimajohtoliityntä (Kantaverkkoon liittyjän opas 2022, 5)

Asiakkaan liityntäköysien yläpään liittimet ovat liittymispisteenä ja omistusrajana kantaverkon johdossa (mts. 5).

2.1.4 Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (VJV)

Voimalaitosten järjestelmäteknisissä vaatimuksissa Fingrid määrittää sille määrätyn järjestelmävastuun perusteella vaatimukset voimalaitoksille, jotka liitetään Suomen sähköjärjestelmään. Voi-

malaitosten järjestelmäteknisten vaatimusten lisäksi sähköverkkoon liitettävien voimalaitosten tulee täyttää Fingridin yleiset liittymisehdot, kantaverkkosopimusten mukaiset ehdot sekä liittymispisteen verkonhaltijan asettamat ehdot. (Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset 2018, 5).

Voimalaitosten järjestelmäteknisien vaatimusten soveltamisala koskee Suomen sähköjärjestelmään kytkettyjä tai kytkettäviä voimalaitoksia, jotka ovat mitoitusteholtaan vähintään 0,8 kW. Suuntaajakytketyn voimalaitoksen mitoitusteho täytyy luokitella voimalaitoksen kokonaiskapasiteetin perusteella. Kokonaiskapasiteetti tarkoittaa yhden liittymispisteen omaavia yhteen koottuja suuntaajakytkettyjä tuotantoyksiköitä, jotka on koottu yhdeksi taloudelliseksi yksiköksi. Voimalaitosten tyyppiluokittelu ja mitoitusteho C ja D tyyppin voimalaitoksissa: Tyyppi C liittymispisteen jännitetaso on alle 110 kV, voimalaitoksen mitoitusteho $1 \text{ MW} \leq P_{\text{max}} \leq 30 \text{ MW}$. Tyyppi D liittymispisteen jännitetaso on vähintään 110 kV, voimalaitoksen mitoitusteho $P_{\text{max}} \geq 30 \text{ MW}$. (Mts. 9.)

Mikäli voimalaitos kuuluu tyyppiluokkaan D, liittyjän tulee pyytää Fingridiltä erityistarkastelutarpeen arviointia, jossa erityistarkastelun tarve arvioidaan alisynkronisen vuorovaikutuksen osalta, geomagneettisesti indusoituvien virtojen osalta, tehoheilahteluiden vaimentumisen osalta ja pienimmän minimoioikosulkutehon osalta. Erityistarkastelut tehdään voimalaitosliittynnän suunnittelu- vaiheessa yhteistyössä Fingridin ja liittymispisteen verkonhaltijan kanssa. (Mts. 12.) Alisynkronista vuorovaikutusta käsitellään kappaleessa 2.5.10.

Tyyppin C ja D suuntaajakytketyissä voimalaitoksissa tulee olla automaattinen loistehon ja jännitteen säätö. Säädön tulee olla jatkuvaa ja tapahtua liittymispisteessä portaattomasti loistehon säädön osalta. Jännitteen ja loistehon säädön toimintatilat tulee olla vakiojännitesäätö, vakioiloistehon säätö ja vakiotehokerroinsäätö. Säätöalueen tulee vastata voimalaitoksen todellista loistehokapasiteettia eikä sitä saa keinotekoisesti rajoittaa. Näiden säätötoimintojen tulee kyetä pitämään voimalaitoksen loistehon tuotanto säätötoiminnon mukaisessa asetteluarvossa. Käyttöönottokokeiden yhteydessä osoitetaan säätötoimintojen tarkkuus. Suuntaajakytketyn laitoksen toimiessa minimitehon alapuolella jännitteen tai loistehon säätöön ei ole velvoitetta. (Mts. 79.)

D-tyypin suuntaajakytkettyjen laitosten tulee myös vastata lisävaatimuksiin, jotka koskevat loistehon- ja jännitteensäädön vaikutuksia sähkömekaanisiin heilahteluihin. Lisäsäätötoimintoja tulee

suorittaa, mikäli voimalaitoksen normaalien säätötoimintojen vaste sähkömekaanisiin heilahteluihin on järjestelmän siirtokykyä heikentävää riippumatta säätöjen toteutuksesta ja asetteluarvoista. Lisäsäätötoimintoihin kuuluvat lisästabilointipiiriä ja vaimennuspiirejä vastaavat toiminnallisuudet. (Mts. 82.)

C ja D tyyppin suuntaajakytettyjen voimalaitosten käyttöönottokokeet suoritetaan sähköjärjestelmän tilanteen ollessa mahdollinen. Käyttöönottokokeissa tulee mitata seuraavat suureet 50 Hz tallennustaajuudella: voimalaitoksen pätöteho, voimalaitoksen loisteho, jännite liittymispisteessä, taajuus liittymispisteessä. Käyttöönottokokeessa tulee näiden lisäksi tallentaa säädettävän suureen asetteluarvo sekä asetteluarvon muutokset. (Mts. 85.)

2.1.5 Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus

Fingridin relesuojauksen sovellusohjeessa esitellään Fingridin 110, 220 ja 400 kV sähköverkon relesuojauksen keskeiset toiminnalliset periaatteet ja siinä asetetaan vaatimukset Fingridin asiakkaiden suojausjärjestelmien toiminnalle. Tämän sovellusohjeen avulla varmistetaan, että liitettävien sähköverkkojen relesuojaus on yhteensopiva. Yleisten liittymisehtojen mukaisesti kantaverkkoon liittyvällä asiakkaalla on velvollisuus huolehtia siitä, että Fingridin yleiset liittymisehdot toteutuvat sekä muut liittymisen toteuttamiseen liittyvät ohjeet ja vaatimukset. Asiakkaalla on myös velvollisuus huolehtia siitä, että hänen sähköverkkoonsa liittyvät osapuolet varmistavat, että Fingridin yleiset liittymisehdot täyttyvät heidän sähköverkkojen ja niihin liittyvien sähkölaitteistojen osalta. (Kantaverkon ja asiakasliityntöjen relesuojaus 2022, 2.)

Kantaverkon relesuojauksen pääperiaatteissa määrätään kantaverkossa käyttävän N-1 mitoitus-sääntöä, jonka mukaisesti mikään yksittäinen verkkovika ei saa johtaa laajenevaan häiriöön tai stabiiliisuuden menettämiseen. Pitkä vika-aika 400 kV:n verkossa tai sähköverkon tehonvajausta voi aiheuttaa stabiiliuden menetyksen. (Mts. 2.)

400 kV sähköverkon stabiiliuden säilyttämiseksi kaikki siinä verkossa tapahtuvat oikosulkuviat erotetaan relesuojauksen avulla viimeistään 0,1 s kuluttua vian alkamisesta. 400 kV kytkinlaitokset varustetaan kiskosuojalla nopean laukaisun aikaansaamiseksi. 400 kV voimajohdot ja muuntajat varustetaan kahdennetulla viiveettä toimivalla suojauksella. Kiskosuojattomat T-haara asemien

kokoojakiskot kuuluvat viiveettömän johtosuojauksen piiriin. Jos katkaisijat eivät toimi, katkaisijavikasuojat, jollaiset on kaikissa 400 kV katkaisijoissa erottavat viat 0,25 s ajassa. (Mts.2.)

110 ja 220 kV kantaverkon voimajohdot ovat rengaskäytössä ja niiden johtosuojaus koostuu

- pääsuojauksesta (kaksi distanssirelettä tai distanssi- ja johtodifferentiaalirele)
- pääsuojareleestä (distanssirele)
- varasuojareleestä (ylivirta- ja maasulkurele)

Kahdennettua pääsuojaa käytetään kaikissa uusissa toteutuksissa ja jos kantaverkon 110 kV voimajohdolle liittyy tuotantoa yli 1 MW, voimajohdon pääteasemille toteutetaan tahdissaolonvalvonta epätahtikytkennän estämiseksi. 110 kV sähköverkon suojauksessa on pyrittävä siihen, että vika on erotettu pääsuojauksella viimeistään 0,1 s kuluttua ja varasuojauksella 0,5 s kuluttua, lukuun ottamatta suuriresistanssisia maasulkujia, niissä suojauksen toiminta-aika on yleensä oltava 1 s tai lyhyempi ja sen on sovittava kantaverkon suojaukseen (Mts. 2–4).

Asiakkailta odotetaan käyttövarmuuden näkökulmasta vikojen irrotusajoilta sellaista suorituskykyä, että asiakkaan sähköverkon suojaus toimii saumattomasti ja yhteensopivasti koko kantaverkon suojausjärjestelmän kanssa. Mikäli asiakkaan sähköverkon suojausta ei voida relesuojausten vaatimusten mukaisesti toteuttaa, on asiasta neuvoteltava Fingridin kanssa. Kantaverkkoon liitettyjen sähkölaitteiden ja niihin suoraan tai välillisesti liittyvien laitteistojen on täytettävä Fingridin yleisissä liittymisehdoissa (YLE) asetetut jännite- ja taajuusvaatimukset, ja niiden on säilyttävä toimintakunnossa näissä määritellyillä alueilla. Asiakkaan vastuulla on varmistaa, että sallitut hetkelliset jännite- tai taajuuspoikkeamat eivät aiheuta vahinkoa asiakkaan tai muiden osapuolien sähkölaitteille. Tämän voi toteuttaa esimerkiksi varustamalla sähkölaitteiston yli- ja alijännitesuojauksella, ja tarvittaessa taajuussuojauksella. (Mts. 3.)

2.1.6 Verkkosäännöt

Hätätilaa ja käytönpalautusta (Network Code For Emergency and Restoration, NC ER) koskeva verkkosääntö tuli voimaan 18.12.2017. sen tarkoituksena on estää suurhäiriöt ja häiriötilanteiden laajeneminen ja järjestelmän tilanteen huononeminen. Tavoitteena suurhäiriötilanteessa on tehokas ja nopea käytönpalautus. (Siltala & Frantti 2019.)

Fingrid on nimennyt nykyiset ja uudentyypiset C (>10 MW) ja D (>30 MW) tyyppin laitokset merkittäviksi verkon käyttäjiksi ja niiden tulee toteuttaa seuraavat velvollisuudet:

- toteuttaa alitaajuussuojajärjestelmä
- osallistua tuotannon irtikytkentään automaattisesti ylitaajuustilanteessa, mikäli tällainen toteutetaan Pohjoismaisella synkronialueella ja Suomessa
- noudattaa kantaverkkoyhtiön ohjeita liittyen loistehon, pätötehon ja jännitteensäädön sekä kulutuksen ja tuotannon irtikytkentään
- automatiikoiden toiminnan testausvaatimusten hoitaminen
- välittää kantaverkkoyhtiön vaatimukset ja ohjeet omaan verkkoonsa liittyneille kantaverkkoyhtiön osapuolille (Mt. 2019.)

2.1.7 Automaattinen ali- ja ylitaajuussuojajärjestelmä Suomessa

NC ER vaatii alitaajuussuojajärjestelmän eli automaattisen kuormien irtikytkemisjärjestelmän suojaamaan voimajärjestelmää, mikäli voimajärjestelmän taajuus laskee alle 48,8 Hz. Sillä pyritään välttämään suurhäiriötilanne, jossa taajuus laskee merkittävästi. (Automaattinen ali- ja ylitaajuussuojajärjestelmien toteutus Suomessa 2021, 3.)

Suomessa alitaajuudesta tapahtuva irtikytkentä toteutetaan siten että, jakeluverkon haltijat ja suurjännitteisen jakeluverkon haltijat veloitetaan asettamaan alitaajuussuojauksen piiriin 30 % verkkoonsa liittyneestä kokonaissähkön kulutuksesta (Mts. 4).

2.2 Tuulivoiman IEC- standardit ja EU-komission asetus tuottajien verkkoliitännäsvaatimuksia koskevista verkkosäännöistä

2.2.1 Tuulivoiman IEC standardit 61400

IEC on maailmanlaajuinen sähköalan standardoimisjärjestö, joka on perustettu vuonna 1906. Sen tehtävänä on laatia ja julkaista kansainvälisiä sähkötekniisiä standardeja, jotka muodostavat perustan eurooppalaiselle ja kansalliselle standardityölle. IEC:n toimintaan osallistuu lähes 20 000 sähkötekniikan alan asiantuntijaa, ja Suomea edustaa kansalliskomiteana SESKO. IEC toimii foorumina eri yrityksille ja sidosryhmille mahdollistaen tapaamiset, keskustelut ja kansainvälisten standardien kehittämisen. Järjestön kaikki maailmanlaajuiset standardit perustuvat konsensukseen ja heijasta-

vat kaikkien osallistuvien valtioiden avainsidosryhmien tarpeita. Jokaisella IEC-komitean P-jäsenmaalla on yhtäläinen ääni ja mahdollisuus vaikuttaa, riippumatta maan koosta. (IEC ja CENELEC 2024.)

Tuulivoimaan liittyy useita standardeja, joissa käsitellään turvallisuuteen, ympäristönsuojeluun, tekniseen yhteensopivuuteen ja alan kehittämiseen liittyviä asioita. Sirviön (2022) mukaan tuulivoiman standardointi on etenemässä uudelle tasolle, ja uudet aiheet kattavat muun muassa tuulivoimaprojektien riskienhallinnan, laitoksen elinkaaren, kestävän kehityksen, kunnossapidon ja kierrätyksen. Sähköalan toiminta perustuu vahvasti standardien noudattamiseen, ja tämä koskee myös uusiutuvan energian järjestelmiä, kuten tuulivoimaa. Kansainvälisen IEC-komitean TC 88 Wind energy generation systems alaisuudessa toimiva asiantuntijaryhmä laatii tuulivoima-alan standardeja, jotka otetaan käyttöön Suomessa kansallisina SFS-EN IEC -standardeina. (Sirviö 2022.)

IEC-komitea on toiminut tuulivoimastandardien laatijana yli 30 vuoden ajan, ja komiteassa TC 88 Suomi osallistuu aktiivisesti. Tuulivoimastandardi EN IEC 61400 määrittelee tuulivoima-alan toimijoiden suunnitteluvaatimukset, kuten laitoksen sijainnin, tuuliturbiinigeneraattorin ominaisuudet ja voimalan ympäristövaikutukset. Standardi on jaettu eri osiin, kuten EN IEC 61400-1, joka käsittelee kaikkien tuulivoimaloiden yleisiä suunnitteluvaatimuksia ja luokitusjärjestelmää. Uudet tuulivoimastandardien aiheet keskittyvät muun muassa riskienhallintaan, elinkaaren hallintaan, kestävään kehitykseen, kunnossapitoon ja kierrätykseen. Tämä laajentaa standardin EN IEC 61400 kohderyhmää sisältäen tuulivoimatuottajat, konsultit, vakuutusyhtiöt ja rahoittajat. Suomessa perustettiin SESKOn toimesta komitea SK 88 Tuulivoimajärjestelmät vastaamaan kansallisesti tuulivoimajärjestelmien standardointityöstä. Tavoitteena on lisätä tietoisuutta standardointikomiteoiden työstä ja saada kotimaiset toimijat mukaan kansainvälisten tuulivoimastandardien kehitykseen. (Mt.)

2.2.2 Komission asetus (EU) 2016/631

Euroopan komissio on julkaissut vuonna 2016 asetuksen (EU) 2016/631 L112/1 jonka mukaan Euroopan komissio on todennut, että on välttämätöntä toteuttaa kiireellisesti toimivat ja yhteiset energian sisämarkkinat energian toimitusvarmuuden ylläpitämiseksi, kilpailukyvyyn lisäämiseksi ja kohtuuhintaisten energiavaihtoehtojen varmistamiseksi kaikille kuluttajille. Tämän tavoitteen saa-

vuttamiseksi komissio on ehdottanut yhtenäisiä sääntöjä sähköntuotantomoduulien verkkoliitännälle, jotta saataisiin selkeä oikeudellinen kehys, helpotettaisiin sähkön kauppaa, varmistettaisiin käyttövarmuus ja edistettäisiin uusiutuvien energialähteiden liittämistä verkkoon. Erityyppisille sähköntuotantomoduuleille (A, B, C, D) asetettaisiin erilaisia teknisiä vaatimuksia, joita säätelyviranomaisten olisi otettava huomioon sääntöjä laatimalla. Asetus pyrkii myös koordinointiin ja yhdenmukaistamiseen synkronialueiden välillä taajuusvaatimusten osalta ja mahdollistaa poikkeukset paikallisten olosuhteiden vuoksi. (Komission asetus (EU) 2016/631 2016.)

Komission asetuksessa, 1. Osaston yleiset säännökset asetuksessa määritetään verkkosääntö suuntaajakytkettyjen voimalaitosten ja merellä sijaitsevien suuntaajakytkettyjen voimalaitosten liittämiseksi yhteiskäyttöjärjestelmään. 1. Osaston neljännen ja viidennen artiklan mukaan paikallinen siirtoverkon haltija voi arvioida komission asetuksen joidenkin säännösten tai niiden kaikkien soveltamista olemassa oleviin sähköntuotantolaitoksiin kolmen vuoden välein yleisten säännösten kohdissa kolme ja viisi esitettyjen kriteereiden ja menettelyjen mukaisesti. (Mt.)

Komission asetuksessa tyyppin C ja D-suuntaajakytkettyjen laitosten on täytettävä artikloissa 21 ja 22 määritellyt taajuusstabiilisuutta koskevat vaatimukset ja jännitestabiilisuutta koskevat vaatimukset. Taajuusstabiilisuutta koskevissa vaatimuksissa siirtoverkonhaltija on oikeutettu vaatimaan voimalaitoksen tuottamaan synteettistä inertiaa erittäin nopeiden taajuuspoikkeamien aikana sekä siirtoverkonhaltijan on määriteltävä synteettisen inertian tuottamiseksi asennettujen säätöjärjestelmien toimintaperiaate ja niihin liittyvät suorituskykyparametrit. (Komission asetus (EU) 2016/631 2016.)

Jännitestabiilisuutta koskevissa vaatimuksissa sanotaan, että liittymispisteen verkonhaltija voi määrittää lisäloistehon loistehokapasiteetin osalta, mikäli suuntaajakytketyn voimalaitoksen liittymispiste ei ole generaattorimuuntajan suurjänniteliittimissä (joissa jännitetaso nostetaan liittymispisteen tasolle) tai suuntaajan liittimissä, jos generaattorimuuntajaa ei ole. Tämän lisäloistehon tulee kompensoida loistehoa suuntaajakytketyn voimalaitoksen generaattorimuuntajan suurjänniteliittimissä tai suuntaajan liittimissä (jos generaattorimuuntajaa ei ole), sekä liittymispisteen välisessä suurjännitejohdossa tai -kaapelissa. Vastuullisen omistajan on toimitettava tämä lisäloisteho kyseiseen johtoon tai kaapeliin. (Mt.)

EU määrittää erityyppisiä säädöksiä, joilla pyritään EU:n perussopimuksissa määrättyihin tavoitteisiin. Säästötyyppinä asetus on sitova ja niitä on sovellettava kaikilta osiltaan kaikkialla EU:ssa. Asetukset ovat sitovia säädöksiä ja direktiiveillä säädetään EU-maita koskevista velvoittavista tavoitteista. (Säästötyypit n.d.)

2.3 Tuulivoimarakentamiseen sovellettavat lait ja luvat

Tuulivoimarakentamiseen sovelletaan useita lakeja ja rakentamiseen tarvitaan laeista johdettuja lupia. Lait ja luvat ovat taulukoituna Liitteessä 1. Liitteen 1. taulukon laadinnassa on käytetty lähteinä Finlexin Maankäyttö- ja rakennuslakia 132/1999 (1999), Finlexin Sähkömarkkinalakia 9.8.2013/588 (2013), Suomen Tuulivoimayhdistyksen Tuulivoimaloille haettavat luvat (n.d.) aineistoa ja Ympäristöministeriön Ympäristöhallinnon ohjeita Tuulivoimarakentamisen suunnittelu dokumentista (2016).

Tuulivoimarakentamisen toteutuksen tulee lähtökohtaisesti perustua maankäyttö- ja rakennuslain (132/1999, MRL) mukaiseen kaavoitukseen ja sitä koskevat pääsääntöisesti samat säännökset kuin muuhun rakentamiseen. Maankäyttö- ja rakennuslaissa määritellään tuulivoimarakentamiseen soveltuvat alueet. (Tuulivoimarakentamisen suunnittelu 2016, 16.) Jotta tuulivoimala voidaan rakentaa edellyttää se aina joko MRL 125 §:n mukaisen rakennusluvan tai MRL 126 §:n toimenpideluvan. Tuulivoimalat rinnastetaan yleensä aina rakennuslupaa edellyttäviin rakennuksiin (mts. 37).

Ympäristövaikutusten arviointimenettelyn (YVA) mukaisen lain soveltamista vaaditaan aina tuulivoimalaitosten lukumäärän ylittäessä 10 kappaletta tai kokonaistehon ollessa vähintään 30 MW. YVA-menettelyllä pyritään vähentämään tai ehkäisemään hankkeen haitallisia ympäristövaikutuksia. (Mts. 43–44.)

2.4 Turbiinin, generaattorin suojausjärjestelmän ja tuulipuiston sisäisen sähköjärjestelmän keskeisimmät komponentit

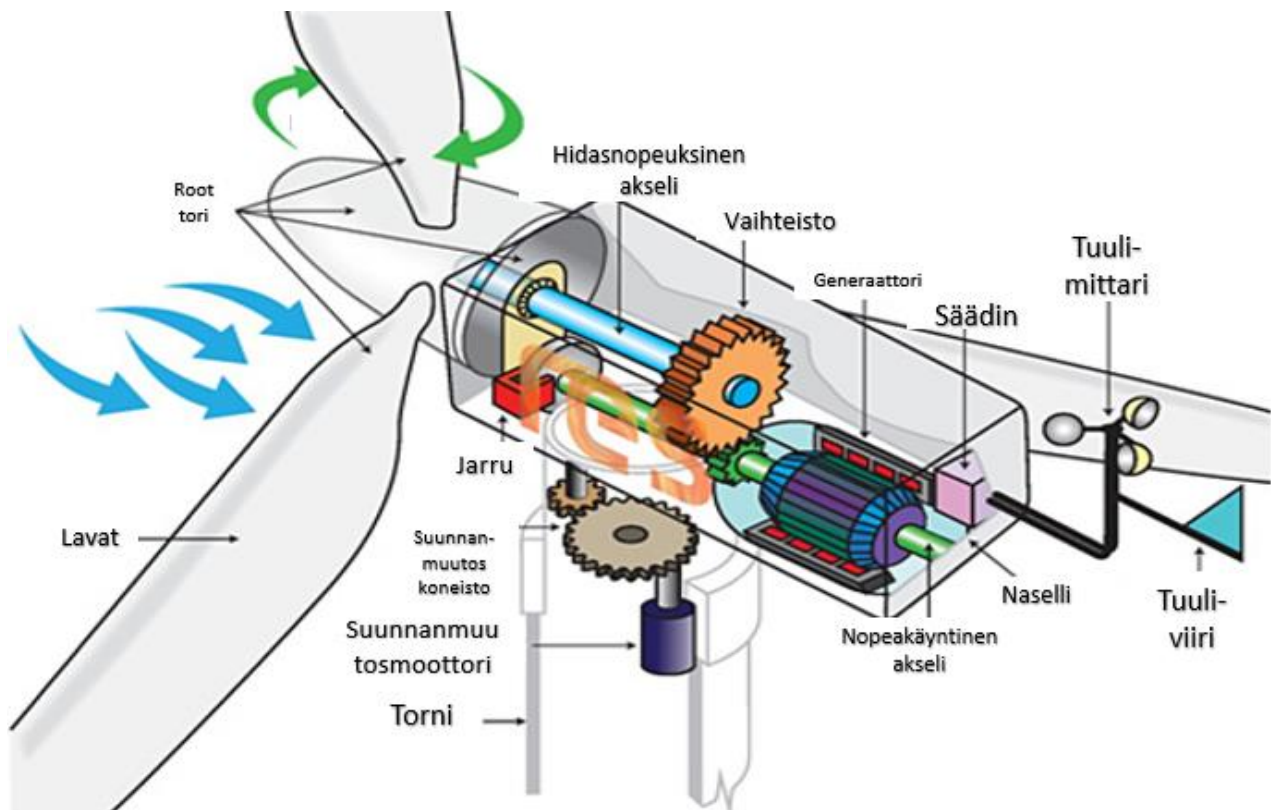
2.4.1 Tuuliturbiinin komponentit

Tuuliturbiinin roottorin muodostama kineettinen energia muutetaan akseliston ja vaihteiston mekaaniseksi energiaksi ja tämä muodostunut mekaaninen energia muuttuu generaattorissa sähköenergiaksi. Kuviossa 4. on kuvattuna tuuliturbiinin komponentit. Lechterin (2017, 146) mukaan

roottorin muodostama kineettinen energia siirretään generaattoriin voimansiirron kautta, joka tyypillisesti koostuu akselista, jarrusta ja vaihteistosta. Jarrua tarvitaan pysäyttämään turbiinin pyöriminen. Jarruttaminen ja pysäyttäminen tapahtuu kääntämällä lavat 90° kulmaan lavan pitkitäisakselin suuntaan (Lechter 2017, 146).

Vaihteiston avulla saadaan hidasnopeuksinen akseli pyörittämään generaattorin akselia nopeammin. Generaattori on sähkömekaaninen komponentti, mikä muuttaa mekaanisen energian sähköenergiaksi. Generaattoreissa on tyypillisesti staattori ja roottori. Staattori on liikkumaton vaippa, jossa on tietynlaisesti asetettu käämitys. Roottori on liikkuva osa, mikä muodostaa generaattorin magneettikentän. (Mt. 147.)

Säätimen avulla turbiini toimii halutulla tavalla. Säädin tarkkailee tuulen nopeutta, roottorin nopeutta, pätö- ja loistehoa sekä turbiinin verkon kytkentäpisteen jännitettä ja taajuutta. Säädin maksimoi tehon tuotannon ja vähentää mekaanisten komponenttien rakenteellisia kuormia, mikä pidentää niiden käyttöikä. (Mt. 152–153.)



Kuvio 4. Tuuliturbiinin komponentit (Rafaat & Hussein 2018, 54, muokattu)

2.4.2 Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori DFIG

Muuttuvanopeuksiset tuuliturbiinit pystyvät seuraamaan vallitsevaa tuulen nopeutta ja mahdollisesti vähentämään mekaanisen rakenteen kuormitusta tiettyyn pisteeseen asti vaimentamalla ajoittaisista tuulenpuuskista aiheutuvia vääntömomentin huippuja. (Anya-Lara ym. 2014, 16.) Kuviossa 5. on kuvattuna ABB:n kaksoissyötetty epätahtigeneraattori DFIG.



Kuvio 5. Kuva DFIG:stä (Generators for wind power 2019, 5)

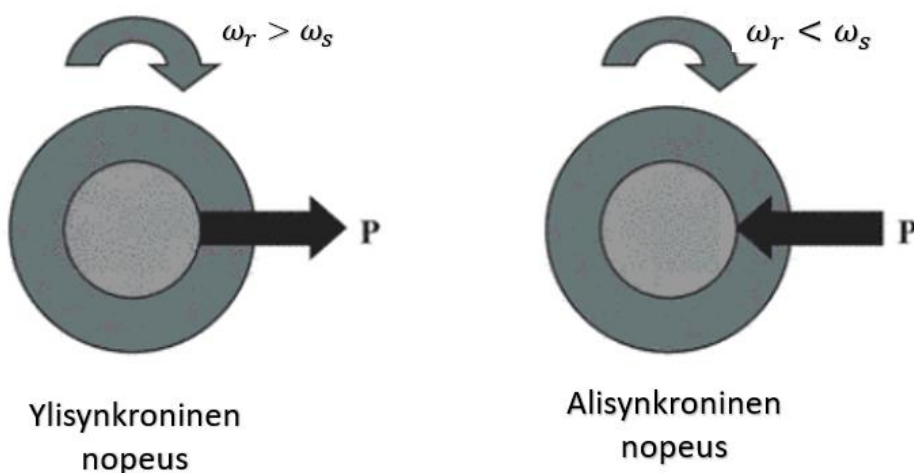
DFIG on epätahtigeneraattori, joka muuttaa kineettisen energian sähköenergiaksi. DFIG:ssä on kaksi reittiä syöttää sähköenergiaa verkkoon, staattorin kautta tai roottorin kautta. DFIG on liukurengasgeneraattori, jossa taajuusmuuttajan kautta kulkee osa tehosta. Korpelan (2016, 80) mukaan kaksoissyötetty epätahtigeneraattori on liukurengaskone, jossa muuttuva nopeus saadaan aikaiseksi jättämällä kasvattamalla.

Roottorin pyörimisnopeus saadaan poikkeamaan staattorin määräämästä tahtinopeudesta, kun jättämän kasvusta seuraava teholisäys siirretään osatehoisen suuntaajakäytön välityksellä sähköverkkoon. Suuntaajakäytön kautta syötetään verkkoon noin 30% generaattorin tuottamasta sähkötehosta, loput 70% syötetään staattorin kautta normaaliin tapaan. Generaattorin staattorikäänitys on kytketty turbiinin muuntajaan, roottorin käänitys on kytketty liukurenkaitten ja taajuusmuuttajan kautta turbiinin muuntajaan (Technical Application Papers No.13. 2011, 59). Taajuusmuuttajassa on kaksiasteinen tehomuuttaja (B2B). Tehon vaihto tämän muuttajan ja verkon välillä riippuu laitteen toimintapisteestä sekä DFIG:n loistehosta, että roottorin halutusta pyörimisnopeudesta. Kaksiasteinen tehomuunnin osittain kahdentaa sähköverkon taajuuden roottorin mekaanisesta taajuudesta, mikä mahdollistaa muuttuvanopeuksisen käytön tuuliturbiinissa. DFIG:ssä nopeuden

vaihteluväli on $\pm 30\%$ synkronisesta nopeudesta, mikäli kaksiasteinen tehomuuntimen nimellisteho on 30% turbiinin tehosta. (Anya-Lara ym. 2014, 15.)

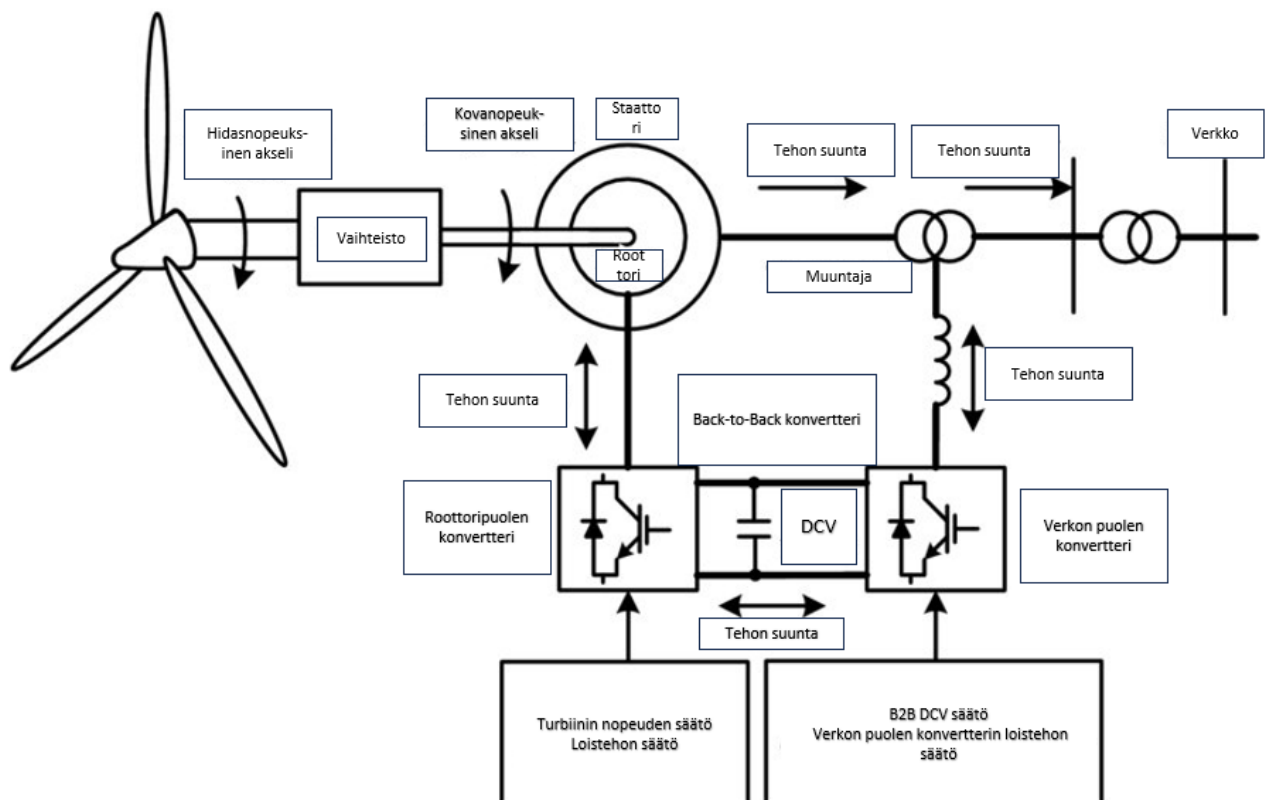
Liukurengasepätahtigeneraattori muodostaa DFIG:n ytimen. Liukurenkaitten avulla saadaan generaattorin oikosuljettuun roottoriin galvaaninen yhteys, minkä seurauksena roottoriin voidaan syöttää sähkövirtaa ulkopuolelta ja roottorista voidaan ottaa virtaa ulos. Saadaksesen staattorilta vakio-
taajuista sähköenergiaa, roottorikäymistä tulee ohjata liukurenkaiden välityksellä jännitteellä, jonka taajuus riippuu roottorin pyörimisnopeudesta. Näin saadaan sähköenergiaa vakio-
taajuudella roottorin pyörimisnopeuden vaihdelta, eli staattorilta saatava energia voidaan syöttää suoraan muuntajan kautta verkkoon. (Korpela 2016, 83.)

DFIG-järjestelmä voi syöttää tehoa verkkoon staattorin ja roottorin välityksellä. Roottori voi ottaa tehoa verkosta. Roottorin verkosta ottama teho riippuu generaattorin pyörimisnopeudesta. Jos generaattori pyörii ylisynkronisella nopeudella, teho siirtyy roottorista konvertterien kautta verkkoon ja generaattorin pyöriessä alisykronisella nopeudella roottori ottaa tehoa verkosta konvertterien välityksellä. (Fox 2014, 73.) Kuviossa 6. on kuvattuna tehon siirron suunta riippuen synkronisesta nopeudesta. ω_r on roottorin nopeus ja ω_s on synkroninen nopeus.



Kuvio 6. DFIG:n ylisynkroninen ja alisykroninen pyörimisnopeus (Fox 2014, 74, muokattu)

Back-to-Back konvertterissa (B2B) eli kaksiasteisessa tehomuuttajassa on kaksi kolmivaihe jännitelähdemuunninta (VSC). Toinen niistä on yhdistetty roottorin puolelle (RSC) ja toinen verkon puolelle (GSC) kuristimen välityksellä. Ne sijaitsevat samassa yksikössä ja ne jakavat saman välipiirin eli DC-piirin. RSC ohjaa tuuliturbiinin nopeutta ja loistehon kulutusta määrittämällä roottorin virtoja. GSC pitää DC jännitteen tasaisena B2B DC-piirissä, mikä on RSC:n oikeanlaiselle toiminnalle välttämätöntä, ja se tuottaa verkkoa tukevaa loistehoa. Molempien konverttereiden rakenne mahdollistaa kaksisuuntaisen tehon syötön tehden B2B konvertterista roottorin jättämän palauttavan laitteen, toisin sanoen se palauttaa induktiogeneraattorin roottorin käämityksessä tuotettua tehoa, joka muuten häviäisi käämien lämmetessä. (Anya-Lara ym. 2014, 16.) Kuviossa 8. on kuvattuna DFIG:n konvertterit ja tehon suunnat.

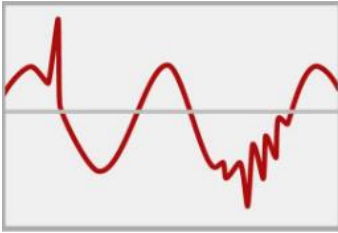


Kuvio 8. DFIG:n konvertterit (Anya-Lara ym. 2014, 16, muokattu)

2.4.4 Generaattorin tehoelektronikan suojaus

Jos verkossa tai tuuliturbiinin lähellä havaitaan vika, ensimmäinen suojausmekanismi on turbiiniin kytkettyjen konverttereiden pulssien ohjaamisen kommutoinnin estäminen. Tämän seurauksena tehoelektronikan kytkimet ovat suojattuna suurilta vian aiheuttamilta transientisilta virroilta ja

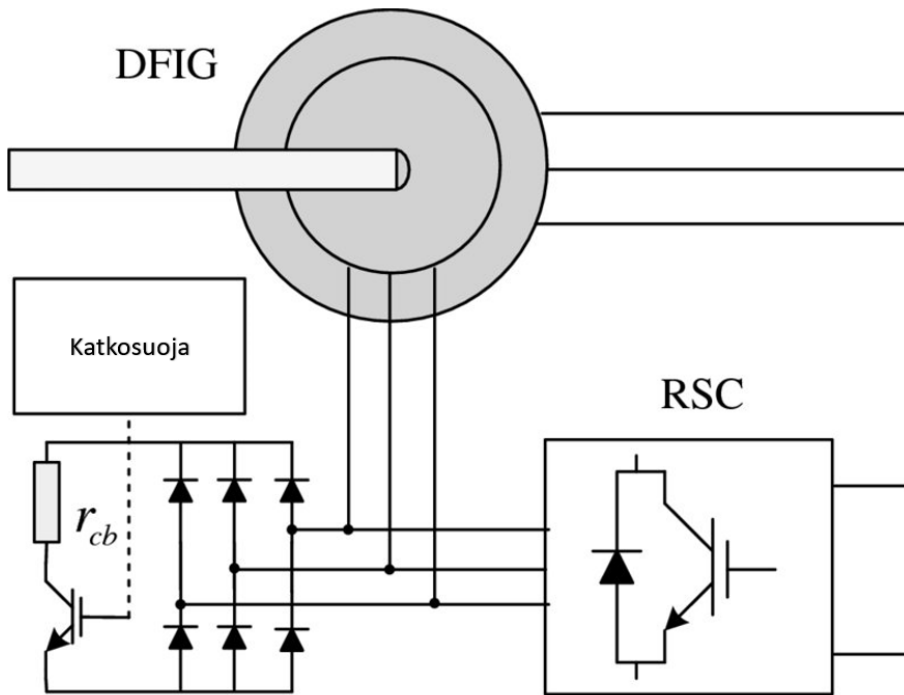
kytkimet menevät OFF-tilaan. (Anya-Lara ym. 2015, 175.) Kuviossa 9. on kuvattuna transientin virran käyrämuoto.



Kuvio 9. Transientin virran käyrämuoto (Pikaopas sähkönlaadun oireisiin ja syihin n.d.)

Kaksiasteisen tehomuuttajan nimellisteho on murto-osa generaattorin nimellistehosta. Tämän seurauksena kaksiasteisen tehomuuttajan tehoelektronikan ylivirtakestoisuus on paljon pienempi, kuin DFIG:n roottorin käämityksissä muodostuvat transientit oikosulkuvirrat. Vian tapahtuessa transienttivirrat, jotka voivat olla verkon vikavirran suuruisia, indusoituvat roottorin käämityksiin. Kaksiasteisen tehomuuttajan liipaisinpulssin välitön esto ei ole riittävä suojaamaan tehoelektronikan komponentteja roottorin puoleisessa konvertterissa. Kaksiasteisen tehomuuttajan suojaksi on laitettu katkosuoja, joka oikosulkee roottorin käämityksen sarjalla vastuksia ja samanaikaisesti roottorin puoleinen konvertteri irrotetaan piiristä. Resistanssi on tarpeeksi suuri vähentääkseen transientit virrat takaisin turvalliselle tasolle lyhyessä ajassa. (Anya-Lara ym. 2014, 179.)

Katkosuoja suojaa B2B konvertteria roottoripiirissä indusoituneilta ylivirroilta verkon vikatilassa (Mts. 16). Kuviossa 10. on kuvattuna katkosuojan sijainti. Katkosuoja katkaisee RSC:n ja oikosulkee roottorin käämityksen vastusparistoon. Resistanssi on tarpeeksi suuri vähentääkseen transienttivirrat takaisin turvalliselle tasolle lyhyessä ajassa. Uusimmissa katkosuojapiireissä on tehoelektronikkakomponentteja kuten IGBT:tä ja GTO:ita. Katkosuojan käyttö on välttämätöntä, jotta verkkomääräyksien lähivikakestoisuudet täyttyvät. Ilman katkosuojaa induktiogeneraattori ei pysy kytkettyneenä verkkoon vian sattuessa, koska RSC ei kestä suuria roottorin transienttivirtoja. B2B ei myöskään kestä roottorista tulevaa äkillistä energiaa. Katkosuojaa käytettäessä RSC on suojattuna roottorin käynnistyksessä muodostuvilta virroilta ja roottorin lisäresistanssi mahdollistaa induktiogeneraattorin pyörimisnopeuden muuttumisen voimakkaaksi ilman, että saavutetaan kriittinen toimintapiste tai että loistehoa ei kuluteta liikaa. (Mts. 16.)



Kuvio 10. Katkosuoja kytkettynä rinnan roottorin ja roottorin puoleisen konvertterin väliin (Anya-Lara ym. 2014, 16, muokattu)

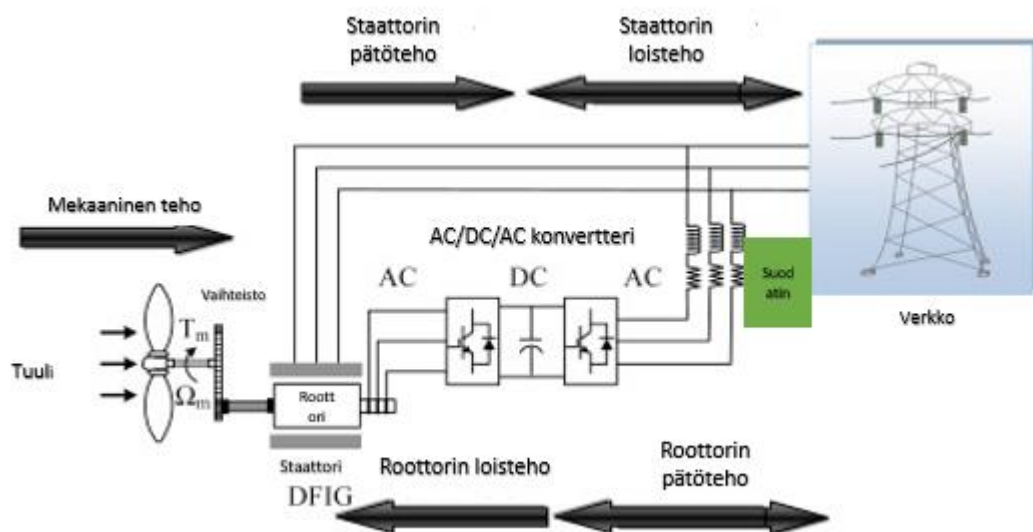
Jarruvastuksella suojataan DC-piiriä. Vian sattuessa DC-piirin jännite nousee johtuen roottorin puoleisen konvertterin kasvaneista virroista ja verkonpuoleisen konvertterin kyvyttömyydestä tuottaa tehoa verkkoon johtuen matalasta jännitteestä. Tällaisessa tilanteessa DC-katkojan IGBT aktivoituu ja jarruvastus kytkeytyy rinnan DC-piirin kanssa. Suojaus aktivoituu, kun jännite nousee yli määritellyn kynnyksarvon. Tällaisessa tilanteessa DC-piirin energia häviää jarruvastukseen ja vähentää jännitetasoa. (Mts. 180.)

2.4.5 Harmonisten yliaallojen suodatus LCL-suodattimella

Harmoniset yliaallot heikentävät sähkön laatua, joten yliaallot pitää suodattaa pois käyttämällä sopivaa suodatinta. Burton, Jenkins, Bossanyi, Sharpe ja Graham (2021, 763) toteavat muuttuvanopeuksisten tuuliturbiinien, joissa on kaksiasteinen tehomuuntaja tuottavan aina harmonisia virtoja, johtuen tehoelektroniikan konverttereista. Harmonisten jännitteiden minimoimiseksi turbiinin verkonpuolella käytetään passiivista suodatinta, joka koostuu kuristimesta ja rinnakkaiskondensaattorista. (Burton, Jenkins, Bossanyi, Sharpe & Graham 2021, 763.)

Tuulen nopeuden vaihteluista johtuva roottorin pyörimisnopeuden muuttuminen aiheuttaa muun muassa jännitteen välkyntää, harmonista säröä ja jännitteen epätasapainoa. DFIG:n tehokonvertterit ovat harmonisten yliaaltojen lähteitä, jotka heikentävät tehon laatua järjestelmässä. (Mishra, Singh, Srivastava & Chatterjee 2018, 446.) Kuviossa 11. on kuvattuna LCL-suodattimen sijainti kaksoisyyötetyssä järjestelmässä. Verkon puoleinen konvertteri kontrolloi verkkoon syötettävää pätö- ja loistehoa varmistaen tehon laadun. LCL-suodattimen avulla varmistetaan tuotetun energian laatu. (Allagui, Belhadj & Hasanoui 2014, 2.)

LCL-suodattimen käyttö voi aiheuttaa stabiilisuusongelmia, johtuen resonanssista. Stabiilisuusongelmia voi välttää asentamalla vaimennusvastus sarjaan kondensaattorin kanssa, mutta se ei vähennä stabiilisuusongelmia. (Mishra ym. 2018, 447.)



Kuvio 11. LCL-suodatin sarjassa (Rasul, Azad & Sharma 2017, muokattu)

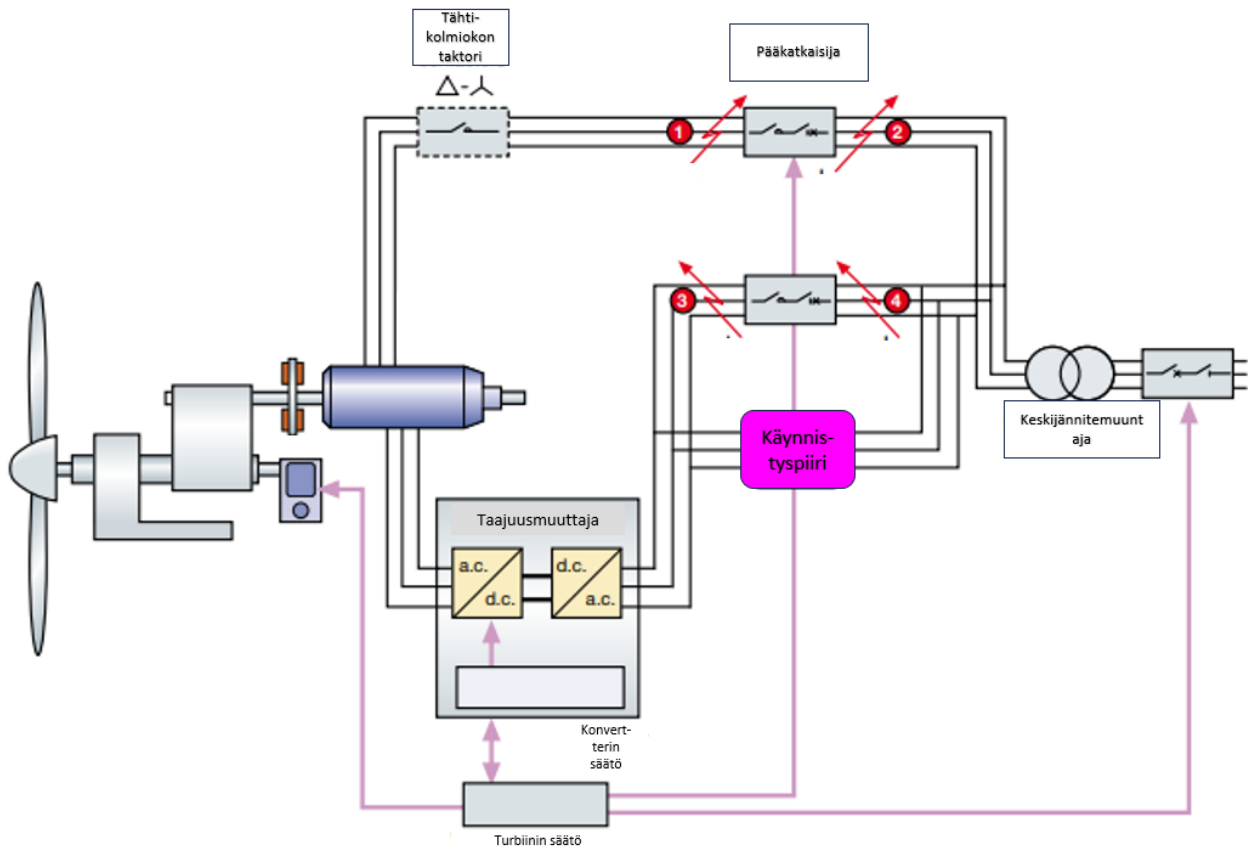
2.4.6 Generaattorin suojaus

Generaattoria suojataan seuraavilta tapahtumilta:

- generaattorin pienjännitepuolen hetkellisiltä ylivirroilta, joita aiheuttaa generaattorin staattorin oikosulku, generaattorin staattorin maasulku, konvertterin oikosulku, muuntajan oikosulku ja muuntajan maasulku
- Asymmetrinen virta
- Generaattorin ylikuumentuminen
- Ylikuormitustilanteessa tapahtuvilta ylivirroilta
- Yli- tai alijännitteiltä, jotka on määritelty verkkomääräyksissä
- Yli- tai ali taajuuksilta, jotka on määritelty verkkomääräyksissä. (Anya-Lara ym. 2014, 174–175.)

Oikosulku taajuusmuuntajan generaattorin puoleisessa syöttöpäässä muodostaa ylivirran generaattoriin. Taajuusmuuttajan säätimen pitää huomata virran voimakas nousu tai jännitteen romahdaminen. Laukaisusulakkeet tai turvakytkimet lopettavat generaattorin puoleisen oikosulun. Säätöjärjestelmä pysäyttää verkonpuoleisen konvertterin ja laitoksen hallintajärjestelmä hidastaa laitosta mekaanisesti. (Heier 2014, 217.)

Oikosulku DC-piirissä romahduttaa DC-piirin jännitteen. Tasasuuntaajat ja verkonpuoleiset konvertterit tuottavat oikosulkuvirtaa vapaakäyntidiodin läpi, jolloin verkko ja generaattori täytyy irrottaa taajuusmuuttajasta järjestelmän hallinnan kautta. (Mts. 217)



Kuvio 12. Turbiinin oikosulkukohtat (Technical Application Papers No.13. 2011, 59, muokattu)

Kuviossa 12. oikosulun sattuessa pisteessä 1 pääkatkaisijalle tuleva vikavirta riippuu verkon oikosulkuvirrasta, johon turbiini on kytketty ja keskijännitemuuntajan oikosulkuimpedanssista. Pisteessä 2 pääkatkaisijalle tulevalla vikavirralla on vaimeneva suuntaus ja vikavirtaa tuottaa rajoitetun ajan generaattorissa oleva kineettinen energia. Samanaikaisesti mitä tulee roottorin päämagnetoimispiiriin sijoitetun pienjännitekatkaisijan valittuun katkaisukykyyn, on huomioitava tämän katkaisijan mitaamat oikosulkuvirrat vian sijainnin perusteella. Jos oikosulku tapahtuu pisteessä 3 katkaisijan havaitsema vikavirta on verkon tuottaman vikavirran ja pisteessä 2 tapahtuvan vikavirran summa. Jos oikosulku tapahtuu pisteessä 4 katkaisijan havaitsema vikavirta rajoittuu konvertterin kaksinkertaiseen mitoitusvirtaan. (Technical Application Papers No.13, 2011, 59.) Tähti-kolmiokontaktoria käytetään eri tuuliolosuhteiden aiheuttamaan roottorin virtojen hallintaan liukurenkaitten ja hiiliharjojen kestävyden osalta (Wind Protection 2016, 60.)

2.4.7 Tuuliturbiinin muuntaja

Valittu jännitetaso tuuliturbiinin nasellin generaattorissa ja päävirtapiireissä on Euroopassa alle 1000V. Jännitetasoksi valitaan yleensä 690 V vaiheitten välillä. Pienoisjännite isossa sähköisessä laitteessa johtaa varsin korkeisiin virtoihin. Esimerkiksi 3 MW turbiinilla, joka tuottaa 1000 V jännitteen, virta vaihetta kohden on yli 1700 A. On huomattu kustannustehokkaammaksi valita matalampi jännitetaso jopa 4–5 MW:n turbiineille. (Burton ym. 2021, 722.)

Matala jännitetaso johtaa muuntajan ja siihen kuuluvien kytkinlaitteiden tarpeeseen, joilla tuuliturbiini kytketään tuulipuiston tehonkeräysjärjestelmään, joka toimii keskijännitteellä. Monet valmistajat toimittavat muuntajan ja kytkinlaitteiston turbiinin mukana. Muuntaja voidaan sijoittaa naselliin, tornin huipulle suunnanmuutosakseliston alle, tornin juureen tai välittömästi tornin läheisyyteen. Moderneissa tuuliturbiineissa on kussakin omat muuntajansa. Tuuliturbiinien muuntajat ovat suunniteltu erityisesti tuulivoimaa varten, koska muuntajan läpi menevä teho vaihtelee. Matala teho aiheuttaa kuparihäviöitä ja sydämen magneettihäviöitä. Muuttuvanopeuksiset tuuliturbiinit muodostavat harmonisia virtoja, jotka voivat aiheuttaa epätavallisia magneettivuon reittejä, häviöitä ja muuntajan kuumentumista. (Mts. 722–723.)

2.4.8 Tuulivoimapuiston sisäinen kaapelointi

Tuulivoimapuiston sisäisen verkon kaapeloinnin kapasiteetti ja johdinpoikkipinta-ala riippuu voimalan tehon tuotannosta, voimalan etäisyydestä sähköasemaan ja voimalaitoksen jännitetasosta. Hayn (2021) ja Koivusen (2010, 23) mukaan tuulipuiston sisäisen verkon kaapelointi koostuu eri johdinpoikkipinta-alaisista kaapeleista. Lähempänä sähköasemaa käytetään paksumpaa kaapelia, koska kaapelissa kulkeva tehon määrä kasvaa lähestyttäessä asemaa (Hay 2021; Koivunen 2010, 23).

Tuulipuiston sisäinen kaapelointi toteutetaan tavallisesti keskijännitteisillä 20 kV tai 36 kV maakaapeleilla (Hyödyllistä tietoa tuulivoima-alueen maanomistajille 2022, 2–3.) myös 30 kV kaapeleita käytetään (Kivisaari 2021, 15.) Tekniikan kehittyessä suuremmat jännitetasot ovat myös mahdollisia. Liityntäjohto tuulivoima-alueen sähköasemalla kanta- tai paikallisverkkoon toteutetaan voimajohdolla, niin kutusutulla ilmajohdolla. Tuulipuiston sisäisessä silmukoidussa verkossa 3–5 voimalan tuottama teho tuodaan sähköasemalle. Maakaapeli on valmistettu pääosin alumiinista ja

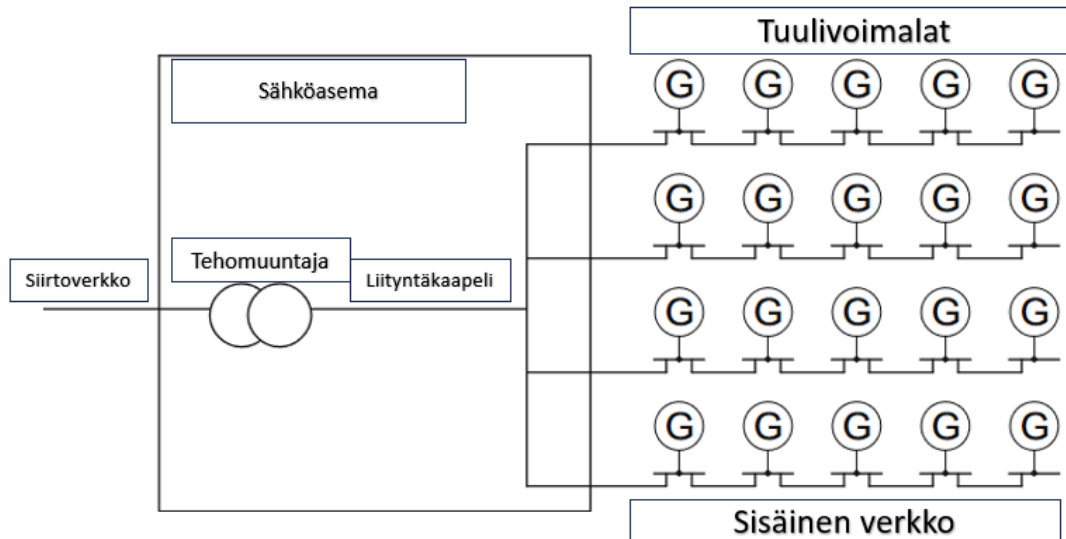
niiden vahvuudet vaihtelevat noin 180–800 mm² välillä. (Hyödyllistä tietoa tuulivoima-alueen maanomistajille 2022, 2–3.)



Kuvio 13. 36 kV tuulipuistokaapeli AHXAMK-W 19/33 (AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3-johdin n.d.)

Kaapeloidussa sisäisessä keskijänniteverkossa johdinkatkeamat ovat harvinaisia, ne johtuvat useimmiten kaivuutöistä. Mikäli kaapeli vaurioituu ja yksi vaihe katkeaa, se on suoraan maan kanssa kosketuksissa. Maasulkuja voi tulla esimerkiksi eristeen hapertuessa, jolloin kaapeliin pääsyt neste muodostaa yhteyden maahan. Tuulivoimalaitoksessa tehon kulkiessa voimaloilta sähköasemille päin käytetään sähköasemilla suunnattuja suoja, jolloin voidaan erottaa vikavirran kulku suunta. Suunnattujen suojien avulla pystytään estämään terveen turbiinilähdön keskeytykset vian ollessa viereisellä lähdöllä. (Koivunen 2010, 23.)

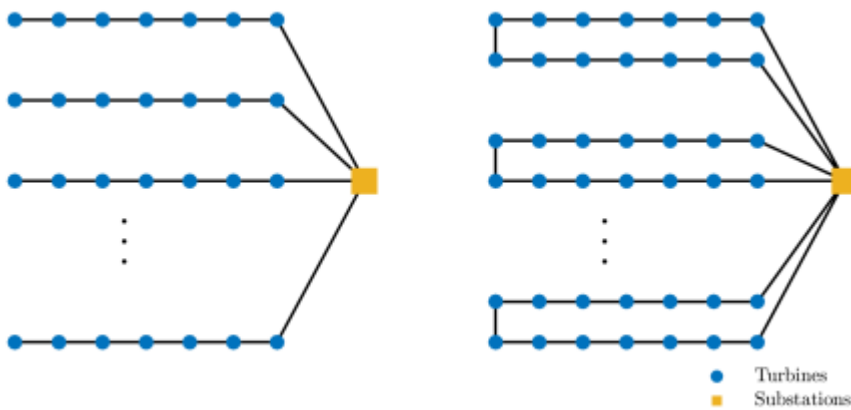
Kuviossa 14. on kuvattuna tuulivoimapuiston kaapeloinnin periaatekuva. Tuulivoimapuiston sisäinen keskijänniteverkko kytkee yksittäiset tuuliturbiinit yhdeksi kokonaisuudeksi, joka yhdistetään liityntäkaapelilla sähköverkkoon. Liityntäkaapeli on tuulipuiston pisin yksittäinen kaapelipituus, mikä riippuu tuulipuiston ja alueverkon liityntäpisteen sijainnista sekä asennusreitistä. (Kivisaari 2021, 15).



Kuvio 14. Tuulivoimapuiston periaatekuva (Koivunen 2010, 17, muokattu)

2.4.9 Muuntamokojeisto (Ring main unit RMU)

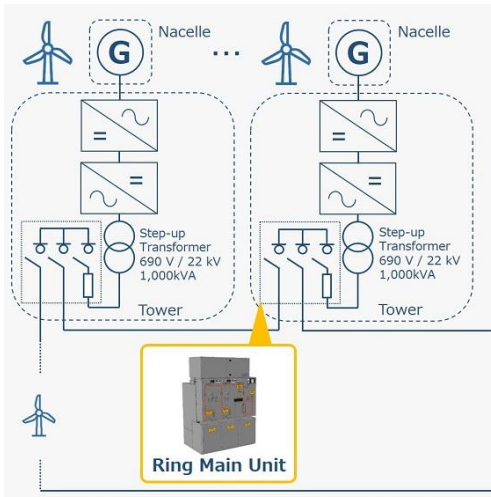
Rengassyöttökojeisto eli muuntamokojeisto on komponentti, joka sijaitsee tuulivoimalan muuntajan ja sähköverkon välissä (Koivunen 2010, 21.) Muuntamokojeiston (RMU) päätehtävänä on suojata tuulivoimalan sisäistä verkkoa, eristää vikaantunut osa verkosta ja suojata maasulkuvirroilta, oikosulkuvirroilta ja ylikuormitukselta (Xixi 2023). Tuulipuiston keskijänniteverkossa ei ole kulu- tusta, lukuun ottamatta puiston omaa käyttöä, eli teho kulkee voimaloista sähköasemalle päin toisin kuin perinteisessä verkossa. Tuulipuiston keskijänniteverkko on kaapeloitu ja silmukoitu RMU-kojeistojen avulla. Verkkoa käytetään säteittäisenä suojauksen toteuttamisen helpottamiseksi. (Koivunen 2010, 23.) Kuviossa 15. on kuvattu tuulivoimapuiston keskijänniteverkko säteittäisenä ja silmukoituna.



Kuvio 15. Tuulivoimapuiston säteittäis- ja silmukoitu verkko (Mokhi & Addam 2020, 24)

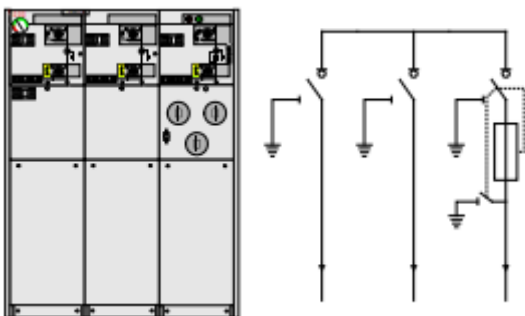
Muuntamokojeisto eli RMU-kojeisto on SF₆-eristeinen. RMU-kojeiston perusversio voi olla esimerkiksi liitettävissä kahteen kaapelilähtöön ja yhteen muuntajaan eli siinä on kaksi kuormanerotinta ja yksi varokekuormanerotin. Erottimien katkaisuperiaate on autopneumaattinen ja kaapeli- ja muuntajalähdöt on varustettu oikosulun kytkemiseen kykenevillä maadoituserottimilla. Kaapeli-pääte- ja varoketilaliitynnät on toteutettu kaasutiiviillä läpiviennillä. Varokkeet ovat ilmaeristeisinä yksivaiheisissa koteloissa tai kouruissa siten, että vaiheiden välinen vuotovirtamahdollisuus on eliminoitu. Maadoitetussa tai kosketussuojatussa lähdössä varokkeet vaihdetaan käsin tai varokepih-tien avulla. (Elovaara & Haarla 2011, 138.)

Turbiinien välinen kaapelointi säteittäisessä verkossa muodostaa yksittäisiä haaroja, jotka yhdistyvät kokoojapisteessä. Rengasmainen verkko mahdollistaa sähkönsyötön yksittäisestä turbiinista haaran molempiin suuntiin, koska rengasmaisessa verkossa kaksi tai useampi haara yhdistyvät kokoojapisteeseen lisäksi myös loppupäistään. Säteittäinen verkko on kuitenkin käytetympi kustannus-syistä. (Kivisaari 2021, 15.) RMU- kojeisto liittää yksittäisiä voimaloita rinnan, jotta välttyttäisiin yksittäisiltä liityntäjohtoilta sähköasemilla. RMU-kojeisto sijaitsee tuulivoimalan muuntajan ja tuulipuiston sähköverkon välissä. (Koivunen 2010, 21.) Kuvio 16. esittää RMU-kojeiston sijainnin turbiinin muuntajan ja tuulivoimapuiston keskijänniteverkon välissä.



Kuvio 16. Muuntajakojeiston kytkentä (RMU Ring Main Unit n.d.)

RMU-kojeisto voi sisältää kuormanerotin C- kenno, suoran kaapeliyhteyden maadoituskytkimellä De- kenno, varokekuormaerotin F-kenno ja tyhjiökatkaisijan V-kenno (SafeRing/SafePlus 12–24 kV 2022, 20). Kuvio 17:ssä on esitetty RMU-kojeisto, jossa on kaksi kuormanerotinta ja muuntajayhteys varokekuormanerotinilla.



Kuvio 17. CCF RMU-kojeisto kahdella kuormanerotinilla ja muuntajayhteyden varokekuormanerotinilla (SafeRing/SafePlus 12-24 kV 2022, 22)

2.5 Tuulipuiston sähköaseman laitteet

2.5.1 Sähköasemien toiminta

Sähköasema termillä tarkoitetaan sähköenergian siirto- tai jakeluverkon pistettä, jossa suoritetaan kytkentöjä, muunnetaan jännitettä sekä keskitetään tai jaetaan sähköenergiaa eri johtoihin. Sähköasemilla on monenlaisia laitteita, joista tärkeimpiä ovat muuntajat, katkaisijat, erottimet ja mittamuuntajat. Muuntajien avulla sähköasemilla voidaan muuntaa jännitettä tarvittaviin arvoihin. Muuntajien ja kiskostojen lisäksi sähköasemilla käytetään erilaisia kojeita ja laitteita. Tärkeimpiin laitteisiin kuuluvat mittamuuntajat, jotka liittyvät suojaustarkoituksiin erityisesti suurjänniteverkossa. Pien- ja keskijänniteverkossa käytetään myös varokkeita. Ylijännitesuojauksessa käytetään venttiilisuojia, jotka liitetään suoraan laitteiden rinnalle. Pienten jakelumuuntajien tapauksessa käytetään myös kipinävälejä. Näillä laitteilla varmistetaan sähköverkon turvallinen ja tehokas toiminta sekä suojataan laitteita mahdollisilta ylijännitteiltä. (Elovaara & Haarla 2011, 76.)

Sähköasema on keskeinen osa sähkönjakeluverkkoa, ja sen sijainti sekä koko vaikuttavat merkittävästi keskijänniterunkojohtojen pituuteen, mitoitukseen ja varayhteyksiin. Sähköasema toimii monipuolisena jakelukeskuksena, jossa sijaitsee pääosa sähköverkon suojareleistyksestä ja muusta automaatiosta. Sähköasema koostuu useista osista, mukaan lukien suurjännitekytkinlaitos, yksi tai useampi päämuuntaja, keskijännitekytkinlaitos ja apujännitejärjestelmä käytöntukitoimintoineen. Nämä komponentit yhdessä muodostavat kokonaisuuden, joka mahdollistaa sähkönjakelun tehokkaan ja turvallisen hallinnan. (Lakervi & Partanen 2008, 119.)

Seuraavassa esitellään tuulipuiston sähköaseman keskeisimmät laitteet. Muuntajat säätävät jännitettä voimalaitokselta käyttökohteisiin. Tuulivoimapuistojen muuntajasta puhutaan tehomuuntajana. Sähkövirtaa ohjataan kytkimillä, ne mahdollistavat sähköverkon osien erottamisen tarpeen mukaan. Erottimien avulla mahdollistetaan turvallinen työskentely sähköasemilla. Mittauslaitteilla seurataan sähköverkon tilaa ja ne varmistavat, että sähkö siirtyy oikealla jännitteellä ja teholla.

2.5.2 Keskijännitekojeisto

Keskijännitekojeisto on tärkeässä osassa tuulivoimaloitten tuottaman sähkönsäilytyksessä sähköverkkoon. Kuviossa 18. on esitetty keskijännitekojeisto ulkoapäin. Kiviniemen (2014) mukaan sähköasemalla tuulivoimaloista tulevat keskijännitekaapelit ohjautuvat omiin kennoihin

eli katkaisijoihin. Kennot muodostavat rivistöjä, joita kutsutaan kojeistoiksi. Jokaisessa kennossa on oma suojalaitteisto, jos kaapeliyhteydessä ilmenee vikaa. Tuulivoimalasta sähköasemalle tulevan sähkön jännite on 20 kV ja jännite nostetaan muuntajalla 110 kilovolttiin. Sähköasemalla muuntajalta tuleva tuulen kautta muodostunut sähkö siirtyy 110 kV kytkinkentän kautta suurjännitteiseen jakeluverkkoon ja siitä edelleen kantaverkkoon. (Kiviniemi 2014.)

Jakeluverkkoa syöttävillä sähköasemilla käytetään keskijännitteisiä kytkinlaitoksia, jotka ovat toteutettu katkaisijakojeistoina. Katkaisijakojeistoissa käytetään nykyään yleisesti vaunukatkaisijakennorakenteita, joissa on kiinteät maadoituserottimet. Katkaisijat ovat tyhjiö- tai SF₆-katkaisijoita. Katkaisijavaunussa kiinni- ja erotusasennot on sijoitettu erillisen oven sisäpuolelle, mikä mahdollistaa kaikkien ohjaustoimenpiteiden suorittamisen turvallisesti ilman oven avaamista. Lisäksi turvallisuutta parantavat oikosulkukestoiset maadoituserottimet, jotka ovat mekaanisesti lukittu katkaisijavaunun asentoon. Muita turvallisuustoimia ovat muun muassa täydellinen lukitus katkaisijan ja vaunun osalta kytkentävirheitä vastaan, parannettu valokaarikestoisuus ja palotiiviys sekä ohjauskaapeleiden vienti suojaputkiin suurjännitetilassa. (Elovaara & Haarla 2011, 124–125.)



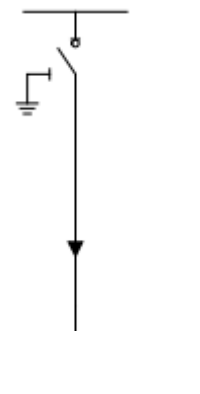
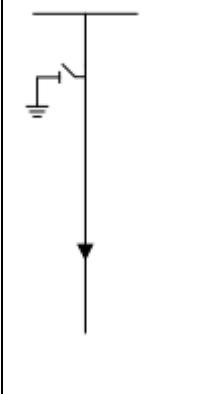
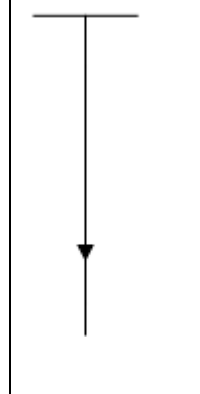
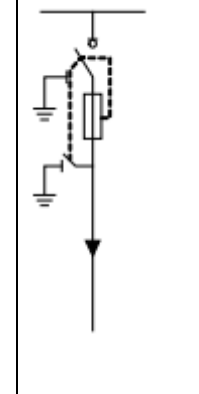
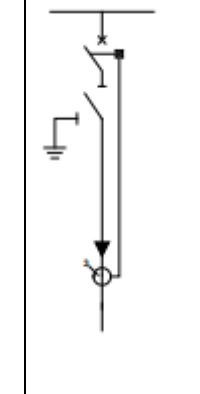
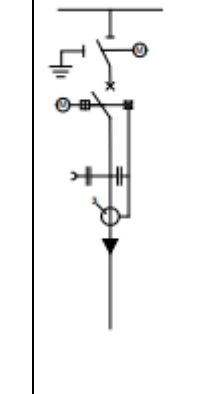
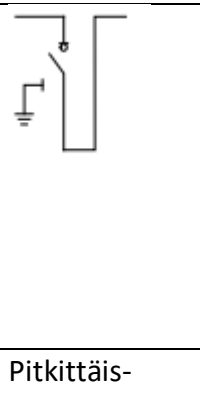
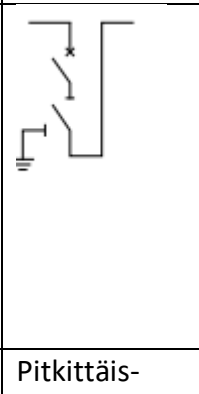
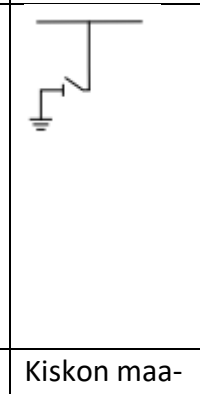
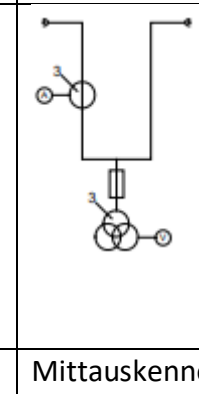
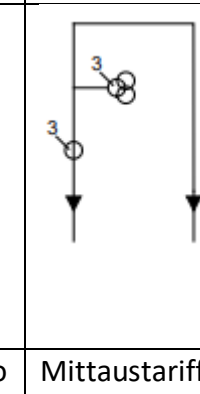
Kuvio 18. Keskijännitekojeisto (SafePlus 12–24 kV 630A 2024)

Kojeisto on rakennekokonaisuus, joka sisältää tarvittavat kytkentä-, suojaus-, ohjaus- ja valvontalaitteet. Kojektorakennukset jaetaan suur-, keski- ja pienjännitekojeistoihin, pienjännitekojeistoa kutsutaan jakokeskukseksi. Koteloidut kojeistot ovat joko ilma- tai (GIS)- SF₆ eristeisiä. Kaasueristeen kytkinlaitoksen etuna on tilansäästö. (Elovaara & Haarla 2011, 117–120.)

Keskijännitekojeisto suojaa muuntajaa joko varokekuormanerotimella tai relekatkaisijalla. Varokekuormanerotin suojaa oikosuluilta ja relekatkaisija suojaa matalilta ylivirroilta. Relekatkaisijaa suositellaan isoille muuntajille. (SafeRing/Safeplus 12–24 kV 2022, 25.)

ABB:n SafePlus keskijännitekojeistoon saatavissa olevat kennosovellukset ovat taulukossa 1. (SafeRing/Safeplus 12–24 kV 2022, 25).

Taulukko 1. Keskijännitekojeiston kennot (SafeRing/SafePlus 12-24 kV 2022, 25)

| | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|
|  |  |  |  |  |  |
| Kuormanerotinkkenno | Nousukkenno | Kaaliliityntäkenno | Varokeuor-manerotinkkenno | Tyhjiökatkaisijakenno | Pitkittäiskatkaisijakenno |
|  |  |  |  |  | |
| Pitkittäiskenno kuormanerottimella | Pitkittäiskenno katkaisijalla | Kiskon maadoituskenno | Mittauskenno | Mittaustariffikenno | |

Keskijännitekojeiston pääosat ovat

- Kuormanerotin
- Ohjainlaite, jossa on mekaaninen asennosoitus
- Koteloitu kokoojakiskosilta
- Toisiokojetila toisiokomponenteille
- Lukitusyksikkö

- Kiskotila
- Johtokouru ohjauskaapeleille
- Katkaisija
- Virtamuuntajat
- Maadoituskytkimet
- Jännitemuuntajat
- Kaapeliaukolla ja -tuella varustettu pohjalevy (Uniswitch Keskijännitekojeisto n.d., 7)

2.5.3 Tuulipuiston tehomuuntaja

Elovaaran ja Haaran (2011, 141–146) mukaan muuntaja muuntaa ja usein säätää jännitettä ja virtoja käyttäen hyväksi vaihtosähköjärjestelmän sähkömagneettista induktiota. Jännitteen säätöä varten suuret muuntajat varustetaan käämikytkimellä. Käämikytkimen avulla voidaan vaihtaa muuntajan muuntosuhdetta myös muuntajan ollessa kuormitettuna. Säätöalue on tavallisesti +/- 15% ja säätäminen tehdään yleensä muuttamalla ensiön johdinkierrosmäärää. Käämikytkin sijoitetaan yleensä käämin tähtipisteen puoleiseen päähän. (Elovaara & Haarla 2011, 141–146.) Kuviossa 19. on esitetty tehomuuntajan käämikytkin. Tehomuuntajat ovat sähköasemakäytössä pääasiassa öljyeristeisiä (Pusa 2020, 22.)



Kuvio 19. Tehomuuntajan käämikytkin (Kurkimäki 2017, 27)

Kulmalan (2015, 3) mukaan Lakervi ja Holmes (1995) määrittelevät päämuuntajan käämikytkimen ohjauksen toiminnan seuraavasti: käyttämällä jännitteensäätörelettä, joka tunnetaan myös nimellä automaattinen jännitteenohjausrele (AVC-rele automatic voltage control relay). Tämä rele voi toimia kahdella eri säätötilalla: vakiojännitesäädössä tai compoundisäädössä. Vakiojännitesäädössä pyritään ylläpitämään sähköaseman alajännitekiskon jännitettä vakaana. Tämä tarkoittaa, että AVC-rele säätää päämuuntajan käämikytkintä siten, että jännite pysyy määritellyssä vakioarvossa. Tämä on tärkeää, sillä vakaa jännite varmistaa sähköverkon tehokkaan ja luotettavan toiminnan. Compoundisäädössä sen sijaan alajännitekiskon jännitettä muutetaan muuntajan läpi kulkevan kuormitusvirran funktiona. Tämä tarkoittaa, että kun kuormitus muuttuu, AVC-rele säätää päämuuntajan käämikytkintä vastaavasti, jotta alajännitekiskon jännite pysyy halutussa tavoitearvossa. Compoundisäätö mahdollistaa jännitteen tehokkaan hallinnan muuttuvissa kuormitustilanteissa, mikä on olennaista sähköverkon vakauden ylläpitämiseksi. (Kulmala 2015, 3.)

Käämikytkintä suojaa virtausrele, jota on käsitelty kappaleessa 2.6.5.

Kolmivaihemuuntajan käämitykset voidaan kytkeä kolmioon tai tähteen. Tähtikytkennän hyvänä puolena on muuntajan tähtipisteen puolen helppo maadoitus, koska siihen on suora pääsy. Kolmiokäämityksessä pitää käyttää maadoitusmuuntajaa tähtipisteen muodostumiseksi. Korkeajännitemuuntajissa on käämikytkin, joka toimii automaattisesti virran aiheuttaessa muutoksia verkon jännitteessä. Jännitteensäätörelettä käytetään pitämään matalamman jännitteen puolen päät lähellä asetusarvoa. Jännitteensäätörele mittaa jännitteen alajännitteen puoleisesta kiskosta, vertaasitä asetusarvoon ja sen jälkeen antaa käskyn käämikytkimelle muuttaa muuntajan muuntosuhdetta. (Burton ym. 2021, 719–720.)

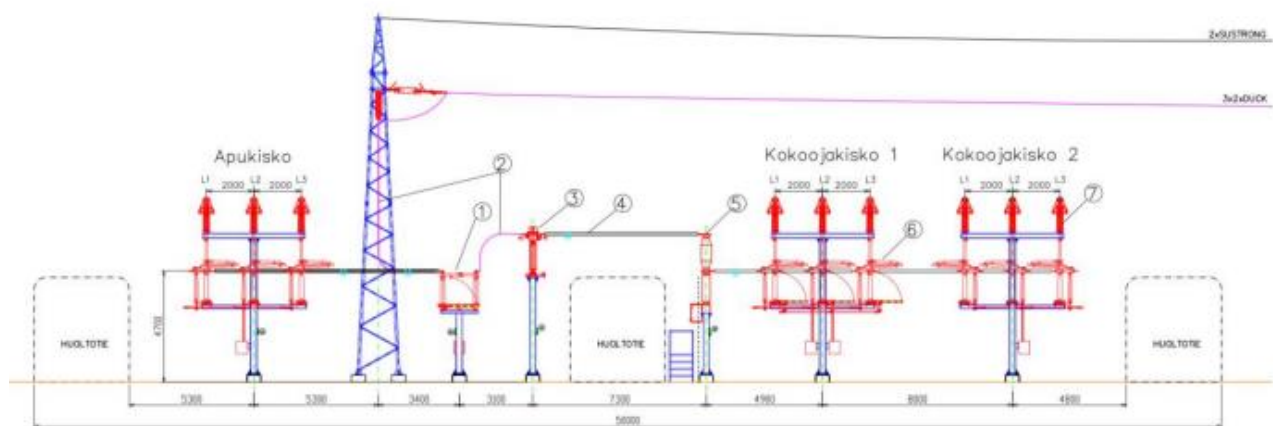
Hagqvistin (2011, 30) mukaan Repo, Laaksonen, Järventausta 2003 määrittelevät käämikytkimen toiminnan perustuvan johtolähtöjen aiheuttamaan kuormitusvirtaan tai kiskoajännitteen mittaukseen. Compoundisäätö, joka perustuu kuormitusvirtaan, voi toimia väärin johtolähdölle kytketyn tuotantoyksikön pienentäessä kuormitusvirtaa. Siinä tapauksessa käämikytkin pienentää sähköaseman jännitetasoa. (Hagqvist 2011, 30.)

2.5.4 Ulkokytkinlaitos

Ulkokytkinlaitokset koostuvat kenttälohkoista, jotka ovat yhdistettyjä toisiinsa kokoojakiskojen välityksellä. Kenttälohkoja käyttäen voidaan hallita sähköverkkoon liittyvää energiaa tai ottaa toinen

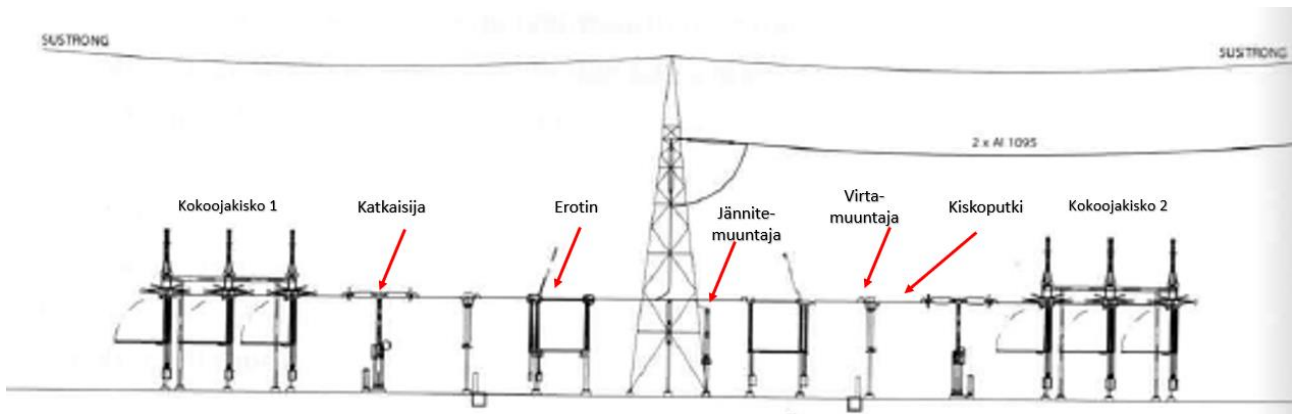
päämuuntaja käyttöön sähköasemalla verkon kytkentätilanteen muuttuessa. (Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot 2000.)

Suomessa tyypillinen 110 kV ulkokytkinkenttä on kaksoiskisko- apukiskojärjestelmä. Kaksoiskisko- apukiskojärjestelmän etuina on käytön aikana tehtävät kuormituksen tai syöttöjen muutokset ilman keskeytyksiä, koska apukisko ja kokoojakisko saadaan jännitteettömäksi käytön aikana sekä katkaisija on mahdollista huoltaa ilman keskeytystä. (Mt.)



Kuvio 20. 110 kV ulkokytkinkentän kaksoiskisko- apukiskojärjestelmän sivuprofiili (Roivanen 2022, 13)

Kuvio 20. on sivuprofiili 110 kV ulkokytkinkentän kaksoiskisko- apukiskojärjestelmän sivuprofiilista, jossa on numeroilla merkittynä 1. Kieroerotin, 2. Avojohtin, 3. Virtamuuntaja, 4. Kiskoputki, 5. SF₆ katkaisija, 6. Tartuntaerotin, 7. Kokoojakiskon tukieristin (Mts. 13). Kuviossa 21. on 400 kV avorakenteisen ulkoytkinlaitoksen sivuprofiili.



Kuvio 21. Sivuprofiili avorakenteisesta 400 kV ulkokytkinlaitoksesta (Elovaara & Haarla 2011, 118, muokattu)

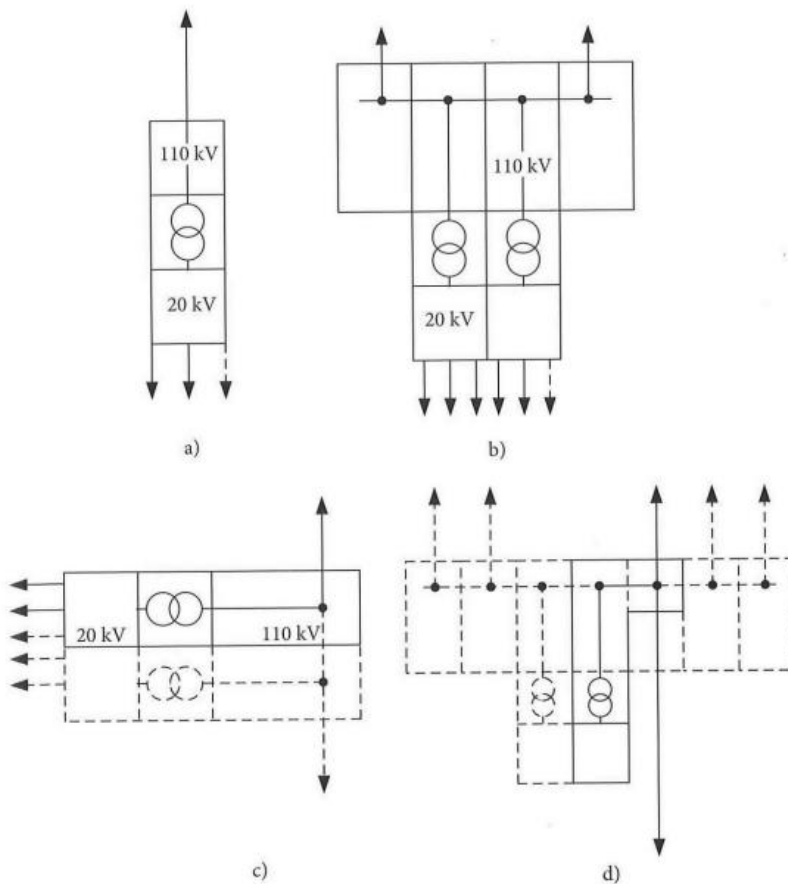
Ulkokytkinlaitokset pyritään rakentamaan siten, että muuntaja- ja kiskokatkasijakentät eivät olisi kytkinlaitoksen päädyssä, jolloin kenttien laajennukset ja vahvennukset olisivat helpommat (Elovaara & Haarla 2011, 118.)



Kuvio 22. Tuulivoimapuiston sähköasema (Hitachi Energy 2023)

Kuviossa 22. on kuvattuna tuulivoimapuiston sähköasema, joka on toteutettu kaksoiskisko- apukiskojärjestelmänä. Kiskoista kaksi voidaan tehdä jännitteettömäksi samanaikaisesti, kahta lähtöä voidaan syöttää samanaikaisesti ja lähtöjä voidaan kytkeä yhteen muun laitoksen ohi. (Elovaara & Haarla 2011, 105.)

Kaksoiskisko- apukiskojärjestelmää käytettäessä voidaan rajoittaa oikosulkutehoa, pitää nykivä kuorma erillään muusta kuormituksesta, lisätä käyttövarmuutta ukkoskautena ja eriyttää eri suuruiset syöttöjännitteet lähi- ja kaukosyötössä jakaen käyttö tarvittaessa pysyvästi tai tilapäisesti kahteen ryhmään. Katkaisijat ovat ohikytkevissä suojausten pysyessä selektiivisenä. (Mts. 103.)



Kuvio 23. Erilaisia yksittäiseen johtoon (110 kV) liittyvien asemien perusratkaisuja (Elovaara & Haarla 2011, 99)

Kuvio 23. esittää erilaisia perusratkaisuja yksittäiseen johtoon liittyvän aseman tapauksessa. a-kohta esittää pääteaseman kytkinlaitosta ja se on kytkennältään yksinkertainen ja sen tilantarve on pieni eikä kokoomakiskoa tarvita. Varautumalla tilankäytössä laajennukseen voidaan vähäisin muutoksin päästä kokoojakiskotyyppiseen laitokseen, kun muuntajaa syöttävä johto siirretään omaan kenttäänsä. Useaan johtoon (≥ 3) liittyvä asema (ns. solmupisteasema) rakennetaan alusta alkaen kokoomakiskolaitokseksi. b-kohta esittää a-kohtaa, joka on laajennettu kokoomakiskolaitokseksi, c ja d ovat johdonvariasemia. Katkoviivat kuvaavat laajennettavuutta (Elovaara & Haarla 2011, 98–99.)

2.5.5 Kytkinlaitteet

Kytkinlaitteiden tehtävänä on muuttaa tarvittaessa verkon topologiaa ja siten ohjata sähköenergian kulkua verkossa, vahinkojen ja vaarojen välttämiseksi. Erottaa viallinen osa verkosta nopeasti ja toimia erotuskohtana verkoston eri osien välillä tarvittaessa. (Elovaara & Haarla 2011, 161.)

Suurvoiman siirron ja jakelun tärkeimmät kytkinlaitteet ja niiden toiminnot: katkaisijoiden (kuvio 24.) pitää pystyä katkaisemaan suurimmatkin verkossa esiintyvät virrat erottimien (kuvio 25.) pitää pystyä pitämään kaksi verkon osaa erillään toisistaan, kytkimillä katkaistaan verkon kuormitusvirta ja kuormanerotin, joka on sekä kytkin että erotin (mts. 161).



Kuvio 24. 110 kV katkaisija (Fingridin sähköasemien laitteet 2017)

Katkaisijat ovat laitteita, jotka toimivat virtapiirin avaamiseen ja sulkemiseen. Niitä voidaan ohjata sekä manuaalisesti että automaattisesti. Yleinen automaattinen toiminto on katkaisijan avautuminen ylivirran, kuten oikosulkuvirran tai maasulkuvirran, vaikutuksesta. Avautumiskäskyn välittää mittamuuntajien avulla kytketty rele. Sulkeutuminen voi myös tapahtua automaattisesti esimerkiksi jälleenkytkentäreleen käynnistämänä. Katkaisijalle on ominaista, että se pystyy avaamaan ja sulkemaan oikosulkupiirin vaurioitumatta, eli kyseessä on piiri, jossa virta on moninkertainen katkaisijan mitoitusvirtaan verrattuna. (Mts. 163.)

Kytkinlaitteet ja niiden toiminta, joita ei käytetä suurvoimansiirron ja sähköjakelun jännitteillä: kontaktorit avaavat ja sulkevat virtapiirin saadessaan ohjausjännitteen ja avaavat virtapiirin ohjausjännitteen poistuessa, varokkeet ja niitä hyödyntävät kytkinvarokkeet sekä jonovarokeytkimet ovat käytössä oikosulkusuojina sekä kytkimien ja oikosulkusuojien yhdistelminä (mts. 161).

2.5.6 Erottimet

Erottimien tehtävänä on muodostaa turvallinen avausväli erotettavan virtapiirin ja muun laitoksen välille ja saada laitoksen osa jännitteettömäksi turvallista työskentelyä varten. Täten erottimen avausvälin on oltava erittäin luotettava. Tämä edellyttää, että erottimen avausvälin on oltava näkyvä tai erotin on varustettava luotettavalla mekaanisella asennonosoituksella. (Elovaara & Haarla 2011, 190.)

Erottimille asetettavia vaatimuksia ovat yleiset laitteille ja kojeille asetettavat vaatimukset sekä turvallisuussyistä voidaan asettaa lisävaatimuksia esimerkiksi jännitelujuudelle. Lisävaatimuksia voivat olla myös ulos asennettaville erottimille sallittava köysivoima, ohjaimien ja koskettimien toimintavarmuus ja luotettavuus sekä erottimen jäänmurtokyky. Jäänmurtokyvyllä kuvataan, kuinka vahvan jääkerroksen erotin kykenee auki- ja kiinniohjauksessa murtamaan rikkoutumatta itse. (Mts. 197–198.)



Kuvio 25. Pantografi saksierotin (Fingridin sähköasemien laitteet 2017)

Erottimien nivellettyä rakennetta käytetään yli 110–220 kV:n jännitteillä. Saksityyppiset tartuntaerottimet sopivat kiskoerottimiksi, mutta eivät sovellu vaakaerottimiksi, joita kytkinlaitoksissa tarvitaan. (Mts. 193.)

Kuormanerotin varustetaan nopean sulkemisen mahdollistavalla jousilaitteella sekä yleensä erillisillä pää- ja katkaisukoskettimilla. Kuormanerotin tehtäviä normaalisti ovat johtosilmukan avaaminen ja sulkeminen, tyhjänä käyvän muuntajan, kaapelin tai avojohdon erottaminen. (Mts. 195–196.)

2.5.7 Mittamuuntajat

Mittamuuntajat ovat erikoisrakenteisia muuntajia, jotka ovat tarkoitettu jännitteen tai virran mittaamiseen. Mittamuuntajien on toistettava mittaamansa jännite tai virta mahdollisimman virheettömästi normaalilla kuormitusalueella. Suurin osa mittamuuntajista perustuu sähkömagneettisen induktion käyttöön. (Elovaara & Haarla 2011, 198.)

Mittamuuntajien pääasialliset tehtävät ovat:

- päävirtapiirin galvaaninen erottaminen suurjännitteisestä päävirtapiiristä
- mitta-ala muuttamalla mahdollistaa mitta- ja suojalaitteiden standardoiminen tiettyihin mitoitusarvoihin
- mittareiden suojeleminen ylikuormitukselta
- mahdollistaa mittareiden ja releiden sijoitus etäälle varsinaisesta mittauspaikasta. (Mts. 198)

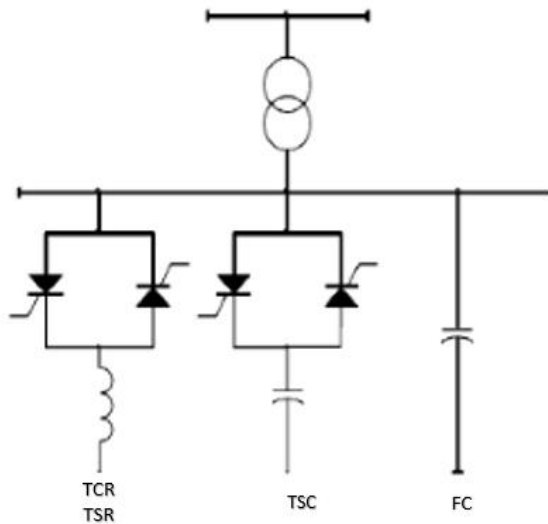
Nykyään on olemassa mittamuuntajaratkaisuja, joissa käytetään valokuitua binaarisen tiedon siirtämiseen. Tällaisia mittamuuntajia käytetään, jos käytössä on digitaalisia suojareleitä, jolloin voidaan siirtyä suoraan suurjännitepotentiaalista näille releille ominaiseen millivolttiluokan digitaaliseen muotoon. Näin syntyy mahdollisuus luopua mittamuuntajista ja siirtyä laitekohtaisten antureiden käyttöön. Näitä antureita voidaan hyödyntää verkon suojauksessa, laitteiden kunnon valvonnassa ja sähkösuureitten mittauksessa. (Mts. 198–224.)

2.5.8 Loistehon kompensointi staattisella SVC:llä

Kaksoissyötettyjen induktiogeneraattoreiden ohjattu tuotannon irrottaminen parantaa taajuuden ja jännitteen tasapainoa verkossa. Tuulivoimaloitten sähköverkkoon tuottama teho sisältää kuitenkin puutteita, joita ovat: taajuuden vaihtelut, tehokonverttereista johtuvat yliaallot, jännitteen vaihtelut ja valaistusvoimakkuuden vaihteluista johtuva välkyntä. Ihminen havaitsee valon 5–15 Hz:n välillä valaistuksen vaihtelu johtuu jännitteen muutoksen aiheuttamasta amplitudin heilahtelusta, tämä havaitaan etenkin heikoissa verkoissa. (González, Martínez-Rojas, Sumper, Gomis-Bellmunt & Trilla 2010.)

Kuviossa 26. on kuvattuna SVC:n kytkentä. Staattinen loistehon kompensattori (SVC) on rinnan kytketty ja se tuottaa vaihtelevaa loistehoa, jonka tuotanto on säädetty vaihtelevaan kapasitiivisen tai induktiivisen virran välillä. Tämä vaihteleva virta syötetään sähköjärjestelmään. SVC säätelee jännitettä kontrolloimalla loistehon määrää käytössä olevassa virtakiskossa. Tarvittava loisteho syötetään tai otetaan energiajärjestelmästä. (Alsammak 2017, 20.)

Staattiset loistehon kompensattorit (SVC) ovat laitteita, joilla voidaan nopeasti hallita vaihejänniteteitä. SVC säätelee ja ohjaa jännitettä vaadittuun asetusarvoon normaalissa jatkuvuustilassa ja vaihtuvuustiloissa, joten sillä saadaan dynaaminen ja nopeavasteinen loisteho vastaamaan systeemin vaihtuvuustiloja, kuten verkon oikosulkuja ja generaattorin tai vaiheen irti kytkeytymisiä. SVC voi lisätä siirtokapasiteettia, vähentää häviöitä, lieventää loistehon värähtelyjä ja estää ylijännitteitä ja kuorman häviöitä. SVC tyypillisesti sisältää tyristoriohjatun reaktorin (TCR), tyristori kytketyn kondensaattorin (TSC) ja yliaalto suodattimen (FC). Yleisimmät topologiat staattisille loistehon kompensattoreille ovat TCR/FC tai TCR/TSC/FC. (Static Var compensation (SVC) 2024.)



Kuvio 26. Staattinen loistehon kompensattori SVC (Alsammak 2017, 20)

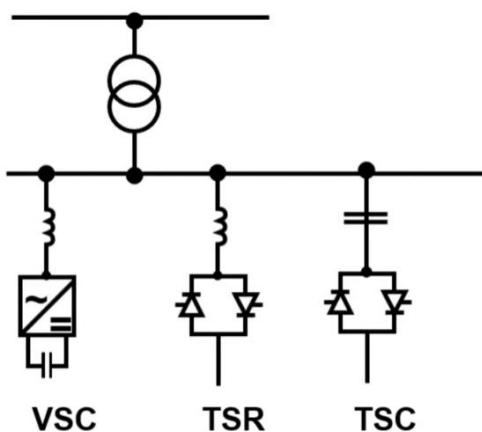
2.5.9 Loistehon säätö staattisella synkronikompensoattorilla eli STATCOM:illa

STATCOM:illa on tärkeä rooli moderneissa sähkösiirtoverkoissa. Se tarjoaa dynaamista jännitteen hallintaa sekä loistehon säätöä tukemaan sähkösiirtojärjestelmän stabiiliutta, tehokkuutta ja luotettavuutta. Fingridin vuonna 2024 julkaiseman artikkelin Uusi tekninen ratkaisu parantaa tuulivoimavaltaisen verkon käyttövarmuutta (2024) mukaan tahtikoneilla on luonnollinen ominaisuus vastustaa jännite- ja taajuusmuutoksia, mikä puuttuu tuulivoimaloilta. Alueellisesta verkosta voi tulla epästabiili jännite- ja taajuusmuutosten vuoksi korkean tuulituotannon ja keskeytystilanteiden aikana ja tuulipuistoja voi irrota verkkovikojen seurauksena verkosta. Jännitemuutoksia on mahdollista vastustaa tahtikoneiden tavoin käyttämällä STATCOM:ia. Siinä on erittäin nopea ohjelmallinen säätö, joka mahdollistaa tuulivoimatuotannon stabiiliutta ja tuulivoimatuotannon alueellisen vähentämisen tarve pienenee. (Uusi tekninen ratkaisu parantaa tuulivoimavaltaisen verkon käyttövarmuutta 2024.)

Gonzálezin, Martínez-Rojasin, Sumperin, Gomis-Bellmuntin ja Trillan (2010) mukaan IEEE määrittelee STATCOM:in rinnankytketyksi staattiseksi synkroniseksi generaattoriksi, joka toimii staattisena kompensattorina. Induktiivinen tai kapasitiivinen lähtövirta voidaan ohjata riippumatta vaihtovirtajärjestelmän jännitteestä. STATCOM tuottaa tai vaimentaa loistehoa verkosta tai verkkoon päin, jotta se voi kompensoida pienet jännitteen vaihtelut tuulivoimalan sähköverkon kytkentäpis- teessä. (González ym. 2010.)

STATCOM on nopeampi kuin SVC ja se tuottaa jatkuvasti vaihtelevaa loistehoa vastaamaan jännitevaihteluihin, mikä stabiloi verkkoa. STATCOM toimii samalla toimintaperiaatteella kuin SVC, ja siinä yhdistyy pulssinleveysmodulaation (PMW) millisekuntiluokassa tapahtuvat kytkennät. (Static compensator (STATCOM) 2024.)

Yleensä STATCOM asennetaan tuulipuiston keskijännitekiskoon, asennuksen tarkoituksena on kontrolloida jännitekuoppia, jännitteen säätelyä, tehokerrointa ja tehon virtauksen tasapainottamista (González ym. 2010). STATCOM, sekä sähkönsiirtosovelluksiin tarkoitettu Hybrid STATCOM hyödyntävät yleensä verkon ja keskijännitekiskon välistä tehomuuntajaa. Tässä kiskossa VSC on kytketty sarjaan kytkinreaktorilla. Lisäksi Hybridi STATCOMISSA TSR ja TSC lisätään rinnakkain. (Mt.) Kuvio 27. esittää hybridi STATCOM:n kytkentää keskijännitekiskon ja tehomuuntajan yhteydessä.



Kuvio 27. Hybridi STATCOM (STATCOM - hybrid 2024)

2.5.10 Rinnakkaiskondensaattoriparistot ja sarjakondensaattorit

Rinnakkaiskondensaattoriparistoja käytetään jakeluverkoissa loistehon tuotantoon. Rinnakkaiskuristimia eli reaktoreita käytetään kondensaattoreiden lisäksi voimansiirtoverkossa loistehon tasapainottamiseen. Reaktoreilla kompensoidaan pienen kuorman aikana johtojen kehittämä ylimääräinen loisteho. (Elovaara & Haarla 2011, 225.)

Sarjakondensaattorilla pienennetään johdon päiden välistä induktiivista reaktanssia. Sarjakondensaattori kytketään johdon kanssa sarjaan. Sarjakondensaattori lieventää induktiivisen reaktanssin

kautta pitkiin siirtoyhteyksiin liittyviä kulma- ja jännitestabiilisuusongelmia ja lisää siirtokapasiteettia. Johdon kuormittuessa ottama loisteho ja johdon päiden välinen kulmaero pienenevät sarjakondensaattorin vaikutuksesta. Sarjakondensaattorin etuihin kuuluu että, sen kehittämä loisteho on verrannollinen johdossa kulkevan kuormitusvirran suuruuteen. Haittapuolina on sarjakompensoidulla johdolla tai sen lähistöllä sattuvien vikojen vikavirtojen kulkeminen sarjakondensaattorin kautta, mikä aiheuttaa ylijännitteitä, jotka on purettava monimutkaisilla ylijännitesuojajärjestelmillä. (Mts. 232.)

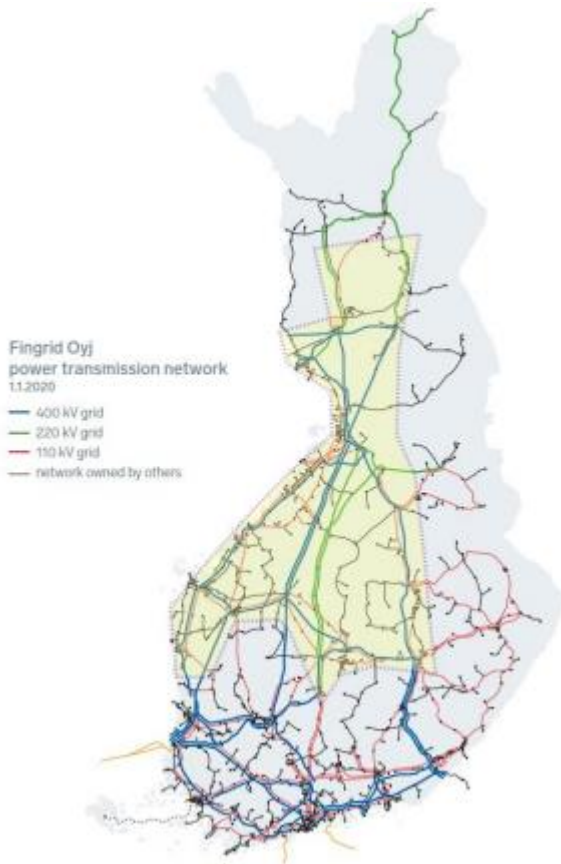
Jos verkossa on suuria sarjakondensaattoreita tai kun sarjakondensaattori sijaitsee lähellä sähköasemaa, verkon relesuojaus on mutkikkaampaa. Kompensoidulla johdolla, ja usein myös läheisillä johdoilla joudutaan käyttämään sarjakompensoidulle johdolle soveltuvia distanssireleitä tai erilistä viestiyhteyttä edellyttäviä differentiaalireleitä. (Mts. 235–236.)

Tuulivoimaloiden ja sarjakondensaattorien välisessä alisykronisessa vuorovaikutuksessa tuulivoimala ja sarjakompensoitu siirtoverkko vaihtavat energiaa jollakin alisykronisella taajuudella viiden ja 45 Hertzin välillä. Alisykronisen taajuuden aiheuttaman ilmiön vuoksi tuulivoimalaitokset ja sarjakondensaattorit saattavat irrota verkosta tai vaurioitua. (Janhunen 2022, 1.)

Sarjakompensoidun verkon läheisyyteen liittyvät suuntaajakytketyt voimalaitokset voivat joutua alisykroniseen vuorovaikutukseen sarjakompensoidun verkon kanssa (Erytistarkasteluvaatimukset suuntaajakytketyille voimalaitoksille liittyen alisykroniseen vuorovaikutusriskiin 2022, 1). Kuviossa 28. on esitetty sarjakompensoitu verkko. Voimalaitoksen ja verkon välillä tapahtuva vaimentumaton alisykroninen vuorovaikutus voi aiheuttaa merkittäviä alisykronisia virtoja ja jännitteitä. Alisykronointinen vuorovaikutus tulee ottaa huomioon voimalaitoksen suunnittelussa ja toteutuksessa. Tavoitteena on estää voimalaitoksen toistuva lyhytaikainen epäkäytettävyys laitteiden rikkoutuessa. (Mts. 1.)

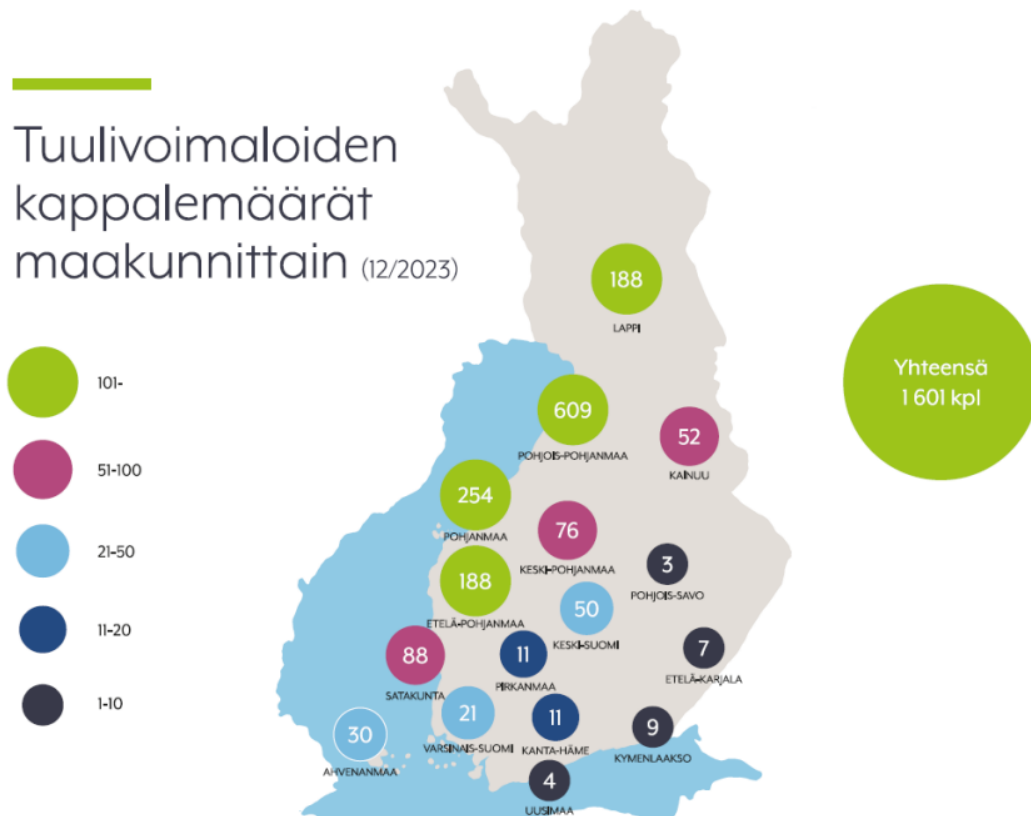
Tyyppin 3 (DFIG) voimalaitoksessa on ominaisuutena negatiivinen resistanssi alisykronisten taajuusalueiden osalta. Tämän voimalaitoksen ohjauksessa oleva suuntaaja mahdollistaa vaikutuksen tuulivoimalan vasteeseen ja samalla vähentää aliharmonista resonanssia. Mikäli alisykronista

vuorovaikutusta ei havaita ja sitä vastaan suojauduta se voi vaurioittaa tuulivoimalaitosta tai sarjakondensaattoria. Alisynkroninen suojaus on toteutettava ensisijaisesti tuuliturbiinin suuntaajakettyyn yksikköön. (Kuusela 2021, 8–16.)



Kuvio 28. Sarjakompensoitu verkko korostettuna keltaisella (Erytistarkasteluvaatimukset suuntaajaketyille voimalaitoksille liittyen alisynkroniseen vuorovaikutusriskiin 2022, 7)

Suomen Tuulivoimayhdistyksen mukaan Tuulivoima suomessa 2023 (2023), suurin osa jo rakennetuista tuulivoimaloista sijaitsee sarjakompensoidun verkon alueella, kuvio 29. Rakenteilla olevat hankkeet (2024) listauksen mukaan myös suurin osa rakenteilla olevista hankkeista sijoittuu sarjakompensoidulle alueelle.



Kuvio 29. Suomen tuulivoimaloiden kappalemäärät maakunnittain 12/2023 (Tuulivoima Suomessa 2023 2023, 16)

2.5.11 Venttiilisuojat, varokkeet ja varokeautomaatit

Venttiilisuojat ovat käytetyin komponentti ylijännitesuojaukseen kaikilla jännitetasoilla. Venttiilisuojilla voidaan alentaa transienttiylijännitteiden suuruutta paikallisesti. Käyttötaajuuksien ylijännitteiden rajoittamiseen venttiilisuojien energianpurkautumiskyky ei yleensä riitä, poikkeuksena sarjakondensaattoreiden yli vaikuttavien jännitteiden rajoittaminen. (Elovaara & Haarla 2011, 237.)

Varokkeiden käyttö suurjännitteillä on rajoittunut pienten tehomuuntajien, jännitemuuntajien, moottorien, kondensaattoreiden ja kaapeleiden oikosulkusuojaukseen. Varokeautomaatit ovat ylivirtasuojia, joissa sähkömagneetin avulla kosketin avataan suurilla ylivirroilla hetkellisesti. Varokeautomaatteja käytetään kytkinlaitosten apujännitepiireissä runsaasti, koska varokeautomaatin laukeamisesta voidaan saada hälytys. Varokeautomaatit rajoittavat virtaa. Sarjaan kytketyt varokeautomaatit mahdollistavat selektiivisen suojauksen. (Mts. 244–248.)

2.6 Relesuojaus

2.6.1 Sähköverkon relesuojaus

Oikosulkusuojaukseen käytetään ylivirtarelettä, differentiaalirelettä ja distanssirelettä. Maasulkusuojaukseen käytetään ylivirtarelettä, distanssirelettä ja suunnattua maasulkurelettä. Relesuojauksen on oltava hyvin toteutettu. Relesuojausjärjestelmä on selektiivinen, nopea, luotettava, herkkä ja se toimii myös poikkeuksellisissa käyttötilanteissa. Selektiivisyydellä tarkoitetaan, että vain vikaantunut komponentti erotetaan muusta verkosta. Selektiivisyys tarkoittaa myös sitä, että kaikki verkon osat on suojattu jollain suojaareleellä. Vian poistamisessa releen toimintanopeus on tärkeää, koska mitä nopeammin vika saadaan korjattua, sitä vähemmän vahinkoa se aiheuttaa ihmisille ja laitteille. Nopea reagointi minimoi vikavirrasta johtuvat mahdolliset vaaratilanteet. (Elovaara & Haarla 2011, 340–342.)

Suojattava sähköverkko on jaettu eri suojausalueisiin virtamuuntajien avulla, ja nämä alueet voidaan erottaa toisistaan katkaisijoilla, jotka tekevät alueista jännitteettömiä. Lisäksi jokainen verkon kohta kuuluu vähintään kahden eri suojaareleeseen suojausalueeseen, mikä lisää suojaustoimintojen luotettavuutta. Tämä kahdennettu suojajärjestelmä varmistaa, että vikatilanteet voidaan havaita ja korjata tehokkaasti, minimoiden samalla vahingot ja varmistaen sähköverkon jatkuvan toiminnan. (Mts. 343.)

Tuulipuiston sähköaseman suojaus on samanlainen kuin perinteisen sähköaseman suojaus (Anya-Lara ym. 2018, 180). Verkon laitteiden suojauksesta huolehtii kokonaisuus, joka muodostuu mittamuuntajista, suojaareleista ja katkaisijoista. Tiedonsiirto samalla asemalla sijaitsevien laitteiden välillä tapahtuu johtimilla tai valokuidulla, tietoliikenneyhteydellä hoidetaan eri sähköasemilla sijaitsevien releiden välinen tiedonsiirto. (Elovaara & Haarla 2011, 335.)

Releet tarkkailevat mittaamia suureita ja ne havahtuvat, toimivat ja palautuvat mittaamiensa suureiden perusteella. Niin kauan kuin releen tarkkailema suureen arvo ei muutu, se pysyy normaalitilassaan. (Mts. 344.) Lehtimäen (2017, 13–15) mukaan tuulipuiston sähköasemalla käytetään virtareleitä, differentiaalireleitä, jännitesuojia ja taajuussuojia.

2.6.2 Virtareleet

Maasulkusuojana voidaan käyttää ylivirtareleitä, jotka asetetaan mittaamaan nollavirtaa nollavirtareleellä eli vaiheitten summavirtaa. Ylivirtarele toimii virran ylittäessä sille asetetun arvon. Ylivirtarele ei havaitse virran suuntaa, joten se ei ole paras vaihtoehto silmukoidun verkon suojaukseen. Säteisverkossa ylivirtarelettä voidaan käyttää silloin kun pienin vikavirta on suurinta kuormitusvirtaa suurempi. Ylivirtarelettä voidaan käyttää säteisverkossa varasuojana, mutta selektiivisyyden saavuttaminen vakioaikareleellä on vaikeaa ja toisaalta käänteisaikareleen laukaisuaikat tulevat joissain vioissa liian pitkiksi. (Elovaara & Haarla 2011, 340–346.)

Vakioaikaylivirtarelettä voidaan käyttää suojaamaan säteisjohtoa, muuntajaa, reaktoria, kondensaattoria ja generaattoria. Käänteisaikaylivirtarelettä käytetään silmukkaverkossa. (Mts. 346.)

2.6.3 Distanssireleet ja differentiaalireleet

Distanssirele havaitsee vian suunnan, joten sitä käytetään silmukoidussa verkossa, koska vikavirta voi tulla mistä suunnasta tahansa. Silmukoidussa verkossa pienin vikavirta on yleensä suurempi, kuin suurin kuormitusvirta. (Elovaara & Haarla 2011, 354.)

Differentiaalirele on muuntajan tärkein suojarle ja sitä käytetään myös yksinkertaisten kiskojärjestelmien suojaukseen. Muuntajan differentiaalireleillä havaitaan virtamuuntajaan aiheutuvat riittävän suuret erovirrat. Erovirtoja aiheuttaa, maasulut, oikosulut, käämisulut ja kierrossulut. (Mts. 355.)

2.6.4 Muut tuulipuistossa käytettävät sähköiset releet

Jänniterelettä käytetään yleisemmin rinnakkaiskompensointilaitteiden jännitteensäätäjien täydennyksenä. Yli- ja alajännitereleet toimivat jännitteen ylittäessä tai alittaessa verkon sallitut arvot. Nollajänniterelettä käytetään 110 kV:n verkossa. Ali- ja nollajänniterelettä käytetään yhdessä taajuusreleen kanssa irrottamaan johdonvarsigeneraattorit verkosta, kun pikajälleenkytkennässä on jännitteetön väliaika. (Elovaara & Haarla 2011, 356.) Nollajännitesuojaa käytetään, kun virtaan perustuvaa maasulkusuojasta ei voi käyttää tai sitä käytetään varasuojana (Lehtimäki 2017, 14).

Taajuusrele mittaa vaihtojännitteen taajuutta ja se toimii verkon taajuuden poiketessa asetellusta. Taajuusrelettä käytetään tehonvajaussuojauksessa sekä johdonvarsigeneraattoreiden irrottamisessa verkosta, kun johdolla on vika. Taajuusrelettä ja jänniterelettä käytetään yhdessä johdonvarsigeneraattoreissa irrottamaan generaattori pika- tai aikajälleenkytkennän jännitteettömänä aikana. poikkeaa (Elovaara & Haarla 2011, 357.)

110 kV:n verkkoon kytkettyjen johdonvarsigeneraattoreiden suojaus poikkeaa sähköasemalle kytkettyjen generaattoreiden suojauksesta. Jos generaattoriin kytketylle johdolle tulee maa- tai oikosulku, johtokatkaisijat aukeavat johdon molemmista päistä ja generaattori jää syöttämään muusta verkosta irronnutta saareketta. Tällaisessa tilanteessa generaattori jatkaa vikavirran syöttämistä, joten se on irrotettava verkosta, koska jälleenkytkennät eivät onnistu sillä valokaari ei sammuu eikä myöskään pikajälleenkytkentä onnistu, koska ilma ei ole saavuttanut läpilyöntilujuuttaan. Saarekkeen taajuus laskee, jos generaattorin teho ei riitä syöttämään kuormaa, jolloin taajuusrele irrottaa generaattorin verkosta. Taajuusrele ei irrota generaattoria verkosta, jos generaattorin syöttämä teho on yhtä suuri kuin saarekkeen kuorma. Taajuus- ja jänniterelettä voidaan käyttää yhdessä, jolloin taajuusrele lähettää laukaisukäskyn, jos jänniterele on havahtunut. (Mts. 377–388.)

2.6.5 Tehomuuntajan suojaus

Muuntajan koko vaikuttaa muuntajan suojaustapaan. Suojausalueeseen kuuluu virtamuuntajien välinen alue, jossa vian esiintyessä laukaistaan välittömästi kaikki muuntajan katkaisijat (Elovaara & Haarla 2011, 378). Tuulipuiston päämuuntajaan kytketyt keski- ja korkeajännitekiskot suojataan kiskosuojareleellä, differentiaalireleellä, kaasureleellä, virtausreleellä ja katkaisijan vikasuojalla (Anya-Lara ym. 2018, 180).

Kiskonsuojarele laukaisee katkaisijat, jotka ovat kytkettyinä vialliseen kiskoon. Kaikilla 400 kV asemilla on kiskonsuojareleet, joillakin 110 kV:n muuntoasemilla ja kaikilla SF₆-kaasueristeisillä sisäkytkinlaitoksilla on varsinaiset kiskonsuojareleet. Mikäli jokainen johto on kytketty omalla katkaisijalla kumpaankin kiskoon (kaksikatkaisijajärjestelmä) kaikki johdot jäävät laukaisun jälkeen ehjään kiskoon. (Elovaara & Haarla 2011, 380).

Differentiaalirele on muuntajan pääsuojarele, joka mittaa muuntajaan tulevia ja siitä lähteviä virtoja. Kaasureleet eli Buchholz-releet ovat ei-sähköisiä releitä, joissa pieni kaasumäärä aiheuttaa hälytyksen ja isompi kaasumäärä laukauksen. Kaasua muodostuu muuntajassa vian seurauksena öljystä ja se kerääntyy kaasureleeseen. Käämikytkimeen asennettu virtausrele on myös ei-sähköinen rele, joka on asennettu öljytilan paisuntaputkeen. Se laukaisee muuntajan irti verkosta, jos käämikytkimen suorittama kytkentä epäonnistuu ja muodostuu valokaari. Käämikytkimessä voi olla myös ylipaineventtiili, joka estää käämikytkimen räjähdysten, jos käämikytkimen toiminta epäonnistuu. Katkaisijavikasuojat kuuluvat osana aseman kiskosuojaan. Ne toimivat, mikäli viallisen lähdön katkaisija ei toimi, jos asemalla on monta johtoa ja yhdellä johdolla on vika, vikavirta muilla johdoilla voi olla niin pieni, että vain viallisen johdon releet havahtuvat. Jos viallisen johdon katkaisija ei toimi eikä vikasuojaa ole mikään suoja ei erota vikaa verkosta. (Mts. 378–384.)

2.6.6 Sähköasema-automaatio

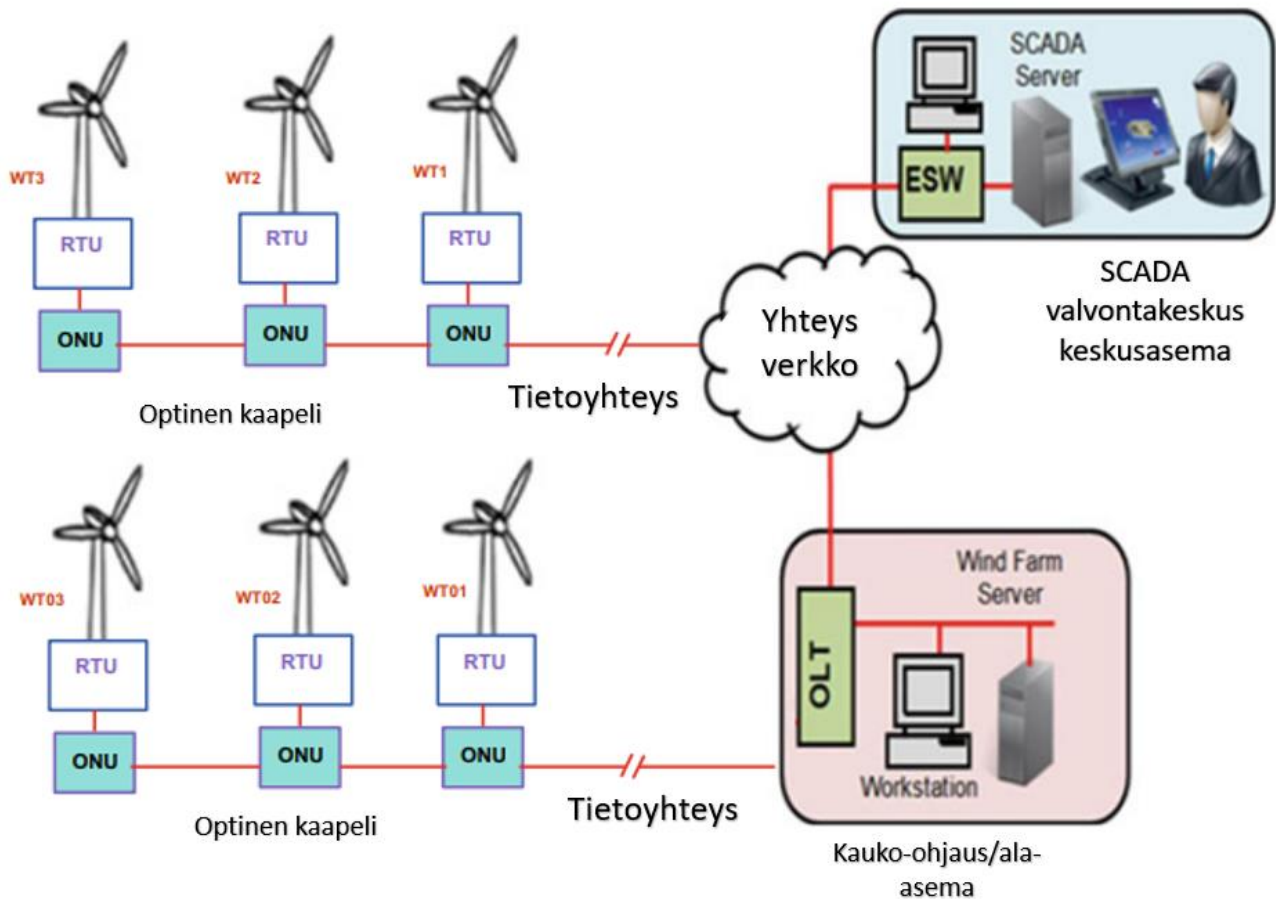
Sähköverkon tulee toimia mahdollisimman taloudellisesti ja käyttövarmasti, jolloin tuotetun ja kulutetun sähkön välillä vallitsee tasapaino. Energian siirtoprosessin hallinnasta vastaa verkon käyttö, jonka tehtävänä on suorien valvonta- ja ohjaustoimenpiteiden avulla vastata energian siirtoprosessin hallinnasta. Jotta siirtoprosessia voidaan hallita, tarvitaan paljon erilaista tietoa, kerätyn tiedon prosessointia ja tietojen vaihtoa yhteiskäyttöjärjestelmään liittyvien muiden yhtiöiden ja toimijoiden kanssa. Kansainvälisesti tällaista laaja-alaista tietojen keruu järjestelmää kutsutaan SCADA:ksi. Sähköaseman automaatiojärjestelmän tehtävänä on tarjota paikallisesti tai kaukokäyttöjärjestelmän kautta pääsyn voimajärjestelmään, mahdollistaa paikalliset manuaaliset ja automaattiset toiminnot, huolehtia tarvittavista tiedonsiirtolinkeistä, liittynnöistä ja tiedon koodaamisesta kaikkien laitteiden ymmärtämään muotoon (Elovaara & Haarla 2011, 385–386). SCADA:n kautta saadaan usein ja reaaliaikaisin tieto tapahtumista ja kytkinlaitteiden tiloista. Yhdistettynä SCADA:n keräämät tiedot yksityiskohtaisiin verkko- ja asiakastietoihin on mahdollista kehittää toimintoja verkoston normaalitilanteen seurantaan, käytön suunnitteluun sekä häiriötilanteiden hallintaan. (Lakervi & Partanen 2008, 237).

SCADA- järjestelmä tuulipuistossa valvoo ja mahdollistaa käynnistys- ja pysäytystoiminnot koko puistossa, turbiiniryhmissä tai yksittäisessä turbiinissa (Sayed, Eltamaly & Abo-Khalil 2021, 116). Tuulipuistoissa SCADA- järjestelmä käsittelee syöttö tai lähtö signaaleja (I/O-signaaleja) ja hälytyk-

siä, yleensä 10-minuutin intervalleissa, hälytysignaalit käsitellään kuitenkin välittömästi. Tuulipuistoissa taloudellisesti merkittävimmistä signaaleista kuten tuulen nopeudesta ja tuotetusta tehosta lasketaan minimi, maksimi, keskiarvo ja keskihajonta, jotta ne voidaan rekonstruoida jälkikäteen. Suurin osa tiedosta on lähtötietoa, osa tiedosta on syöttötietoa valvomosta turbiiniin. Yhdessä 5 MW:n tuuliturbiinissa voi olla 4–500 I/O-kanavaa, kun taas 500 MW fossiilisilla polttoaineilla käyvässä generaattorissa on 1–2000 I/O-kanavaa. (Tavner 2021, 181.)

Tuulipuiston SCADA- järjestelmä voidaan asettaa pysäyttämään turbiinit, jotka voivat aiheuttaa välkyntää sähköjärjestelmän kriittisissä tilanteissa. Pysäyttämisen hallinta voidaan tehdä ajastimella tai valon intensiteettiä mittaamalla, jolloin tuotetusta tehosta menetetään vain pieni osa. (Burton ym. 2021, 687.)

Asemien päätelaitteet RTU:t keräävät tietoja, joiden avulla on toteutettu kentän ohjaukset, mahdolliset säädöt kuten loistehon tuotannon ohjaus ja jännitteen säätö, kentän ja laajempien kokonaisuuksien suojaustoiminnot sekä häiriöpiirturi- ja tapahtumakirjausjärjestelmät. RTU lähettää keräämänsä tiedot eteenpäin SCADA- järjestelmälle. (Elovaara & Haarla 2011, 387.)



Kuvio 30. Viestintäjärjestelmän rakenne (Sayed ym. 2021, 120, muokattu)

SCADA-järjestelmä vastaa kaiken tiedon keräämisestä ja hallinnasta, joka on peräisin kaukoaseman tuuliturbiinin etäterminaalilaitteelta (RTU) ja SCADA-palvelimelta ohjauskeskuksen pääasemaan, tarkoituksenaan valvonta ja ohjaustoiminnot. SCADA-järjestelmän viestintä turbiinien kanssa on kuvattu kuviossa 30. Kaikki tuulivoimapuiston tiedot kerätään ja lähetetään viestintäyhteyden yli, kuten optisen kuitukaapelin, valvontakeskukselle (keskusasema). SCADA-palvelin tuulivoimapuistossa on teollisuustietokone, joka katsotaan SCADA-järjestelmässä pääkoneeksi, kun taas kaikki RTU:t toimivat orjina. Toisinaan yksi RTU toimii masterina kerätäkseen tietoa orja-RTU:lta. (Sayed ym. 2021, 119.)

2.7 Tuulivoima osana sähköjärjestelmää

2.7.1 Sähköjärjestelmän tasapaino

Tuulivoiman tuotanto riippuu sääolosuhteista. Tuulivoiman tuotantovaihtelut tasapainotetaan verkossa. Reservi- ja säätösähkö mahdollistavat nopean reagoinnin sähköverkon tasapainottamiseksi. Tuulivoimatuotannon vaihdellessa säätösähköjärjestelmä voi käyttää säätövoimaa tai taajuusohjattua reservijärjestelmää palauttamaan tasapainon.

Sähköntuotanto, joka otetaan nopeasti käyttöön tasaamaan kulutuksen huippuhetkiä tai häiriötilanteita, kutsutaan säätövoimaksi. Suomen suurin säätövoima on vesivoima ja naapurimaista ostettu sähkö. Se vastaa noin 70 % sähköntasaustarpeesta vuorokausitasolla. (Säätövoiman tarve kasvaa 2024; Tuulivoiman vaikutukset sähköverkkoon n.d.)

Sähkön reservimarkkinat ovat mekanismeja, jotka varmistavat sähköjärjestelmän tasapainon ja häiriöttömän toiminnan. Reservi- ja säätösähkömarkkinat ovat osa sähköntuotannon ja jakelun järjestelmää. Fingridin Reservimarkkinat (2023) mukaan Suomessa sähköverkon taajuus on 50 Hz, joka kertoo sähkön tuotannon ja kulutuksen olevan tasapainossa eli sähköä pitää tuottaa ja kuluttaa joka hetki yhtä paljon. Käyttötunnin aikaisten poikkeamien tasapainotukseen tarvitaan reservejä. Voimalaitokset, energiavarastot ja kulutuskohteet, jotka muuttavat tehoaan tarpeen mukaan, kutsutaan reserveiksi. Taajuusohjattua käyttöreserviä pidetään yllä 600 MW normaalitilan taajuuden säätöä varten joka hetki, taajuusohjattua häiriöreserviä ylläpidetään siten että taajuuspoikkeama on enintään 0,5 Hz. (Reservimarkkinat 2023.)

Pienen inertian tilanteita varten käytetään nopeaa taajuusreserviä (FFR). Nopeaa taajuusreserviä hankitaan vain osalle tunneista ja hankittava määrä vaihtelee. Hankittava määrä pohjoismaissa on arvioitu olevan enintään noin 300 MW. Ennalta sovituille aamun, illan ja yön tunneille käytetään automaattista taajudenhallintareserviä (aFRR). Sitä on sovittu ylläpidettävän pohjoismaissa 300–400 MW. Kantaverkkoyhtiöiden tulee lisäksi ylläpitää nopeaa häiriöreserviä oman alueensa mitoitettavan vian verran. (Mt.) Taajuusohjattu häiriöreservi FCR-D säätää nopeasti ja lineaarisesti suurimmissa taajuuspoikkeamissa. Ylössäätö tarkoittaa voimalaitoksilla tehonlisäystä ja kuormilla tehon pudotusta eli sähkön tuotantoa lisätään tai kulutusta vähennetään, alassäädöllä tarkoitetaan voimalaitoksilla tehon pudotusta ja kuormilla tehon lisäystä eli sähkön tuotantoa vähennetään tai

kulutusta lisätään. FCR-N on taajuusohjattu käyttöreservi, se säätää jatkuvasti taajuuden normaali-alueella. Sen on kyettävä sekä tehon lisäykseen että tehon pudotukseen. (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat 2023, 8–9.)

Fingrid osallistuu pohjoismaisten säätösähkömarkkinoiden ylläpitoon yhteistyössä muiden pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden kanssa. Reservitoimittajat voivat tarjota säätökykyistä kapasiteettiaan markkinoille ja saavat korvauksen, jos heidän tarjouksiaan käytetään. Pohjoismaiset kantaverkkoyhtiöt tilaavat tarvittavan määrän tarjouksia säätösähkömarkkinoilta tehontasapainon hallitsemiseksi normaali- ja häiriötilanteissa. Fingrid hankkii säätökapasiteettia markkinoilta varmistukseksi riittävän taajuuden palautusreservin tuotannon ja kulutuksen tasapainottamiseksi sekä muille siirtoverkon käyttövarmuuden tarpeille. Reservitoimittaja sitoutuu jättämään hyväksytyä kapasiteettitarjousta vastaavan määrän säätötarjouksia säätösähkömarkkinoille ja saa siitä kapasiteettikorvausta. Osallistuminen säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinoille edellyttää sopimuksen tekemistä Fingridin kanssa. (Säätösähkö- ja kapasiteettimarkkinat (mFRR) 2023.)

Tuulivoimaa voidaan käyttää seuraavissa reserveissa: FFR, FCR-D alassäätö, aFRR (automaattinen taajuudenpalautusreservi) alassäätö sekä säätösähkömarkkinoilla manuaalisessa taajuuden palautusreservissä mFRR alassäätöön (Reservituotteet ja reservien markkinapaikat, 6).

2.7.2 Mitä on inertia

Kuten luvussa 2.5.3 mainittiin, tuulivoimaloilta puuttuu tahtikoneilla oleva ominaisuus vastustaa jännite- ja taajuusmuutoksia. Leinosen (2018) mukaan Laasonen määrittelee sähköverkossa olevan liike-energian olevan inertiaa. Fysiikassa inertialla tarkoitetaan muutoksen vastustamista ja hitautta. Voimalaitoksissa ja tehtaissa liike-energia on sitoutunut pyöriviin koneisiin, jotka pyörivät samalla taajuudella sähköverkon kanssa. Huolimatta tuulivoimalan generaattorin pyörivästä roottorista, verkko ei näe sitä pyörivänä massana, koska verkon ja generaattorin välissä on taajuusmuuttaja. (Leinonen 2018.)

Yangin, Xien, Sun & Jiangin (2022, 367) mukaan perinteiset synkroniset generaattorit sähköverkossa pitävät taajuutta yllä inertian ja vaimennusominaisuuksien avulla. Laajamittainen uusiutuvien energioiden kytkentä verkkoon vähentää inertiaa ja vaikuttaa järjestelmän turvallisuuteen ja vakauteen (Yang ym. 2022, 367).

Toisin kuin perinteisessä synkronisessa generaattorissa kaksoissyötetyssä induktiogeneraattorissa (DFIG) vaihtovirtaverkkojen synkronointi tapahtuu yleensä kytkentäsilmoitettujen vaihelukituksen avulla ja toimintatila on suurimman tehopisteen seurantalatila, jolla on nolaa lähentyvä inertiatuki järjestelmälle. Jos perinteinen tahtigeneraattori korvataan laajamittaisesti, järjestelmän inertiamomentti vähenee merkittävästi, ja järjestelmän transienttitaloissa stabiilisuus on uhattuna. (Zhang, Liu, Zhao, Diao & Yu. 2022, 379).

Tahtigeneraattoreiden tuottamaa inertiaa voidaan tulevaisuudessa tuottaa virtuaalisella tahtigeneraattorilla. Virtuaalisella tahtigeneraattorilla voidaan tuottaa inertiaa tehoelektroniikkakonvertterin läpi. Virtuaalinen tahtigeneraattori jaetaan vektorisäätöön ja virtuaaliseen tahdissaolon valvontaan. Suodatetussa verkossa, joka on saatu kytkentäsilmoitettujen vaihelukituksesta, on käytössä jättämäkompensaattori, jotta virtuaalista inertiaa voidaan tuottaa. Vektorisäätöä käytetään yleisesti tuuliturbiinigeneraattoreissa, jotta vektorisäätö toimii, vaatii se kytkentäsilmoitettujen vaihelukituksen, mikä soveltuu hyvin vahvoihin verkkoihin. Virtuaalista tahdissaolon valvontaa käytetään vahvoissa ja heikoissa verkoissa eikä se tarvitse kytkentäsilmoitettua vaihelukitusta. Virtuaalinen tahdissaolon valvonta tuottaa inertiaa matkimalla pyörimisliikkeen perusyhtälöä. (Agrawal, Tyagi, Kumar & Sharma 2023.)

3 Kuvaileva kirjallisuuskatsaus

3.1 Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen määritelmä

Tämän opinnäytetyön aineistoin keruu tehtiin kuvailevalla kirjallisuuskatsauksella. Salmisen (2023, 7) mukaan kuvaileva kirjallisuuskatsaus on yksi yleisimmin käytetyistä kirjallisuuskatsauksen muodoista, joka tarjoaa laajan yleiskatsauksen tutkittavaan ilmiöön ilman tiukkoja ja tarkkoja sääntöjä. Tämän katsauksen aineistot ovat laajoja eikä niiden valintaa rajoita tiukat metodiset säännöt. Vaikka tutkittava ilmiö kuvataan laaja-alaisesti, tarvittaessa sitä voidaan luokitella ja eritellä sen ominaisuuksia. Tutkimuskysymykset ovat yleensä avoimempia kuin systemaattisessa katsauksessa tai meta-analyysissä. Kuvaileva katsaus voi toimia itsenäisenä metodina, mutta samalla se voi myös tarjota uusia näkökulmia ja tutkimusaiheita systemaattista kirjallisuuskatsausta varten. Sitä voidaan joskus kutsua myös perinteiseksi kirjallisuuskatsaukseksi. (Salminen 2023, 7–8.)

Kangasniemen, Pietilän, Utraisen, Jääskeläisen, Ahosen ja Liikasen (2013, 298) mukaan kuvaileva kirjallisuuskatsaus kokoaa aiemman tiedon, kuvailee sitä ja tarkastelee sitä jäsenetysti. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus on ymmärtämiseen tähtävää ilmiön kuvaamista ja se on aineistolähtöistä. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus vaatii syvällistä perehtymistä menetelmään, jotta sillä voidaan tuottaa luotettavaa tietoa. (Kangasniemi ym. 2013, 298.)

3.2 Aineiston keruu

Aineistoa kerättiin seuraavista tietokannoista: Aaltodoc: Aalto-yliopiston julkaisuarkisto, Arkisto (Alma Talent), Ellibs, Elsevier Science Direct, Google Scholar, Knovel, ProQuest databases and e-book collections, TEPA tekniikan termipankki, Janet Finna, Finna, IEEE Xplore digital library. Tietokantahaku suoritettiin kahdessa vaiheessa.

Ensimmäisessä kirjallisuushaussa haettiin opinnäytetöitä, kandidaatin töitä, maisterin töitä, väitöskirjoja, teknisiä ohjeita avoimesta internetistä ja oppikirjoja tuulivoiman kytkemisestä sähköverkkoon sekä tuulivoimalaitoksen generaattorityypeistä. Toisessa kirjallisuushaussa haettiin tietoa samalla tavalla, kuin ensimmäisessä haussa tuulivoiman generaattorin vaikutuksista sähköverkon stabiilisuuteen. Kolmannessa haussa haettiin tietoa avoimesta internetistä verkkosäännöistä sekä IEC-standardeista ja EU-komission asetuksista. Tietokantahaut, manuaalinen haku sekä avoimen internetin haut suoritettiin talvella ja keväällä 2024. Käytetyt hakusanat olivat suomen, ruotsin ja englanninkielisiä. Omien hakusanojen lisäksi käytettiin yleisen suomalaisen asiasanaston termejä kuten taajuusmuuttaja (YSA), eristimet (YSA) ja sähkömarkkinalaki (YSA).

3.3 Aineiston valinta

3.3.1 Tuulivoimalat osana sähköverkkoa

Tuulivoima osana sähköverkkoa täsmennetty aihe oli ”Tuulivoimaloitten liittäminen sähköverkkoon”. Tavoitteena oli selvittää 1. ”Miten tuulivoimalan kytkentä sähköverkkoon eroaa tavallisesta voimalaitoksesta” 2. ”Miten tuulivoimalaitoksista kerätty sähköenergia siirretään sähköverkkoon”. Tietokannoista haku aloitettiin Janet Finnasta, Google Scholarista, Aaltodoc: Aalto-yliopiston julkaisuarkistosta ja Ellibsistä, hakuja laajennettiin seuraavaksi Finnaan. Hakujen tarkoituksena oli löytää oikeat hakusanat sekä tarkentaa hakusanoja. Hakusanoina käytettiin: tuulivoima, sähköverkko,

kytkentä, generaattori, vindenergi, koppling, elnet, wind power, electric grid. Näiden hakujen jälkeen hakusanoiksi tarkentuivat ja muodostuivat. Hakusanoiksi muodostuivat IEC 61400, IEC 61400-21, taajuusmuuttaja, kaksoissyötetty generaattori, DFIG, sähköverkko, kytkentä, liittäminen, voimalaitos, sähkönjakelutekniikka ja sähkölaitokset. Oheiseen taulukkoon on koottu kirjallisuudessa käytetyt hakusanat ja niiden yhdistelmät hakusanoista (1.) ja tarkennetusta hausta (2.)

Taulukko 2. Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon

| |
|--|
| Käytetyt hakusanat ja niiden yhdistelmät |
| 1. Tuulivoima sähköverkko, Wind Power AND Electric Grid, vindenergi, vind energi AND elnet, sähköverkko AND kytkentä, koppling, sähkövoimalaitos AND liittäminen |
| 2. Tuulivoima AND Generaattori AND Taajuusmuuttaja, Tuulivoima AND Sisäinen AND Sähköverkko, Vomalait* AND kytkent*, IEC 61400, IEC 61400-21, sähköverk* AND kytkent* OR liittämi*, Kaksoissyötetty generaattori, DFIG |

Tuulivoiman liittämiseen sähköverkkoon liittyvän kirjallisuushaun jälkeen aineistoa rajattiin oheisen taulukon hyväksymis- ja hylkäämiskriteerien mukaisesti. Näiden kriteereiden perusteella aineistoksi valittiin 11 tutkimusartikkelia, kuusi oppikirjaa ja kaksi teknistä ohjeistusta.

Taulukko 3. Tuulivoiman liittäminen sähköverkkoon hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit

| Hyväksymiskriteerit | Hylkäämiskriteerit |
|--|---|
| -Sisällysluettelo -Tiivistelmät -Tieteelliset artikkelit, tutkimukset, väitöskirjat, oppikirjat, tekniset ohjeistukset | - Tutkimukset, jotka käsittelivät ei-suuntaaja-kytkettyjen laitosten verkkoon kytkentää -Tutkimukset, jotka käsittelivät markkinavaikutuksia |

| | |
|---|---|
| -Teokset, jotka kuvaavat sähköverkkoa | -Tutkimukset, jotka käsittelevät vedyn tuotantoa |
| -Tutkimukset, oppikirjat ja tekniset ohjeistukset, jotka kuvaavat DFIG:tä | -Sisällysluettelo |
| -Tutkimukset ja oppikirjat, jotka kuvaavat taajuusmuuttajaa | -Liian vanhat julkaisut tai julkaisut, joihin ei ollut pääsyä |

3.3.2 Suojajärjestelmät ja tuulivoimalan keskeisimmät komponentit

Sähköaseman ja tuulivoimalan keskeisten komponenttien, generaattorin suojauksen ja suodatinratkaisujen keskeisimmät tutkimuskysymykset olivat 1. ”Miten kaksoissyötetyn epätahtigeneraattorin suojaus toteutetaan”, 2. ”Miten tuulivoimapuiston sähköasema eroaa muista teollisen kokoluokan sähköasemista”, 3. ”Miten generaattorin taajuusmuuttaja suojataan”. Näillä kysymyksillä oli tarkoitus selvittää, miksi kaksoissyötetty epätahtigeneraattori on suosituin generaattorimalli teollisen kokoluokan tuulipuistoissa, miten yliaallot suodatetaan verkkoon päin, mitä eroavaisuuksia on tuulipuiston sähköasemilla perinteiseen sähköasemaan verrattuna. Tiedon hankinta suoritettiin samalla tavalla kuin ensimmäisessä haussa, tietokantahakua laajennettiin Knoveliin ja IEEE Xploreen.

Taulukko 4. Suojajärjestelmät ja tuulivoimalan keskeisimmät komponentit hakusanat

| |
|---|
| Käytetyt hakusanat ja niiden yhdistelmät |
| vindenergi AND elnet AND feltålighet, vindenergi AND effektbytare, Variable speed AND Converter, tuulivoimapui*AND nimellisteho, kolmikäämimuuntaja AND generaattori, three windings transformer AND electric grid, wind energy AND circuit breaker, DFIG LCL filter, DFIG grid side converter, sähköverk* AND stabiil*, Wind power AND SCADA, SCADA AND RTU, |

Suojausjärjestelmiin ja tuulivoimalan keskeisimpiin komponentteihin liittyvään hakuun saatiin 22 tietolähdettä, joista 13 otettiin tarkasteluun. Tietolähteitä olivat kolme oppikirjaa, yksi tekninen ohjeistus ja seitsemän tutkimusartikkelia.

Taulukko 5. Suojausjärjestelmät ja komponentit hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit

| Hyväksymiskriteerit | Hylkäämiskriteerit |
|--|----------------------------------|
| - Sisällysluettelo | -Sisältö ei saatavissa |
| -Tiivistelmä | -Sisältö ei vastannut tarpeisiin |
| -Oppikirja | -Sisällysluettelo |
| -Tutkimukset, jotka kuvaavat suodattimia | -Liian vanhoja julkaisuja |
| -Tutkimukset ja oppikirjat, jotka kuvaavat sähköasema-automaatiota | |
| -Oppikirjat ja tutkimukset, jotka kuvaavat suojausjärjestelmiä | |
| -Oppikirjat ja tutkimukset, jotka kuvaavat sähköaseman laitteita | |
| -Tutkimusartikkelit vuosilta 2019–2024 | |

3.3.3 Sähköverkon stabiilisuus ja verkkomääräykset

Sähköverkon stabiiliutta ja verkkomääräyksiä koskevat keskeiset tutkimuskysymykset olivat 1. ”Mitkä verkkomääräykset koskevat teollisen kokoluokan tuulivoimapuistoja” 2. ”Mitkä asiat vaikuttavat sähköverkon stabiilisuuteen suuntaajakytketyn tuulivoimalan tapauksessa”. Kysymyksiin yksi ja kaksi haettiin tutkimusartikkeleita IEEE Xplore-, Finna ja Knovel tietokannoista sekä avoimesta internetistä.

Taulukko 6. Sähköverkon stabiilisuus ja verkkomääräykset hakusanat

| |
|---|
| Käytetyt hakusanat ja niiden yhdistelmät |
| DFIG turbine AND grid stability, energy AND electric grid AND inertia, DFIG AND inertia |

Tieteellisiä artikkeleita löytyi kuusi kappaletta, joista kolme otettiin tarkasteluun. Hyväksymiskriteereinä olivat tiivistelmät, hylkäämiskriteereinä sisällön sopimattomuus tarpeisiin.

4 Johtopäätökset

4.1 Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen tulokset

Kirjallisuuskatsauksen tietokantahaussa ei löytynyt tutkimuksia, joissa tuulivoimaloiden kytkemistä sähköverkkoon olisi käsitelty kokonaisuutena. Opinnäytetyö koottiin lähdeaineistojen perusteella osa-alueittain, jolloin saatiin kokonaiskäsitelmä tuulivoimalaitosten kytkemisestä sähköverkkoon komponentti- ja laitteistotasolla.

Tietokannoista saadut tutkimukset ja artikkelit luettiin ja niistä poimittiin vastauksia tutkimuskysymyksiin. Tutkimuskysymykset ja tutkimukset ja artikkelit ovat liitteessä 2. Taulukossa kuvataan aineiston ja tekijän nimi, aineiston tavoite ja tarkoitus, mitä tutkittiin ja tulokset opinnäytetyön tutkimuskohtaisiin kysymyksiin. Artikkelit ja tutkimukset otettiin tähän tutkimukseen kokonaiskartoituksena.

4.2 Tuulivoimaloiden sähköverkkoon liittämisen säätely

Suuntaajakytkettyjen laitosten sähköverkkoon liittymistä määrittävät eurooppalaiset sähkön sisämarkkinat. Sähkömarkkinoiden perusteella Fingrid on määritellyt ehdot ja vaatimukset suuntaajakytkettyjen laitosten sähköverkkoon liittämiseen. Generaattoreiden verkkosäännöistä on säädetty EU-komission asetuksella 2016/631 ja ne menevät kansallisen lainsäädännön edelle. Niiden käyt-

töönnotosta vastaavat jäsenvaltiot, jotka myös varmistavat kansallisen lainsäädännön yhteneväisyyden verkkosääntöjen kanssa. Verkkosäännöt jaetaan liityntöjä, verkon käyttöä sekä markkinoita koskeviin verkkosääntöihin. (Verkkosäännöt n.d.; Frantti 2018.)

Tuulivoimaloiden sähköverkkoon liitännässä tulee noudattaa EU-komission asetusta, Fingridin voimalaitosten järjestelmätekniisiä vaatimuksia (VJV) sekä soveltuvia standardeja. Tuulivoimarakentamista säättävät lait, luvat ja asetukset, joilla varmistetaan tuulivoimapuistojen sopiva sijoitus ympäristöön.

4.3 Turbiiniteknologia ja tuulipuiston sisäinen sähköjärjestelmä

Kaksoissyötetty epätahtigeneraattori tuottaa vakiotaajuista jännitettä tuulennopeuden vaihdellessa, mikä auttaa parantamaan sähköverkon stabiiliutta. DFIG säättää pätö- ja loistehon tuotantoa, mikä mahdollistaa sen sujuvan kytkeytymisen sähköverkkoon. DFIG:n ominaisuus muuttaa tehon tuotantoa vastaa sähköverkossa tapahtuviin jännitteen- ja taajuuden muutoksiin. Taajuusmuuttajan rakenteessa oleva katkosuoja parantaa DFIG:n lähivikakestoisuutta. Ilman katkosuojaa DFIG ei pysy kytkeytyneenä verkkoon, koska roottorin puoleinen konvertteri (RSC) ei kestä roottorin suuria transientteja virtoja.

Taajuusmuuttaja, generaattori ja muuntaja ovat suojattu kontaktoreilla ja katkaisijoilla. Muuntamokojeisto suojaa tuulipuiston sisäistä sähköverkkoa. Tuulipuiston sisäinen kaapelointi suojataan suunnatuilla suojilla, jolloin turbiinit, joissa ei ole vikaa pysyvät kytkeytyneenä sähköaseman keski-jännitekojeistoon.

4.4 Tuulipuistojen sähköasemien laitteisto

Tuulipuiston sähköasemien laitteisto on samankaltainen kuin perinteisen sähköaseman. Relesuojaus on mutkikkaampi kuin perinteisen sähköaseman. Tehomuuntajan jänniteensäätörele pitää matalamman jännitteen puolen lähellä asetusarvoa ja antaa käämikytkimelle käskyn muuttaa muuntosuhdetta, mikäli jännitteessä tapahtuu muutoksia. Tuulipuistoissa käytetään muitten releitten lisäksi jänniterelettä, taajuusrelettä ja nollajännitesuojaa. Taajuusrele irrottaa tuulivoimalan generaattorin verkosta vikatilanteessa, jolloin generaattori jää saarekekäyttöön. Tuulipuistoissa on

SCADA-järjestelmä, jolla valvotaan tuulipuiston toimintaa. SCADA-järjestelmän avulla voidaan pysäyttää turbiinit häiriötilanteissa. Järjestelmää käytetään myös tuulipuiston normaalitilanteen seurantaan, käytön suunnitteluun sekä häiriötilanteiden hallintaan.

Kaksoissyötetyn epätahtigeneraattorin ominaisuus on taajuuden ja jännitteen tasapaino. DFIG:n tuottamassa tehossa on kuitenkin puutteita, joita korjataan sähköasemilla kompensoimislaitteistoilla. Staattisella loistehon kompensoimislaitteistolla (SVC) voidaan parantaa generaattorin tuottamaa tehon laatua. Staattisella synkronikompensaattorilla (STATCOM) hallitaan tilanteita, joissa tuulivoimalat irtoavat verkosta. STATCOM:n toimintaperiaate on samanlainen kuin staattisen loistehon kompensoimislaitteiston, mutta se toimii staattisena synkronisena generaattorina.

Sarjakompensoidussa verkossa suuntaajakytketyt laitokset aiheuttavat alisykronista vuorovaikutusta. Alisykronisen vuorovaikutuksen vuoksi tuulivoimalat saattavat irrota verkosta. DFIG-tyyppisessä voimalaitoksessa alisykroninen suojaus tulee kytkeä taajuusmuuttajaan.

4.5 Sähköverkon tasapaino

Sähkön tuotannon ja kulutuksen ollessa tasapainossa Suomen sähköverkon taajuus on 50 Hz. Sähkön reservimarkkinoilla varmistetaan sähköjärjestelmän tasapaino. Nopeaa taajuusreserviä käytetään pienen inertian tilanteita varten.

Taajuusmuuttajaohjatut generaattorit eivät tuota inertiaa sähköjärjestelmään ja sähköjärjestelmässä tapahtuvan muutoksen tapahtuessa tuulivoimalat eivät tasapainoita sähköjärjestelmää. Säättövoimaa käytetään tasaamaan sähkönkulutusta. Suomessa säättövoimana käytetään pääasiassa vesivoimaa ja sitä käytetään pienen inertian tilanteissa.

5 Pohdinta

5.1 Tulosten arviointi ja hyödynnettävyys

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia tuulivoimaloitten teknistä liittämistä sähköverkkoon. Työn tuloksena saatiin selvitys, jota opiskelijat voivat hyödyntää tuulivoimaan liittyvissä

opinnoissaan. Työn avulla opiskelijat saavat käsityksen yleisimmästä käytössä olevasta tuulivoimageraattorityypistä, suuntaajakytkettyjen laitosten verkkoon liittäminen säätelystä, tuulivoimaloihin liittyvästä relesuojauksesta, tuulivoimaloitten sähköasemien kompensoimislaitteista ja tuulivoimaloissa käytettävästä sähköasema-automaatiosta.

Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen avulla voitiin muodostaa johtopäätökset tuulivoimaloitten teknisestä liittämisestä sähköverkkoon ja säätövoiman markkinamekanismeista. Kirjallisuuskatsauksesta saatiin myös tietoa tekniseen liittämiseen liittyvistä uusista näkökulmista.

5.2 Luotettavuus

Tämän opinnäytetyön tietoperusta tehtiin kirjallisuushakujen avulla luotettavista tietokannoista sekä avoimesta internetistä saatavilla dokumenteilla. Kirjallisuushaussa käytettiin alkuperäisiä lähteitä kolmea poikkeusta lukuun ottamatta. Tähän työhön valitulle aineistolle oli määritelty hyväksymis- ja hylkäämiskriteerit. Kirjallisuushaun prosessi on kuvattu kappaleessa kolme.

Tämä opinnäytetyö on ollut tarkistettavana ja kommentoitavana IEC:n teknisen komitean asiantuntijalla. Tarkistuksessa huomattavat virheet ja epäkohdat korjattiin hänen antamien tietojen mukaan.

5.3 Eettisyys

Opinnäytetyössä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä ja Jyväskylän ammattikorkeakoulun ohjeistusta lähdeviitteiden merkitsemisestä. Eurooppalaisen tutkimuseettisen ohjeistuksen mukaan (Allea 2023, 5) hyvät tieteelliset käytännöt ovat luotettavuus, rehellisyys, arvostus ja vastuunkanto. Luotettavuudella varmistetaan tieteellisen toiminnan laatu suunnittelussa, menetelmissä, analyyseissä ja voimavarojen käytössä. Rehellisyys edellyttää avointa viestintää oikeudenmukaisesti, puolueettomasti ja salaamatta yksityiskohtia. Osoitetaan arvostusta kollegoita, tieteellisen toiminnan osapuolia, yhteiskuntaa, ekosysteemejä, ympäristöä ja kulttuuriperintöä kohtaan. Kannetaan vastuu koko tieteellisen toiminnan elinkaaresta julkaisemiseen ja vaikutuksiin asti (Mts. 5.)

Tämän opinnäytetyön tekemisessä käytetyt tietolähteet perustuivat jo olemassa olevaan tutkittuun tietoon ja tietolähteiden luotettavuus otettiin huomioon. Kirjallisuuskatsauksessa kerätty tieto tutkittiin huolellisesti, jotta tuloksista saatiin oikeat.

Eettiset kysymykset tuulivoiman liittämässä sähköverkkoon ovat häiriöt sähköjakelutilanteessa; kuinka varmistetaan sähkön jakelu. Tämä voidaan ratkaista vastuullisella suunnittelulla noudattamalla standardeja ja säännöksiä sekä avoimella yhteistyöllä verkkoyhtiöiden kanssa. Häiriötilanteessa tarvitaan varavoimaratkaisuja sekä häiriön ehkäisemiseksi tarvitaan myös jatkuvaa sähköverkon tarkkailua.

5.4 Jatkotutkimusehdotukset

Tämän opinnäytetyön tulosten perusteella esitetään jatkotutkimusehdotukseksi tuulivoimaloista tuotettavan sähköenergian varastointiin liittyvät teknologiat, jotta tuulivoimaloissa tuotettu suuri energiamäärä saadaan varastoitua tehokkaasti ja otettua käyttöön, mikäli sähköverkon tasapaino on uhattuna. Jatkotutkimuksena voidaan myös tutkia miten kysynnänohjausjärjestelmät ja niihin liittyvä kyberturvallisuus toteutetaan tulevaisuudessa.

Lähteet

- ABB wind turbine converters. 2019. ABB. PCS6000, full power converter, up to 15MW. pdf-tiedosto. Viitattu 9.2.2024. https://library.e.abb.com/public/32e7505899a64a8c9005133829458579/PCS6000_wind_turbine_converter_catalog_3BHS351272_RevD_EN.pdf?x-sign=MJQ601cVNbZtgF7kWIok5TDg19TpXdkvOtfI4Dn8I1216J4NGGC7w+kchDbCIE48
- AHXAMK-W 19/33 (36) kV 3-johdin. N.d. Reka by Nexans. Keskiännitekaapeli esite. Viitattu 22.2.2024. <https://www.reka.fi/tuoteryhma/ahxamk-w-19-33-36-kv-3-johdin/>
- Agrawal, S. Tyagi, B. Kumar, V. & Sharma P. 2023. Enhancing Grid Stability through Adaptive Damping and Inertia Control in DFIG-Based Wind Turbines with VSync. IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG). Viitattu 11.3.2023. <https://janet.finna.fi/IEE-EXplore>
- Allagui, M. Hasanoui O.B & Belhadj, J. 2014. Grid Support Capabilities of Direct Drive Wind Turbines During Faults for Uninterrupted Operation Mode. Tutkimusartikkeli Research Gate- sivustolla. 2. Viitattu 12.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/268030096_Grid_Support_Capabilities_of_Direct_Drive_Wind_Turbines_During_Faults_for_Uninterrupted_Operation_Mode
- Allea. 2023. The European Code of Conduct for Research Integrity. 2023, uudistettu painos. Viitattu 1.4.2024. <https://allea.org/wp-content/uploads/2023/06/European-Code-of-Conduct-Revised-Edition-2023.pdf>
- Alsmmak, A. N. 2017. Transient Stability Improvement of Multi-machine Power Systems Using Modern Energy Storage Systems. Tutkimusartikkeli Research Gate-sivustolla. 20. Viitattu 27.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/319269680_Transient_Stability_Improvement_of_Multi-machine_Power_Systems_Using_Modern_Energy_Storage_Systems
- Anya-Lara, O., Campos-Gaona, D., Moreno-Goytia, E & Adam, G. 2014. Offshore Wind Energy Generation: Control, Protection, and Integration to Electrical Systems, John Wiley & Sons, Incorporated, 2014. Viitattu 30.3.2024. https://janet.finna.fi/ProQuest_Ebook_Central.
- Automaattinen ali- ja ylitaajuussuojajärjestelmien toteutus Suomessa. 2021. Fingrid Oyj. Järjestelmän varautumissuunnitelma. Pdf-tiedosto. Viitattu 4.3.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/verkkosaannot/automaattisten-ali--ja-ylitaajuussuojajarjestelmien-toteutus-suomessa-2021.pdf>
- Bedalov, Z. 2020. Practical power plant engineering: A guide for early career engineers. Hoboken, New Jersey: Wiley. Viitattu 22.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.

- Bošnjaković, M., Katinić, M., Santa, R. & Marić, D. 2022. Wind Turbine Technology Trends. Applied Sciences. Artikkele Google Scholar- sivustolta. Viitattu 30.3.2024. <https://www.mdpi.com/2076-3417/12/17/8653>
- Brøndsted, P., Nijssen, R., Goutianos, S. 2023. Advances in Wind Turbine Blade Design and Materials. 2.p. Elsevier. Viitattu 30.3.2024. <https://janet.finna.fi/> Knovel.
- Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D. & Graham, M. 2021. Wind energy handbook. 3. painos. Hoboken, NJ: Wiley.
- Breakers and Switches Low Voltage Products. N.d. ABB. Protection and Control on Wind Turbine application. Esite. Viitattu 9.2.2023. https://library.e.abb.com/public/b835844c78725c9dc125784f0037fe9d/Brochure_Breakers_switches_LV%20products%20for%20wind%20turbines_lowres.pdf
- Elovaara, J. & Haarla L. 2011. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. Helsinki: Otatieto.
- Energiavirasto. 2019. Tuotantotukijärjestelmien yhteenveto. Pdf-tiedosto Energiaviraston sivustolta. Viitattu 23.3.2024. <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12760153/2019-yhteenveto-tuotantotukij%C3%A4rjestelm%C3%A4.pdf/3be990ca-776d-f33e-a7aa-d3e9da916d34/2019-yhteenveto-tuotantotukij%C3%A4rjestelm%C3%A4.pdf?t=1553065591000>
- Energyabcs. 2023. Exploring Wind Turbine Varieties: Type 1, 2, 3, and 4 Explained. Blogiteksti. Viitattu 19.2.2024. <https://www.energyabcs.com/wind-turbine-varieties/>
- Erytystarkasteluvaatimukset suuntaajakytketyille voimalaitoksille liittyen alisynkroniseen vuorovaihtusrisktiin. 2022. Fingrid. Asiakirja. pdf-tiedosto. Viitattu 20.2.2024. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkoon/20220211_erytystarkasteluvaatimukset_suuntaajakytketyille_voimalaitoksille---sso.pdf
- Fingridin sähköasemien laitteet. 2017. Sähkön tuotanto- ja jakelu. Kurssimateriaali. Jyväskylän ammattikorkeakoulu. Viitattu 21.2.2024.
- Frantti, A. 2018. Verkkosäännöt yhtenäistävät Euroopan energiapolitiikkaa. Artikkele Fingrid lehti.fi- sivustolla. Viitattu 30.3.2024. <https://www.fingridlehti.fi/verkkosaannot-energiapolitiikka/>
- Fox, B. 2014. Wind power integration: connection and system operational aspects. Lontoo: The Institution of Engineering and Technology. 2.p. Viitattu 1.4.2024. <https://janet.finna.fi/> Knovel
- Generators for wind power. 2019. ABB. Esite. Viitattu 1.2.2024. https://library.e.abb.com/public/cd0a90835e1249a994f0a9afcbd65289/Generators_for_wind_power_broch_9AKK105649_RevB_EN_lowres.pdf
- González, F. D., Martínez-Rojas, M., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Trilla, L. 2010. Strategies for Reactive Power Control in Wind Farms with STATCOM. Konferenssi raportti EPE Wind Energy Chapter Symposium 2010. Viitattu 27.2.2024. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/7386/Paper%20STATCOM.pdf>

Haggvist, O. 2011. Tuulipuiston sähköverkkoliittynän teknistaloudellinen analyysi. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 19.2.2024. <https://core.ac.uk/download/pdf/250163469.pdf>

Hay, J. 2021. Show me the 10^{115} ways to electrically connect 50 wind turbines. Artikkelit Traverse- sivustolla. Viitattu 9.2.2024. <https://www.traverse.ai/blog/show-me-the-ten-to-one-hundred-fifty-ways-to-electrically-connect-fifty-wind-turbines>

Heier, S. 2014. Grid integration of wind energy: Onshore and offshore conversion systems. 3. painos. Chichester, England: Wiley. Viitattu 31.1.2024. <https://janet.finna.fi/>, Ebook Central.

Heikkilä, T. 2021. Sähköntuotantolaitoksen liittäminen jakeluverkkoon. Energiateollisuus. Ohje. Viitattu 29.2.2024. https://www.oulunenergia.fi/contentassets/f227b582fd8848c0889342628a44ab7e/et-sahkontuotantolaitoksen-liittaminen-jakeluverkkoon-6_2021.pdf

Hitachi Energy. Hitachi Energy varmistaa Suomen suurimman tuulivoimapuiston verkkoliittynän luotettavuuden. STT info. Viitattu 15.2.2024. <https://www.sttinfo.fi/tiedote/70004435/hitachi-energy-varmistaa-suomen-suurimman-tuulivoimapuiston-verkkoliittynnan-luotettavuuden?publisherId=69818085>

Hyödyllistä tietoa tuulivoima-alueen maanomistajille. 2022. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Tiedote. Pdf-tiedosto Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n sivustolla. Viitattu 22.2.2024. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/hyodyllista_tietoa-1.pdf

IEC ja CENELEC. 2024. SESKO. Tietoa kansainvälisistä sähköalan standardointijärjestöistä. Artikkelit SESKO:n sivustolla. Viitattu 6.3.2024. <https://sesko.fi/standardit/iec-ja-cenelec/>

Janhunen, O.P. 2022. Kehityshanke: Tuulivoiman alisynkronisen vuorovaikutuksen riski Fingridin sarjakompensoidussa verkossa. Fingrid. Muistio. pdf-tiedosto. Viitattu 20.2.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/tki-toiminta/raportit/loppuraportti-tuulivoiman-ss0-kehitysprojekti-id-328215.pdf>

Kangasniemi, M., Pietilän, A-M., Utriainen, K., Jääskeläinen, P. Ahonen, S-M. & Liikanen, E. 2013. Kuvaileva kirjallisuuskatsaus: eteneminen tutkimuskysymyksestä jäsenettyyn tietoon. Hoitotiede 2013. Google Scholar. Viitattu 29.3.2024. https://scholar.google.fi/scholar_url?url=https://journal.fi/hoitotiede/article/download/128286/77409&hl=fi&sa=X&ei=daEGZreLDLbBy9YPgLu-guAg&scisig=AFWwaeaX_gTBy5BzYskbfrCcLrg8&oi=scholar

Kantaverkon ja asiakasliittyntöjen relesuojaus. 2022. Fingrid. Sovellusohje. Pdf-tiedosto. Viitattu 1.3.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-ja-asiakasliittyntojen-relesuojausohje.pdf>

Kantaverkkoon liittyjän opas. 2022. Fingrid. Pdf-tiedosto. Viitattu 6.2.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkkoon-liittyjan-opas.pdf> Sivustolta <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/liitynta-kantaverkkoon/kantaverkkoon-liittyjalle/>

- Kiviniemi, A. 2014. Energian matka tuulesta töpseliin. EPV Tuulivoima. Blogiteksti EPV Tuulivoima sivustolla. Viitattu 14.2.2024. <https://www.epvtuulivoima.fi/torkkolan-blogi/energian-matka-tuulesta-topseliin/>
- Kivisaari, M. 2021. 33 kV tuulivoimakaapeloinnin tutkiminen. Diplomityö. Aalto-yliopisto. Sähkötekniikan korkeakoulu. Viitattu 6.4.2024. <https://aaltodoc.aalto.fi/server/api/core/bitstreams/bf940ca8-f2d4-4b46-bf43-8af8222ea526/content>
- Koivunen, T. 2011. Tuulipuiston sähköverkon suojaus. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta. Viitattu 9.2.2024. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/6887/koivunen.pdf?sequence=4>
- Komission asetus (EU) 2016/631. 2016. Euroopan unionin virallinen lehti. Komission asetus tuottajien verkkoliitännävaatimuksia koskevasta verkkosäännöstä. Viitattu 4.3.2024. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/HTML/?uri=CELEX:32016R0631#d1e4063-1-1>
- Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet. Tampere: AMK-kustannus Oy. Tammertekniikka
- Kulmala, A. 2015. Tuulipuiston kytkentä sähköasemalle sähkön laadun näkökulmasta. Raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 19.2.2024. <https://www.elenia.fi/files/caf6bad4cdc1f1b9ea2e09a446e84b0c050d2e97/tuulivoimala-sahkoasemalla-v3.pdf>
- Kuusela, A. 2021. VJV-vaatimusten ajankohtaiset. Fingrid. Pdf- tiedosto Fingridin ajankohtaiswebinaarista 29.1. 2021. Viitattu 27.2.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/ajankohtaista-tapahtumat/20210129-vjv-vaatimusten-ajankohtaiset.pdf>
- Kurkimäki, A.S. 2017. Päämuuntajan perushuolto sekä kunnonvalvonta. Opinnäytetyö AMK. Oulun ammattikorkeakoulu. Sähkö- ja automaatiotekniikka. Viitattu 20.2.2024. https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/133181/Kurkimaki_Artturi.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3. painos. Helsinki: Otatieto Helsinki University
- Lechter, T.M. & Hansen A.D. 2023. Wind Energy Engineering - A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. 2. Painos. Elsevier. 93. Viitattu 28.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.
- Lechter, T.M. 2017. Wind Energy Engineering – A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. Elsevier. Viitattu 13.3.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.
- Lehtimäki, S. Usean kytkinlaitoskentän suojaaminen yhdellä suojalaitteella tuulivoiman liityntäsähköasemalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 23.2.2024. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/123456789/24622/Lehtimaki.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Leinonen, P. 2018. Mitä on inertia. Fingridlehti.fi. Fingridin vanhemman asiantuntijan Minna Laasosen haastattelu Fingrid lehdessä. Viitattu 8.3.2024. <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/>

Maankäyttö- ja rakennuslaki (Alueiden käyttölaki) 132/1999. Finlex. Dokumentti Finlex- sivustolla. Viitattu. 7.3.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/1999/19990132>

Madrigal, M., Uluski, R. & Mensan Gaba, K. 2017. Practical Guidance for Defining a Smart Grid Modernization Strategy: The Case of Distribution. Uudistettu painos. The World Bank. Viitattu 23.2.2024. <https://openknowledge.worldbank.org/server/api/core/bitstreams/07ae7bd2-3af0-559a-b028-866d54ad4a68/content>

Mishra, A. Singh, M. Srivastava, A & Chatterjee, K. 2018. Suppression of Harmonics in DFIG based WECS using passive LCL filter. 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control. Konferenssijulkaisu IEEEExplore-sivustolla. 446-447. Viitattu 13.2.2024. https://janet.finna.fi/_IEEEXplore

Mokhi, C. E. & Addaim A. 2020. Optimization of Wind Turbine Interconnections in an Offshore Wind Farm Using Metaheuristic Algorithms. Sustainability. ResearchGate. Viitattu 8.2.2022. https://www.researchgate.net/publication/343022271_Optimization_of_Wind_Turbine_Interconnections_in_an_Offshore_Wind_Farm_Using_Metaheuristic_Algorithms

Pikaopas sähkölaadun oireisiin ja syihin. N.d. Fluke. Artikkelin sivustolla. Viitattu 23.2.2024. <https://www.fluke.com/fi-fi/lue-lisaa/blogi/sahkonlaatu/quick-guide-power-quality-symptom>

Pusa, E. 2020. Jakeluverkkoyhtiön sähköasemahankinnan kojeistomäärittelyt. Diplomityö. Lappeenranta-Lahden teknillinen yliopisto (LUT). Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 19.2.2024. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/161136/Diplomityo_Pusa_Erkki.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Rafaat, S.M. & Hussein, R. 2018. Power Maximization and Control of Variable Speed Wind Turbine System Using Extremum Seeking. Journal of Power and Energy Engineering. Viitattu 12.3.2024. <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=82125>

Rakenteilla olevat hankkeet. 2024. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Ladattu Excel-tiedosto. Viitattu 13.3.2024. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa/rakenteilla-olevat-hankkeet>

Rasul, M.G., Azad k.A. & Sharma S.C. 2017. Doubly-Fed Induction Generator. Clean Energy for Sustainable Development. Comparisons and Contrasts of New Approaches. Kuva otettu ScienceDirect-sivustolta. Viitattu 14.2.2024. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/doubly-fed-induction-generator>

Reservimarkkinat. 2023. Fingrid. Artikkelin sivustolla. Viitattu 11.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservivelvoitteet-ja-hankintakanavat>

Reservituotteet ja reservien markkinapaikat. 2023. Fingrid. Esitysmateriaali. Viitattu 11.3.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/reservit/reservituotteet-ja-reservien-markkinapaikat.pdf>

RMU Ring Main Unit. N.d. Togami Electric Mfg. Co., Ltd. SF6 gas insulated Ring Main Unit (RMU). Viitattu 8.2.2024. <https://www.togami-elec.co.jp/en/mvp/equipment12.html#shita>

Roivanen, O. 2022. Oikosulkuvoimien tietokonesimulaatio sähköasemaympäristössä. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. Sähkötekniikan koulutusohjelma. Viitattu 16.2.2024. https://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/163887/diplomityo_roivainen_ossi.pdf?sequence=1

SafePlus 12–24 kV 630A. 2024. ABB. Esite ABB:n sivustolla. Viitattu 15.2.2024. <https://new.abb.com/medium-voltage/switchgear/gas-insulated-switchgear/iec-gis-rmu-for-secondary-distribution/safeplus>

SafeRing/SafePlus 12–24 kV. 2022. ABB. Esite ABB:n sivustolla. Viitattu 8.2.2024. <https://new.abb.com/medium-voltage/by-customer-segment/wind>

Salminen, A. 2023. Mikä kirjallisuuskatsaus. Johdatus kirjallisuuskatsausten tyypeihin ja hallintotieteellisiin sovelluksiin. Vaasan yliopiston julkaisuja. 2.p. Viitattu 14.3.2024. <https://osuva.uwasa.fi/bitstream/handle/10024/15470/978-952-395-081-8%20%28PDF%29.pdf?sequence=2&isAllowed=y>

Sayed, K., Eltamaly A.M & Abo-Khalil A.G. 2021. Wind Power Plants Control Systems Based on SCADA System. Artikkelit Research Gate- sivustolla. 116. Viitattu 28.2.2024. https://www.researchgate.net/publication/349807006_Wind_Power_Plants_Control_Systems_Based_on_SCADA_System

Siltala, J. & Frantti, A. Verkkosäätö sähköverkon hätätilasta ja käytön palautuksesta. Fingrid lehti.fi. Artikkelit Fingrid lehdessä. Viitattu 4.3.2024. <https://www.fingridlehti.fi/verkkosaanto-sahkoverkon-kaytonpalautuksesta/>

Sirviö, A. 2022. Tuulivoiman standardointi. Artikkelit Tuulivoima lehti sivustolla. Viitattu 6.3.2024. <https://tuulivoimalehti.fi/tuulivoiman-standardointi/>

Suurjänniteliityntöjen tekninen ohje. 2020. Elenia. Palvelut urakoitsijalle. Pdf-tiedosto. Viitattu 29.2.2024. <https://www.elenia.fi/palvelut/sahkoliittymat/palvelut-urakoitsijalle>

Static Compensator (STATCOM). 2024. Hitachi Energy. Artikkelit Hitachi Energyn sivustolla. Viitattu 27.2.2024. <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/facts/statcom>

Static Var compensation (SVC). 2024. Hitachi Energy. Artikkelit Hitachi Energyn sivustolla. Viitattu 27.2.2024. <https://www.hitachienergy.com/products-and-solutions/facts/static-var-compensation-svc>

Sähköasemat, kojeistot ja muuntamot. 2000. ABB:n TTT-käsikirja. Luku 13. Viitattu 16.2.2024. https://heikkilaakso.com/opetus/abb/130_0007.pdf

Sähkömarkkinalaki 9.8.2013/588. Finlex. Dokumentti Finlex- sivustolla. Viitattu 7.3.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2013/20130588#O2L2P4>

Säädöstyypit. N.d. Euroopan unioni. Artikkelit Euroopan unionin virallisella verkkosivustolla. Viitattu 6.3.2024. https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_fi

Säätösähkö- ja kapasiteettimarkkinat (mFRR). 2023. Fingrid. Artikkelin Fingridin- sivustolla. Viitattu 12.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/saatosahko--ja-saatosahko-pasiteettimarkkinat/>

Säätövoiman tarve kasvaa. 2024. Pohjolan voima. Artikkelin Pohjolan voiman sivustolla. Viitattu 12.3.2024. <https://www.pohjolanvoima.fi/huomisen-energiaa/saatovoiman-tarve-kasvaa/>

Tavner, P. 2021. Offshore Wind Power - Reliability, Availability and Maintenance. Institution of Engineering and Technology (The IET). 181. Viitattu 28.2.2024. <https://janet.finna.fi/>, Knovel.

Technical Application Papers No.13. 2011. ABB. Pdf-tiedosto. <https://electrical-engineering-portal.com/res/Guide-to-wind-power-plants.pdf>

Tuotantotuki. N.d. Energiavirasto. Artikkelin Energiaviraston sivustolla. Viitattu 23.3.2024. <https://energiavirasto.fi/tuotantotuki>

Tuulivoima. N.d. Hyötytuuli. Artikkelin Hyötytuulen sivustolla. Viitattu 29.3.2024. <https://hyotytuuli.fi/tuulivoima/>

Tuulivoimahankkeet Suomessa. 2024. Suomen Tuulivoimayhdistys. Sweco. Pdf-tiedosto Suomen Tuulivoimayhdistys sivustolla. Viitattu 23.3.2024. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoimahankkeet-1_2024_fin.pdf

Tuulivoimaliittyjän opas. N.d. Fingrid. Pdf-tiedosto. Viitattu 5.3.2024. https://www.tuulivoimayhdistys.fi/media/188-fingrid_tuulivoimaliittyjan_opas.pdf

Tuulivoimaloille haettavat luvat. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Artikkelin Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n sivustolla. Viitattu 7.3.2024. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimahanke/tuulivoimaloille-haettavat-luvat>

Tuulivoiman vaikutukset sähköverkkoon. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Artikkelin Suomen tuulivoimayhdistys ry:n sivustolla. Viitattu 12.3.2024. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoiman-vaikutukset/tuulivoiman-vaikutukset-sahkoverkkoon>

Tuulivoimarakentamisen suunnittelu. 2016. Ympäristöhallinnon ohjeita 5 | 2016. Ympäristöministeriö. Pdf-tiedosto. Viitattu 4.3.2024. https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79057/OH_5_2016.pdf?sequence=1

Tuulivoima Suomessa. 2024. Motiva. Artikkelin Motivan sivustolla. Viitattu 23.3.2024. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/tuulivoima/tuulivoima_suomessa

Tuulivoima Suomessa 2023. 2023. Suomen Tuulivoimayhdistys ry. Pdf-tiedosto Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n sivustolla. Viitattu 23.2.2024. https://tuulivoimayhdistys.fi/media/tuulivoima_vuositalastot-2023-3.pdf

Tuulivoimatekniikka. N.d. Suomen Tuulivoimayhdistys. Artikkelin Suomen Tuulivoimayhdistys ry:n sivustolla. Viitattu 23.3.2024. <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/tietoa-tuulivoimasta/tuulivoimatekniikka/tuulivoimatekniikka-2>

Type 3 Wind Turbine Model. 2018. Manitoba Hydro International Ltd. Pdf-tiedosto PS CAD-sivustolla. Viitattu 6.4.2024. <https://www.pscad.com/search?q=wind+turbine+pscad#gsc.tab=0&gsc.q=wind%20turbine%20pscad&gsc.page=1>

Uniswitch Keskijännitekojeisto. N.d. ABB. Esite. pdf-tiedosto. Viitattu 20.2.2024. <https://library.e.abb.com/public/0c8cf4b3a630586fc12573d2004b1e1d/UNIS5FI%200801.pdf>

Uusi tekninen ratkaisu parantaa tuulivoimavaltaisen verkon käyttövarmuutta. 2024. Fingrid. Lehdistö tiedote Fingridin sivustolla. Viitattu 5.3.2024. <https://www.fingrid.fi/ajankohtaista/tiedotteet/2024/uusi-tekninen-ratkaisu-parantaa-tuulivoimavaltaisen-verkon-kayttovarmuutta/>

Valtioneuvoksen asetus uusiutuville energialähteillä tuotetun sähkön tuotantotuesta. 2011. 1397/2010. Finlex. Hallinnonala: Työ- ja elinkeinovirasto. Viitattu 23.3.2024. <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2010/20101397>

Verkkosäännöt. N.d. Fingrid. Artikkelin Fingridin- sivustolla. Viitattu 30.3.2024. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/verkkosaannot/>

Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. 2018. Fingrid. Pdf-tiedosto. Viitattu 26.2.2024. <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkon-siirto/vjv2018.pdf>

Wind Protection. 2016. ABB. Julkaisu ABB Review- sivustolla. Pdf-tiedosto. Viitattu 28.2.2024. https://library.e.abb.com/public/74cbcdf63854c26b9e1dc13742d2739/57-62%204m6036_EN_72dpi.pdf

Xixi. 2023.(RMU) Ring main unit: definition, construction and application. Artikkelin CEED:n sivustolla. Viitattu 9.2.2023. [What is a Ring Main Unit? Definition Construction Application \(ceed-electric.com\)](http://www.ceed-electric.com/What-is-a-Ring-Main-Unit-Definition-Construction-Application)

Yang, G. Zhang, R. Xie, Y. Su, X & Jiang, S. 2022. Frequency Security and Stability Evaluation Method based on Energy Storage Inertia Support. IEEE 6th Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC). IEEE. 367. Viitattu 11.3.2024. [https://janet.finna.fi/IEEEXplore Digital Library](https://janet.finna.fi/IEEEXplore-Digital-Library).

Yleiset liittämisehdot. 2021. Fingrid. YLE 2021. Pdf-tiedosto. Viitattu 6.2.2024. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkoon/fingrid_yle2021.pdf

Zhang, Y. Liu, C. Zhao, X. Diao S. & Yu, F. 2021. Analysis of the Relationship Between Inertia and Energy of High-Proportion Wind Power Grid-Connected Power System. 3rd Asia Energy and Electrical Engineering Symposium (AEEES). 379. Viitattu 11.3.2024. [https://janet.finna.fi/IEEEXplore Digital Library](https://janet.finna.fi/IEEEXplore-Digital-Library).

Liitteet

Liite 1. Tuulivoimarakentamiseen sovellettavat lait ja luvat

| | | |
|---|-------------------------------------|---|
| Maanrakennuslaki | 132/1999 | 125 § Rakennuslupa 126 § Toimenpidelupa 127 § ja 139 § Purkamislupa |
| Luonnonsuojelulaki | 1096/1996, LSL | 38–39 §, 42 § rauhoitettuja lajeja koskevat säännökset. 47 § erityisesti suojellun lajin esiintymispaikkaa koskevat säännökset. 49 § EU:n tiukasti suojeltujen lajien lisääntymis- ja levähdyspaikkaa koskevat säännökset. 29 § luontotyyppien suojelua koskevat säännökset. Mahdollinen Ympäristölupa |
| Ympäristön suojelulaki (ei läh- tökohtaisesti tarvita) | 527/2014, YSL 26/1920, NaapL | YSL 180 § tai YSL 27 § melu- tai välkevaikutuksiin puuttu- minen. Ympäristölupa tarvi- taan, jos melu- tai välkevaiku- tuksista koituu kohtuutonta rasitusta, nämä määritetään naapurisuhdelaissa. |
| Vesilaki | 587/2011 | Vesilupa tarvitaan, mikäli hanke voi muuttaa vesistön asemaa, syvyyttä, vedenkor- keutta tai virtaamaa. |

| | | |
|------------------------|------------------|--|
| Ilmailulaki | 864/2014 | 158 § Kaikki yli 30 metriä korkeammat rakennelmat lentoaseman lähellä tai yli 60 metriä korkeammat rakennelmat kaikkialla Suomessa vaativat lentoesteluvan. |
| Maantielaki | 503/2005 | 44 § |
| Ratalaki | 110/2007 | 37 § |
| Sähkömarkkinalaki | 588/2013 | 6 § Sähköverkkolupa 19 § 14 § Hankelupa |
| Lunastuslaki | 603/1977 | 5 § Lunastuslupa 110 kV:n voimajohdoille hankittava johtoreitin käyttöoikeuden hallintaan. |
| Laki puolustusvoimista | 551/2007 | Yli 50 metriä korkeat eli kaikki teollisen kokoluokan tuulivoimalat tarvitsevat Puolustusvoimien myönteisen lausunnon ennen rakentamista. Lupa puolustusvoimilta |
| Aluevalvontalaki | 755/2000 | 12 § Lausunto Rajavartiolaيتokselta kaikista Suomen merialueille suunnitelluista tuulivoimahankkeista sekä aluevesialueelle että talousvesivyöhykkeelle. |
| Muinaismuistolaki | 295/1963 | |
| Erämaalaki | 62/1991, ErämaaL | |

| | | |
|---------------------------------|---------------|--|
| Poronhoitolaki | 848/1990, PHL | 2 § poronhoitoon käytettyä aluetta ei saa käyttää siten, että siitä aiheutuu huomattavaa haittaa poronhoidolle. |
| Saamelaiskäräjistä annettu laki | 974/1995 | 9 § Suunniteltaessa tuulivoimama-alueella saamelaisten kotiseutualueelle tulee hankkeesta neuvotella saamelaiskäräjien kanssa. |
| Kolttalaki | 253/1995 | 56 § kolttama-alueella sijoituvista tuulivoimahankkeista tulee neuvotella kyläkokouksen kanssa. |

Liite 2. Aineistona käytetyt artikkelit ja tutkimukset

| Aineiston ja tekijän nimi | Mitä tutkittu | Tulokset tutkimuskysymyskohtaisesti |
|---|--|--|
| Agrawal, S. Tyagi, B. Kumar, V. & Sharma P. 2023. Enhancing Grid Stability through Adaptive Damping and Inertia Control in DFIG-Based Wind Turbines with VSync. | DFIG:n kytkeytymistä sähköverkkoon mukautuvan vaimennuksen ja inertian kannalta virtuaalisen synkronoinnin kontrollin avulla. | Tutkimuskysymys 4. inertian tuottaminen tulevaisuudessa. |
| Allagui, Belhadj & Hasanoui 2014. Grid Support Capabilities of Direct Drive Wind Turbines During Faults for Uninterrupted Operation Mode. | Uutta valvontajärjestelmää optimoimaan tuulienergian verkkoon kytkentään. Kestomagnetoidut tuuliturbiinit, verkon puoleinen konvertteri, vektorisäätö, jännitteen läpilyönnit. | Tutkimuskysymys 2. Harmonisten yliaaltojen suodatus LCL-suodattimella. |
| Alsmmak, A. N. 2017. Transient Stability Improvement of Multi-machine Power Systems Using Modern Energy Storage Systems. | Monilaitteisia tehojärjestelmiä, transientin stabiilisuuden parantaminen, modernit energian varastointijärjestelmät, PSAT-ohjelmisto | Tutkimuskysymys 2. Loistehon hallinta ja säätö. |
| Anaya-Lara, Campos-Gaona, Moreno-Goytia & Adam 2018. | Täysteposuuantaajakäyttö, osatehoinen suuntaajakäyttö, merituulivoimalan sähköjärjestelmät, suojaus, uudet teknologiat, konvertterit. | Tutkimuskysymys 2. DFIG:n suojaus, toiminta, konverttereiden toiminta, generaattorin suojaus. Tutkimuskysymys 3. Päämuuntajan suojaus. |
| Bedalov, Z. 2020. Practical power plant engineering: A guide for early career engineers. | Eri voimalaitostekniikoiden perustietoa. | Tutkimuskysymys 2. DFIG:n tuottaman jännitteen muodostuminen. |
| Burton, Jenkins, Bossanyi, Sharpe & Graham. 2021. | Tuuli ilmiönä, vaaka-akselisten tuulivoimaloiden aerodynamiikka, kuormien laskenta, tuulipuistojen hallinta ja | Tutkimuskysymys 2. Harmonisten yliaaltojen suodatus. Tuuliturbiinin muuntaja. Tutkimuskysymys 3. Sähköaseman |

| | | |
|---|--|--|
| | säätö, maatuulivoimaloiden rakentaminen, tuulivoiman kytketyminen sähköverkkoon, merituulivoimaloiden turbiinit. Potkurivirtojen vaikutusta | muuntaja. Tutkimuskysymys 3. Tuulipuiston sähköasema-automaatio |
| Elovaara, J. & Haarla L. 2011. Sähköverkot II: Verkon suunnittelu, järjestelmät ja laitteet. | Sähkön saaminen voimaloista tuotantolaitosten ja kuluttajien käyttöön. Suurjännitetekniikka, sähköasemat ja niiden suunnittelu, sähköasemien laitteet, sähköjohdot, relesuojaus, asema-automaatio ja käytön valvonta, maadoitukset, sähköverkkojen aiheuttamat häiriöt ja vaarajännitteet, sähkövahingot ja tapaturmat, tulevaisuuden sähköverkot. | Tutkimuskysymys 2. tuulivoimalaitoksen sisäisen verkon komponentit. Tutkimuskysymys 3. Sähköaseman suojaus. Tutkimuskysymys 3. päämuuntajan toiminta. Tutkimuskysymys 3. SCADAN ja RTU:n toiminta. |
| González, F. D., Martínez-Rojas, M., Sumper, A., Gomis-Bellmunt, O., Trilla, L. 2010. Strategies for Reactive Power Control in Wind Farms with STATCOM. | Tuulipuistot, loistehon hallinta, DFIG | Tutkimuskysymys 3. Loistehon säätö tuulipuiston sähköasemilla. |
| Haggvist, O. 2011. Tuulipuiston sähköverkkoliittymän teknistaloudellinen analyysi. Diplomityö. | Määritellään optimaalinen verkkoliittymän toteutus ja analysoidaan jännitetsion hallintaa. | Tutkimuskysymys 3. Päämuuntajan kämmikytkimen toiminta. |
| Koivunen, T. 2011. Tuulipuiston sähköverkon suojaus. Diplomityö. | Tutkia tuulipuiston sähköverkon suojausta. Sähköverkon viat ja suojaus, tuulipuiston sähköverkon komponentit, verkkoyhtiöiden vaatimukset verkkoon liittymälle, tuulivoimalatyyppin vaikutus tuulipuiston sähköverkon ja tuulivoimaloiden suojaukseen. | Tutkimuskysymys 2. Tuulipuiston sisäisen verkon komponentit. |

| | | |
|--|---|--|
| Kulmala, A. 2015. Tuulipuiston kytkentä sähköasemalle sähkön laadun näkökulmasta. Raportti. Tampereen teknillinen yliopisto. | Jännitteen tason vaikutus kiskojännitteeseen. | Tutkimuskysymys 3. Päämuuntajan kämmikytkimen toiminta. |
| Lakervi, E. & Partanen, J. 2008. Sähkönjakelutekniikka. 3.p. | Sähkönjakelutekniikan teknisten ja taloudellisten näkemysten ymmärtäminen. | Tutkimuskysymys 3. Sähköasemien laitteet. |
| Lehtimäki, S. Usean kytkinlaitoskentän suojaaminen yhdellä suojalaitteella tuulivoiman liityntäsähköasemalla. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto. | Onko usean kytkinlaitoskentän suojaus toteutettavissa yhdellä suojalaitteella. | Tutkimuskysymys 3. Tuulipuistojen suojauksen eroaminen muista sähköntuotantolaitoksista. |
| Heier, S. 2014. Grid integration of wind energy: Onshore and offshore conversion systems. 3. p. | Tuulen muutosta kineettisestä energiasta sähköenergiaksi, sähköenergian siirto verkkoon, verkon suojaus, verkko-vaikutukset, turbiinien säätö- ja hallinta. | Tutkimuskysymys 2. Generaattorin suojaus oikosuilta. |
| Korpela, A. 2016. Tuulivoiman perusteet. | Tuuli ilmiönä, tuulienergia, tuulivoimalat, tuuliturbiinit, generaattorit, tuuligeneraattorit, energian tuotanto. | Tutkimuskysymys 2. DFIG:n toiminta. |
| Lechter, T.M. 2017. Wind Engineering – A Handbook for Onshore and Offshore Wind Turbines. | Tuulivoiman historia, tuulivoimatekniikat, vaaka-akseliset tuulivoimalat, rakennustekniikan näkökulmat, seismisyyteen liittyvät näkökulmat. | Tutkimuskysymys 2. Selvitys tuuliturbiinin komponenteista. |
| Mishra, A. Singh, M. Srivastava, A & Chatterjee, K. 2018. Suppression of Harmonics in DFIG based WECS using | Tuulienergian muuttamisjärjestelmät, kaksoisyyötetty epätahtigeneraattori, | Tutkimuskysymys 2. Harmonisten yliaaltojen suodattaminen LCL-suodattimella |

| | | |
|--|---|---|
| passive LCL filter. 2018 International Conference on Power Energy. | LCL-suodatin, verkon puoleinen konvertteri, roottorin puoleinen konvertteri, kokonaissärö. | |
| Yang, G. Zhang, R. Xie, Y. Su, X & Jiang, S. 2022. Frequency Security and Stability Evaluation Method based on Energy Storage Inertia Support. | Laajamittaisen uusiutuvan energian liittyminen sähköverkkoon tehoelektronikan kautta. | Tutkimuskysymys 4. inertian muodostuminen. |
| Zhang, Y. Liu, C. Zhao, X. Diao S. & Yu, F. 2021. Analysis of the Relationship Between Inertia and Energy of High-Proportion Wind Power Grid-Connected Power System. | Laajamittaisen uusiutuvan energian liittyminen sähköverkkoon ja sen vaikutukset verkon transienttiin stabiiliuteen DFIG:n kannalta. | Tutkimuskysymys 4. DFIG:n synkronointi sähköverkkoon. |