



Tuulesta temmattua – tuulivoima ja huoltovarmuus



Huoltovarmuuskeskus



Huoltovarmuuskeskus

www.huoltovarmuuskeskus.fi

Huoltovarmuudella tarkoitetaan kykyä sellaisten yhteiskunnan taloudellisten perustoimintojen ylläpitämiseen, jotka ovat välttämättömiä väestön elinmahdollisuuksien, yhteiskunnan toimivuuden ja turvallisuuden sekä maanpuolustuksen materiaalistien edellytysten turvaamiseksi vakavissa häiriöissä ja poikkeusoloissa. Huoltovarmuuskeskus (HVK) on työ- ja elinkeinoministeriön hallinnonalan laitos, jonka tehtävänä on maan huoltovarmuuden ylläpitämiseen liittyvä suunnittelu ja operatiivinen toiminta. Huoltovarmuuskeskuksen yhteydessä toimii Huoltovarmuusneuvosto sekä pysyvinä yhteistyöeliminä komitean tapaan toimivia sektoreita ja pooleja. Nämä yhdessä muodostavat Huoltovarmuusorganisaation.

Yhä suurempi osa Suomen sähköstä tuotetaan tuulivoimalla. Tällä selvityksellä on pyritty luomaan parempi ymmärrys siitä, mitkä ovat tärkeimpiä kysymyksiä tuulivoiman häiriönsietoisuudessa, millaisia uhkia tuulivoimaan liittyy ja millaista varautumistyötä alalla on tehty tai tulisi jatkossa tehdä.

Julkaisija: Huoltovarmuuskeskus

Laatinut: Paavo Tertsunen

Kansikuva: Gettyimages

Taitto: LM Someco Oy

Julkaisuvuosi: 2025

ISBN: 978-952-7470-41-1

Sisältö

Tiivistelmä	1
1. Johdanto	2
2. Tausta	3
Tuulivoiman nykytila Suomessa	3
Tuulivoima Suomessa, ennakoitu kehitys	5
Tuulivoimaan liittyvä sääntely ja vaatimukset	5
3. Kirjallisuuskatsaus	8
Menetelmäkuvaus	8
Katsaukset toteutus	8
Katsauksen tulokset	8
4. Haastattelut	20
Menetelmäkuvaus	20
Haastatteluhavainnot	20
5. Arviointi	22
Tuulivoimaa koskevat riskit ja uhkatekijät	22
Tunnistettut toimintamallit ja rakenteet	24
6. Johtopäätökset	25
Lähteet	28

Tiivistelmä

Tuulivoiman tuotanto ja tuulivoimaloiden lukumäärä Suomessa on kasvanut merkittävästi. Tätä raporttia kirjoitettaessa tuulivoima on vuositasolla toiseksi merkittävin sähköntuotantomuoto. Hetkittäin tuulivoimalla saatetaan tuottaa huomattava osa sinä hetkenä tarvittusta sähkötehosta. Kappalemääräisesti Suomessa on jo lähes 2000 tuulivoimalaa, ja visiot alan kasvun osalta ovat kunnianhimoisia. Tuulivoimaan liittyvät rakenteet ovatkin yhä olennaisempi osa kriittisiä infrastruktuureja.

Tässä raportissa selvitettiin Huoltovarmuuskeskuksen (HVK) ja huoltovarmuusorganisaatioon kuuluneen sähköpoolin toimeksiannosta voimakkaasti kasvaneen tuulivoiman huoltovarmuus- ja varautumisenäkökuja. Selvityksen tavoitteena oli valaista tuulivoimaan liittyviä uhkia erityisesti häiriönsietoisuuden ja varautumisen nykytilan pohjalta. Raportissa oli lisäksi tarkoituksena avata tuulivoima-alaan liittyviä rakenteita, ilmiöitä, keskinäisriippuvuuksia sekä mahdollisia häiriötilanteisiin johtavia tekijöitä. Lisäksi raportissa kuvattiin tuulivoima-alan nykytilaa, viimeaikaisinta tuulivoimaa koskevaa tieteellistä kirjallisuutta, toteutettiin kymmeniä haastatteluita suomalaisille sidosryhmille ja tuulivoimatoimijoille sekä lopuksi arvioitiin toimintaympäristöä ja -malleja huoltovarmuuden näkökulmasta. Menetelminä käytettiin eritoten systemaattista kirjallisuuskatsausta sekä puolistrukturoituja asiantuntijahaastatteluita.

Tuulivoima on selvityshetkellä hyvin alueellisesti keskittynyttä ja yli puolet tuulivoimaloista sijaitsee Pohjois-Pohjanmaalla ja Pohjanmaalla. Nykyinen kapasiteetti on rakennettu merkittävältä osin kuluneen muutaman vuoden aikana. Tuulivoimaan kohdistuu merkittäviä kasvuodotuksia ja etenkin meritulivoiman osalta odotukset mutta myös epävarmuudet ovat suuria. Myös tuulivoimatoimijoita koskeva sääntely on muutoksessa.

Merkittävimmiksi uhka- ja riskiteemoiksi kirjallisuuden sekä haastattelujen perusteella tunnistettiin äärimmäiset sääolosuhteet, kyberturvallisuuden liittyvät tekijät, toimijakentän monimutkaisuus, voimajärjestelmätason rakenteet ja riskit, teknologian kypsyys ja siihen liittyvät riskit sekä fyysisen turvallisuuden näkökulmat. Tuulivoimaloiden ollessa etäohjattuja ja kyberfyysisiä järjestelmiä, etenkin tieto- ja viestintäjärjestelmien riskit ovat merkittäviä. Koska tuulivoiman toimijaverkot ovat monimutkaisia, ja toimitus- sekä arvoketjujen kansainvälisyys on alalla tyypillistä, näiden huolellista jatkoanalyysia tarvitaan.

Selvityksen perusteella huoltovarmuustyössä on jatkossa kyettävä seuraamaan muuttuvaa sähköjärjestelmää monista ulottuvuuksista. Ymmärrystä vaaditaan paitsi organisatorisella tasolla, mutta myös teknislähtöisesti sekä voimajärjestelmän että tieto- ja viestintäjärjestelmien osalta. Tuulivoiman osalta on tunnistettava ja seurattava uusia ja nykyisiä huoltovarmuuskriittisiä toimijoita, sillä suuretkin muutokset vaikuttavat olevan alalla tyypillisiä. Toimivan verkostotyön kannalta on tärkeää ymmärtää erilaisia kypsyystasoa ja toimintamalleihin liittyviä eroavuuksia. Teknisiin näkökohtiin on tarpeellista syventyä tätä selvitystä laajemmin.

Varautumista parantavaa verkostoyhteistyötä on kehitettävä ja laajennettava esimerkiksi kohdennetuilla toimilla. Tuulivoimajärjestelmien ja -toimijoiden varautumissuunnittelun tueksi olisi esimerkiksi hyödyllistä tuottaa ohjemateriaaleja ja työkaluja. Harkinnanvaraisia muotoja ovat esimerkiksi varautumissuunnitelmien mallipohjat, kybermaturiteettia kuvaavat mittarit ja kohderyhmille suunnatut tiedonjakotilaisuudet, tuulivoima-alalle kohdennetut varautumisharjoitukset sekä yksityiskohtaisemmat jatkoselvitykset. Toimialan varautumistyötä tuemalla parannetaan jo hyvässä vauhdissa olevaa häiriönsietoisuuden kehitystyötä.

1. Johdanto

Yhteiskunnat ovat yhä riippuvaisempia häiriöttömästä sähkön saannista. Sähköön liittyvät infrastruktuurit ovat jokapäiväisen elämämme kannalta erittäin tärkeitä. Koska sähköjärjestelmä on koko energiajärjestelmän tavoin keskellä voimakasta muutosta, on tärkeää ymmärtää muuttuvan systeemin häiriönsietoisuutta ja huoltovarmuutta. Energiasektorin järjestelmät ovat kuitenkin kompleksisia, ja koska niiden muutokset ovat epälineaarisia, kehityskulkujen tarkkaa muotoa ja vaikutuksia on mahdotonta täydellisesti ennakoida. Uusien teknologioiden käyttöönotto silti edellyttäisi yhä parempaa ymmärrystä muuttuvista rakenteista ja keskinäisriippuvuuksista.

Huoltovarmuuskeskuksen strategian 2024–2027 mukaan riskit ja uhat huoltovarmuudelle ovat konkreettisempia, vakavampia ja monialaisempia kuin aiemmin. HVK toteuttaa varautumistyötä riskiperusteisesti, mikä tarkoittaa toimialakohtaisten uhkien ja häiriöiden keskeisten huoltovarmuusriskien ja keskinäisriippuvuuksien tunnistamista. Strategian tavoitteena on luoda **iskunkestävämpi Suomi** erityisesti strategian viidellä painopistealueella, joista yksi on energiahuolto. Strategisina tavoitteina painopistealueiden huoltovarmuuden tulisi parantua merkittävästi HVK:n työn ansiosta.

Energiahuoltovarmuuden parantaminen edellyttää näin ollen hyvää nykytilaymmärrystä. Sähköjärjestelmässä yksi suurista nykytilan muutostekijöistä on tuulivoima-tuotannon kasvu. Tämän raportin kirjoitushetkellä Suomen sähköjärjestelmään liitetyn tuulivoiman teho on noin 8,3 GW. Tuulivoimaan kohdistuu myös pitkällä aikavälillä merkittäviä kasvuodotuksia. Sitä on positiivisimmissa puheenvuoroissa kuvattu jopa yhdeksi nopeimmin kasvavista, kilpailukykyisimmistä ja vähiten haittoja aiheuttavista uusista tuotantoteknologioista. Hajautuneena tuotantomuotona tuulivoima myös vähentää joitain keskitetylle tuotannolle tavanomaisia riskejä.

Tuulivoimatuotannon kasvuun liittyy toisaalta tarve tunnistaa nopeasti kasvaneen tuotannon huoltovarmuuskätköjä. Tämän selvityksen tavoitteena oli valaista tätä kysymystä tuulivoima-alan uhkien, häiriönsietoisuuden ja varautumisen näkökulmasta. Raportti tarjoaa vastauksia seuraaviin kysymyksiin, sulkeissa liittymäpinta HVK:n strategiaan:

- Millaisia uusia tai vähän tunnettuja rakenteita, ilmiöitä tai keskinäisriippuvuuksia tuulivoima ja sen lisääntyminen synnyttävät?
(riskiperustaisuus ja keskinäisriippuvuudet)
- Millaiset ilmiöt tai tekijät voivat johtaa merkittävään häiriötilanteisiin ja mikä on tuulivoimajärjestelmien suorituskky häiriötilanteissa?
(iskunkestävyys)
- Mikä on tuulivoiman nykytila Suomessa ja millaisia varautumiskäytänteitä tuulivoima-alalla on, sekä millaisia huoltovarmuuden kannalta olennaisia ilmiöitä tai toimia tuulivoimatoimijat tai muut keskeiset sidosryhmät ovat tunnistaneet? *(painopistesektoreiden huoltovarmuuden parantaminen)*
- Mitkä havainnot ovat keskeisiä huoltovarmuuden kannalta, ja mihin asioihin huoltovarmuustoiminnassa tulisi tuulivoimatoimijoiden ja -toimialan tapauksessa erityisesti keskittyä? Mitkä ovat tuulivoiman huoltovarmuuden kannalta keskeisiä rakenteita? *(painopistesektoreiden huoltovarmuuden parantaminen)*

Selvityksen terminologiassa tuulivoimatoimija tarkoittaa organisaatiota, joka joko omistaa tuulipuistoja, tai tarjoaa palveluja niiden omistajille tai operoijille. Raportti on tuotettu HVK:n sekä huoltovarmuusorganisaation alaisen sähköpoolin toimeksiannosta HVK:n linjatyönä vuoden 2024 aikana. Selvityksen etenemistä on seurattu Huoltovarmuusorganisaation sähköpoolin poolitoimikunnassa. Toteutusta valvoi pieni ohjausryhmä. Johtopäätöksiä varten on hyödynnetty myös HVK:n sisäistä tietoa erittelemättömistä lähteistä. Aineisto on kerätty pääosin maalissyyskuun välillä 2024 ja sitä on päivitetty ajantasaisilla tilastoilla helmikuussa 2025. Selvityksen toteutti HVK:n varautumisasiantuntija Paavo Tertsunen.

2. Tausta

Tässä osiossa on esitetty vuoden 2024 lopun tilannetta edustava kuvaus tuulivoiman nykytilasta sekä siihen liittyvästä sääntelystä Suomessa. Tiedot perustuvat yksin omaa julkisiin lähteisiin, eikä HVK ole varmistanut kaikkia yksittäisiin toimijoihin liittyviä tietoja. Tämän osion mukaiset nykytilatiedot ovat edustavia kuvaamaan tilannetta vuonna 2024/2025, mutta johtuen alan nopeasta kasvusta, vuodesta 2025 alkaen osiossa voi olla merkittäviä puutteellisuuksia.

Tuulivoiman nykytila Suomessa

Suomen Uusiutuvat ry:n mukaan Suomessa oli vuoden 2024 lopussa 1835 toiminnassa olevaa tuulivoimalaa. Tuulisähkön vuotuinen tuotanto on yli kaksinkertaistunut 2020-luvulla, lähes 20 000 gigawattituntiin. Tuulivoiman nopeaa kasvua kuvastaa erityisen hyvin se, että yli puolet käytössä olevasta tuulivoimakapasiteetista on asennettu kuluneen neljän vuoden aikana. Lähes 90 % Suomessa sijaitsevista tuulivoimaloista on Vestasin tai Nordex Accionan valmistamia. Suomessa käytössä oleva tuulivoimala on napakorkeudeltaan todennäköisesti 140–160 m korkea ja sen roottorin halkaisija on 150–160 metriä. Taulukossa 1 on esitetty voimaloiden alueellinen jakautuminen (tieto kesäkuulta 2024). (Suomen Uusiutuvat ry, 2024; Suomen Uusiutuvat ry, 2025)

Suomessa on tämän raportin kirjoittamishetkellä vain yksi toiminnassa oleva merituulipuisto: Suomen Hyötytuuli Oy:n v. 2017 valmistunut Porin Tahkoluoto (44,3 MW). (Suomen Hyötytuuli Oy, 2024) Metsähallituksella on lisäksi tehty varaus sopimus kahdelle Suomen aluevesillä sijaitsevalle hankkeelle (Suurhiekan ja Maanahkaisen merituulivoimapuistot) ja käyttöoikeussopimus Porin Tahkoluodon laajennukselle. Joulukuusta 2021 eteenpäin aluevesien merituulipuistoihin on sovellettu huutokauppamallia. Ensimmäinen uuden mallin mukainen kilpailutus koski Korsnäsin merituulivoimahanketta, josta allekirjoitettuun sopimus joulukuussa 2022.

Taulukko 1. Tuulivoimalat Suomessa maakunnittain (Suomen Uusiutuvat ry, 2025), tieto vuoden 2024 lopulta.

Maakunta	Käytössä olevia tuulivoimaloita (kpl)
Pohjois-Pohjanmaa	696
Pohjanmaa	279
Etelä-Pohjanmaa	245
Lappi	188
Satakunta	103
Keski-Pohjanmaa	100
Keski-Suomi	67
Kainuu	61
Ahvenanmaa	30
Varsinais-Suomi	21
Kanta-Häme	11
Pirkanmaa	11
Kymenlaakso	9
Etelä-Karjala	7
Uusimaa	4
Pohjois-Savo	3
Päijät-Häme, Etelä-Savo, Pohjois-Karjala	0

Taulukossa 2 on esitetty kymmenen merkittävintä Suomessa tuulivoimaa omistavaa tahoa. Tiedot perustuvat Suomen Uusiutuvat ry:n tilastoihin, joita yleisesti pidetään edustavina kuvastamaan Suomen markkinaa. Taulukkoon on koottu Suomen Uusiutuvat ry:n kesäkuussa 2024 esittämä tieto toimijan omistussuudesta (% asennetusta kumulatiivisesta kapasiteetista) ja toimijan esittely (perustuen julkiseen verkkosivuun). Tietojen perusteella kymmenen suurinta toimijaa omistaa yli puolet Suomen tuulivoimasta 3–8 % osuuksin.

Taulukko 2. Suomen merkittävimmät tuulivoimaomistajat ja niiden toiminta Suomen Uusiutuvat ry:n tietojen pohjalta.

Maakunta	Omistajayhtiön tausta tai kuvaus	Lähde	Osuus
Hyötytuuli Oy	Yhtiö kantaa kokonaisvastuun tuulipuistojen elinkaaresta hankekehityksestä ja rakentamisesta tuotantoon, huoltoon ja purkuun. Omistajina kahdeksan suomalaista kaupunki-energiayhtiötä: ALVA, Lappeenrannan Energia Oy, Turku Energia Oy, Vantaan Energia Oy, Pori Energia Oy, Helen Oy, Tampereen Energia Oy ja Lahti Energia Oy.	Suomen Hyötytuuli Oy, 2024a Suomen Hyötytuuli, 2024b	8 %
Neoen	Kehittää, rahoittaa, rakentaa, omistaa ja operoi aurinkovoimaloita, tuulipuistoja ja akkuvarastoja. Toiminta kattaa koko elinkaaren: hankkeiden kehittäminen, rahoitus, rakentaminen ja voimalaitosten toiminta. Suurin omistaja ranskalainen holdingyhtiö Impala.	Neoen, 2024a Neoen, 2024b Impala, 2024	8 %
Taaleri Energia Oy	Suomalainen uusiutuvan energian hankekehittäjä ja rahastonhoitaja. Taaleri Energia on osa Taaleri-konsernia, joka on listattu Nasdaq Helsingin pörssilistalle. Konsernin hallinnoitavat varat 2,6 mrd.	Taaleri Energia Oy, 2024	7 %
Wpd Finland Oy	Yksi Euroopan johtavista tuulivoima-alan toimijoista. Erikoistunut tuuli- ja aurinkovoiman kehittämiseen. Wpd Suomi Oy aloitti toimintansa 2007 ja kehittää maatuulivoimaprojekteja Suomessa. Toimintaan kuuluu projektien johtaminen ja kehittäminen, ympäristövaikutusten arviointi, rakennuttaminen, kunnossapito, huolto ja rahoitus.	Wpd Suomi Oy, 2024b Wpd Suomi Oy, 2023	6 %
Exilion Tuuli Ky	Suomalaisten instituutioiden omistama sijoitus- ja varainhoito-yhtiö, hallinnoi neljän kommandiittiyhtiön kautta noin 1,2 mrd euron omaisuutta, johon kuuluu 13 tuulivoimapuistoa. Exilion Tuuli Ky:n yhtiömiehiä ovat Keskinäinen Työeläkevakuutusyhtiö Elo, Eläkevakuutusosakeyhtiö Veritas ja Valtion Eläkerahasto.	Exilion, 2024	6 %
EPV Tuulivoima Oy	EPV Tuulivoiman omistaa sataprosenttisesti EPV Energia Oy. EPV Tuulivoima Oy valmistele, toteuttaa ja operoi omia tuulivoimahankkeita ja toimii pääasiassa Pohjanmaan alueella. EPV Energia vastaa tuulivoimapuistojensa toimivuudesta ja turvallisuudesta koko niiden elinkaaren ajan.	EPV, 2024a EPV, 2024b	6 %
Ilmatar Oy	Ilmatar sitoutuu jokaiseen vaiheeseen: tunnistaa, kehittää, rahoittaa, rakentaa ja myös hallinnoi laitoksia. Yhtiö ottaa kokonaisvastuun tuotantolaitoksista – aina sijoituspaikkojen ja rahoituksen etsimisestä rakentamisen ja jatkuvan toiminnan valvontaan. Sähkökaupankäynnin perustamisen myötä yhtiö on ottanut ratkaisevan askeleen eteenpäin kohti täysivaltaista itsenäistä sähköntuottajaa.	Ilmatar, 2024a Ilmatar, 2024b	5 %
Helen Oy	Helsingin kaupungin omistama yhtiö, tarjoaa asiakkailleen sähköä, lämpöä ja jäähdytystä sekä monipuolisia palveluita energian pientuotantoon sekä asiakkaiden omaan energiankäyttöön ja sen tehostamiseen. Konserniin kuuluvat emoyhtiö Helen Oy:n lisäksi tytäryhtiöt, mm. Tuulipuisto Lakiakangas 3 Oy ja osaomistuksella Tuulipuisto Kalistanneva Oy, Tuulipuisto Karahka Oy, Tuulipuisto Juurakko Oy ja Tuulipuisto Niinimäki Oy.	Helen Oy, 2024a	5 %
Fortum Power and Heat Oy	Ydinliiketoiminta on pohjoismaissa, koostuu päästöttömästä sähkön tuotannosta, myynnistä, kaukolämmöstä sekä kierrätys- ja jäteliiketoiminnasta.	Fortum Oyj, 2024a	4 %
Gigawatti Oy	Vastaa S-ryhmän tuulivoimatuotannosta. S-ryhmän sähkönhankinnasta vastaavan S-voiman täysin omistama yhtiö. Vuonna 2023 Gigawatti Oy:lla oli 62 tuulivoimalaa neljässä tuulipuistossa.	S-ryhmä, 2020 S-ryhmä, 2024a	3 %

Tuulivoima Suomessa, ennakoitu kehitys

Monien näkemysten mukaan sekä sähkön kulutus että tuotanto tulevat Suomessa kasvamaan merkittävästi tulevina vuosina. Kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n mukaan (2024a) jo tehtyihin investointipäätöksiin ja liittymissopimuksiin perustuva, alempi herkkyysskenaario ennakoi 99 TWh sähkön kulutusta vuodelle 2030. Tuulivoiman on erityisesti odotettu kasvavan edelleen voimakkaasti. Fingridin mukaan Suomi on maatuulivoiman rakentamiselle houkutteleva kohde, ja tuulivoimasta tulee todennäköisesti seuraavan vuosikymmenen aikana Suomen suurin sähköntuotantomuoto. (Fingrid, 2024b) Tämän raportin kirjoitushetkellä ennakoitiin, että tuulivoima tulee olemaan vuositasolla Suomen toiseksi suurin sähköntuotantomuoto ydinvoiman jälkeen (tilannearvio Energy-Charts.info-sivun tilastoihin perustuen). Tieto vahvistui v. 2024 energiatilastojen valmistuttua (Suomen Uusiutuvat, 2025).

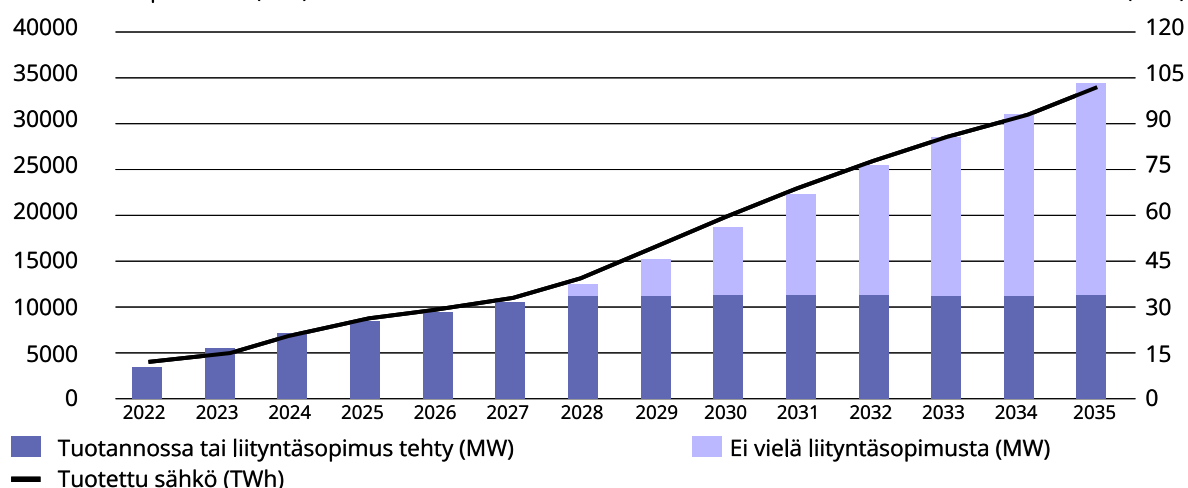
Fingridin kantaverkon kehittämissuunnitelmassa (2024b) tuulivoiman tuotantokapasiteetin ja sähköntuotannon on ennakoitu kasvavan jopa 23 gigawattiin ja 80 terawattituntiin v. 2030. Syyskuussa 2024 julkaistujen, päivitettyjen tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymien mukaan (ks. kuva 1) vuonna 2030 tuulivoimalla tuotettaisiin sähköä 60 TWh noin 19 GW kapasiteetilla (Fingrid Oyj, 2024a). Monissa yhteyksissä on tuotu esille myös tuulivoiman kasvuun liittyviä epävarmuustekijöitä sekä mahdollista investointipäätösten vähenemistä. Näitä näkökulmia ei tarkasteltu tässä selvityksessä.

Tuulivoima

Fingridin ennuste, syyskuu 2024.

Asennettu kapasiteetti (MW)

FINGRID
Tuotettu sähkö (TWh)



Kuva 1. Tuulivoimakapasiteetti ja tuulivoimalla tuotettu sähkö 2022–23, ennuste vuoteen 2035. (Fingrid Oyj, 2024a)

Tuulivoimaan liittyvä sääntely ja vaatimukset

Tuulivoiman osalta sääntely painottuu tämän raportin kirjoitushetkellä hankekehitysvaiheeseen liittyviin kaavoitus- ja vaikutusarviointimenettelyihin sekä käyttövaiheessa järjestelmävastaava Fingrid Oyj:n asettamiin, EU-tason sääntelyyn pohjaaviin voimalaitosten järjestelmäteknisiin vaatimuksiin. Lisäksi lähitulevaisuudessa on astumassa voimaan tuulivoimatoimijoita koskevia säädöksiä sekä EU-tasolta (CER-direktiivi) että kansallisella tasolla (merituulivoimaa koskeva sääntely). NIS2-direktiivin toimeenpaneva kyberturvallisuuslaki astui voimaan keuhällä 2025, ja se koskee myös tuulivoima-alan toimijoita. Tässä osiossa on kuvattu lyhyesti näiden sääntelykokonaisuuksien keskeistä sisältöä.

Hankekehitysvaiheessa hankekehittäjää (esim. energiayhtiö) sitovat erilaiset kaava- ja lupamenettelyt. Kaavoitusvaiheessa selvitetään maankäytöllisiä edellytyksiä sille, voidaanko tietylle alueelle rakentaa tuulivoimaloita, perustuen maankäyttö- ja rakennuslakiin. Tuulivoimahankkeilta voidaan myös edellyttää, ja usein edellytetään, YVA-lain mukainen ympäristövaikutusten arviointimenettely. Keskeisiä toimijoita näissä vaiheissa ovat hankekehittäjän lisäksi kunta, maanomistajat, maakuntaliitto sekä viranomaissektorista eritoten alueen ELY-keskus. (ELY-keskus, 2021) Lisäksi ennen rakennushankkeen toteuttamista tarvitaan Pääesikunnalta lausunto tuulivoimahankkeesta.

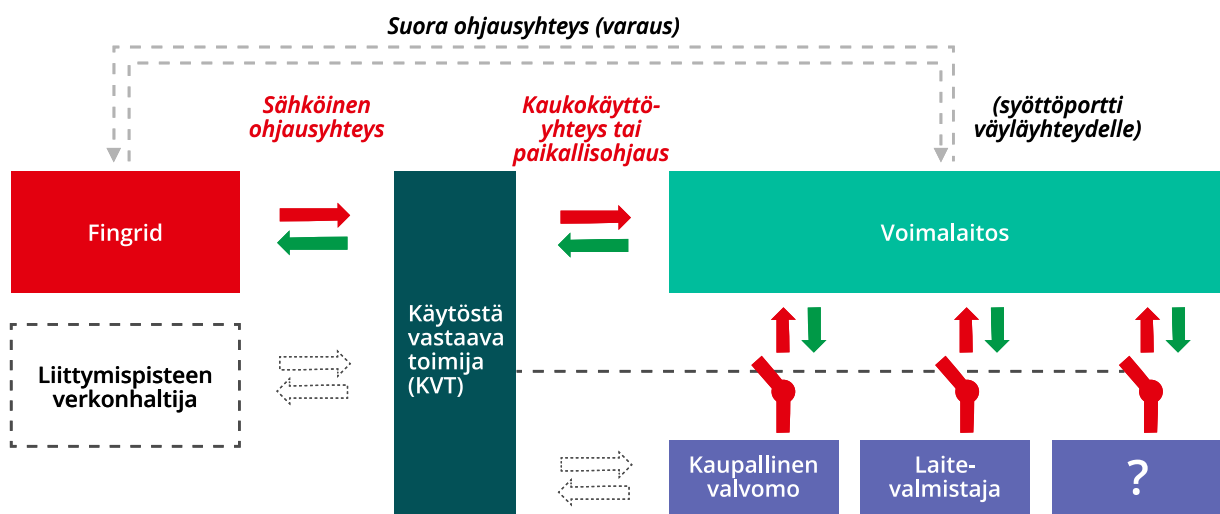
Pääesikunta vastaa Puolustusvoimien lausunnon keräämisestä kaikilta puolustushaaroilta. Tarkemmat selvitykset teetetään tarvittaessa VTT:llä. (Puolustusvoimat, 2024) Osa kunnista on edellyttänyt tuulivoimahankkeilta ympäristölupamenettelyä mutta yleensä ympäristölupaa ei edellytetä. Merituulihankkeet puolestaan edellyttävät lisäksi vesiluvan.

Toimiessaan käyttövaiheessa osana Suomen sähköjärjestelmää, tuulivoimalaitosten on täytettävä kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj:n järjestelmätekniset vaatimukset. Vaatimusten lähtökohtana on Fingridin kansallisin näkökulmin täydentämä eurooppalainen verkkosääntö (Euroopan komission asetus 2016/631). (Fingrid Oyj, 2024b) Asetuksessa on esitetty vaatimukset voimalaitosten liittämiseksi yhteiskäyttöjärjestelmään, pyrkien mm. varmistamaan tasa-puoliset kilpailuolosuhteet ja käyttövarmuuden. Liittymispisteen verkonhaltijalle on asetuksessa esitetty mahdollisuus evätä liittäntä, jos asetuksessa vahvistetut vaatimukset eivät toteudu. (Euroopan komissio, 2016)

Lokakuussa 2024 viimeisimmät vahvistetut järjestelmätekniset vaatimukset ovat vuodelta 2018. Järjestelmäteknisiä vaatimuksia päivitettiin tämän raportin kirjoitushetkellä. Järjestelmäteknisissä vaatimuksissa on pyritty varmistamaan esimerkiksi laitosten kyky kestää sähköjärjestelmän jännite- ja taajuusvaihteluja. Sähköjärjestelmään kytketty laitos ei myöskään esitettyjen vaatimusten mukaan saa aiheuttaa verkossa haittaa muille laitteille ja sen on toimitettava luotettavasti sekä häiriötilanteiden aikana että niiden jälkeen. Järjestelmävastaava Fingridillä on lisäksi ehtojen mukaan oltava riittävät tiedot sähköjärjestelmän ja sen käytön suunnitteluun sekä käyttövarmuuden ylläpitoon tarvittavat tiedot. (Fingrid Oyj, 2018)

Fingrid Oyj:n energiavirastolle vahvistettavaksi esittämissä ehdoissa vaatimukset on yhä porrastettu (A-D) voimalaitosten mitoitustehon ja liittymispisteen jännitetason mukaisesti. Liittymispisteen jännitetasosta ja voimalaitoksen mitoitustehosta riippuen voidaan käyttää raskaampia menettelyjä. Esimerkiksi tyyppin D osalta (jännitetaso vähintään 110 kV ja mitoitusteho vähintään 30 MW) mm. voimalaitosten todentamisprosessin ja käyttöönotto-ilmoitusmenettelyn vaatimukset ja edellytykset ovat yksityiskohtaisia. (Fingrid Oyj, 2024c)

Tuulivoiman osalta huomionarvoisia ovat vaatimukset liittyen voimalaitosten ohjaukseen ja kaukokäyttöön (alkaen sivulta 49). Vaatimusten mukaan jokaisella voimalaitoksella on oltava yksi nimetty, voimalaitoksen käytöstä vastaava toimija, jolla on joka hetki tieto voimalaitoksen toimintatilasta sekä oikeus ja mahdollisuudet tehdä toimenpiteitä mm. ohjauksen suhteen. Kaukokäytön tapauksessa toimijalla on oltava etäohjaukseen ja -valvontaan tarvittavat ohjaukset ja mittaukset. Toimijan on vaatimusten mukaan säädettävä toimintatilaa, jos Fingridin Kanta-verkkokeskus tai liittymispisteen verkonhaltija sitä pyytää. Ohjauksen periaatteita on havainnollistettu kuvassa 2. Punaiset nuolet kuvastavat Fingridin ohjauspyyntöjä ja vihreät nuolet tilatietojen vastaanottamista sähköisellä ohjausyhteydellä. Käytöstä vastaavalla toimijalla voi olla sähköinen ohjausyhteys jakeluverkkoyhtiöön tai muihin voimalaitosta ehdollisesti ohjaamaan kykeneviin toimijoihin. (Fingrid Oyj, 2024c)



Kuva 2. Voimalaitoksen ohjaus ja kaukokäyttö. Kuva: Fingrid Oyj, 2024c

Fingridin sähköisen ohjausyhteyden avulla parannetaan sähköjärjestelmän käyttövarmuutta mahdollistamalla Fingridille järjestelmävastaavana voimalaitosten toiminnan koordinointi poikkeustilanteissa. Voimalaitosten järjestelmäteknisissä vaatimuksissa on esitetty raja-arvoja sille, kuinka nopeasti Fingridin käskemiin muutoksiin on päästävä. Lisäksi vaatimuksissa edellytetään, että käytöstä vastaava toimija on tavoitettavissa ympäri vuorokauden vuoden jokaisena päivänä, ja että sekä voimalaitoksen ohjattavuus ja kaukokäyttöön käytettävien tietoliikenneyhteyksien toimivuus on varmistettu jatkuvalla valvonnalla. (Fingrid Oyj, 2024c)

Käytön aikana tuulivoimalaitoksia koskee Euroopan komission asetus 2017/2196 eli sähköverkon hätätilaa ja käytönpalautusta koskeva verkkosääntö (NC ER, Network Code for Emergency and Restoration). Asetuksessa on määrätty mm. siirtoverkonhaltijoiden toteuttama hätä-, suurhäiriö- ja palautustilojen hallinta ja verkon käytön unionin laajuinen koordinointi vastavissa tiloissa. Asetusta sovelletaan muun muassa eurooppalaisen verkkosäännön perusteella tunnistettuihin, merkittäviin verkonkäyttäjiin (aiemmin viitatus neliportaisen luokitteluaasteikon mukaisesti) C ja D sekä kaikkiin siirtoverkkoihin, jakeluverkkoihin ja yhdysjohdotuihin. Asetuksessa on esitetty yksityiskohtaisia vaatimuksia esimerkiksi siirtoverkonhaltijoiden välisistä tiedonvaihtokäytänteistä ja tiedonkeruuoikeuksista. Lisäksi asetus esimerkiksi edellyttää merkittävilta verkonkäyttäjiltä vähintään 24 tunnin toimintakykyä ääniviestintäjärjestelmän osalta myös tilanteissa, sähköön syöttö ulkoisesta järjestelmästä on kokonaan loppunut. (Euroopan komissio, 2017) joissa Suomessa Fingrid Oyj vastaa NC ER:n toimenpiteiden määrittelystä ja toteuttamisen seurannasta ja Energiavirasto sen valvonnasta. Fingrid on julkaissut tarkemman kuvauksen toimeenpanosta Suomessa. (Fingrid Oyj, 2024d)

Tämän raportin kirjoittamishetkellä on valmisteilla tai astumassa voimaan uutta, myös tuulivoima-alaa varmasti tai mahdollisesti koskevaa regulaatiota (CER-direktiivi sekä NCCS-asetus). EU:n kyberturvallisuudirektiivi NIS2 astui voimaan syksyllä 2024 koskien sähköön tuottajia eli myös tuulivoima-alaa, jos toimija täyttää asetetut kokokriteerit, tai on CER-kriittinen toimija. NIS2-direktiivin toimeenpaneva kyberturvallisuuslaki astui voimaan keväällä 2025 ja edellytti toimijoiden ilmoittautumista Energiaviraston ylläpitämään toimijaluetteloon, määritettyjen riskienhallintavelvoitteiden toteuttamista sekä merkittävistä poikkeamista raportoimista NIS-ilmoituksella Energiavirastolle. Sähköalan kyberturvallisuutta koskeva verkkosääntö (NCCS) on Suomessa suoraan sovellettavaa regulaatiota, joka mm. täydentää NIS2-direktiivissä säädettyjä yleisiä sääntöjä. (Energiavirasto, 2024) NCCS:n soveltamisalaan kuuluva kyberriskien hallinta edellyttää asetuksen mukaan jäseneltyä prosessia, joka kattaa mm. rajat ylittäviin sähkönsiirtoihin kohdistuvien riskien

tunnistamisen, siihen liittyvät käytännön prosessit, vyöhykerajaukset sekä kyberturvallisuuden varatoimet ja todentamismekanismit. (Euroopan komissio, 2024)

Tuulivoima-alan toimijoita voi lähitulevaisuudessa säädellä myös CER-direktiivi. CER:n kansallinen toimeenpano Suomessa on tämän raportin kirjoitushetkellä vielä kesken. CER-direktiivissä säädetään velvoitteista toteuttaa toimenpiteitä, joilla varmistetaan eräiden välttämättömien yhteiskunnan toimintojen tai taloudellisen toiminnan kannalta keskeisten palvelujen häiriötön tarjonta sisämarkkinoilla, ja erityisesti määrittää kriittiset toimijat ja antaa tukea niille velvoitteiden täyttämiseksi. Lisäksi CER:ssä on mm. säädetty kriittisten toimijoiden velvoitteista ja vahvistettu säännöt, jotka koskevat valvontaa, täytäntöönpanon valvontaa ja kriittisten toimijoiden määrittämistä. (Euroopan Unioni, 2022) Hallitus antoi ehdotuksen laiksi yhteiskunnan kriittisen infrastruktuurin suojaamisesta ja häiriönsietokyvyn parantamisesta joulukuussa 2024. Esityksessä ehdotettiin uusia tehtäviä sektoriministeriöille, viranomaisille sekä vuoden 2026 aikana kriittisiksi tunnistetuille yrityksille. Kriittisiksi tunnistetuilta toimijoilta tullaan lakiesityksen mukaan edellyttämään toimenpiteitä kriittisen infrastruktuurin suojaamiseksi, riskiarviointitoimenpiteitä sekä menettelyjä mm. poikkeamien ilmoittamiseksi. (Sisäministeriö, 2024) Tämän raportin julkaisuhetkellä CER-direktiivin vaikutuksia tuulivoimatoimialaan ei ole tiedossa.

Kokonaan oma sääntelykokonaisuutensa koskee merituulivoimaa, eritoten talousvyöhykkeen merituulihankkeita. Valtioneuvosto lähetti 3.10.2024 eduskunnalle esityksen merituulivoimasta Suomen talousvyöhykkeellä. Esitykseen sisältyi sekä kokonaan uusi laki että muutoksia olemassa olevaan lainsäädäntöön. Merituulivoimaan liittyen julkaistiin Työ- ja elinkeinoministeriön toimesta vuonna 2024 myös merituulivoiman edistämisen toimenpidesuunnitelma. (Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024a; Työ- ja elinkeinoministeriö, 2024b) Koska kyse on vahvasti kehittyvästä ja vielä keskeneräisestä lainsäädännöstä, ja Suomessa on toistaiseksi vasta yksi toiminnassa oleva merituulipuisto, joka sijaitsee aluevesillä, merituulivoiman sääntelyä ei tässä raportissa ole arvioitu tarkemmin.

3. Kirjallisuuskatsaus

Tässä osiossa on toteutettu tuulivoiman resilienssiin ja varautumiseen keskittyvä systemaattinen kirjallisuuskatsaus. Katsaus koostuu yksin omaa julkisesta tiedosta, joka on kerätty vertaisarvioituista tieteellisistä julkaisuista. Osion tarkoituksena on parantaa ymmärrystä siitä, millaiset asiasisällöt ovat nousseet esille viimeaikaisimmassa tieteellisessä tutkimuksessa.

Menetelmäkuvaus

Kirjallisuuskatsaukset auttavat vastaamaan kysymyksen siitä, millaisia tutkimattomia aihealueita tai puutteita kohteena olevasta aihealueesta löytyy. Kirjallisuuskatsauksissa tutkitaan tutkimuksia eli niissä selvitetään, millaista tutkimusta niiden kohteena olevasta aiheesta on tehty, ja kuinka aihepiiriä voitaisiin tulevaisuudessa työstää esimerkiksi ammatti- tai tieteenalalla. Kirjallisuuskatsauksilla voidaan myös luoda uusia käytänteitä, ohjeita ja ohjeistuksia sekä uusia tutkimuskysymyksiä. (Vilka, 2023, 7)

Tämän raportin kirjallisuuskatsaus toteutettiin *systemaattisen kirjallisuuskatsauksen* menetelmiä mukaillen. Systemaattisen kirjallisuuskatsauksen lähtökohtana ovat tarkat, järjestelmälliset ja toistettavat menettelytavat, joihin viitataan käsitteellä protokolla. Niiden tavoitteena on synnyttää puolueettomia, yleistettäviä ja uskottavia tuloksia. (Vilkan 2023 synteesi lähteistä: Booth ym. 2022, 6–7; Fink, 2020, 20–21; Fan ym. 2022, 4; Efron & Ravid, 2019, 33) Tämän raportin kirjallisuuskatsaus noudatti PRISMA-metodologiaa (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) sovellettuna selvityksen tarpeisiin.

Katsaukset toteutus

Katsausta varten etsittiin vertaisarvioituja tutkimusartikkeleita kahdesta tietokannasta (Web of Science ja Scopus) alla luetelluilla hakutermeillä. Katsaus rajattiin koskemaan vuosina 2020–2024 julkaistuja artikkeleita. Seulontakriteereinä käytettiin julkaisun aihetta, ikää ja julkaisumuotoa. Konferenssijulkaisut jätettiin katsauksen ulkopuolelle.

- “Wind power” and resilience
- “Wind energy” and resilience
- “Wind power” and preparedness
- “Wind energy” and preparedness
- “Wind power” and readiness
- “Wind energy” and readiness

Mainituilla hakukriteereillä tunnistettiin päällekkäisyyksien poistamisen jälkeen 300 vertaisarvioitua tutkimusartikkelia. Ensimmäisessä seulonnassa katsauksen ulkopuolelle suljettiin otsikkojen perusteella ne julkaisut, joissa ei ollut merkittävää tuulivoima- tai resilienssi-liittymäpintaa. Toisessa seulontavaiheessa jäljellä olevista, tuulivoimaan ja sähköjärjestelmään sekä resilienssiin liittyvistä artikkeleista poissuljettiin tiivistelmien perusteella ne tutkimukset, jotka eivät käsitelleet riittävässä määrin tuulivoimajärjestelmien resilienssiä, vaan esimerkiksi yksittäisten tuulivoimalatyyppien teknisiä ominaisuuksia tai laajemmin sähköjärjestelmänäkökulmia. Kolmannessa ja viimeisessä seulontavaiheessa jäljellä olevat artikkelit analysoitiin tarkemmin, ja katsauksen ulkopuolelle jätettiin ne julkaisut, joiden tavoitteet eivät olleet olleet linjassa katsauksen tavoitteiden kanssa.

Lopulliseen katsaukseen päätyi 46 vertaisarvioitua tutkimusartikkelia. Näitä tutkimuksia tarkasteltiin siitä näkökulmasta, millaisia asiakokonaisuuksia, uhkamalleja, riskejä, riippuvaisuuksia tai rakenteita niissä on tuotu esille. Pyrkimyksenä oli kuvata ja teemoitella tuulivoiman resilienssiä koskevan tutkimuksen aihepiirejä yleisellä tasolla. Katsaus ei näin ollen kerro yksiselitteisesti, mitkä riskit ovat tuulivoima-alan näkökulmasta vakavimpia tai todennäköisimpiä, vaan kuvaa kirjallisuudessa esiin nousevia havaintoja ja riskikategorioita.

Katsauksen tulokset

Toteutetun kirjallisuuskatsauksen tulokset voidaan luokitella kuuteen temaattiseen kategoriaan (luettelo alla). Artikkelikohtainen tiivistelmä on esitetty taulukossa 3.

Tuulivoiman häiriönsietoisuus. Kategoriaan luokitellut tutkimukset käsittelevät resilienssiä, tai yleisimmin teknistä häiriönsietoisuutta, tuulivoimajärjestelmien optimaalisen hallinnan tai esimerkiksi riskienhallinnan kautta. Kategoriaan luokitelluissa tutkimuksissa on käsitelty myös toimenpiteitä ennen häiriötilanteita, niiden aikana ja niiden jälkeen, sekä mm. häiriötilanteiden edellyttämää sidosryhmäyhteistyötä.

Äärimmäiset sääilmiöt. Kategoria sisältää esimerkiksi myrskyihin ja luonnonmullistuksiin sekä niiden vaikutuksen arviointiin liittyviä tutkimuksia. Osassa tutkimuksia on myös esimerkiksi arvioitu rakenteellista kestävyyttä ja keskittyty erityisesti merituulivoimaan.

Merituulivoima nousi selkeänä teemakategoriana esille tutkimuskirjallisuuden joukosta. Sitä koskeva tutkimus liittyi usein myös joko tuulivoiman häiriönsietoisuuteen, äärimmäisiin sääilmiöihin tai rakenteisiin sekä niiden kestävyYTEEN.

Kyberturvallisuus. Tämän kategorian tutkimuksissa oli sekä arvioitu uuden teknologian kyberriskejä että tutkittu yksittäisten hyökkäysmenetelmien toimivuutta ja mahdollisia vaikutuksia. Kategorian tutkimuksissa oli myös kehitetty strategioita ja käytänteitä kyberturvallisuuden parantamiseksi.

Sähköjärjestelmänäkökulmat. Kategoriassa käsiteltiin esimerkiksi tuulivoiman lähivikasetoisuutta, inertian vähenemistä, kytkentätapoja tai yleisesti sähköjärjestelmäsuunnittelua. Merkittävä määrä kategorian mukaisia tutkimuksia rajattiin katsauksen ulkopuolelle vähäisen tuulivoimakytöksen vuoksi.

Rakenteet ja niiden kestävyys. Kategorian tutkimuksissa selvitettiin esimerkiksi äärimmäisille sääoloille altistuvien tuulivoimaloiden rakenteiden lujuutta ja kestävyttä, esimerkiksi salamaniskuja tuulivoimalan lapoihin.

Kuva 3. Katsaukseen valikoituneet tutkimukset ja niiden teemoittelu sekä keskeinen sisältö.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
A probabilistic fraework for offshore wind turbine loss assessment	2020	Wilkie & Galasso, 2020	Merituulivoima Äärimmäiset sääilmiöt Rakenteet ja niiden kestävyys	Merituulivoimaloihin liittyvät riskit kovasta tuulesta ja aalloista, taloudellisten vahinkojen arvioimiseen soveltuvan viitekehyksen kehittäminen.
Design structure matrix (DSM) method application to issue of modeling and analyzing the fault tree of a wind energy asset	2020	Konstantinidis et al., 2020	Rakenteet ja niiden kstävyys Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Artikkelissa hyödynnetään Design Structure Matrix-menetelmää häiriöihin ja riskeihin tuulivoimajärjestelmissä; erilaisten häiriöiden mahdollisuutta ei voida eliminoida edes parhaalla mahdollisella suunnittelulla.
Emergency preparedness and response: Insights from the emerging offshore wind industry	2020	Pedersen & Ahsan, 2020	Merituulivoima Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Merituulivoiman kasvu edellyttää enemmän toimijoiden keskinäistä yhteistyötä. Tutkimus kartoitti toimijoiden häiriötilanteiden hallintaa ja niihin liittyen viranomaisten roolia.
Quantification and visualisation of extreme wind effects on transmission network outage probability and wind generation output	2020	Jamieson et al., 2020	Äärimmäiset sääilmiöt Sähköjärjestelmänäkö-kulmat	Tutkimuksen lähestymistavalla havainnollistetaan ilmajohdojen häiriöitä ja tuulivoiman antamaa tehoa äärimmäisissä tuuliolosuhteissa.
Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review	2020	Cheng et al., 2020	Sähköjärjestelmänäkö-kulmat	Review-tutkimus, jossa käsitellään älykästä taajuuden hallintaa tuulivoimajärjestelmissä. Taustalla on tuulivoiman tehoelektroniikkaan pohjaava kytkentätapa, joka ei tuota inerttia verkkoon.
Forecasting renewable energy for environmental resilience through computational intelligence	2021	Khan et al., 2021	Merituulivoima Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Merituulivoiman ennustamisesta on tullut yhä haastavampaa. Tutkimuksessa on vertailtu olemassa olevia ennustemalleja toimivan strategian tunnistamiseksi.
Resilience assessment of wind farms in the arctic with the application of bayesian networks	2021	Mustafa & Barabadi, 2021	Äärimmäiset sääilmiöt Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tutkimuksessa ns. resilienssimuuttujien (reliability, maintainability, supportability, organizational resilience) välistä suhdetta tarkastellaan verkkotodennäköisyysmallin (Bayes-verkko) avulla tuulivoiman häiriönsietoisuuden parantamiseksi.
The different characteristics of real options in contracts of wind power in Brazil	2021	Delapedra-Silva, 2021	Muut	Tutkimuksessa tarkastellaan tuulivoiman kaupallistamista koskevia sopimuksia Brasi-liassa sekä niihin liittyviä epävarmuuksia ja reaali-optioihin liittyviä riskejä.
Features of the Operation of Wind Power Plants in an Electric Power System	2021	Sigitov & Chembo-risova, 2021	Sähköjärjestelmänäkö-kulmat	Tutkimuksessa on kartoitettu perinteisen sähköntuotannon kykyä seurata sään mukaan vaihtelevaa tuotantoa.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
Reducing material criticality through circular business models: Challenges in renewable energy	2021	Velenturf et al., 2021	Muut	Artikkelissa on käsitelty tuuli- ja aurinkovoiman kriittisten materiaalien kiertotalouteen liittyvän tutkimuksen aukkoja sekä käytänteisiin liittyviä, politiikkatason haasteita.
A risk-averse multiyear framework for resilience improvement planning of active distribution networks against hurricanes	2022	Faramarzi et al., 2022	Äärimmäiset sääilmiöt Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tutkimus esittää strategian siirtolinjojen suunnittelemiseksi siten, että ne ovat suojassa tai kestävät paremmin hurrikaaneja.
Assessment of the Reliability of Wind Farm Devices in the Operation Process	2022	Duer et al., 2022	Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tutkimuksessa tehtiin simulaatiotestejä tuulivoiman operoinnissa tarvituille laitteille. Tutkimuksen mukaan testien perusteella on mahdollista arvioida laitteiden (esim. tuuliturbiinit, muuntajat, jne.) luotettavuutta sekä parantaa tuulipuistoon liittyvien laitteiden laatua.
Dynamic Performance Assessment of PMSG and DFIG-Based WECS with the Support of Manta Ray Foraging Optimizer Considering MPPT, Pitch Control, and FRT Capability Issues	2022	Mahmoud et al., 2022	Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tuulivoimajärjestelmät ovat alttiita rajoille ympäristöllisille olosuhteille ja verkkovioille. Tutkimuksessa on selvitetty, miten kaksi valittua turbiinityyppiä reagoi tuulennopeuden muutoksiin ja vaarallisiin kolmivaihevikoihin. Optimoitujen ohjaimien luotettavuutta on arvioitu simulaatiotestien perusteella.
Enablers of management system resilience in wind power plant	2022	Dashtpeyma & Ghodsi, 2022	Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tutkimuksen tavoitteena oli koota viitekehys, joka mahdollistaa tuulivoimaloiden häiriönsietoisuuden / resilientin hallintajärjestelmän kehittämisen. Tutkimuksessa noteerattiin sekä alan julkaisuja että asiantuntijoiden mielipiteitä.
Importance measure-based resilience analysis of a wind power generation system	2022	Dui et al., 2022	Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Koska tuulivoiman tuotantoon liittyy olennaisesti satunnaisuus ja volatiilisuus, tuotanto on herkempää ulkoisten tekijöiden synnyttämille häiriöille. Näiden piirteiden takia tarvitaan toimivia häiriönsietoisuuskäytänteitä, joita on kehitetty julkaisussa analysoidulla tuulivoimajärjestelmiä ennen ja jälkeen ns. multi-noodivikojen (multi-node failures).
Modelling and utilisation of frequency responsive TCSC for enhancing the frequency response of a low inertia grid	2022	Shazon et al., 2022	Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tutkimuksen tavoitteena on parantaa taajuudenhallintaa TCSC-mallin (Thyristor Controlled Series Capacitor) avulla. Taustalla on se, että tuulivoimalat eivät tue verkon taajuuden vakautta.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
Resilient scheduling of MESSs and RCs for distribution system restoration considering the forced cut-off of wind power	2022	Wu et al., 2022	Äärimmäiset sääilmiöt Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tutkimuksessa on esitetty palautumisstrategia tilanteeseen, jossa tuulivoimajärjestelmä on vaurioitunut hurrikaanin vaikutuksesta. Menetelmä on verifioitu simulaation avulla.
Secure Sampled-Data Observer-Based Control for Wind Turbine Oscillation under Cyber Attacks	2022	Amini et al., 2022	Kyberturvallisuus	Tutkimuksessa kuvataan suurille tuulipuistoille soveltuva hallintaviitekehys määriteltäviä kyberhyökkäyksiä, esim. palvelunesto-hyökkäyksiä, vastaan.
Surge analysis on wind farm considering lightning strike to multi-blade	2022	Hosseini et al., 2022	Äärimmäiset sääilmiöt Rakenteet ja niiden kestävyys	Tutkimuksessa on mallinnettu yhdeksän tuulivoimalan tuulipuistoa, johon kohdistuu tuulivoimalan lavan kautta salamanisku. Tulokset auttavat parantamaan puistojen suojausta salamaniskuja vastaan.
Towards resilience of offshore wind farms: A framework and application to asset integrity management	2022	Liu et al., 2022	Merituulivoima Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tutkimuksessa merituulipuistot on jäsennetty system-of-systems-mallin kautta kuvaten samalla systeemien välisiä riippuvuuksia ja kehittämällä todennäköisyysperustaisen kehyksen merituulipuistojen häiriönsietoisuuden mallintamiseen ja analysointiin. Viitekehyksen pohjalta on tutkittu käyttöomaisuuden hallinnan kannalta merkityksellisten vaihtoehtojen vaikutuksia.
Behavior of Mono Helical Pile Foundation in Clays under Combined Uplift and Lateral Loading Conditions	2022	Venkatesan & Mayakrishnan, 2022	Merituulivoima Rakenteet ja niiden kestävyys	Merituulivoimaloiden perustus on ns. perustavanlaatuinen haaste merituulivoimaloiden suunnittelussa. Tutkimuksessa selvitettiin mono helical pile-perustuksen käyttäytymiseen pehmeässä savipohjassa. Malli on verifioitu analyysitulosten ja pienimuotoisen laboratoriotestin avulla. Sitä voidaan hyödyntää arvioitaessa nousu- ja sivukuormitusta.
A Cross-Layer Design Approach to Strategic Cyber Defense and Robust Switching Control of Cyber-Physical Wind Energy Systems	2023	Chen & Zhu, 2023	Kyberturvallisuus	Tutkimuksessa on esitetty system-of-systems- mallin mukainen viitekehys kyberfyysisille tuulivoimajärjestelmille. Tutkimuksen taustalla on tarve ennaltaehkäistä kyberhyökkäyksiä ja loiventaa niistä syntyviä vaikutuksia. Eritelty ratkaisu tukee tuulitoimijoita optimaalisessa suojaautumisessa kyberhyökkäyksiä vastaan.
Adaptive Observer-Based Resilient Control Strategy for Wind Turbines Against Time-Delay Attacks on Rotor Speed Sensor Measurement	2023	Zhao et al., 2023a	Kyberturvallisuus	Tutkimuksessa on käsitelty ns. aikaviivehyökkäystä (time-delay attack), jossa ylikuormitetaan roottorin nopeusanturin ja säätimen välistä yhteyslinkkiä, sekä kehitetty menetelmä tämän tyyppiseen hyökkäykseen puolustautumiseksi.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
Instrumentation and Measurement Systems: Aerosense: A Wireless, Non-Intrusive, Flexible, and MEMS-Based Aerodynamic and Acoustic Measurement System for Operating Wind Turbines	2023	Polonelli et al., 2023	Tuulivoiman häiriönsietoisuus Rakenteet ja niiden kestävyys	Tutkimus vastaa tarpeeseen kehittää standardoitu monitorointiratkaisu kriittisten rakenteellisten komponenttien, kuten lapojen, suorituskyvyn tarkkailuun.
An Enhanced AC Fault Ride through Scheme for Offshore Wind-Based MMC-HVDC System	2023	Soomro et al., 2023	Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tutkimuksessa on esitetty oikosulkuvikoihin liittyvä strategia modulaarisille, monitasoisille ja korkeajännitteisille merituulivoimakohteille (MMC-HVDC, modular multilevel converter based high voltage direct current).
Cybersecurity Resilience Demonstration for Wind Energy Sites in Co-Simulation Environment	2023	Mccarty et al., 2023	Kyberturvallisuus	Tutkimuksessa laadittiin hyökkäysskenaarioita sisältäen sekä etä- että paikallisen pääsyn tuulivoimajärjestelmiin ja mm. tutkittiin hyökkäyksen havainnointiin liittyvien järjestelmien toimivuutta ja parantamista edelleen.
De-Loaded Technique Enhanced by Fuzzy Logic Controller to Improve the Resilience of Microgrids Based on Wind Energy and Energy Storage Systems	2023	Mahrouch et al., 2023	Sähköjärjestelmänäkökulmat	Koska tuulivoimalat ovat erittäin herkkiä sähköverkoissa tapahtuville häiriöille, ja ne voivat pudota verkosta taajuuden heitellessä, tuulivoimalta odotetaan lisäistä pätöthoa tilanteisiin, joissa taajuus muuttuu. Tutkimuksessa on esitetty uusi tekniikka edellä mainittuun haasteeseen.
Designing off-grid renewable energy systems for reliable and resilient operation under stochastic power supply outages	2023	Javed et al., 2023	Äärimmäiset sääilmiöt Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tuulivoimalat ovat herkkiä äärimmäisille sääilmiöille. Tutkimuksessa on luotu skenaarioita erilaisista tapahtumaketjuista sekä kehitetty mitoitusmenetelmä verkon ulkopuoliselle sähköjärjestelmälle syöttämään vähimmäistehokynnys sähkökatkosten aikana.
Dual-Triggered Adaptive Torque Control Strategy for Variable-Speed Wind Turbine Against Denial-of-Service Attacks	2023	Zhao et al., 2023b	Kyberturvallisuus	Tutkimuksessa esitetään säätöstrategia muuttuvanopeuksiselle tuuliturbiinille (VSWT, variable speed wind turbine). Ehdotetulla strategialla esitetään voivat parantaa tuulivoimaloiden hyökkäyskestävyyttä palvelunoestohyökkäyksiä vastaan ja säästää erilaisia resursseja.
Optimal resilience enhancement dispatch of a power system with multiple offshore wind farms considering uncertain typhoon parameters	2023	Liang et al., 2023	Äärimmäiset sääilmiöt Tuulivoiman häiriönsietoisuus Merituulivoima	Tutkimus käsittelee merituulivoiman häiriönsietoisuuden parantamista taifuunien vaikutuksia vastaan ja esittää kolmivaiheisen ORED-viitekehityksen (optimal resilience enhancement dispatch) ongelman ratkaisemiseksi.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
Parameter Optimization for Var Planning of Systems With High Penetration of Wind Power: An Adaptive Equivalent Reduction Method	2023	Xue et al., 2023	Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tuulivoimavaltaisissa järjestelmissä jännitteen vaihtelu ja loistehokapasiteetin puute ovat yleisiä haasteita. Artikkelissa on ehdotettu uutta lähestymistapaa ongelman ratkaisemiseksi (APO-ERO, adaptively parameter order equivalent reduced optimization).
Resilience management processes in the offshore wind industry: schematization and application to an export-cable attack	2023	Köpke et al., 2023	Merituulivoima Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Merituulivoiman kasvuun liittyy kasvavia paineita huomioida erilaisia turvallisuuskäsitteitä. Tutkimuksessa on kehitetty ratkaisuja ja lähestymistapaa turvallisuuskäsitteiden hallitsemiseksi merituulivoimainfrastruktuureissa.
Resilience-Oriented Restoration Strategy by Offshore Wind Power Considering Risk	2023	Rong et al., 2023	Merituulivoima Äärimmäiset sääilmiöt Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tutkimuksessa käsitellään merituulivoiman palautumisstrategiaa tavoitellen palautumisprosessin tehostamista. Artikkelissa on mallinnettu sekä yksittäisen voimalan että kokonaisen tuulipuiston häiriömalli äärimmäisen sään vaikutuksen osalta. Strategian toimivuus todennetaan esimerkkijärjestelmässä.
Risk-Based Dispatch Strategy for a Power System with High Wind Power Integration Considering Damage Due to Typhoons	2023	Wang et al., 2023	Äärimmäiset sääilmiöt Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tutkimuksessa esitetään ajojärjestysstrategia sähköjärjestelmälle, jossa on paljon tuulivoimaa, ja johon kohdistuu taifuunille tyypillisiä ilmiöitä ja ongelmia.
Machine Learning-Adjusted WRF Forecasts to Support Wind Energy Needs in Black Start Operations	2023	Hugeback et al., 2023	Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Tuulivoimatuotannon lisääntyneen määrän edellyttää entistä tarkempia tuulienustuksia. Tutkimuksessa on tutkittu muutamia koneoppimismenetelmiä ennusteisiin ja niiden korjaamiseen.
A Hybrid MMC Control Strategy to Enhance the Resilience of DC Transmission System	2024	Mei et al., 2024	Sähköjärjestelmänäkökulmat	Merituulivoimajärjestelmiin, joissa on joustava tasasiirtoyhteys, liittyy haasteita mm. vakaan tilan suorituskyvyn parantamisessa. Kaikkia näkökulmia ei käsitellä nykyisissä valvontastrategioissa. Tutkimuksessa on esitetty tämän pohjalta koordinoitua, uutta ohjausstrategiaa.
Adversarial false data injection attacks on deep learning-based short-term wind speed forecasting	2024	Yang et al., 2024	Tuulivoiman häiriönsietoisuus Kyberturvallisuus	Tuulivoimatuotannon syöttäminen älyverkkoihin edellyttää tarkkoja tuuliennusteita, mutta koska tuuliennusteet perustuvat datalähtöisiin syväoppimismalleihin, ne ovat alttiita erilaisille kyberhyökkäyksille. Tutkimuksessa on tutkittu virheellisen datan injektioimiseen perustuvaa taktiikkaa (false data injection attack tactic) uhkamallin ymmärtämiseksi. Tutkimuksessa kehitetään myös optimointimalli ja tehdään numeerisia tutkimuksia ehdotetusta hyökkäystaktiikasta eri tuulen nopeuden ennustemalleilla.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
Assessment of the tropical cyclone-induced risk on offshore wind turbines under climate change	2024	Wen et al., 2024	Merituulivoima Äärimmäiset sääilmiöt	Tutkimuksessa kehitetään synteettinen trooppisen syklonin riskiä kuvaava data-syöte, joka mallintaa trooppisia sykloneja 10 000 vuoden ajalta. Lisäksi kehitetään datan pohjalta viitekehys ja luotettavuusanalyysi häiriöiden todennäköisyyden arvioimiseksi.
Coordination of preventive and emergency dispatch in renewable energy integrated power systems under extreme weather	2024	Rong et al., 2024	Äärimmäiset sääilmiöt Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Äärimmäiset sääilmiöt ovat aiheuttaneet merkittäviä vahinkoja voimajärjestelmälle samalla, kun lisääntynyt uusiutuva energia on tuottanut uusia haasteita. Tutkimuksessa on esitetty metodologiaa ennaltaehkäisevien ja häiriötilanteiden aikaisten toimenpiteiden koordinoimiseksi puolustajahyökkääjä-puolustaja-mallin pohjalta.
Cyber resilience of power electronics-enabled power systems: A review	2024	Hou et al., 2024	Kyberturvallisuus	Review-artikkeli, jossa on selvitetty tehoelektroniikan kyberresilienssiä ennen, jälkeen ja kyberhäiriötilanteiden aikana.
Graph Temporal Attention Network for Imbalanced Wind Turbine Blade Icing Prediction	2024	Ying et al., 2024	Äärimmäiset sääilmiöt	Lapojen jäätymisen tavalliset ratkaisut ovat kalliita. Tutkimuksessa on esitetty datalähtöinen ratkaisu, jota testattiin kolmesta turbiinista saadulla datalla. Lisäksi tutkimuksessa toteutettiin kattavia analyysejä jäätymistapahtumien tarkan ennustamisen todentamiseksi uudella mallilla.
Grid Integration of Offshore Wind Power: Standards, Control, Power Quality and Transmission	2024	Wu et al., 2024	Merituulivoima Sähköjärjestelmänäkökulmat	Tutkimuksessa on esitetty katsaus state-of-the-art-teknologioihin merituulivoiman verkkokytkeämisessä sekä pohdittu tuulivoiman hallintastrategioita sekä uusia näkökulmia näihin liittyen, mm. verkkoa luova (grid forming) menetelmä.
Injecting Offshore Wind Power into the Grid: Readiness Looking Back on the Past Few Decades since the Global Beginning	2024	Biswas & Singh, 2024	Merituulivoima	Artikkelissa on tarkasteltu merituulivoimaan ja sen kehitykseen liittyviä näkökulmia sitten ensimmäisen merituulivoimalaitoksen käyttöönoton v. 1991. Artikkelissa on korostettu olevan tärkeää ymmärtää merituulivoiman kehittämiseen liittyviä yleisiä näkökohtia ja rajapintaa verkon vakauden näkökulmasta.
Stochastic Unit Commitment with High-Penetration Offshore Wind Power Generation in Typhoon Scenarios	2024	Liu et al., 2024	Merituulivoima Äärimmäiset sääilmiöt	Tutkimuksessa on kehitetty kaksivaiheinen malli (stochastic unit commitment model) parantamaan voimajärjestelmän häiriönsietoisuutta taifuuniskenaarioissa. Menetelmän toimivuutta on validoitu numeerisilla testeillä.

JULKAISU	VUOSI	VIITE	KATEGORIA	SISÄLTÖ
Ultra-short-term wind power forecasting based on personalized robust federated learning with spatial collaboration	2024	Zhao et al., 2024	Tuulivoiman häiriönsietoisuus	Artikkelissa on esitetty erittäin lyhyen aikavälin tuuliennustemalli, joka mahdollistaa tuulipuistojen välisen alueellisen yhteistyön.
Leveraging Deep Learning to Strengthen the Cyber-Resilience of Renewable Energy Supply Chains: A Survey	2024	Halgamuge, 2024	Kyberturvallisuus	Review-artikkeli, jossa on tehty katsaus syväoppimista koskevaan tutkimukseen uusiutuvan energian kyberresilienssin parantamisen näkökulmasta.

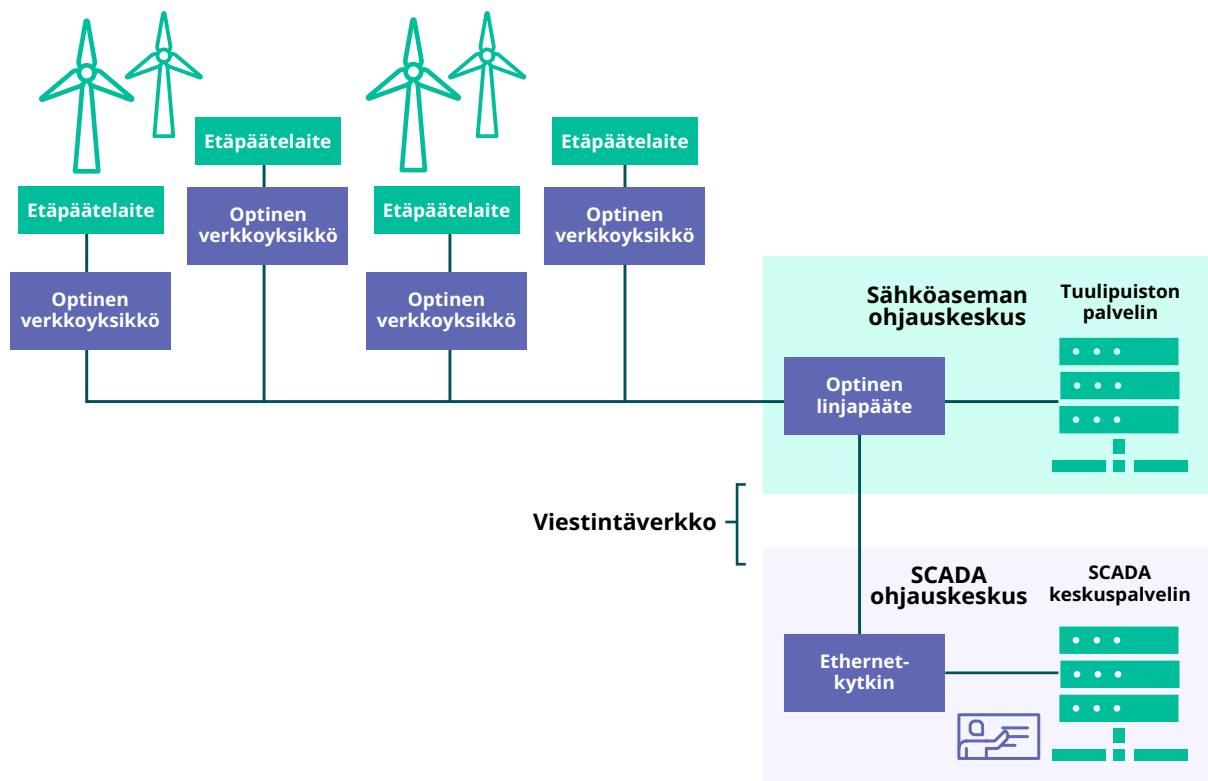
Katsauksessa nousivat jokseenkin odotetusti vahvasti esiin ympäristölliset riskitekijät ja uhkamallit. Äärimmäisten sääolosuhteiden osalta tuulivoimaa koskevassa tutkimuksessa korostuvat etenkin voimakkaat myrskyt, kuten taifuunit, joiden voimakkuuden, vaikutusten ja etenemisreittien ennakointi vaikuttaa olevan merkittävä kysymys etenkin Aasiassa (Rong et al., 2023; Wang et al., 2023; Liu et al., 2024). Tutkimuksessa on korostettu sekä tuulivoiman että laajemmin sähköjärjestelmän haavoittuvuutta äärimmäisille sääilmiöille, joista taifuunien lisäksi on mainittu muut myrskyt, trooppiset syklonit, kova tuuli, aallokko, raemyrskyt, jäätäminen (Wilkie & Galasso, 2020; Fatamarzi et al., 2022; Javed et al., 2023; Liang et al., 2023; Wen et al., 2024; Rong et al., 2024; Liu et al., 2024), arktiset sääolosuhteet (Mustafa & Barabadi, 2021), ja ukkonen (Hosseini et al., 2022). Äärimmäisten sääilmiöiden vaikutusten arvioiminen voi tutkimusten perusteella olla haastavaa, mutta välttämätöntä (Mustafa & Barabadi, 2021; Jamieson et al., 2020).

Suomen näkökulmasta mahdollisesti kiinnostavimpia ympäristöllisiin näkökohtiin liittyviä havaintoja ovat kova tuuli, aallokko, jäätäminen, arktiset sääolosuhteet, ukkonen sekä raemyrskyt. Tutkimuskirjallisuudessa on esitetty ja arvioitu monenlaisia ratkaisuja sääolosuhteisiin varautumiseksi ja niiden vaikutusten minimoimiseksi. Esimerkiksi jäätämisen varhainen havaitseminen on tärkeää, ja datapohjaisilla ratkaisuilla voidaan parantaa tähän liittyvää varautumista (ks. esim. Ying et al., 2024). Pitkäkestoisimmissa häiriöissä tarvitaan myös sähkövarastoja tai akkuja. (Javed et al., 2023) Yksityiskohtaisten havaintojen tekeminen tehokkaimmasta ympäristöllisiin häiriötekijöihin varautumisesta edellyttää tutkimuksissa esitettyjen toimenpiteiden tarkempaa arviointia. Onko Suomessa niin voimakkaita matalapaineita tai myrskyrintamia, että esimerkiksi merituulivoiman lisääntyessä niiden reittien mallintamisesta tulee kriittisempää (vrt. esim. taifuunien reittien mallintaminen, mm. Rong et al., 2023)?

Toinen odotettu, esille noussut teema oli kyberturvallisuus. Katsauksen perusteella käy selväksi, että tuuli-

voimajärjestelmät ovat kyberfyysisiä ja riippuvaisia monimutkaisien tieto- ja viestintäjärjestelmien jatkuvaluonteisesta toiminnasta. (Chen & Zhu, 2023; Hoe et al., 2024) Ohjauksessa käytettävässä SCADA-järjestelmässä (Supervisory Control And Data Acquisition) luodaan ohjauskomennot paikallisten sensoreiden pohjalta, ja ne lähetetään palvelimille. Jos SCADA-järjestelmään tai turbiinin hallintatyökaluihin kohdistetaan hyökkäyksiä, vahingot voivat olla merkittäviä. Koska kyberhyökkäykset ovat nykyisin hyvin kehittyneitä, niiden torjunta edellyttää ns. strategista puolustautumista pelkkien vahvojen palomuurien suunnittelemisen sijaan. (Chen & Zhu, 2023) Tuulivoiman turvallinen operointi edellyttää sekä luotettavia tuuliennusteita, toimivia ohjaus- ja hallintamenetelmiä, turbiinitason komentotoimia sekä kokonaan uudenlaisten sähkötekniisten ratkaisujen ohjausta. Kirjallisuuskatsauksen havaintojen perusteella tieto- ja viestintätekniologian käyttö lisää järjestelmien hyökkäyspinta-alaa, ja kaikkiin edellä mainittuihin liittyy kyberturvallisuusriskejä esimerkiksi palvelunestohyökkäysten muiden hyökkäysten (mm. FDIA, False Data Injection Attack; TDA, time delay attack) muodossa. (ks. esim. Yang et al., 2024; Amini et al., 2022; Mccarty et al., 2023; Zhao et al., 2023).

Bianchinin ja Pasqualettin mukaan (2018, 157) kyberfyysisiä järjestelmiä koskeva kirjallisuus on keskittynyt kahteen näkökulmaan: palvelunestohyökkäyksiin (DoS) ja huijaus- tai harhautustekniikoihin (deception technology). Huijaustekniikoissa verkostoissa vaihdettavan tiedon luotettavuus ja eheys vaarantuu esimerkiksi anturien, toimilaitteiden ja viestintäkanavien käyttäytymistä muokkaamalla. Palvelunestohyökkäyksissä puolestaan estetään laitteiden toimintaa esimerkiksi viestintäkanavia tukkimalla. Kyberfyysisten järjestelmien toiminnan kannalta olisi kuitenkin hyvä kiinnittää huomiota myös ajoitushyökkäyksiin, joissa lähetettyjen tietojen sisältöön ei kajota, vaan ainoastaan pyritään viivästyttämään niiden kulkua, pyrkien häiritsemään järjestelmien toimintaa ja suorituskykyä. (Bianchini & Pasqualetti, 2018, 157–158; Amini et al., 2022)



Kuva 3. Havainnekuva tuulivoimajärjestelmästä ja sen ohjauksesta (muokattu lähteestä Chen & Zhu, 2023).

Monien tarkasteltujen tutkimusten perusteella tuuliennusteet ovat haavoittuvia kyberhyökkäyksille, ja aihetta on tutkittu vain vähän. Tuuliennusteita voidaan esimerkiksi korruptoida syöttämällä järjestelmiin virheellistä dataa. (Yang et al., 2024) Zhao et al., (2023) puolestaan kuvaavat ns. ajoitushyökkäystä, jossa nopeussensorin ja turbiinin välisen viestilinkin toimintaa häiritään, mikä on verrattain helppoa toteuttaa, ja voi johtaa onnistuessaan turvallisen tuotannon vaarantumiseen sekä voimansiirron ylikuormittumiseen. Tuulivoimajärjestelmien turvallisuuden parantaminen ennen hyökkäyksiä, niiden aikana ja niiden jälkeen edellyttää järjestelmien kyberhaavoittuvuuksien ja kyberhyökkäysinjektioiden tunnistamista sekä vaikutuksiin vastaamista ja niiden minimoimista. Erityisesti tehoelektroniikan on kirjallisuudessa korostettu olevan varhaisessa kehitysvaiheessa ja siihen liittyy yhä paljon ratkaisemattomia ongelmia. (Hoe et al., 2024) Kyberriskien realisoituminen voi johtaa vakaviin vaikutuksiin, etenkin, jos niihin liittyy SCADA-järjestelmiin suunnattuja toimia. Nykyaikaiset kyberhyökkäykset ovat yksityiskohtaisia ja huomaamattomia, minkä takia niihin tulisi vastata huolella. (Chen & Zhu, 2023) Toisaalta myös kyberresilienssiä parantavia teknologioita on tunnistettu ja niiden toimivuutta on arvioitu. (Mccarty et al., 2023)

Kolmas merkittävä uhkakategoria liittyy sähköjärjestelmään ja sähköjärjestelmätason hallintaan sekä riskeihin. Useissa lähteissä on korostettu esimerkiksi

sitä, että tuulivoimalat on kytketty sähköverkkoon tehoelektroniikan avulla, eivätkä ne tuota verkkoon ns. inerttia (mm. Cheng et al. 2020; Shazon et al., 2022; Xue et al., 2023), toisin kuin pyöriin koneisiin perustuva perinteinen lämpövoimatuotanto, jonka katsotaan voimakkaimmin ylläpitävän sähköverkon taajuutta sen muutoksia vastustamalla. Inertian vähenemiseen ja tehoelektroniikan käyttöön liittyviä sähköteknisiä haasteita onkin kuvattu tutkimuksessa monipuolisesti. Taajuuden ylläpitämiskäytänteiden muuttuessa on myös esitetty useita ratkaisuja, myös tuuliturbiinitasolle. (Cheng et al. 2020; Shazon et al., 2022) Vaikka tuuliennusteita on kuvattu tarkoiksi, tuulivoimatuotannon vaihteleva luonne haastaa sähköjärjestelmää, ja edellyttää mm. perinteisen säätövoiman käyttöä ja tarvittaessa tuulivoiman alasajoa tilanteissa, joissa tuotantoa on liikaa. (Sigitov & Chemborisova, 2021).

Katsauksen mukaan tuulivoimalat ovat herkkiä verkkotason vioille ja voivat esimerkiksi pudota kokonaan verkosta jännitekuoppien tai heikon lähivikasioitaisuutensa vuoksi. (Maahrouch et al., 2023; Xue et al., 2023; Soomro et al., 2022; Mahmoud et al., 2022) Järjestelmä-vastaavien verkkokoodissa edellytetään tyypillisesti kykyä pysyä verkossa esimerkiksi jännitekuopissa. Aihepiirin on kuitenkin todettu tarvitsevan enemmän tutkimusta. Joidenkin katsausten mukaan lisää tutkimusta tarvitaan esimerkiksi tuulivoimaloiden black start-kyvykkyydestä, verkkoa rakentavasta (grid-forming)-

invertteriteknologiasta ja HVDC (high voltage direct current)-kehityskulusta, jota on sovellettu ainakin merituulihankkeissa. (Wu et al., 2024) Jännitteen ylläpitämiseen kehittyvissä järjestelmissä liittyy kompleksisia haasteita (Xue et al., 2023), vaikka ratkaisuja selkeästi tutkitaan paljon. Laadullisesti arvioiden vaikuttaa siltä, että sähköjärjestelmätasoon liittyvää tutkimusta on tehty merkittäviä määriä, eikä tämän selvityksen laajuudessa katsauksessa edes yritetty tunnistaa siihen liittyviä puutoksia

Resilienssi on ollut tutkimusmaailman kiinnostuksen kohteena ainakin kaksisataa vuotta. Käsitteen tieteellinen määrittely kuitenkin odottaa selkiyttäjäänsä – myös energiasektorin osalta. Kenties tunnetuimpia määritelmiä resilienssille on esitellyt mm. Holling (1970) ekologisia systeemeitä koskien. Resilienssin käsitettä on sovellettu myös tuulivoiman osalta, lähinnä kuitenkin teknisen häiriönsietoisuuden ja palautumiskyvyn näkökulmasta, kuten alla on osoitettu. Resilienssin määrittelystä, taustoista ja energioresilienssistä ks. tarkemmin mm. Angeler & Allen, 2016; Allen et al., 2019; Adil & Audirac, 2019; Holling, 1970; Jasiūnas et al., 2021.

Tuulivoiman osalta resilienssin tai teknisen häiriönsietoisuuden toimintaperiaatteita on käsitelty pyrkien mm. arvioimaan, millaiset ulottuvuudet ovat merkittävimpiä tuulivoimajärjestelmien *kokonaisresilienssin näkökulmasta*. Kirjallisuudessa tuulivoimaa on arvioitu ulottuvuuksien *reliability, maintainability, supportability ja organizational resilience* kautta (Mustafa & Barabadi, 2021). Tutkimuksessa on korostettu myös mm. riskien ja häiriöiden sekä erilaisten alasysteemien välistä vuorovaikutusta turvallisuuden kehittämiseksi (Konstantinidis et al. 2020). Häiriötilanteisiin ja tuulivoiman kehittämiseen liittyvän sidosryhmäyhteistyön tärkeys nousee joissain tutkimuksissa esille. Esimerkiksi merituulivoiman tapauksessa keskeisiä sidosryhmiä ovat tuulivoiman operoijat, alustoimijat, hallinto ja viranomaiset, verkonhaltijat sekä yhteinen pelastuskoordinaatiokeskus (Pedersen & Ahsan, 2020). Tarkempi analyysi liittyen sidosryhmäyhteistyöhön voisi olla huoltovarmuuden ja siihen liittyvän verkostoyhteistyön näkökulmasta kiinnostavaa.

Liu et al., (2022) tarkastelevat tuulivoiman resilienssiä ns. elinkaarisena suorituskykynä, johon sisältyy neljä hierarkkisesti toisiinsa sidoksissa olevaa systeemiä: *management system, environmental system, infrastructure system ja economic system*. Liu et al. (2022) lähestymistapa nojaa ns. system-of-systems-ajatteluun, jota voidaan soveltaa myös infrastruktuurien resilienssiin. Edelleen tuulivoiman resilienssiä voidaan tarkastella jakamalla toiminta kolmeen vaiheeseen: ennakoiva hallinta, häiriötilanteisiin vastaaminen tai tilanteissa toimiminen, ja nopea palautuminen (ks. esim. Liang et al., 2023; Rong et al., 2024). Resilienssin parantaminen edellyttää koordinoituja toimenpiteitä kaikissa

kolmessa vaiheessa (Rong et al., 2024) Resilienssiä koskeva tutkimus vaikuttaa korostavan oletettua kykyä tunnistaa mahdollisia riskitekijöitä ja edelleen reagoida niihin nopeasti, jotta voidaan palautua nopeasti niin sanottuun normaalitilaan.

Toisaalta häiriönsietoisuutta kehittäessä on tutkimuksessa korostettu olevan tarpeellista keskittyä erityisesti niihin järjestelmiin, jotka on arvioitu kaikkein kriittisimmiksi, ja jotka vuorovaikuttavat keskenään eniten (Konstantinidis et al., 2020). Kaikkein kriittisimpien järjestelmien tunnistaminen lienee kuitenkin haastavaa. Dashtpeyma ja Ghodsi jaottelevat (2022) tuulivoiman resilienssin mahdollistajia kolmeen kategoriaan: suorituskyky (mm. operatiivinen hallinta, riskeihin varautuminen), infrastruktuuri (mm. rakentamisen tekno-ekonominen toteutettavuus, optimaalinen investointi- ja rahoituspolitiikka sekä suunnittelu) ja strategia (mm. optimaalinen suunnittelu, pitkän ja lyhyen tähtäimen tavoitteet).

Tuulivoiman häiriönsietoisuutta koskevat havainnot on kytketty myös alan kasvuun. Esimerkiksi merituulivoimaan liittyvä varautumistyö ja valmius nähdään joidenkin havaintojen mukaan sitä tärkeämmäksi, mitä enemmän merituulivoima-ala kasvaa (Pedersen & Ahsan, 2020). Merituulivoima nousi katsauksen havainnoissa vahvasti esille, ja huolimatta siitä, että kyseessä ei ole uhkamalli tai riskikategoria, se on nostettu tämän selvityksen tuloksissa merkittävyytensä vuoksi yhdeksi tulosteemaksi. Merituulivoima nousi esille kirjallisuuskatsauksessa selkeänä halkileikkaavana asiakokonaisuutena. Merituulivoima-alan on monissa tutkimuksissa ennakoitu kasvavan merkittävästi (Wilkie & Galasso, 2020; Rong et al., 2023; Wu et al., 2024; Liu et al., 2024). Merituulivoimalaitokset ovat uniikkeja järjestelmiä, jotka ovat riippuvaisia monimutkaisista osaelementeistä. Niihin liittyy myös kompleksisia keskinäisriippuvuuksia. (Wilkie & Galasso, 2020) Merituulivoimaa koskevassa tutkimuksessa vaikutetaan korostavan erityisesti ympäristöllisiä ilmiöitä vaikutuksineen, kuten kovaa tuulta ja aaltoja (Wilkie & Galasso, 2020), taifuuneja (Rong et al., 2023), trooppisia sykloneja (Wen et al., 2024), mutta myös ihmisperäisiä häiriölähteitä, kuten sabotaasia, varkauksia tai törmäyksiä (Köpke et al., 2023). Tutkimuskirjallisuudessa korostuu etenkin merituulivoiman perustus, johon kohdistuu huomattavia voimia (Venkatesan & Mayakrishnan, 2022).

Ensimmäinen merituulivoimalaitos otettiin käyttöön Tanskassa vuonna 1991. Alan nopea kehitys huomioiden on arvioitu, että merituulivoimatuotannon kasvu tulee tuottamaan hyötyjä, mutta myös haasteita. (Biswas & Singh, 2024) Merituulivoimaan liittyy riskejä kaikissa elinkaaren vaiheissa (rakentaminen, käyttö ja huolto sekä purku). Verrattain nuoren toimialan kehityksessä on korostettu olevan tärkeää huomioida etenkin sidosryhmäyhteistyö sekä kilpailevien toimijoiden että

julkisen sektorin kanssa ja välillä. (Pedersen & Ahsan 2020) Merituulivoimasta esille nousevat havainnot ovat suomalaisesta näkökulmasta osin vähemmän olennaisia (mm. trooppisten myrskyjen reittien ennakointi ja vaikutukset merituulivoiman tuotantoon), mutta koska ala on kasvamassa vahvasti myös taifuuni-alueiden ulkopuolella, merituulivoimatutkimusta pitäisi seurata huolellisesti myös Suomessa.

Etenkin merituulivoiman fyysisiltä rakenteilta edellytetään kestävyyttä (ks. mm. Venkatesan & Mayakrishnan, 2022), joka nousi kuudenneksi teemaksi katsauksen pohjalta. Haastavat olosuhteet alleviivaavat mm. sijaintikohtaisia riskiarviointeja. (Wilkie & Galasso, 2020). Toisaalta tutkimuksessa tuodaan ilmi, että optimaalisellakaan suunnittelulla häiriöiden mahdollisuutta ei voida täysin poissulkea, minkä takia on erityisen kriittistä tunnistaa ja luokitella tuulivoimaloiden kriittisimmät komponentit. (Konstantinidis et al., 2020) Kirjallisuudessa on huomioitu myös tuuliennusteisiin liittyviä epävarmuuksia. (Khan et al., 2021) Tuuliennusteiden tarkkuuden ja merkityksen on arvioitu tulevan yhä tärkeämmäksi, kun tuulivoimatuotannon määrä kasvaa. (Hugeback et al., 2023) Tuuliennustuksiin liittyvissä järjestelmissä on myös kyberhaavoittuvuuksia, joita on arvioitu tutkitun vain vähän (Yang et al., 2024). Ennustusten tarkkuutta kehittämällä voitaisiin saavuttaa monia hyötyjä (ks. esim. Hugeback et al., 2023).

4. Haastattelut

Selvitystyön osana toteutettiin laaja, löyhästi strukturoitu haastattelututkimus. Yksityiskohtainen kooste haastatteluhavainnoista on toimitettu rajatulle kohderyhmälle. Tässä osiossa on esitetty lyhyt, julkinen tiivistelmä johtopäätöksistä.

Menetelmäkuvaus

Osana projektia toteutettiin HVK:n sisäisenä työnä löyhästi strukturoituja haastatteluita. Haastattelut toteutettiin HVK:n varautumisasiantuntija Paavo Tertusen toimesta pääosin maalisi- ja kesäkuun 2024 välisenä aikana, viimeisimmät elo-lokakuussa 2024. Keskusteluja toteutettiin lähes 40 kpl, joista hieman yli puolet energia-alan yrityksille, ja toinen puolet pääosin viranomaisille ja järjestöille. Useammassa haastattelussa tai keskustelussa oli mukana enemmän, kuin yksi vastaosapuoli.

Haastateltaville toimitettiin yleiskuvaus tuulivoimaprojektista sekä sen tavoitteista. Lisäksi haastateltaville korostettiin, että yksilöiviä tietoja ei sisällytetä raporttiin ja tarkat muistiinpanot jäävät vain HVK:n käyttöön. Osallistujille annettiin mahdollisuus toimittaa tarkempia tietoja salatulla sähköpostilla. Tarkempia havaintoja salatulla yhteydellä projektia varten ei kuitenkaan toimitettu.

Ohjaavina kysymyksinä keskustelun tueksi esitettiin seuraava kooste:

- *Keskustelu toteutetaan avoimena ja löyhästi strukturoituna. Keskustelussa on tarkoitus käsitellä läpi seuraavat osa-alueet*
 - *Haastateltavan tahon oman organisaation näkökulma projektiin*
 - *Tuulivoimaan liittyvä jatkuvuudenhallinta ja varautumistoiminta*
 - *Tuulivoima vakavissa häiriö- ja poikkeustilanteissa*
 - *Tunnistetut tietopuutteet ja -aukot sekä uhat*
- *Keskusteluun on hyvä valmistautua pohtimalla esimerkiksi:*
 - *Millaisia tämän projektin tavoitteisiin liittyviä toimenpiteitä omassa organisaatiossa on tällä hetkellä käynnissä ja mitkä niistä koetaan erityisen tärkeiksi?*
 - *Kuinka nämä teemat liittyvät tuulivoimaan vakavien häiriö- ja poikkeustilanteiden kontekstissa?*

Haastatteluhavainnot

Haastattelujen perusteella tuulivoima-alalla on monimutkaisia toimijarakenteita. Toimijaverkot rakentuvat muun muassa erilaisista hankekehittäjiä, tuulipuistojen omistajista, teknisistä ja kaupallisista managereista, kunnossapitoyrityksistä, valvomopalveluita tarjoavista tahoista ja niin edelleen. Huoltovarmuuden kannalta olennainen kysymys on, miten nämä tahot toimivat yhdessä, ja esimerkiksi tunnistavat rajapintariskejä, tai vaihtavat tietoa. Monimutkaisuutta ei voida sinänsä pitää riskinä, mutta se vaikeuttaa kokonaisnäkökulman muodostamista alan varautumisesta.

Tuulivoima-alalla on tavanomaista, että hankekehittäjä voi olla mukana tuulipuiston elinkaareen nähden vain lyhyen aikaa. Koska hankekehityksen aikana kuitenkin myötävaikutetaan ratkaisuihin, joilla voi olla huoltovarmuuden näkökulmasta suuri merkitys, merkittävien tietokatveiden syntymistä tai tiedon häviämistä tulisi aktiivisesti ehkäistä. Hankekehityksen toimenpiteet korostuvat erityisesti merituulivoimassa, jossa käytetään uusia ratkaisuja, ja jossa mittakaavat ovat suuria.

Kuten selvitystyössä kävi muutoinkin ilmi, voimalaitosvalmistajien osalta tuulivoima-ala on hyvin keskittynyttä. Suurimmat ja merkittävimmät Suomessa toimivat voimalaitosvalmistajat ovat Vestas ja Nordex Acciona. Voimalaitosvalmistajilla on kriittinen rooli tuulivoiman jatkuvuudenhallinnassa, sillä tyypillisesti ne vastaavat yksittäisten tuuliturbiinien häiriömonitoroinnista sekä huollosta. Suomalaisella tuulipuistolla on lisäksi oltava sopimus suomalaisen ns. sopimusvalvomon kanssa. Valvomotoiminta on huoltovarmuuden kannalta kriittistä.

Tuulivoima on hajautettu tuotantomuoto, minkä takia yksittäisen tuulivoimalan vaurioituminen ei missään olosuhteissa vaaranna sähkön toimitusvarmuutta. Yksittäisiä tuulivoimaloita kriittisempiä ovat sähköasemat, jotka liittävät useita tuulipuistoja kanta- tai jakeluverkkoon, sekä valvomokohteet ja/tai käyttökeskukset. Tuulivoimalat eivät tuota sähköverkkoon taajuuden muutoksia vastustavaa inerttia, ja havaintojen perusteella invertteripohjaiseen liitäntään liittyy epävarmuuksia, joita kuitenkin tutkitaan aktiivisesti.

Vakavien häiriötilanteiden ja poikkeusolojen näkökulmasta tuulivoimalaitosten tulisi kyetä toimimaan kaikenlaisissa olosuhteissa. Tämä edellyttää esimerkiksi kriittisen henkilöstön varaamista poikkeusolojen aikaisiin tehtäviin (VAP), ajoneuvojen ja työkalujen varausta (ATV) sekä toisaalta myös muita varautumis-

käytänteitä, kuten sopimuksellista varautumista ja erilaista harjoitustoimintaa häiriötilanteiden varalta.

Tuulivoimajärjestelmät ovat kyberfyysisiä ja ne edellyttävät etäohjausta ja -valvontaa, mikä korostaa tietoliikenneyhteyksien jatkuvuutta ja turvaamista. Huoltovarmuuden näkökulmasta onkin välttämätöntä ylläpitää riittävää tietoturvasoaa ja kyvykkyyttä jatkaa toimintaa myös silloin, kun yhteyksissä on häiriöitä. Kyberfyysinen luonne tarkoittaa lisäksi järjestelmien suojaamisen ja turvaamisen osalta sitä, että kriittisiä fyysisiä rakenteita valvotaan, sillä niiden häirinnällä tai sabotaasilla voidaan aiheuttaa merkittävää haittaa tuotannolle.

Merituulivoiman osalta erityisinä havaintoina esille nousi niihin kohdistuva, huomattava mielenkiinto, kehittyvä lainsäädäntö ja uniikit ympäristölliset olosuhteet merialueilla. Merituulivoimahankkeissa lisäksi myös hankekoot ovat merkittäviä ja hyödynnetty teknologia osin melko uutta eli siihen voi liittyä epävarmuuksia. Merituulivoimaa ei kuitenkaan tässä raportissa selvitetty laajemmin, sillä Tahkoluodon merituulipuistoa lukuunottamatta ensimmäisten merituulipuistojen ennakoidaan valmistuvan Suomeen vasta vuosien päästä.

5. Arviointi

Tässä osiossa on esitetty selvitystyön keskeisten tulosten arviointi. Arviointi perustuu kirjallisuuskatsaukseen, haastatteluaineistoon sekä muihin selvitystyön aikana esitettyihin tai saatuihin, raportissa erittelemättömiin havaintoihin.

Tuulivoimaa koskevat riskit ja uhkatekijät

Kirjallisuuskatsauksen ja haastatteluaineiston perusteella tunnistetut riskit ja uhkamallit voidaan jaotella seuraaviin yläluokkiin. Luokat ovat aakkosjärjestyksessä.

1. Monimutkaiset toimija- ja kehitysrakenteet
2. Teknologian kypsyys ja riskit
3. Tieto- sekä viestintäjärjestelmäuhat sekä kyberfyysisuus
4. Tuulipuistojen turvallisuus ja sabotaasi
5. Voimajärjestelmätason rakenteet ja riskit
6. Äärimmäiset sääolosuhteet ja uhat

Monimutkaisilla toimija- ja kehitysrakenteilla tarkoitetaan sekä tuulivoima-alalla esiintyviä organisatorisia käytänteitä ja toimintatapoja että laajemmin tuulivoima-alan toimijaverkkorakennetta. Tuulivoima-alan osalta monimutkaisuus ilmenee ennen kaikkea sitoutuneisuuden tai hallinnan hajautuneisuudessa sekä toimitusketjujen kansainvälisyydessä. Tuulivoima-alalla hanketta voi suunnitella ja kehittää eri toimija, kuin joka operoinnista lopulta vastaa. Samoin myös turbiinin huollosta vastaa pitkäaikaisesti toimija, jonka toimenpiteet voivat perustua myös ulkomailta tapahtuvaan monitorointiin ja huollon koordinointiin. Toimintamalleja ja rakenteita konkreettisine esimerkkeineen on käsitelty tarkemmin seuraavassa osiossa. Monimutkaiset toimijarakenteet eivät korostuneet erityisesti kirjallisuuskatsauksessa, mutta ne nousivat esiin haastatteluissa sekä selvityksen taustakeskusteluissa.

Monimutkaiset toimija- ja kehitysrakenteet eivät itsessään ole riski. Monet tuulivoima-alalle tyypilliset mallit esim. hankekehityksen osalta ovat lisäksi käytössä myös muilla toimialoilla. Monimutkaiset käytänteet ja toimintatavat voivat kuitenkin johtaa tilanteeseen, jossa sirpaleisen kentän vuoksi voi olla epäselvää, millaisia häiriösietoisuuden kannalta tärkeitä ratkaisuja on tehty, tai pitäisi vielä tehdä. Esimerkiksi tuulivoimahankkeen hankekehitysaikana toteutetut ratkaisut ja niihin liittyvän tiedon jakaminen, esim. millaisia suojauksia tai tietoliikenteen varmentamiseen liittyviä ratkaisuja on tuulipuistoa rakentaessa toteutettu, onko tuulivoimaloihin asennettu varavoimaa tai jäänestolaitteistoja, ja

niin edelleen. Valveutunut ostaja saa edellä mainittuja asioita helposti selville. Osa tehdyistä ratkaisuista voi jäädä helpommin pimentoon. Toinen esimerkki ovat voimalaitosvalmistajiin liittyvät toiminnot ja riskit etenkin valvontatoimien osalta.

Vaikka tuulivoimaloita on ollut käytössä kymmeniä vuosia, tuulivoimajärjestelmät ovat silti osin uutta teknologiaa. Sekä tutkimuskirjallisuudessa että empiirisissä havainnoissa on korostettu nyt ja tulevaisuudessa asennettavaan teknologiaan liittyviä epävarmuuksia. Epävarmuudet liittyvät erityisesti merituulivoimajärjestelmiin, esimerkiksi niiden kytkentäratkaisuihin, rakenteelliseen kestävyteen ja muun muassa ympäristöllisten olosuhteiden ennakointiin. Yksittäiset tekniset viat ja ns. lastentaudit eivät kuitenkaan välttämättä ole uhkia huoltovarmuudelle, ellei kyse ole tyyppiviasta esimerkiksi sellaisessa komponentissa tai rakenteessa, joka on poikkeuksellisen merkittävässä laajuudessa käytössä voimalaitosvalmistajien keskittyneisyyden vuoksi. Tätä voidaan puolestaan pitää erittäin epätodennäköisenä. Suomen tuulivoimalaitekanta on nuorta, ja koska puistoihin on asennettu viimeisintä teknologiaa edustavia turbiinimalleja, toimintaa kaikissa olosuhteissa ei ole vielä täysin koeponnistettu. Tuottajilla ja voimalaitosvalmistajilla on toisaalta omakohtaiset taloudelliset insentiivit minimoida uuteen teknologiaan liittyviä riskejä, ja monissa yhteyksissä tilanteen on arvioitu kehittyneen myönteiseen suuntaan.

Tuulivoimajärjestelmät ovat kyberfyysisiä. Kyberturvallisuutta korostettiin laadullisesti arvioituna kaikkein merkittävimpänä uhkamallikategoriana. Tuulivoiman turvallinen operointi edellyttää sekä luotettavia tuulienusteita, toimivia ohjaus- ja hallintamenetelmiä, turbiinitason komentotoimia, että kokonaan uudenlaisten sähköteknisten ratkaisujen ohjausta. Samanaikaisesti tuulivoiman tuotanto on riippuvaista monimutkaisten tieto- ja viestintäjärjestelmien jatkuvaluonteisesta toiminnasta, mikä lisää hyökkäyspinta-alaa sekä kyberturvallisuusriskejä. Paitsi empiiriset havainnot, myös tutkimusjulkaisut korostavat tuulivoimajärjestelmien jatkuvuudenhallintaa ennen hyökkäyksiä, niiden aikana ja niiden jälkeen, sillä kyberriskien realisoituminen voi johtaa vakaviin, tuulivoiman tapauksessa ehkä jopa kaikkein vakaviimpiin vaikutuksiin. Tuulivoimatoimialan kannalta tärkeisiin tieto- ja viestintäjärjestelmiin voi kohdistua esimerkiksi palvelunestohyökkäyksiä. Toimenpiteiden vaikutukset voivat merkitä suppeimmillaan tiedon korruptoitumista ja käytön vaikeutumista, mutta pahimmillaan tuotannon seisahtumista ja jopa laitteiston hajoamista.

Jos tuulivoimajärjestelmiä tarkastellaan fyysisen maailman rakenteina, erityistä huomiota on huoltovarmuuden näkökulmasta kohdistettava valvomotiloihin, käyttökeskuksiin, sähköasemiin ja merkittäviin voimajohtoihin liittyviin riskeihin. Vaikka tuulivoimaloiden sijainnit ovat helposti selvitettävissä julkisista tietolähteistä, ja niiden täydellinen fyysinen suojaaminen on käytännössä mahdotonta, tuotannon hajautuneisuus suojaaa järjestelmää sekä tahallisuudesta että tahattomalta vaikuttamiselta. Yksittäisten tuulivoimaloiden vaurioituminen ei muodosta sähköjärjestelmän kannalta kriittistä tilannetta. Sen sijaan merkittävän sähköaseman vaurioituminen voi esimerkiksi kireässä tehotilanteessa aiheuttaa suurempaa vahinkoa. Kuten muukin teollinen toiminta, myös tuulipuistot ovat alttiita esimerkiksi rikollisuudelle, ja niissä voi tapahtua onnettomuuksia. Rikollinen toiminta liittyy etenkin tuulipuistojen kehitysvaiheeseen, jolloin puistoissa on liikuteltavassa muodossa olevaa materiaalia.

Voimajärjestelmätason osalta erityisesti tutkimuskirjallisuudessa korostuu tuulivoimajärjestelmien herkkyyttä sähköjärjestelmätason vioille. Kirjallisuudessa nousee esille myös tehoelektroniikkaan perustuva kytkentätapa. Tuulivoimalat eivät tuota ns. inertiaa sähköverkkoon. Tehoelektroniikkaan liittyviä epävarmuuksia tunnetaan vielä huonosti. Riskit ovat pääosin kahden tyyppisiä. Tuulivoimatuotannon lisääntyminen itsessään, tarkoista tuuliennusteista huolimatta, lisää järjestelmätason epävarmuutta vaihtelevan ja säätövoimaa edellyttävän luonteensa vuoksi. Toisaalta tuulivoima-

järjestelmien kyky pysyä verkossa esimerkiksi lähivioissa tai jännitekuopissa voi olla riski tuotannon jatkuvuuden kannalta. Esimerkiksi väärien invertterien suojausasetteluiden vuoksi voi olla verkosta pudota hetkessä suuri määrä tuulivoimatuotantoa, mistä on raportoitu myös julkisuudessa esimerkitapauksia Suomen ulkopuolelta. Sekä sähköjärjestelmätasolle että tuulivoimalatasolle on kuitenkin esitetty ja etsitään säännöllisesti ratkaisuja, joiden voidaan nähdä parantavan tuulivoimatuotannon häiriönsietoisuutta ja edelleen myös huoltovarmuutta.

Ympäristölliset olosuhteet synnyttävät tuulivoiman näkökulmasta riskejä, joita ei voida ennaltaehkäistä tai estää, vaan joihin on tavalla tai toisella sopeuduttava. Tuulivoimajärjestelmät ovat kirjallisuuden mukaan haavoittuvia esimerkiksi voimakkaalle myrskyille, kovalle tuulelle, aallokelle, raemyrskyille, jäätämislle, arktisille sääolosuhteille, metsäpaloille ja ukkoselle. Äärimmäisten sääilmiöiden arviointi voi olla haastavaa, mutta niihin varautumiseksi on tunnistettu monia käytänteitä. Suurimmat ympäristölliset epävarmuudet vaikuttavat liittyvän merituulivoimaan, jossa sekä tuotannon että sääilmiöiden skaala on merkittävä. Äärimmäisten sääilmiöiden vaikutus on pienimmillään hyvin lokaali (esim. salaman rikkoma lapa) mutta pahimmillaan hyvinkin laaja (esim. useita tuulipuistoja käsittävä jäätämislanne, joka laskee tuotantoa äkisti pitkäaikaisesti).

Keskeiset havainnot luokista on tiivistetty taulukkoon 5.

Kuva 5. Tiivistelmä riski- ja uhkatekijöiden yläluokista.

Esimerkkejä ja kuvaus riskien ilmenemisestä	
Monimutkaiset toimija- ja kehitysrakenteet	Toimijakenttä on sirpaleinen, hallinta hajautunutta ja ketjut kansainvälisiä. Riskienhallinnasta vastaa useita tahoja, tiedon jakaminen voi olla puutteellista. Monitorointia ja valvontaa tehdään sekä Suomesta että ulkomailta. Puiston ylläpidosta voi vastata erillinen ns. tekninen ja kaupallinen manageri.
Teknologian kypsyysriskit	Tuulivoimajärjestelmät ovat monelta osin uutta teknologiaa. Niihin liittyy epävarmuuksia, ns. lastentauteja, sekä niissä voi esiintyä tyyppivikoja. Myös sähköverkon näkökulmasta käytössä on ja etenkin merituulivoiman osalta käyttöön tulee mm. uusia kytkentätapoja.
Tieto- ja viestintäjärjestelmäuhat, kyberfyysisuus	Tuulivoimajärjestelmät ovat kyberfyysisiä ja edellyttävät kyberuhille ja vioille alttiiden, monimutkaisten tieto- ja viestintäjärjestelmien jatkuvaluonteista toimintaa. Järjestelmät ylläpitävät sekä puistojen valvontaa ja turbiinien monitorointia mutta myös mm. tuuliennusteita.
Tuulipuistojen turvallisuus, sabotaasi	Sähköasemiin tai usean sähköaseman kantaverkkoon kytkevään voimajohtoon liittyvät riskit ovat keskeisimpiä huoltovarmuuden näkökulmasta. Vaikka tuotannon hajautuneisuus suojaaa yleisesti järjestelmää tahattomalta ja tahallisuudesta vaikuttamiselta, rakenteet sijaitsevat syrjässä ja ovat alttiita sabotaasille.
Voimajärjestelmätason rakenteet ja riskit	Tuulivoimatuotannon lisääntyminen lisää järjestelmätason ilmiöitä, epävarmuutta ja säätövoiman tarvetta. Tuulivoimaloiden heikko kyky pysyä verkossa esim. lähivioissa voi olla riski.
Äärimmäiset sääolosuhteet ja uhat	Erilaiset ympäristölliset ilmiöt (voimakkaat myrskyt, kova tuuli, aallokko, raemyrskyt, jäätäminen, arktiset sääolosuhteet, metsäpalot, ukkonen) ovat haaste tuulivoimatuotannolle

Tunnistettut toimintamallit ja rakenteet

Tuulivoima-alan toimija- ja kehittämismallit ovat monimutkaisia ja -tasoisia. Erilaisia toimintamalleja kehittämisessä ja operoinnissa on tunnistettavissa ainakin viisi erilaista. Taulukossa 6 on esitetty avoimien lähteiden pohjalta tunnistettuja toimintamalleja. Luettelo on suuntaa antava, ja koska se perustuu julkisiin lähteisiin, sitä ei tule pitää aukottomana tai virheettömänä. Huomionarvoista on myös, että yksi yhtiö voi toimia markkinassa usealla toimintamallilla eli mallit eivät ole välttämättä toisiaan poissulkevia. Tämän selvityksen valossa ei ole tehty systemaattista arviointia tunnistettujen mallien heikkouksista tai vahvuuksista, koska tietopohja laadullista arviointia varten ei ole riittävä. Lopuksi on kuitenkin esitetty arvio siitä, miten eri toimintamalleja tulisi jatkossa huoltovarmuustoiminnassa lähestyä.

Kuva 6. Tuulivoima-alan toimijamalleja. Lähteet esitettynä erikseen kullekin riville.

Malli	Mallin piirteet	Esimerkkejä	Lähteet
Omistaja-vetoisuus	Tuulipuiston hankekehityksestä ja rakentamisesta vastaa yksi taho, joka usein myös jää operoimaan valmistunutta puistoa, mutta voi myös ulkoistaa käyttökeskustoiminnan. Usein kyseessä on pääosin Suomessa toimiva yhtiö tai kotimaisten (energia)yhtiöiden omistama tuulivoimayhtiö.	EPV Tuulivoima Oy: yhtiö valmistelee, toteuttaa ja operoi omia tuulivoimahankkeita sekä vastaa niistä koko elinkaaren ajan. Suomen Hyötytuuli Oy: Yhtiö kantaa kokonaisvastuun tuulipuistojen koko elinkaaresta hankekehityksestä ja rakentamisesta tuotantoon, huoltoon ja purkuun. Ilmatar Oy: yhtiö tunnistaa, kehittää, rahoittaa, rakentaa ja hallinnoi laitoksia, kokonaisvastuu laitoksista.	EPV, 2024a; EPV, 2024b; Suomen Hyötytuuli Oy, 2024a; Suomen Hyötytuuli, 2024b; Ilmatar, 2024a; Ilmatar, 2024b
Hanke myyntiin-malli	Tuulivoimatoimija ostaa hankeoikeudet toiselta hankekehittäjältä ja rakentaa omaan omistukseensa ja operointiinsa jäävän puiston. Hankekehittäjiä voi olla myös useampia.	Ilmatar Oy: yhtiö osti toiselta yhtiöltä rakennusvalmiin puiston hankeoikeudet.	Ilmatar Oy, 2024c
Ulkomainen sijoittaja-malli	Ulkomainen toimija, esimerkiksi tuuli- tai aurinkoenergiaan erikoistunut pääomasijoitusyhtiö, sijoittaa tuulivoimaan Suomessa ja jää ns. passiiviseksi omistajaksi.	Renewable Power Capital & OX2: OX2 toteutti Renewable Power Capitalille kolme tuulipuistoa avaimet käteen-periaatteella. OX2 vastaa jatkossa puistojen teknisestä ja taloudellisesta hallinnoinnista. Prime Capital AG & CPC Germania Oy: CPC Finland Oy toteutti hankkeen rakentamisen ja suunnittelun ja vastaa sen teknisestä ja taloudellisesta hallinnoinnista.	OX2, 2024a; CPC Germania Oy, 2024
Taaleri-malli	Kotimainen toimija toteuttaa kaikkia tai lähes kaikkia tuulivoiman elinkaareen liittyviä toimintoja ja toimii ns. aktiivisena omistajana puistoissaan. Yhtiön päätoimiala on alun perin ollut jotain muuta.	Taaleri Oy: suomalainen uusiutuvan energian hankekehittäjä ja rahastonhoitaja, joka sijoittaa parhaillaan kansainvälistä uusiutuvan energian infrastruktuurirahastoa, yksi Suomen suurimmista tuulivoiman tuottajista.	Taaleri Energia Oy, 2024
Ikea-malli	Suomessa toimiva, toista toimialaa edustava yritys sijoittaa tuulivoimaan oman liiketoimintansa tavoitteiden vuoksi tai sähkönkulutuksen kattamiseksi	Ikea & OX2: OX2 toteutti neljä tuulipuistoa Ikea Suomelle avaimet käteen-periaatteella, jääden jatkossa vastaamaan puistojen teknisestä ja taloudellisesta hallinnoinnista.	Ikea, 2024a; OX2, 2024b

6. Johtopäätökset

Tässä raportissa selvitettiin voimakkaasti kasvaneen tuulivoiman huoltovarmuus- ja varautumisnäkökulmia. Selvityksen tavoitteena oli valaista tuulivoimaan liittyviä uhkia erityisesti häiriönsietoisuuden ja varautumisen nykytilan pohjalta. Raportissa oli lisäksi tarkoituksena avata tuulivoima-alaan liittyviä rakenteita, ilmiöitä, keskinäisriippuvuuksia sekä mahdollisia häiriötilanteisiin johtavia rakenteita ja tekijöitä. Lisäksi raportissa kuvattiin tuulivoima-alan nykytilaa, viimeaikaisinta tuulivoimaa koskevaa tieteellistä kirjallisuutta, toteutettiin kymmeniä haastatteluja suomalaisille sidosryhmille ja tuulivoimatoimijoille sekä lopuksi arvioitiin toimintaympäristöä ja -malleja huoltovarmuuden näkökulmasta.

Tuulivoiman nykytila Suomessa ja sitä koskeva sääntely

Tuulivoima on Suomessa tällä hetkellä hyvin alueellisesti keskittynyttä Pohjois-Pohjanmaalle ja Pohjanmaalle. Yli puolet toiminnassa olevista tuulivoimaloista sijaitsee näissä maakunnissa. Nykyinen kapasiteetti on suurelta osin rakennettu ja asennettu kuluneen muutaman vuoden aikana, ja kumulatiivisen kapasiteetin on ennakoitu lisääntyvän merkittävästi seuraavan muutaman vuoden aikana. Fingridin ennusteiden mukaan tuulivoimalla tuotetaan 60 TWh sähköä 19 GW kapasiteetilla vuonna 2030 (Fingrid Oyj, 2024a). Tässä selvityksessä ei arvioitu tuulivoiman kasvunäkymiä tai Fingridin ennusteen realistisuutta. Raportin taustalla on havainto siitä, että huolimatta tulevasta kasvuvauhdista tuulivoimalla on sähköntuotannossa joka tapauksessa aiempaa merkittävämpi ja huoltovarmuuden kannalta merkittävä rooli.

Tällä hetkellä kymmenen suurinta toimijaa omistaa yli puolet Suomen tuulivoimasta 3-8 % osuuksin (lähteenä Suomen Uusiutuvat ry:n tilastot). Suurimpia toimijoita ovat Hyötytuuli Oy, Taaleri Energia Oy ja Neoen. Etenkin merituulivoimaan kohdistuu huomattavaa kiinnostusta. Merituulihankkeiden etenemiseen ja toteutumiseen liittyy toisaalta myös huomattavia epävarmuuksia. Suomessa on toistaiseksi vain yksi toiminnassa oleva merituulipuisto. Merituulivoimarakentamisesta talousvyöhykkeellä ei ollut aineiston keruuhetkellä voimassa olevaa lainsäädäntöä. Merituulivoimahankkeet näkyvät toteutuessaan todennäköisesti vasta 2030-luvulla laajemmin huoltovarmuuskeskustelussa.

Myös tuulivoiman sääntely-ympäristöön kohdistuu merkittäviä muutoksia. Hankekehitysvaiheen käytäntöjen lisäksi tuulivoimalaitoksia sitovat kantaverkko-yhtiö Fingrid Oyj:n voimalaitosten järjestelmätekni-

vaatimukset, joita päivitettiin tämän raportin aineistoa kerätessä. Selvityshetkellä myös CER- ja NIS2-direktiivien toimeenpanon yksityiskohdat ja soveltamisalat olivat osin avoimia, mutta astumassa voimaan ja koskemaan myös merkittävää osaa tuulivoimatoimijoista. Koska CER:n ja NIS2:n välillä on sidoksia (esim. jos yritys todetaan CER-kriittiseksi, se kuuluu automaattisesti myös NIS2-direktiivin piiriin), näihin lakeihin liittyvät velvoitteet ovat keskeisiä tuulivoimatoimijoille. Direktiivit tuovat kriittisille toimijoille velvoitteita raportoida häiriöistä säädetyllä mekanismilla eli korostavat yhtiöiden sisäisen varautumissuunnittelun kehittämistä. Jos varautuminen tuulivoima-alalla perustuu jatkossa vapaaehtoisuuteen, vaaditaan vahvoja kannusteita eli huoltovarmuustoiminnan osalta kykyä tarjota jotain (esim. työkaluja), josta toimijat käytännössä hyötyvät.

Tunnistettut uhka- ja riskitekijät

Tutkimuskirjallisuudessa tuulivoiman osalta korostuvat erityisesti **äärimmäiset sääolosuhteet** ja niiden muodostama uhka tuulivoimajärjestelmille. Äärimmäisten sääolosuhteiden osalta on mainittu erityisesti kovat myrskyt, tuuli, aallokko, jäätäminen ja arktiset olosuhteet. Tutkimuksessa korostetaan sekä tuulivoiman että laajemmin sähköjärjestelmän haavoittuvuutta äärimmäisille sääilmiöille, joiden vaikutusten arvioiminen voi olla haastavaa, mutta välttämätöntä, jotta toimijat voivat niihin varautua. Tässä selvityksessä ei tehty yksityiskohtaisempia havaintoja tehokkaimmista sääilmiöihin liittyvistä varautumiskeinoista. Näiden tekeminen edellyttää tutkimuksissa esitettyjen toimenpiteiden huolellista analyysia ja soveltamista Suomen olosuhteisiin.

Toisena merkittävänä uhkakategoriana sekä tutkimuskirjallisuudessa että toteutetuissa haastatteluissa esille nousivat **kyberturvallisuuteen** liittyvät tekijät. Tuulivoimajärjestelmät ovat kyberfyysisiä, niissä käytetään erilaisia IoT-ratkaisuja ja tuulivoimaa ohjataan sekä monitoroidaan etänä, myös Suomen ulkopuolelta. Kyberfyysinen luonne tarkoittaa sitä, että sekä kybertason että fyysisen tason on toimittava koordinoitusti, jotta voidaan tuottaa haluttua suorituskykyä. Tuulivoimajärjestelmiä voidaan häiritä esimerkiksi palvelunestohyökkäyksillä ja esimerkiksi kyberhyökkäyksillä, joilla joko hankaloitetaan yhteyksien normaalia toimintaa yhteyslinkkien ylimääräisellä kuormituksella, tai joilla järjestelmiin injektoidaan virheellistä dataa kohtalokkain seurauksin. Tutkimuskirjallisuudessa korostetaan ns. strategisen puolustuksen merkitystä kyberuhkiin vastaamiseksi, sillä hyökkäykset ovat nykyisin erittäin kehittyneitä ja vaikeita havaita. Tutki-

muksissa on myös tunnistettu tehokkaiksi esitettyjä suojausmenetelmiä, mutta niitä ei arvioitu tässä selvityksessä. Kyberfyysiseen luonteeseen liittyvät riskit nousivat esille myös haastatteluaineistossa. Havaintojen perusteella etähallintajärjestelmät ovat hajaute- tussa tuotannossa välttämättömiä, mutta etäohjauksen ohittaminen manuaalisella ohjauksella voi olla haas- tavaa. Haastatteluaineiston perusteella toimialalla hyödynnetään erilaisia palveluntarjoajia IT-järjestelmiin liittyen, ja tuulivoimatoimijoiden tietoturvaosaamisessa on tapahtunut myönteistä kehitystä kuluneina vuosina.

Tutkimuskirjallisuudessa vähemmälle huomiolle jäänyt **toimijakentän monimutkaisuus** nousi esille erityisesti selvityksessä toteutetuissa haastatteluissa. Tuulivoima- ala voidaan nähdä ns. perinteiseen tuotantoon verrat- tuna monimutkaisena ja kansainvälisenä verkostona, jossa esimerkiksi käytetään paljon alihankkijoita, ja jossa on ajoin epäselvää, miten paljon esimerkiksi tuulipuistoista vastaavat kaupalliset managerit ja käytöstä ja huollosta vastaavat toimijat kommunikoivat keskenään. Toimijaverkko koostuu myös keskenään hyvin erilaisista omistajaprofiileista. Osa omistajista toteuttaa ja operoi omistamiaan hankkeita, kun taas osa on leimallisen kaukana käytännön tason operoinnista. Edelleen tuuli- voiman toimijaverkolle luonteenomainen piirre on vahva kytkös voimalaitosvalmistajiin, ennen kaikkea Nordexiin ja Vestasiin, jotka vastaavat mm. tuuliturbiinien huollosta pitkillä sopimuksilla. Voimalaitostoimit- tajiin pieni määrä ja keskittyneisyys voivat olla riski vakavissa toimitusketjujen haasteissa. Tässä selvityk- sessä ei perehdytty tarkemmin siihen, millä tavalla voimalaitosvalmistajat ovat varautuneet tähän liittyviin riskeihin. Suomessa tuulivoimaa operoidaan joko tuuli- voimaa omistavan yhtiön tai valvontapalveluja tarjo- avan ns. sopimusvalvomon kautta. Sopimusvalvomot valvovat ja ohjaavat tuulipuiston jakelu- tai kantaverk- koon liittyvää sähköasemaa ja ovat näin ollen kriittisiä toimijoita järjestelmien jatkuvuuden kannalta. Merkit- tävien puistojen osalta valvomon on veloitettu sijait- sevan Suomessa, jotta käyttöön liittyvät käskyt, kuten tehonrajoitukset, voidaan kaikissa tilanteissa toteuttaa ilman viiveitä.

Tuulivoimajärjestelmiin liittyy sekä tutkimuskirjallisuu- dessa että haastatteluissa esille nousseiden havain- tojen perusteella **voimajärjestelmätasoon ja tekno- logian kypsyys** liittyviä riskejä. Tuulivoimalat ovat herkkiä verkkotason vioille ja voivat pahimmillaan esimerkiksi pudota verkosta jännitekuoppien tai heikon lähivikasioisuuden vuoksi. Tuulivoimalat on kytketty verkkoon tehoelektroniikan avulla, mikä on kytkentä- periaatteena verrattain uusi ja sisältää itsessään tunte- mattomia riskejä (ks. esim. Hoe et al., 2024 katsaus tehoelektroniikan kyberresilienssistä). Tuulivoimalat eivät myöskään tuota inertiaa sähköverkkoon ja ne edellyttävät säätövoiman käyttöä ja tarvittaessa tuuli- voimatuotannon alasajoa tilanteessa, jossa tuotantoa

on liikaa. Erityisesti teknologian kypsyys liittyviä epävarmuuksia nousi esille meritulivoiman osalta, sillä käytännön kokemusta Suomen olosuhteista on vain vähäisesti, mittakaavat meritulivoimahankkeissa ovat merkittäviä, ympäristölliset olosuhteet haastavia ja huolto- sekä kunnossapitotoimet voivat olla haastavia. Hajautettuna energialähteenä tuulivoima on kuitenkin sinänsä sähköjärjestelmän näkökulmasta resiliencetämpi tuotantomoto esimerkiksi yksittäisiin vikoihin nähden. Huoltovarmuuden näkökulmasta kriittisiä solmukohtia ovat useita puistoja sähköverkkoihin liittyvät sähkö- asemat tai tuotannon lisääntyessä kriittisemmiksi muut- tuvat liityntäjohtot.

Hajautetun luonteensa vuoksi tuulivoiman **fyysinen turvallisuus** on keskeinen kysymys jatkuvuudenhal- linnan kannalta. Eri lähteissä sekä kirjallisuudessa (ks. mm. Ferlemann & Sheno, 2017) että haastatteluissa pohdittiin, voiko yksittäiseen tuuliturbiiniin murtautu- malla sabotoida esimerkiksi kokonaisen tuulipuiston toimintaa. Keskustelua fyysisestä turvallisuudesta pidettiin tärkeänä mutta ratkaisuja sen kehittämiseksi ei tässä selvityksessä kartoitettu yksityiskohtaisesti.

Jatkotoimenpiteitä ja yhteenveto

Tuulivoiman häiriönsietoisuuden on nähty parantuneen kuluneina vuosina. Tuotannon edelleen kasvaessa ja tehojen noustessa varautumistyötä on jatkettava entistä systemaattisemmin. Edellä kuvattuihin riski- kokonaisuuksiin vastaamiseksi on esitetty tutkimuskir- jallisuudessa toimivia suojausmenetelmiä sekä resi- lienssiä parantavia strategioita. Kun tuulivoimatoimi- joiden ja -järjestelmien huoltovarmuustyötä kehitetään, on näitä havaintoja hyödynnettävä samalla edelleen kartoittaen alan sisäisessä työssä uusia uhkia sekä toisaalta myös uusia ratkaisuja.

Tämän selvityksen laatimishetkellä Huoltovarmuusor- ganisaation sähköpoolin toiminnassa on jo useita tuuli- voimatoimijoita mukana. Varautumisen kehittämiseen tähtäävää verkostoyhteistyötä on kuitenkin kehitettävä ja laajennettava kohdennetuilla toimilla. Tuulivoimajär- jestelmien ja -toimijoiden varautumissuunnittelun tueksi on esimerkiksi tuotettava ohjemateriaaleja ja työkaluja. Harkinnanvaraisia muotoja ovat esimerkiksi varautumissuunnitelmien mallipohjat, kybermaturi- teettia kuvaavat mittarit (ns. tuulimittari), eri kohde- ryhmille suunnatut tiedonjakotilaisuudet (hankekehittä- jät, sijoittajat, kaupalliset ja tekniset managerit, jne.), tuulivoima-alalle kohdennetut varautumisharjoitukset sekä syvemmälle yksittäisiin riskikategorioihin menevät jatkoselvitykset. Varautumisharjoituksissa tulisi keskittyä tunnistettuihin riskikategorioihin sekä tilan- nekuvaan ja tiedonvaihtoon keskeisten osapuolten välillä häiriötilanteissa.

Tässä selvityksessä identifioidut, merkittävät tuulivoiman omistajat ja tuottajat, on hyödyllistä analysoida yksityiskohtaisemmin esimerkiksi niille soveltuvien yhteistyömuotojen kartoittamiseksi. Uusia tuulivoimatoimijoita on pyrittävä houkuttelemaan osaksi vapaaehtoista huoltovarmuustoimintaa. Tuulivoiman omistajien ja tuottajien tarkemman analyysin yhteydessä on jäsenneltävä tätä selvitystä tarkemmin erilaisia tunnistettuja toimintamalleja, joiden kautta voidaan kartuttaa ymmärrystä siitä, mitkä yritykset tarjoavat keskeisiä palveluja merkittäville omistajille. Näiden toimijoiden huoltovarmuuskriittisyyttä on arvioitava osana sähköpoolin jokapäiväistä työtä ja tunnistettuja huoltovarmuuskriittisiä toimijoita on tarvittaessa houkuteltava huoltovarmuustoiminnan piiriin.

Huoltovarmuuskeskuksen ja sähköpoolin on kyettävä seuraamaan muuttuvaa sähköjärjestelmää monista ulottuvuuksista. Ymmärrystä vaaditaan paitsi organisatorisella tasolla, mutta myös teknislähtöisesti sekä voimajärjestelmän että siihen kytkeytyvien tieto- ja viestintäjärjestelmien osalta. Tuulivoiman osalta on tunnistettava ja seurattava uusia sekä nykyisiä huoltovarmuuskriittisiä toimijoita, sillä suuretkin muutokset vaikuttavat olevan alalla tyypillisiä. Toimivan huoltovarmuuden verkostotyön kannalta olisi tärkeää ymmärtää eri toimijoiden kypsyystasoja ja toimintamalleihin liittyviä eroavuuksia siinä, miten varautumista järjestellään. Organisatorista tasoa leikkaaviin teknisiin, voimajärjestelmään sekä tieto- ja viestintäjärjestelmiin liittyviin, näkökohtiin on tarpeellista syventyä tätä selvitystä laajemmin.

Lähteet

- Adil, A., Audirac, I. (2019). A call to reframing planning discourses. The Routledge Handbook of Urban Resilience. eBook ISBN 9780429506666.
- Allen, C., R., Angeler, D., G., Chaffin, B., C., Twidwell, D., Garmestani, A. (2019). Resilience reconciled. *Nature Sustainability*, Vol. 2, Pages 898-900. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0401-4>
- Angeler, D., G., Allen, C., R. (2016). Quantifying resilience. *Journal of Applied Ecology*, volume 53, pages 617-624. 10.1111/1365-2664.12649
- Bianchini, G., Pasqualetti, F. (2018). Time-Delay Attacks in Network Systems. Ç. K. Koç (ed.), *Cyber-Physical Systems Security*. 10.1007/978-3-319-98935-8_8
- Booth, A., Sutton, A., Clowes, M., Martyn, St. J., Marrison. (2022). *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*. Los Angeles: SAGE Publications Ltd. Teoksessa: Vilkkä, L. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Efron, S., E., Ravid, R. (2019). *Writing the Literature Review. A practical guide*. New York: The Guilford Press. Teoksessa: Vilkkä, L. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Fan, D., Breslin, D., Callahan, J., L., Iszatt-White, M. (2022). Advancing literature review methodology through rigour, generativity, scope and transparency. *International Journal of Management Reviews*, s. 1-10. doi. org/10.1111/ijmr.12291. Teoksessa: Vilkkä, L. (2023). *Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina*. Printon, Tallinna: Art House Oy.
- Ferlemann, D., Senoi, S. (2017). Wind farm security: Attack surface, targets, scenarios and mitigation. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*. 10.1016/j.ijcip.2017.03.001
- ELY-keskus. (2021). Tuulivoiman yleisopas. Saatavilla: <https://www.ely-keskus.fi/documents/10191/57296/Tuulivoiman+yleisopas.pdf/9f0ed0a3-7df6-ee6c-81ed-e90279b264fe?t=1636093932871>
- Energiavirasto. (2024). Kyberturvallisuudirektiivi (NIS2). Saatavilla: <https://energiavirasto.fi/kyberturvallisuus>
- Euroopan komissio. (2016). KOMMISSION ASETUS (EU) 2016/631. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32016R0631>
- Euroopan komissio. (2017). KOMMISSION ASETUS (EU) 2017/2196. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32017R2196>
- Euroopan komissio. (2024). Komission delegoitu asetus (EU) 2024/1366. Saatavilla: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=OJ:L_202401366
- Euroopan Unioni. (2022). EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI (EU) 2022/2557. Saatavilla: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2022/2557/oj>
- Fingrid Oyj. (2018). Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2018. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kayttovarma-sahkonsiirto/vjv2018.pdf>
- Fingrid Oyj. (2024a). Saatavilla: Sähkön tuotannon ja kulutuksen kehitysnäkymät päivitetty – Pidemmän aikavälin näkymä ennallaan - Fingrid
- Fingrid Oyj. (2024a). Kantaverkon kehittämissuunnitelma 2024-2033. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/kantaverkko/kantaverkon-kehittaminen/fingrid_kehittamissuunnitelma_2024-2033.pdf
- Fingrid Oyj. (2024c). Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset. Energiavirastolle vahvistettavaksi. Viitattu 14.10.2024. Saatavilla: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/vjv2024---energiavirastolle-vahvistettavaksi-9_2024-id-471030.pdf
- Fingrid Oyj. (2024d). Käyttösaannöt. Saatavilla: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/verkkosaannot/kayttosaannot/#network-code-for-emergency-and-restoration-nc-er>
- Jasiūnas, J., Lund, P. D., & Mikkola, J. (2021). Energy system resilience – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, Article 111476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111476>
- Puolustusvoimat. (2024). Tuulivoimahankkeet. Saatavilla: <https://puolustusvoimat.fi/tuulivoimalahankkeet>

Sisäministeriö. (2024). Hallitus esittää uutta lakia ohjaamaan yhteiskunnan toimintakyvyn kannalta kriittisen infrastruktuurin suojaamista ja häiriönsietokyvyn parantamista. Saatavilla: <https://intermin.fi/-/hallitus-esittaa-uutta-lakia-ohjaamaan-yhteiskunnan-toimintakyvyn-kannalta-kriittisen-infrastruktuurin-suojaamis-ta-ja-hairionsietokyvyn-parantamista>

Suomen Hyötytuuli Oy. (2024). Tahkoluodon merituulivoimahankkeen laajennus. Saatavilla: <https://hyotytuuli.fi/tuulipuistot/tahkoluodon-merituulivoimahankkeen-laajennus/>

Suomen Uusiutuvat ry. (2024). Tuulivoima Suomessa. Saatavilla: <https://tuulivoimayhdistys.fi/tuulivoima-suomessa>

Suomen Uusiutuvat ry. (2025). Tuulivoima vuositilastot 2024. Saatavilla: https://suomenuusiutuvat.fi/media/tuulivoima_vuositilastot-2024-1.pdf

Vilkkä, H. (2023). Kirjallisuuskatsaus metodina, opinnäytetyön osana ja tekstilajina. Printon, Tallinna: Art House Oy

Kirjallisuuskatsauksen lähteet

Amini, A., Ghafouri, M., Mohammadi, A., Hou, M., Asif, A., Plataniotis, K. (2022). Secure Sampled-Data Observer-Based Control for Wind Turbine Oscillation Under Cyber Attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 13, Issue 4, pages 3188-3202. 10.1109/TSG.2022.3159582

Biswas, H., Singh, J. (2024). Injecting Offshore Wind Power into the Grid: Readiness Looking Back on the Past Few Decades since the Global Beginning. *Water & Energy International*. https://www.researchgate.net/publication/382400498_Injecting_Offshore_Wind_Power_into_the_Grid_Readiness_Looking_Back_on_the_Past_Few_Decades_since_the_Global_Beginning

Chen, J., Zhu, Q. (2023). A Cross-Layer Design Approach to Strategic Cyber Defense and Robust Switching Control of Cyber-Physical Wind Energy Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Volume 20, Issue 1. 10.1109/TASE.2022.3164860

Cheng, Y., Azizpanah-Abarghoee, R., Azizi, S., Ding, L., Terzija, V. (2020). Smart frequency control in low inertia energy systems based on frequency response techniques: A review. *Applied Energy*, Volume 279. 10.1016/j.apenergy.2020.115798

Dashtpeyma, M., Ghodsi, R. (2022). Enablers of management system resilience in wind power plant. *International Journal of Ambient Energy*, Volume 43, Issue 1. 10.1080/01430750.2022.2091030

Delapiedra-Silva, V., A. (2021). The different characteristics of real options in contracts of wind power in Brazil. *Gest. Prod.* 28 (4). 10.1590/1806-9649-2021v28e5652

Duer, S., Pas, J., Hapka, A., Duer, R., Ostrowski, A., Wozniak, M. (2022). Assessment of the Reliability of Wind Farm Devices in the Operation Process. *Energies*, 15(11), 3860. doi.org/10.3390/en15113860

Dui, H., Zheng, X., Guo, J., Xiao, H. (2022). Importance measure-based resilience analysis of a wind power generation system. Volume 236, Issue 3. 10.1177/1748006X211001709

Faramarzi, D., Rastegar, H., Riahy, G., H., Doagou-Mojarrad, H. (2022). A risk-averse multiyear framework for resilience improvement planning of active distribution networks against hurricanes. *IET Renewable Power Generation*, Volume 16, Issue 14, pages 3119-3133. 10.1049/rpg2.12563

Halgamuge, M., N. (2024). Leveraging Deep Learning to Strengthen the Cyber-Resilience of Renewable Energy Supply Chains: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Volume 26, Issue 3. 10.1109/COMST.2024.3365076

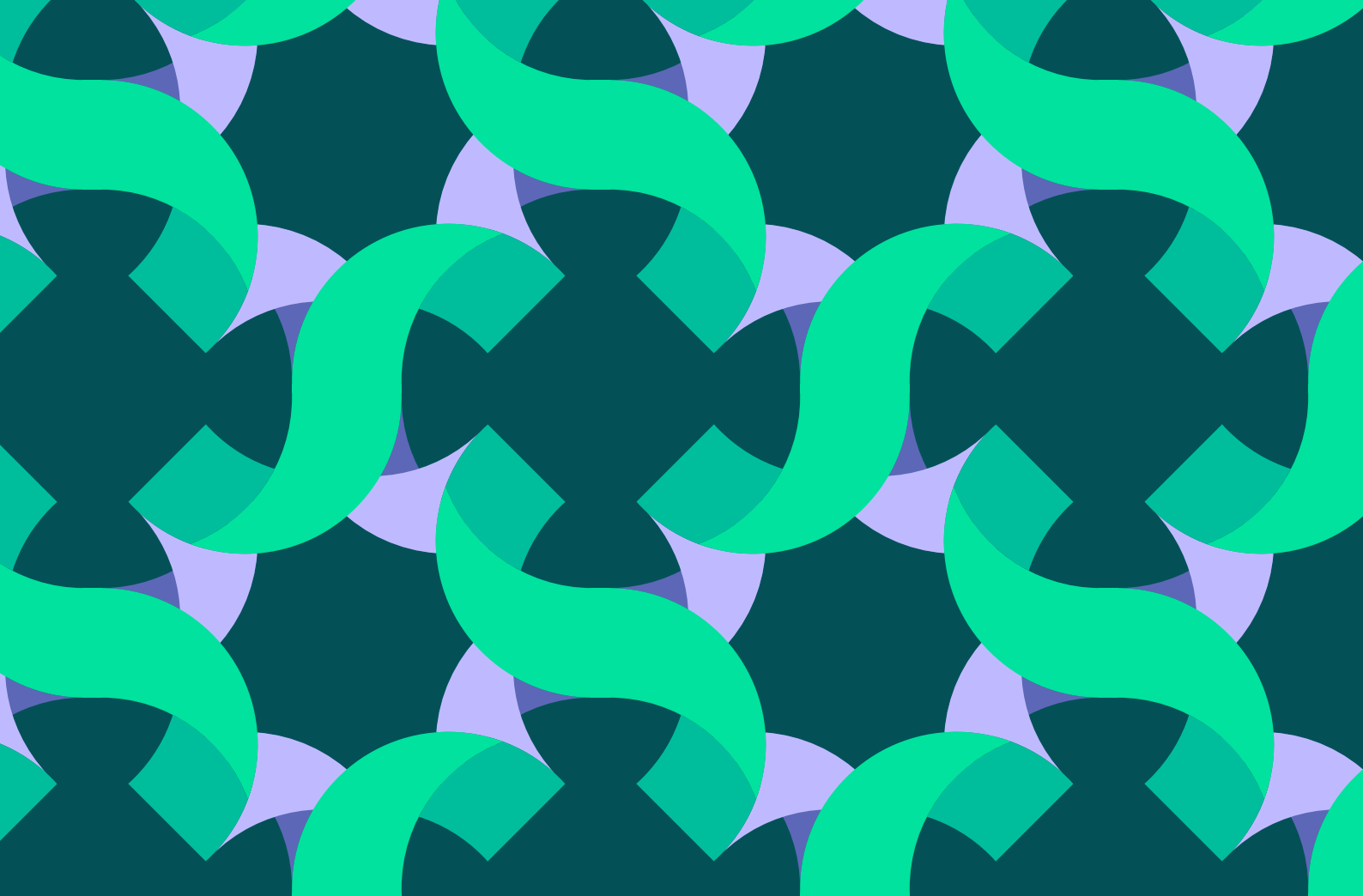
Hosseini, S., M., A., Mohammadirad, A., Akmal, A., A., S. (2022). Surge analysis on wind farm considering lightning strike to multi-blade. *Renewable Energy*, Volume 186, pages 312-326. 10.1016/j.renene.2021.12.061

Hoe, J., Hu, C., Lei, S., Hou, Y. (2024). Cyber resilience of power electronics-enabled power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 189, Part B. 10.1016/j.rser.2023.114036

Hugeback, K., K., Gallus Jr, W., A., Villegas Pico, H., N. (2023). Machine Learning-Adjusted WRF Forecasts to Support Wind Energy Needs in Black Start Operations. *Weather and Forecasting*, Volume 38, Issue 9, pages 1553-1561. 10.1175/WAF-D-23-0023.1

- Jamieson, M., R., Strbac, G., Bell, K., R., W. (2020). Quantification and visualisation of extreme wind effects on transmission network outage probability and wind generation output. *IET Smart Grid*, Volume 3, Issue 2, p. 112-122. 10.1049/iet-stg.2019.0145
- Javed, M., S., Jurasz, J., Ruggles, T., H., Khan, I., Ma, T. (2023). Designing off-grid renewable energy systems for reliable and resilient operation under stochastic power supply outages. *Energy Conversion and Management*, Volume 294. 10.1016/j.enconman.2023.117605
- Khan, M., Al-Ammar, E., Naeem, M., R., Ko, W., Choi, H.-J., Kang, H.-K. (2021). Forecasting renewable energy for environmental resilience through computational intelligence. *PLoS ONE* 16(8): e0256381. 10.1371/journal.pone.0256381
- Konstantinidis, E., I., Katsavounis, S., Botsaris, P., N. (2020). Design structure matrix (dsm) method application to issue of modeling and analyzing the fault tree of a wind energy asset. *Wind Energy*, 23, 731-748. 10.1002/we.2454
- Köpke, C., Mielniczek, J., Roller, C., Lange, K., Torres, F., S., Stolz, A. (2023). Resilience management processes in the offshore wind industry: schematization and application to an export-cable attack. *Environment Systems and Decisions*, Volume 43, pages 161-177. 10.1007/s10669-022-09893-9
- Liang, Y., Lin, S., Feng, X., Liu, M., Su, L., Zhang, B. (2023). Optimal resilience enhancement dispatch of a power system with multiple offshore wind farms considering uncertain typhoon parameters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 153. 10.1016/j.ijepes.2023.109337
- Liu, Y., Liu, D., Zhang, H. (2024). Stochastic Unit Commitment with High-Penetration Offshore Wind Power Generation in Typhoon Scenarios. *Journal of Modern Power Systems*, Volume 12, Issue 2. 10.35833/MPCE.2023.000019
- Liu, M., Qin, J., Lui, D.-G., Zhang, W.-H., Zhu, J.-S., Faber, M., H. (2022). Towards resilience of offshore wind farms: A framework and application to asset integrity management. *Applied Energy*, Volume 322. 10.1016/j.apenergy.2022.119429
- Mahmoud, M., M., Atia, B., S., Abdelaziz, A., Y., Aldin, N., A., N. (2022). Dynamic Performance Assessment of PMSG and DFIG-Based WECS with the Support of Manta Ray Foraging Optimizer Considering MPPT, Pitch Control, and FRT Capability Issues. *Processes*, 10(12), 2723. 10.3390/pr10122723
- Mahrouch, A., Ouassaid, M., Cabrane, Z., Lee, S., H. (2023). *Energies*, Volume 16, Issue 1. 10.3390/en16010291
- Mccarty, M., Johnson, J., Richardson, B., Rieger, C., Cooly, R., Gentle, J. (2023). Cybersecurity Resilience Demonstration for Wind Energy Sites in Co-Simulation Environment. *IEEE Access*, Volume 11. 10.1109/ACCESS.2023.3244778
- Mei, J., Guo, J., Diao, W., Wo, R., Wang, L., Lui, A. (2024). A Hybrid MMC Control Strategy to Enhance the Resilience of DC Transmission System. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume 71, Issue 9. 10.1109/TIE.2023.3344814
- Mustafa, A., M., Barabadi, A. (2021). Resilience Assessment of Wind Farms in the Arctic with the Application of Bayesian Networks. *Energies*, 14(15), 4439. 10.3390/en14154439
- Pedersen, S., Ahsan, D. (2020). Emergency preparedness and response: Insights from the emerging offshore wind industry. *Safety Science*, Volume 121, Pages 516-528. 10.1016/j.ssci.2019.09.022
- Polonelli, T., Deparday, J., Abdallah, I., Barber, S., Chatzi, E., Magno, M. (2023). Instrumentation and Measurement Systems: Aerosense: A Wireless, Non-Intrusive, Flexible, and MEMS-Based Aerodynamic and Acoustic Measurement System for Operating Wind Turbines. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Volume 26, Issue 4. 10.1109/MIM.2023.10146566
- Rong, J., Zhou, M., Li, G. (2023). Resilience-oriented Restoration Strategy by Offshore Wind Power Considering Risk. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, Vol. 9, NO. 6. 10.17775/CSEEJPES.2022.07710
- Rong, J., Zhou, M., Zhang, Z., Li, G. (2024). Coordination of preventive and emergency dispatch in renewable energy integrated power systems under extreme weather. *IET Renewable Power Generation*, Volume 18, Issue 7, pages 1164-1176. 10.1049/rpg2.12893
- Shazon, M., N., H., Al-Masood, N., Ahmed, H., M. (2022). Modelling and utilisation of frequency responsive TCSC for enhancing the frequency response of a low inertia grid. *Energy reports*, Volume 8, pages 6945-6959. 10.1016/j.egy.2022.05.101
- Sigitov, O., Y., Chemborisova, N., S. (2021). Features of the Operation of Wind Power Plants in an Electric Power System. *Power Systems and Electric Networks*, Volume 55, pages 620-624. 10.1007/s10749-021-01407-y

- Soomro, J., B., Kumar, D., Chachar, F., A., Isik, S., Alharbi, M. (2023). An Enhanced AC Fault Ride through Scheme for Offshore Wind-Based MMC-HVDC System. *Sustainability*, Volume 15, Issue 11. 10.3390/su15118922
- Velenturf, A., P., M., Purnell, P., Jensen, P., D. (2021). Reducing material criticality through circular business models: Challenges in renewable energy. *One Earth*, Volume 4, Issue 3, pages 350-352. 10.1016/j.oneear.2021.02.016
- Venkatesan, V., Mayakrishnan, M. (2022). Behavior of Mono Helical Pile Foundation in Clays under Combined Uplift and Lateral Loading Conditions. *Applied Sciences*, 12(14), 6827. 10.3390/app12146827
- Wang, S., Foley, A., M., Chen, N., Chen, B. (2023). Risk-Based Dispatch Strategy for a Power System with High Wind Power Integration Considering Damage Due to Typhoons. *Electric Power Components and Systems*, Volume 51, Issue 18. 10.1080/15325008.2023.2205431
- Wen, Z., Wang, F., Wan, J., Wang, Y., Yang, F., Guo, C. (2024). Assessment of the tropical cyclone-induced risk on offshore wind turbines under climate change. *Natural Hazards*, Volume 120, pages 5811-5839. 10.1007/s11069-023-06390-3
- Wilkie, D., Galasso, C. (2020). A probabilistic framework for offshore wind turbine loss assessment. *Renewable Energy*, Volume 147, Part 1, 1772-1783. 10.1016/j.renene.2019.09.043
- Wu, D., Seo, G.-S., Xu, L., Su, C., Kocewiak, L., Sun, Y. (2024). *IEEE Open Journal of Power Electronics*, Volume 5, pages 583-604. 10.1109/OJPEL.2024.3390417
- Wu, H., Xie, Y., Xu, Y., Wu, Q., Yu, C., Sun, J. (2022). Resilient scheduling of MESSs and RCs for distribution system restoration considering the forced cut-off of wind power. *Energy*, Volume 244, Part B. 10.1016/j.energy.2021.123081
- Xue, L., Niu, T., Fang, S., Li, Z. (2023). Parameter Optimization for Var Planning of Systems With High Penetration of Wind Power: An Adaptive Equivalent Reduction Method. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Volume 14, Issue 4. 10.1109/TSTE.2023.3269532
- Yang, L., Liang, G., Yang, Y., Ruan, J., Yu, P., Yang, C. (2024). Adversarial false data injection attacks on deep learning-based short-term wind speed forecasting. *IET Renewable Power Generation*, Volume 18, Issue 7, pages 1370-1379. 10.1049/rpg2.12853
- Ying, L., Xu, Z., Zhang, H., Xu, J., Cheng, X. (2024). Graph Temporal Attention Network for Imbalanced Wind Turbine Blade Icing Prediction. *IEEE Sensors Journal*, Volume 24, Issue 6. 10.1109/JSEN.2024.3358873
- Zhao, Y., Pan, S., Zhao, Y., Liao, H., Ye, L., Zheng, Y. (2024). Ultra-short-term wind power forecasting based on personalized robust federated learning with spatial collaboration. *Energy*, Volume 288. 10.1016/j.energy.2023.129847
- Zhao, S., Xia, J., Deng, R., Cheng, P., Yang, Q. (2023a). Adaptive Observer-Based Resilient Control Strategy for Wind Turbines Against Time-Delay Attacks on Rotor Speed Sensor Measurement. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Volume 14, Issue 3. 10.1109/TSTE.2023.3248862
- Zhao, S., Xia, R., Cheng, P., Yang, Q., Jiao, X. (2023b). Dual-Triggered Adaptive Torque Control Strategy for Variable-Speed Wind Turbine Against Denial-of-Service Attacks. *IEEE Transactions on Smart Grid*, Volume 14, Issue 4. 10.1109/TSG.2022.3224903



Huoltovarmuuskeskus