



**MERITUULIVOIMAN LIITTÄMISESSÄ KÄYTETTÄVIEN SIIRTOYHTEYK-
SIEN HYÖDYNTÄMINEN VOIMAJÄRJESTELMIEN VÄLISESSÄ SÄHKÖN-
SIIRROSSA**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Nestori Rask

Tarkastajat: Tutkijatohtori Janne Karppanen

Nuorempi tutkija Julius Vilppo

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Nestori Rask

MERITUULIVOIMAN LIITTÄMISESSÄ KÄYTETTÄVIEN SIIRTOYHTEYKSIEN HYÖDYNTÄMINEN VOIMAJÄRJESTELMIEN VÄLISESSÄ SÄHKÖNSIIRROSSA

Sähkötekniikan kandidaatintyö

34 sivua, 10 kuvaa, 1 taulukko ja 0 liitettä

Tarkastajat: Tutkijatohtori Janne Karppanen ja Nuorempi tutkija Julius Vilppo

Avainsanat: Merituulivoima, Siirtoverkot, Siirtoverkkojen yhteiskäyttö

Euroopan merillä tuotetaan yhä enemmän sähköä merituulivoimalla uusiutuvien energialähteiden yleistyessä ja tuotantomenetelmän kilpailukyvyn parantuessa. Yhä pidemmiksi kasvavat puistojen siirtoyhteydet ovat herättäneet keskustelua siirtoyhteyksien hyödyntämisestä myös voimajärjestelmien välisessä sähkönsiirrossa. Tässä kandidaatintyössä selvitettiin, miten merituulipuistojen siirtoyhteyksiä hyödynnetään voimajärjestelmien välisessä sähkönsiirrossa, sekä miten nämä siirtoverkkojen yhteiskäytöt voisivat palvella sähköverkkojen tarpeita tulevaisuudessa.

Selvityksen perusteella voidaan todeta, että siirtoverkkojen yhteiskäytöt ovat vielä tois-
taiseksi harvinainen tapa toteuttaa merituulipuiston verkkoliitäntä. Yhteiskäyttöratkaisuilla on mahdollista olla kannattavia tietyin edellytyksin, mutta niihin liittyy myös paljon epävarmuustekijöitä. Maailmassa on kuitenkin jo toiminnassa olevia yhteiskäytöllä toteutettuja siirtoverkkoja ja on odotettavissa, että niiden määrä tulee lisääntymään tulevaisuudessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Nestori Rask

UTILIZATION OF TRANSMISSION CONNECTIONS FOR OFFSHORE WIND POWER AS INTERCONNECTORS BETWEEN POWER SYSTEMS

Bachelor's thesis

2022

34 pages, 10 figures, 1 table and 0 appendices

Examiners: Postdoctoral researcher Janne Karppanen and Junior researcher Julius Vilppo

Keywords: Offshore wind power, Electric power transmission, Multi-purpose interconnector

Europe's offshore wind is generating more and more electricity as renewable energy sources become more widespread and the competitiveness of the generation method improves. The ever-increasing transmission distances of the offshore wind farms have sparked a debate on the use of transmission assets of the wind farms in the transmission of electricity between different power systems as well. In this bachelor's thesis, it was investigated how the transmission connections of offshore wind farms are being utilized in the transmission of electricity between different power systems, and how these multi-purpose interconnectors will serve the needs of electricity networks in the future.

Based on the study, it can be stated that the sharing of transmission networks is still a rare way to implement the grid connection of an offshore wind farm. Multi-purpose interconnectors can be advantageous under certain conditions, but they also involve a lot of uncertainty. However, there are already multi-purpose interconnectors that are in operation and the number of multi-purpose interconnectors is expected to increase in the future.

LYHENNELUETTELO

| | |
|--------|--|
| HVAC | High Voltage Alternating Current |
| HVDC | High Voltage Direct Current |
| KF CGS | Kriegers Flak Combined Grid Solution |
| MIO | Master Controller for Interconnector operation |

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

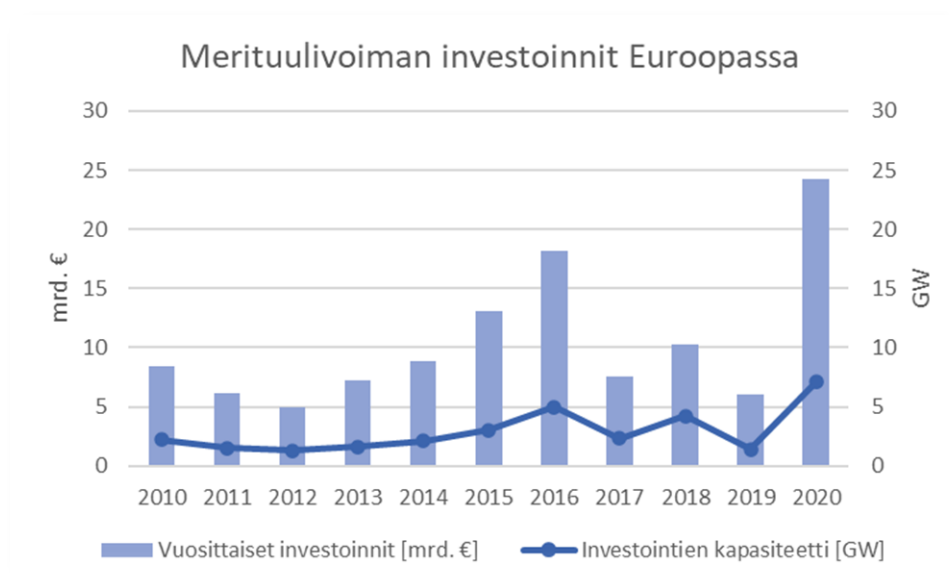
Abstract

Lyhenneluettelo

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Johdanto..... | 6 |
| 2 | Merituulivoiman liittäminen sähköverkkoon | 8 |
| 2.1 | Merituulivoiman sähköverkko | 8 |
| 2.1.1 | Keräinverkko..... | 9 |
| 2.1.2 | Siirtoverkko..... | 11 |
| 3 | Siirtoverkkojen yhteiskäytöt | 13 |
| 3.1 | Hybridihankkeet | 13 |
| 3.2 | Siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen nykytila | 17 |
| 3.2.1 | Suunnitteilla olevat siirtoverkkojen yhteiskäytöt..... | 21 |
| 4 | Energiaverkkojen tulevaisuus Euroopan merialueilla | 24 |
| 4.1 | Euroopan energiasektorin kehitys | 24 |
| 4.2 | Siirtoverkot tulevaisuudessa..... | 27 |
| 5 | Johtopäätökset ja yhteenveto | 29 |
| | Lähteet | 31 |

1 Johdanto

Euroopan merialueet tarjoavat suuren potentiaalin uusiutuvalle energiantuotannolle, jonka myös ennustetaan olevan keskeisessä roolissa Euroopan Unionin ilmastotavoitteiden saavuttamisessa (Euroopan komissio, 2020b). Merialueiden eri tuotantomuodoista kypsimmäksi on osoittautunut merituulivoima, johon tehtiin investointeja Euroopassa vuonna 2020 ennätyslisen 24,2 miljardin euron edestä, kuten kuvassa 1.1 on esitetty (WindEurope, 2020). Merituulivoimasta on myös kehittynyt kilpailukykyinen vaihtoehto fossiilisiin polttoaineisiin perustuvalla sähköntuotannolle (Ørsted, 2022).



Kuva 1.1 Merituulivoiman investoinnit vuositasolla Euroopassa 2010-luvulla. Muokattu lähteestä: (WindEurope, 2020).

Merelle sijoitetun tuulivoimatuotannon kasvu ja erityisesti sen vaatima siirtoverkko on luonut kannusteita ns. siirtoverkkojen yhteiskäyttöille, joissa esimerkiksi tuulipuisto on liitetty suoraan valtioiden väliseen rajayhdysjohtoon (3E, 2011). Verkon yhteiskäytöllä voidaan edistää verkon siirtovarmuutta ja verkko voisi myös palvella sähkömarkkinoiden tarpeita tilanteissa,

joissa merellä tapahtuva tuotanto ei täytä yhteyden koko siirtokapasiteettia (Marten, et al., 2019a).

Siirtoverkkojen yhteiskäytöllä on mahdollista saavuttaa merkittäviä etuja verrattaessa perinteisiin merituulipuistojen yhteyksiin, joissa puisto on liitetty suoraan yhden valtion mannerverkkoon, sekä erillisiin rajasiirtoyhteyksiin. Merituulipuistojen liittämällä useamman valtion kantaverkkoon on mahdollista vähentää verkkoinfrastruktuurin, kuten merikaapelien ja muuntoasemien alueellista kokonaistarvetta. Tämän seurauksena yhteiskäyttöratkaisulla voidaan saavuttaa kustannussäästöjä, sekä merialueiden tilankäytön kannalta tehokkaampi verkkoratkaisu. Verkkoliitöntöjen suuremman määrän voidaan nähdä myös vaikuttavan positiivisesti verkon toimitusvarmuuteen lisääntyvien siirtoyhteyksien myötä. Toisaalta yhteiskäyttöverkot ovat luonteeltaan monikansallisia hankkeita ja erityisesti niitä koskevien säännösten puute on osoittautunut haasteelliseksi niiden kehityksen kannalta. (3E, 2011.)

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan siirtoverkkojen yhteiskäyttöä, joissa merituulipuistojen siirtoverkkoja hyödynnetään myös valtioiden kantaverkkojen välisessä sähkönsiirrossa. Tutkimuksen tavoitteena on selvittää, miten merituulipuistojen siirtoverkkoja hyödynnetään eri voimajärjestelmien välisessä sähkönsiirrossa nykyisellään, sekä miten siirtoverkkojen yhteiskäyttöratkaisut voisivat palvella sähköverkkojen tarpeita tulevaisuudessa. Tutkimus suoritetaan kirjallisuuskatsauksen muodossa. Tutkimusmateriaalina käytetään aihetta käsitteleviä tieteellisiä julkaisuja, sekä merituulivoimateollisuuden kannalta olennaisten sidosryhmien raportteja ja näkemyksiä. Tutkimuksessa pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

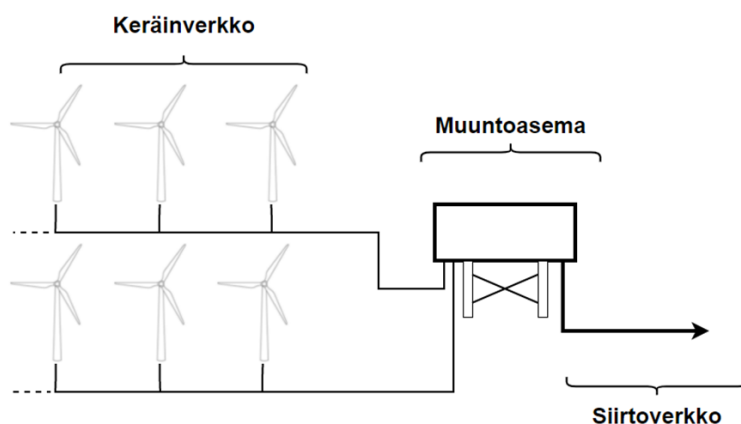
- Missä merituulivoiman ja siirtoverkkojen yhteiskäyttöä on jo olemassa ja mihin niitä on suunnitteilla?
- Mitä kannusteita yhteiskäyttöille on todettu olevan?
- Miten verkon yhteiskäyttö vaikuttaa sen tekniseen toteutukseen?
- Miten yhteiskäyttöratkaisut tulevat yleistymään merituulivoimateollisuuden kasvassa?

2 Merituulivoiman liittäminen sähköverkkoon

Tämän luvun aiheena on merituulipuiston sähköverkon eri osat ja niiden toiminta. Luvussa esitellään merituulipuistojen yleisimpiä teknisiä toteutuksia ja niihin liittyvää termistöä, joita käytetään myöhemmin tutkimuksessa.

2.1 Merituulivoiman sähköverkko

Merituulipuiston sähköverkko liittää puiston mantereella sijaitsevaan valtakunnanverkkoon ja se mahdollistaa samalla sähkön toimituksen mereltä kuluttajille (Ng & Ran 2016, 419). Energiantuotannon näkökulmasta tuuliolosuhteet merellä ovat suotuisampia, kuin maalla, mutta turvallisen ja kustannustehokkaan energiansiirron takaamiseksi merenalaiset kaapelijärjestelmät vaativat tapauskohtaista optimointia, jossa otetaan huomioon turbiinien sijainnit, sekä maalla sijaitseva verkkoinfrastruktuuri (Burton et al. 2021, 771; Ng & Ran 2016, 419). Merituulipuistoprojektit ovat myös luonteeltaan pääomaintensiivisiä, joten puistojen sähköverkoista johtuvien käyttökatojen ja siirtohäviöiden minimointi voidaan nähdä edullisena puistojen tuoman taloudellisen hyödyn näkökulmasta (Ng & Ran 2016, 10). Tavnerin (2012, 19) mukaan matalaan veteen rakennettavan merituulipuiston verkkoliitäntä muodostaa tyypillisesti noin 15 %:a puiston kokonaiskustannuksista.



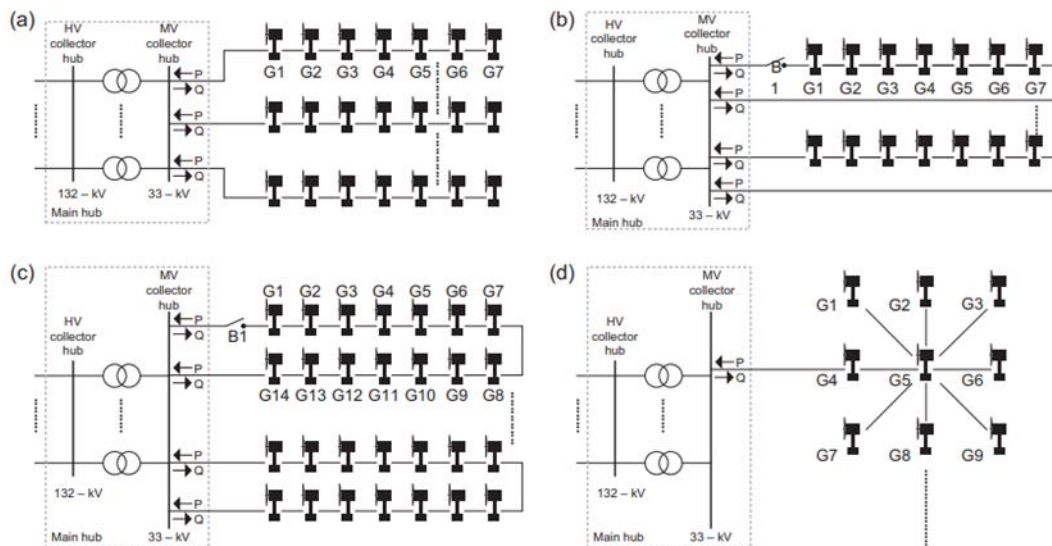
Kuva 2.1 Modernin merituulipuiston sähköverkon eri osakokonaisuudet. Muokattu lähteestä: (Ng & Ran 2016, 400).

Tyypillinen merituulipuiston sähköverkko voidaan jakaa kahteen eri osakokonaisuuteen; puiston sisäiseen keräinverkkoon ja siirtoverkkoon, kuten kuvassa 2.1 on esitetty. Keräin- ja siirtoverkon välillä voi olla myös hallinnollinen rajapinta sähköliiketoimintojen eriyttämissäännösten seurauksena. Esimerkiksi Tanskassa, Belgiassa, Saksassa ja Alankomaissa on tapana, että kantaverkkoyhtiö vastaa tuulipuiston siirtoyhteyden kehittämisestä ja käytöstä. (Roland Berger GmbH, 2019.)

2.1.1 Keräinverkko

Merituulipuiston keräinverkko yhdistää puiston yksittäiset tuulivoimalat toisiinsa, sekä muuntoasemaan merenalaisella kaapeloinnilla, mahdollistaen tehonsiirron tuulivoimaloilta muuntoasemalle (Ng & Ran 2016, 389). Keräinverkon rakenteeseen vaikuttaa turbiinien sijoittelu vanahäviöiden minimoimiseksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että turbiinit sijoitetaan tarpeeksi kauas toisistaan, jotta tuulen hidastuminen ja lisääntynyt turbulenssi ei vaikuta enää seuraavaan turbiiniin. Optimaalisen etäisyyden määrittäminen perustuu turbiinien roottoreiden halkaisijoiden monikertoihin, joka johtaa suuremmilla turbiineilla satojen metrien välimatkoihin. (Van Hertem et al., 2016, 109–110.) Turbiinien välisen etäisyyden kasvattamisella on kuitenkin omat haittavaikutuksensa, sillä se suurentaa kaapelointien pituuksia ja se vaikuttaa negatiivisesti tilankäytön tehokkuuteen. Tämän takia turbiinien sijoittelu on tärkeä optimoida myös keräinverkon näkökulmasta, jotta vältetään turhilta investointi- ja käyttökuluilta. (Ng & Ran 2016, 389–390.)

Keräinverkon rakenteella voidaan myös vaikuttaa verkon toimintakykyyn poikkeustilanteissa, joita ovat esimerkiksi kaapelin tai turbiinin vikaantuminen. Tällöin vikaantunut alue täytyy pystyä eristämään siten, että mahdollisimman suuri osa tuotannosta pystytään viasta huolimatta hyödyntämään. Keräinverkkojen suojalaitteiden määrä, sekä tyypit vaihtelevat eri verkotopologioiden välillä. (Ng & Ran 2016, 393–394.) Suojauksen toteutuksessa tulee myös huomioida merituulipuistojen keräinverkoille ominaiset pienet vikavirrat (Van Hertem et al., 2016, 118).

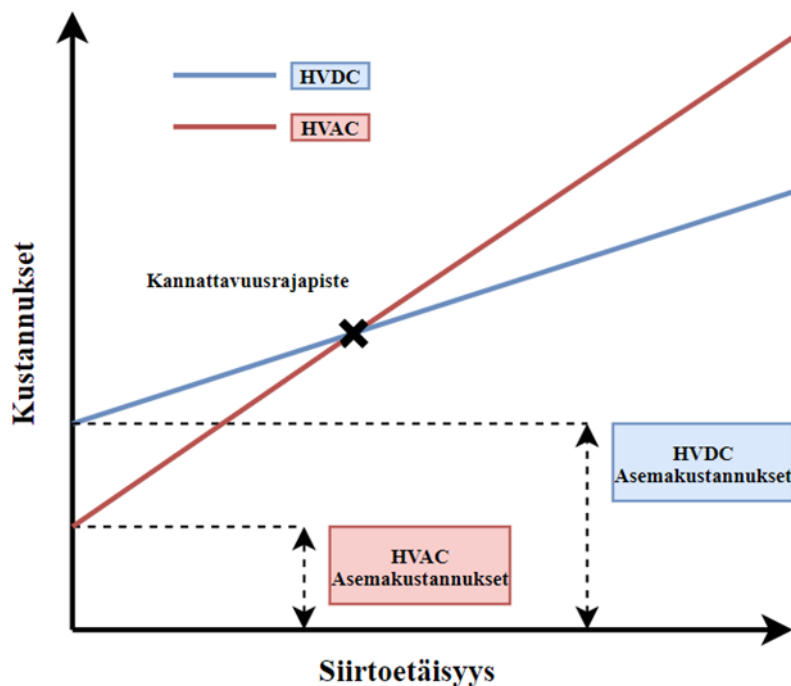


Kuva 2.2 Neljä yleistä keräinverkon mallia, (a) radiaaliyhteys, (b) -c) yksi- ja kaksipuoleinen rengasyhteys ja (d) tähtiyhteys (Ng & Ran 2016, 398).

Keräinverkon radiaalisessa mallissa (kuva 2.2(a)) muuntoasemaan yhdistetään useampi keräinverkon kaapeliyhteys, joissa jokaisessa on omat turbiininsa. Yksittäisen yhteyden turbiinien määrän määrittää generaattoreiden tehot ja kaapeleiden kapasiteetit. Radiaalinen keräinverkko on keräinverkkotyypeistä yleisin ja sen suurimmat edut ovat sen yksinkertaisuus ja pieni kaapelintarve, mutta sen vika-alueen rajauskyky on huono. (Van Hertem et al., 2016, 111–112.) Radiaalista mallia voidaan jalostaa lisäämällä kaapeliyhteys ketjun viimeiseltä turbiinilta muuntoasemalle, jolloin kyseessä on yksipuolinen rengasyhteys (kuva 2.2(b)). Rengasyhteys voidaan toteuttaa myös kaksipuolisena (kuva 2.2(c)), jolloin kahden eri yhteyden viimeiset turbiinit yhdistetään toisiinsa. Tähtiyhteydellä (kuva 2.2(d)) pyritään keventämään yksittäisten kaapeleiden kuormitusta ja edistämään keräinverkon toimintavarmuutta. Rengas- ja tähtiyhteyksien etuina on parempi toimintavarmuus, mutta ne myös vaativat enemmän kaapelointia. Vikatilanteiden tehonsiirto tulee ottaa myös huomioon kaapeleiden siirtokapasiteettien mitoituksessa. (Ng & Ran 2016, 397–399.)

2.1.2 Siirtoverkko

Merituulipuiston siirtoverkon tehtävänä on yhdistää yhden tai useamman merituulipuiston tuotanto merenalaisella kaapeloinnilla manntoverkkoon. Yhteys voidaan toteuttaa joko vaihto- tai tasasähköllä. Molemmissa tapauksissa verkon jännite nostetaan keräinverkon jännitetasosta erillisellä muuntoasemalla siirtohäviöiden minimoimiseksi. Vaihtosähköyhteyden tapauksessa pidemmällä siirtoetäisyyksillä hyödynnetään suurjännitevaihtovirtaa (HVAC) jännitetason ollessa tyypillisesti 132 kV tai enemmän. Siirtoetäisyyden kasvaessa suurjännitetasavirtaa (HVDC) hyödyntävällä tasasähköyhteydellä voidaan saavuttaa kuitenkin vaihtosähköyhteyttä kustannustehokkaampi verkkoratkaisu. Moderni tasasähköyhteys hyödyntää tehoelektronikkaa, joka suorittaa vaihtovirran tasasuuntauksen muuntajan jälkeen siirtoa varten. (Ng & Ran 2016, 444–446.) Kannattavuusrajan siirtoetäisyyden suhteen näiden kahden teknologian välillä vaikuttaa mm. laitteistojen investointikustannukset, sekä eri kustannus- ja häviökomponenttien suhteet siirtoetäisyyteen (Hardy, et al., 2019).



Kuva 2.3 Vaihto- ja tasasähköyhteyksien kustannusten vertailua. Muokattu lähteestä: (Dragan 2019, 4).

Kuvassa 2.3 esitetystä tasa- ja vaihtosähköyhteyksien kustannusten vertailusta nähdään, että tasasähköyhteydestä tulee tietyn rajapisteen jälkeen yhteyden kustannuksien kannalta edullisempi ratkaisu. Tasasähköyhteyden pienemmät muuttuvat kustannukset ilmenevät kuvaajan kulmakertoimessa. Vaihtosähköyhteyden suuremmat muuttuvat kustannukset ovat seurausta kolmivaihejärjestelmän suuremmasta johdinmäärästä ja yhteyden vaatimasta loistehon kompensoinnista. Tasasähköyhteyden taloudellista kilpailukykyä lyhyemmällä siirtoetäisyyksillä rajoittaa sen suuret asemakustannukset, jotka ovat seurausta suuntaaja-asemien vaatimasta tehoelektroniikasta. Valinta tasa- tai vaihtosähkösiirtoyhteyden välillä on kuitenkin tapauskohtaista. Yhteyksien kannattavuutta vertailevassa kustannusanalyysissä on otettava huomioon monia tekijöitä kuten pääoma, huolto-, ja häviökustannukset, sekä laitteiston luotettavuus. (Xiang, et al., 2016.) Eri lähteissä tehtyjen tarkastelujen perusteella kannattavuusrajaksi on saatu mm. seuraavia siirtoetäisyyksiä; Xiangin et al. (2016) tutkimuksen mukaan kannattavuusraja on 87 kilometrin etäisyydellä, Jovcicin (2019) mukaan 40–70 kilometrin välillä ja Ng:en & Ranin (2016) mukaan 60–70 kilometrin välillä. Tästä saadaan osviittaa mille etäisyyksille kannattavuusraja suurin piirtein tyypillisesti asettuu, mutta ennen kaikkea voidaan päätellä rajapisteen olevan hyvin tapauskohtaista.

3 Siirtoverkkojen yhteiskäytöt

Tämän luvun aiheena on merituulipuistojen siirtoverkkojen yhteiskäytöt, joissa puiston siirtoverkkoa voidaan hyödyntää myös valtioiden kantaverkkojen välisessä sähkönsiirrossa. Luvussa esitetään mitä hyötyjä yhteiskäytöllä on saavutettavissa, miten yhteiskäyttö vaikuttaa verkon tekniseen toteutukseen, sekä mikä on yhteiskäyttöratkaisujen nykytila maailmalla.

3.1 Hybridihankkeet

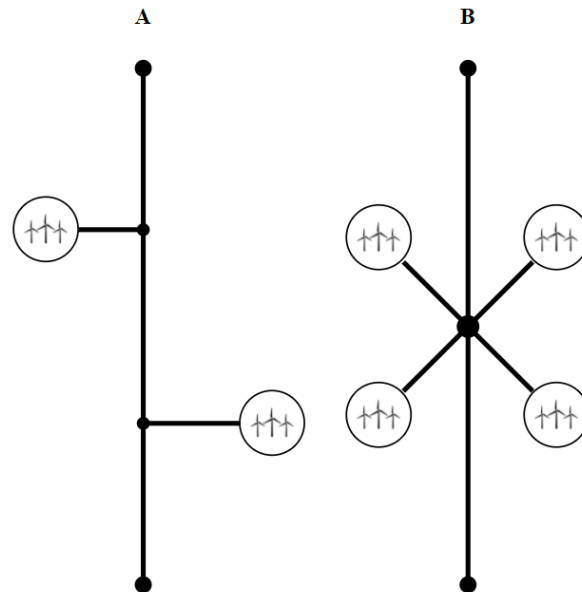
Merituulipuistohankkeet Euroopassa ovat olleet suurimmilta osin kansallisia projekteja, jotka ovat toteutettu yhden valtion mannerverkkoon yhdistetyllä radiaalisella yhteydellä. Merialueiden tuuliresurssien hyödyntämisen kasvu on samalla johtanut merituulipuistojen sijoittamiseen suuremmille etäisyyksille rannikkoalueista. Yhä pidemmiksi kasvavat siirtoyhteydet ovat luo-
neet kannusteita hybridihankkeille, joita myös siirtoverkkojen yhteiskäytöt edustavat. Siirtoverkkojen yhteiskäytöissä merellä sijaitseva sähköntuotanto ja voimajärjestelmien välinen sähkönsiirto on yhdistetty samaan verkkoratkaisuun. (Roland Berger GmbH, 2019.) Yhteiskäytön seurauksena siirtoverkolla on kaksi toiminnallisuutta; sähkönsiirto merituulipuiston ja mannerverkon välillä, sekä sähkönsiirto valtioiden välillä (Euroopan komissio, 2020b).

Konsulttitoimisto Roland Bergerin (2019) suorittaman tutkimuksen mukaan siirtoverkkojen yhteiskäytöillä voidaan saavuttaa merkittäviä kustannussäästöjä koko projektien elinkaarien ajalta verrattaessa tilanteeseen, jossa projektit toteutettaisiin erillisinä kokonaisuuksina. Siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen kustannussäästöjen suuruus on tapauskohtaisia, mutta niiden voidaan yleistää perustuvan yhteiskäyttöratkaisun vaatimaan pienempään kaapelitarpeeseen ja muuntoasemien määrään, sekä pienempiin huolto- ja käyttökuluihin. (Roland Berger GmbH, 2019.) Yhteiskäyttöprojekteja ei nähdä poikkeuksellisen riskialttiina teknisestä näkökulmasta ja niiden suurimpana riskitekijänä pidetään verkkojen HVDC-laitteistoa, jonka odotetaan kehittyvän tulevaisuudessa (NorthSeaGrid, 2014).

Kuvassa 3.1 on esitetty kaksi erilaista verkkokonseptia siirtoverkkojen yhteiskäyttöille, joiden kummankin kannattavalle hyödyntämisille on omat erikoistapauksensa. Tuulipuistojen rajayhdysjohtoon liittämisen (kuva 3.1 (A)) kannattavuus perustuu pääasiassa siihen, että yhteyden rakentamiseen liittyvät kustannussäästöt ovat suurempia, kuin rajayhteyden kaupankäynnin rajoittumisesta koituvat kustannukset. (3E, 2011.) Voimajärjestelmät yhdistävän rajayhdysjohdon varrella sijaitseva sähköntuotanto rajoittaa yhteyden rajasiirtokapasiteettia tai vastaavasti yhteyden rajasiirtokapasiteetin ylläpitämiseksi on tuotantoa rajoitettava (NorthSeaGrid, 2014). Tällä on negatiivinen vaikutus yhteiskäyttöjen kustannustehokkuuteen. Tuulipuiston liittämisen rajayhdysjohtoon on yleisesti kannattavaa, kun (3E, 2011.):

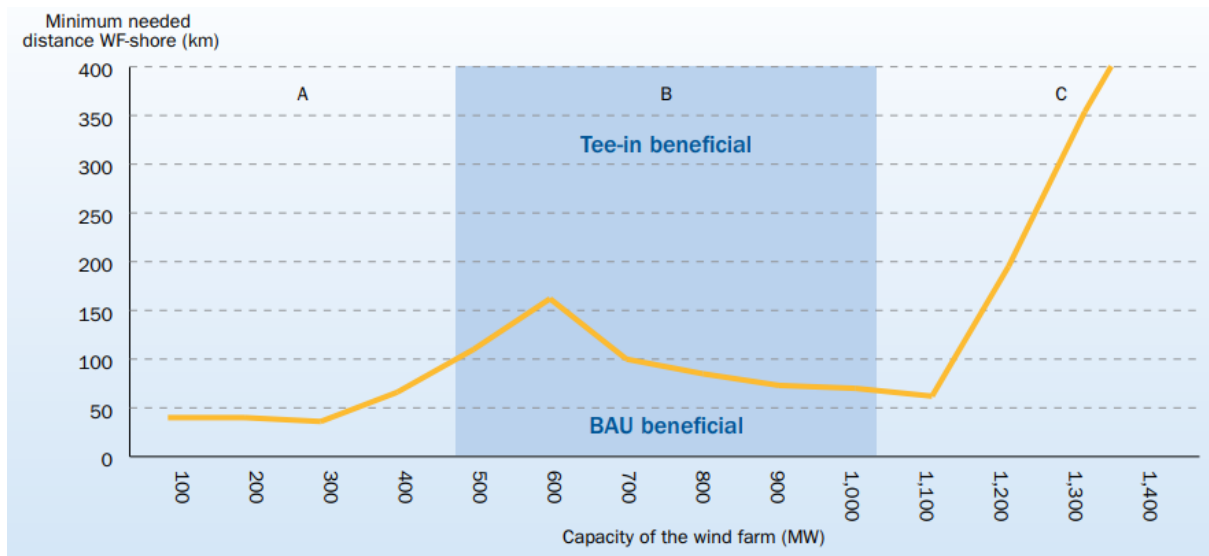
- Sähkön hintaerot liitettävien valtioiden välillä eivät ole suuria
- Tuulipuisto on kaukana rannikosta, mutta lähellä rajayhdysjohtoa
- Tuulipuisto rakennetaan sen valtion talousvyöhykkeelle, missä sähkön hinta on edullisempää
- Tuulipuiston teho on pieni rajayhdysjohdon siirtokapasiteettiin nähden tai tuulipuiston teho on kaksinkertainen rajayhdysjohdon siirtokapasiteettiin nähden

Energiasaarekkeen (kuva 3.1 (B)) kannattavuuden tapauksessa pätee samat em. yleistyksiset. Tämän lisäksi energiasaarekkeen kannattavuuden edellytyksenä on se, että liitettävät tuulipuistot ovat kaukana mantereella sijaitsevista liitäntäpisteistä, mutta puistot ovat klusterin tavoin lähellä toisiaan. (3E, 2011.)



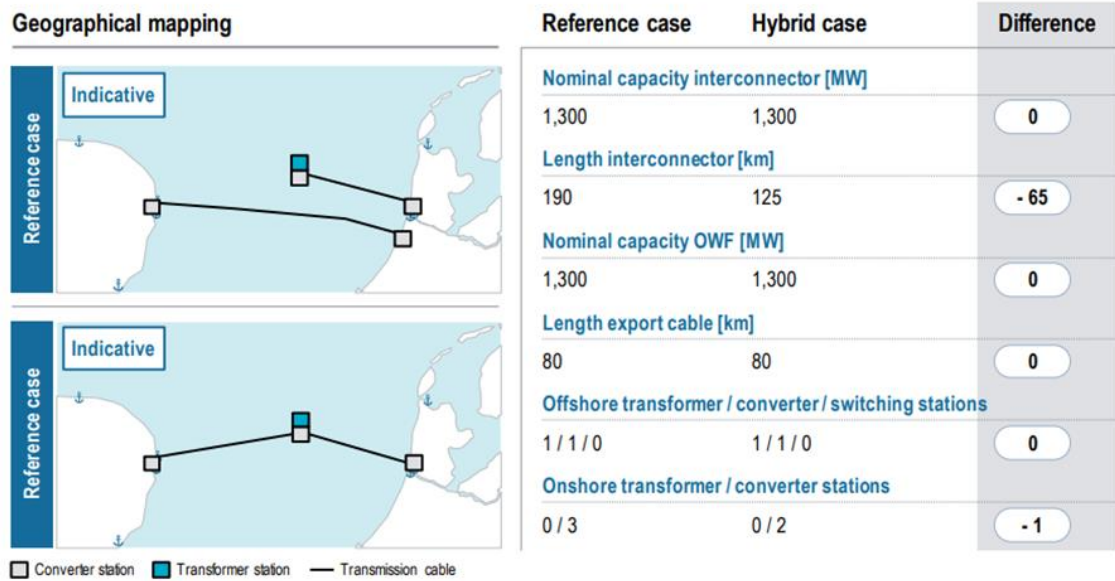
Kuva 3.1 Kaksi esimerkkiä siirtoverkkojen yhteiskäytöistä, A rajayhdysjohtoon liitetty tuulipuisto ja B energiasaareke. Muokattu lähteestä: (Roland Berger GmbH, 2019).

Kuvassa 3.2 on havainnollistettu tuulipuiston rajasiirtoyhteyteen liittämisen kannattavuusraja-käyrää etäisyyden suhteen, josta nähdään, että pienten tuulipuistojen tapauksessa (kuva 3.2, alue A) yhteen liittämisen on kannattavaa jo alle 50 km:n siirtoetäisyyksillä. Tämä on seurausta siitä, että tuulipuiston tuotannon aiheuttama kaupankäynnin rajoitus ei ole suurempi kuin yhteiskäytön tuomat säästöt rakennuskustannuksissa. Liitântäetäisyyden toinen optimipiste sijaitsee alueella, jossa tuulipuiston tuotantokapasiteetti on kaksinkertainen rajayhdysjohdon kapasiteettiin nähden. Tällöin rajayhdysjohto toimii tuulipuiston liitântänä kahden valtion kanta-verkkoon. Kun tuulipuiston tuotantokapasiteetti on yli kaksinkertainen rajayhdysjohdon siirtokapasiteettiin nähden, niin siirtoyhteydestä muodostuu pullonkaula, jolloin osa puiston tuotannosta jää hyödyntämättä. (3E, 2011.)



Kuva 3.2 Kannattavuusrajakäyrä tuulipuiston erillisen säteittäisen yhteyden (BAU) ja rajasiirtoyhteyteen liittämisen välillä (Tee-in) (rajayhdysjohdon siirtokapasiteetti 500 MW ja hintaero alueiden välillä 7.5 €) (3E, 2011).

Kuvassa 3.3 on havainnollistettu siirtoverkkojen yhteiskäytön pienempää materiaalitavetta verrattuna tuulipuiston säteittäiseen siirtoyhteyteen ja erilliseen rajayhdysjohtoon. Kuvasta nähdään, että oikeissa olosuhteissa yhteiskäyttöratkaisulla voidaan saavuttaa lyhyempi etäisyys tuulipuiston ja sen liitännäspisteen välillä tai vastaavasti luoda rajasiirtoyhteys kahden valtion kantaverkkojen välille hyödyntämällä tuulipuistojen siirtoyhteyksiä. Tällöin myös kaapeloinnin ja muuntoasemien aiheuttamat kustannukset pienenevät. Kuvan 3.3 tapauksessa siirtoverkkojen yhteiskäytöllä toteutetun projektin laskettu kustannusetu on 400 miljoonaa euroa laitteiston 25 vuoden elinkaaren aikana, joka on yli 5 %:a projektin koko elinkaaren kustannuksista. (Roland Berger GmbH, 2019.)



Kuva 3.3 Iso-Britannian ja Alankomaiden välille rakennettavan tuulipuiston toteutuksen vertailua radiaalaisella yhteydellä ja siirtoverkkojen yhteiskäytöllä (Roland Berger GmbH, 2019). Vertailusarake ”Hybrid case” viittaa alempana olevaan verkkoratkaisuun kuvassa.

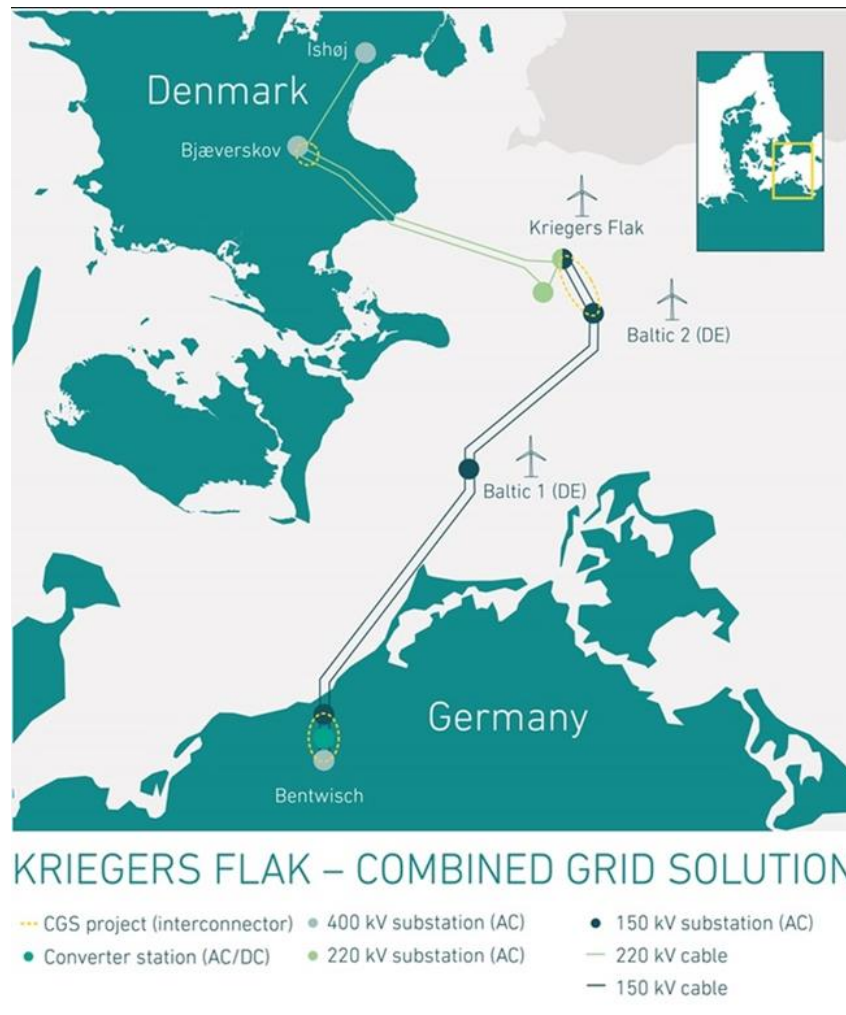
Siirtoasemien ja merikaapeliyhteiskäyttö johtaa myös pienempään rakennustarpeeseen ja täten myös merialueiden tehokkaampaan tilankäyttöön. Euroopan merialueilla on paljon kaupallista toimintaa, kuten meriliikennettä ja kalastusta, sekä suojeltuja Natura 2000 merialueita, joten vähemmät tilaa vievät verkkoratkaisut voidaan nähdä ideaalisina erityisesti näillä alueilla. (Roland Berger GmbH, 2019.) Verkkoinfrastruktuurin yhteiskäyttö nähdään myös edullisena ympäristön näkökulmasta, sillä lyhyemmät, sekä enemmän keskitetyt rakennusvaiheet vähentävät projektien ympäristövaikutuksia. (Müller, 2015). Yhteiskäyttöratkaisujen tuoma vaihtoehtoisten yhteyksien lukumäärän kasvu myös edistää verkon siirtovarmuutta (NorthSeaGrid, 2014).

3.2 Siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen nykytila

Maailman ensimmäinen ja ainoa siirtoverkkojen yhteiskäyttö on vuonna 2020 Itämeren lounaisosassa sijaitsevalle Arkananmerelle valmistunut Kriegers Flak Combined Grid Solution (KF CGS). Siirtoyhteyden omistuksesta, sekä käytöstä vastaavat Saksan ja Tanskan siirtoverkonhaltijat 50Hertz Transmission GmbH ja Energinet. (Marten, et al., 2019a.) Alueella sijaitseva ”Kriegers Flak” niminen riutta soveltui hyvin tuulipuistojen rakentamiseen sen matalien

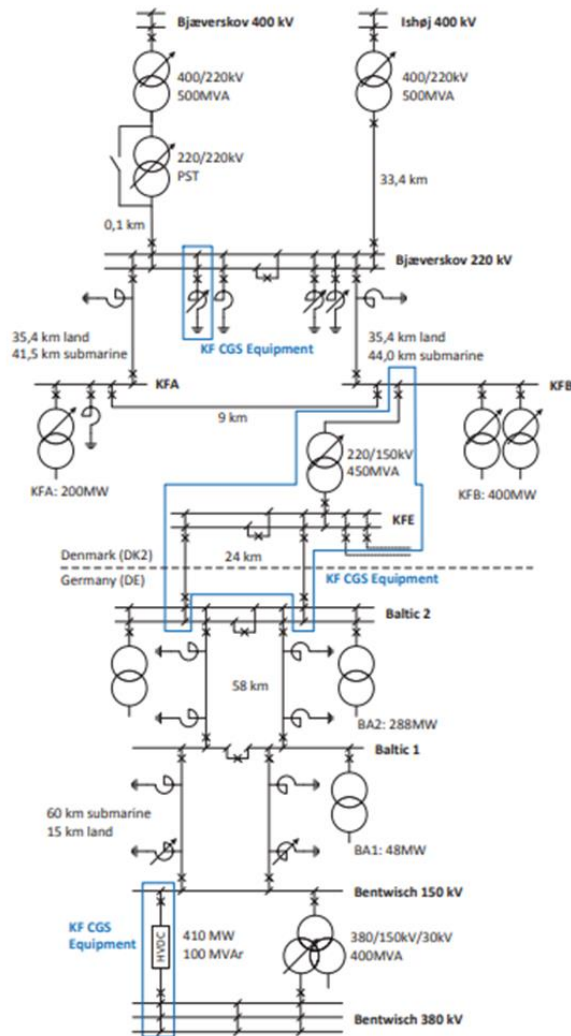
vesien ansiosta. Riutta ulottuu myös kolmen valtion; Tanskan, Ruotsin ja Saksan yksinomaisille talousvyöhykkeille, joten maiden siirtoverkonhaltijat tekivät vuonna 2009 alustavan kannattavuusselvityksen alueen kolmen tuulipuiston kattavasta siirtoverkkojen yhteiskäytöstä. Selvityksen tuloksena oli, että alueen tuulipuistojen siirtoverkkojen yhdistäminen olisi taloudellisesti kannattavaa. HVDC-yhteyksien hyödyntämistä alueen tuulipuistojen liittämässä rajoitti hyvin pitkälle edenneet alueen saksalaisen tuulipuiston rakennustyöt, jonka myötä yhteys Saksan manneverkkoon olisi joka tapauksessa tehtävä vaihtovirralla. (Energinet et al., 2009).

Toteutuneessa projektissa (kuva 3.4) varsinaisen rajayhteys on pituudeltaan 24 kilometriä ja se yhdistää saksalaisen Baltic 2 tuulipuiston ja tanskalaisen Kriegers Flak B tuulipuiston toisiinsa. Rajayhteyden nimellinen siirtokapasiteetti on suuruudeltaan 400 MW ja yhteydellä on neljä tuulipuistoa, joiden yhteenlaskettu tuotantokapasiteetti on 936 MW. (50Hertz, 2022.) Alueelle suunnitellun ruotsalaisen tuulipuiston rakentaminen ei lopulta toteutunut, mutta rajayhteyden kytkinlaitoksella on kaksi varakennoa, mikäli yhteys Ruotsiin halutaan vielä joskus toteuttaa (Marten, et al., 2019b).



Kuva 3.4 KF CGS-yhteys ja sen varrella olevat tuulipuistot (Energinet, 2022b).

Kuvasta 3.5 nähdään, että verkkojen yhteiskäytöllä on merkittävä vaikutus KF CGS-yhteyden tekniseen toteutukseen. Tämä on seurausta mm. siitä, että Tanskan ja Saksan manneverkot kuuluvat eri synkronialueisiin ja tuulipuistojen siirtoverkot käyttävät eri jännitteitä (Tanska 220 kV ja Saksa 150 kV). Ylimääräisen kaapeliyhteyden ja kompensointireaktorin lisäksi rajasiirtoyhteys vaatii toimiakseen verkot yhteen sovittavan muuntajan ja Saksassa sijaitsevan suuntaajyksikön. (Marten, et al., 2019a.) Yhteyden Itä-Tanskassa sijaitseva rantautumispiste on osa pohjoismaiden synkronialuetta, kun taas Saksan sähköverkko on osa Manner-Euroopan synkronialuetta, jonka johdosta mm. verkkojen taajuudet voivat poiketa toisistaan. Tämän seurauksena yhteys sisältää kahdesta ± 410 MW jännitelähdesuuntaajasta koostuvan suuntaajyksikön, joka suorittaa tarvittavan AC-DC-AC-suuntauksen. (Marten, et al., 2019b; Kwapis & Akhmatov, 2019.)



Kuva 3.5 KF CGS-yhteyden yksiviivaesitys, jossa rajasiirtoyhteyden vaatimat osat on rajattu sinisellä (Marten, et al., 2019a).

Normaaleissa toimintaolosuhteissa KF CGS-yhteyden saksalaiset tuulipuistot Baltic 1 & 2, ovat synkroniassa pohjoismaiden verkon kanssa ja puistojen tuotanto syötetään Saksan man- nerverkkoon suuntaajyksikön kautta. Mikäli rajayhteys täytyy avata tai suuntaajyksikkö ei ole toimintakunnossa, voidaan molempien saksalaisten tuulipuistojen toimintakyky säilyttää suuntaajyksikön rinnalla olevan 380/150 kV muuntajan ansiosta. (Marten, et al. 2019a.) Ky- seinen muuntaja mahdollistaa myös yhteyden tanskalaisten tuulipuistojen liittämisen Saksan man- nerverkkoon, mikäli kaapeliyhteys Tanskaan on huollossa (Marten, et al., 2019b). Muun- taja on ollut vuosina 2011 ja 2015 valmistuneiden Baltic 1 ja Baltic 2 tuulipuistojen käytössä,

mutta rajayhteyden valmistuttua se jätettiin reserviin näitä poikkeustilanteita varten. Rajayhteys laitteistoinen lisää puistojen toimitusvarmuutta ja sähkönsiirron joustavuutta. (Marten, et al., 2019a.)

Rajayhteyden ominainen luonteenpiirre on sen siirtokapasiteetin riippuvuus yhteyden varrella olevien tuulipuistojen tuotannosta ja täten myös alueella vallitsevista tuuliolosuhteista. Siirtoyhteys on täten altis nopeille kuormitusmuutoksille, jotka voivat vahingoittaa yhteyden laitteistoa tehon noustessa tai laskiessa. Yhteyden monimutkaisesta luonteesta johtuen yhteyden hallinnasta vastaa erillinen Berliinissä sijaitseva päähallintayksikkö, Master Controller for Interconnector operation (MIO). (Marten, et al., 2019a.) MIO:n päätehtäviä ovat mm. rajayhteyden maksimisiirtokapasiteetin laskenta, joka ilmoitetaan sähkömarkkinoiden käytettäväksi ja suuntausyksikön jännitteensäätö (Kwapis & Akhmatov, 2019; Wu, et al., 2019).

KFS CGS on saanut Euroopan komissiolta vapautuksen kymmeneksi vuodeksi sähköasetuksen (2019/943) 16 artiklan 8 kohdasta, jonka johdosta yhteyden tuulipuistojen tuotantoa ei rajoiteta ko. tarjousalueiden yhteenliittämiskapasiteetin ylläpitämiseksi (Euroopan komissio, 2020c). Yhteydellä sijaitseva tuulivoimatuotanto on siten sähkömarkkinoiden näkökulmasta oma hinta-alueensa, jolla on korkein prioriteetti yhteyden siirtokapasiteetin hyödyntämisessä. Tämän johdosta sähkömarkkinoiden käytettäväksi jää siirtokapasiteetti, jota tuulituotanto ei pysty hyödyntämään, jonka suuruus on puistojen täydellä tuotannolla 64 MW Tanskasta Saksaan. (Marten, et al., 2019a.)

3.2.1 Suunnitteilla olevat siirtoverkkojen yhteiskäytöt

Euroopan pohjoisille merialueille on esitetty useampia suunnitelmia merituulivoimaprojekteista (taulukko 1), jotka sisältävät siirtoverkkojen yhteiskäyttöjä eri muodoissa. Projekteista kenties merkittävimpiä ovat Tanskan talousvyöhykkeelle rakennettavat kaksi energiasaarekettä (kuva 3.6), joiden rakentamisesta maan parlamentti päätti vuonna 2020. Toinen energiasaarekkeista on määrä rakentaa Itämerelle ja toinen Pohjanmerelle. (Danish Energy Agency, 2020.)



Kuva 3.6 Tanskalaisten Pohjan- ja Itämerelle rakennettavien energiasaarekkeiden sijainnit (Energinet, 2022a).

Itämerelle rakennettavan tanskalaisen energiasaarekkeen tuotannolliseksi kapasiteetiksi on suunniteltu 2 GW ja yhteys hyödyntää Bornholmin saarta tuulipuistojen keräinverkkojen yhdistämisessä, sekä mahdollisessa rajayhteydessä Saksaan. Pohjanmerelle rakennettava tanskalainen energiasaareke tulee hyödyntämään keinotekoisia saarirakennelmaa puistojen keräinverkon yhdistämisessä ja sen tuotannollisen kapasiteetin on suunniteltu olevan alustavasti 3 GW, jota ajan myötä laajennetaan 10 GW:iin. Saaren verkkoinfrastruktuuria on myös suunniteltu hyödynnettäväksi rajayhteyden muodostamisessa Belgian kanssa. (Danish Energy Agency, 2020.)

Taulukko 1: Euroopan pohjoisille merialueille suunnitteilla olevia yhteiskäyttöprojekteja (Danish Energy agency, 2020; Elia, 2021; National Grid Ventures, 2021 & Ministry of Economics of Latvia, 2021).

| Projekti | Sijainti | Kapasiteetti | Valmistuminen |
|---------------------------|-----------------------|---------------|---------------|
| Elwind | Riiianlahti | 700–1000 MW | 2030 mennessä |
| Nautilus | Iso-Britannia-Belgia | 1,4–2,8 GW | 2028 |
| Triton | Saksa-Tanska | - | 2030 |
| Tanskan energiasaarekkeet | Itämeri ja Pohjanmeri | 2 GW ja 10 GW | 2030 |

Muita siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen kannalta huomionarvoisia projekteja ovat mm. Pohjanmerelle rakennettavat Nautilus- ja Triton-yhteydet, sekä Itämerelle rakennettava Elwind-projekti. Nautilus on Iso-Britannian ja Belgian välille suunnitteilla oleva 1.4 GW:n rajayhteys, jonka on määrä valmistua vuonna 2028. Yhteys toteutetaan yhteiskäyttönä, mikäli se osoittautuu ratkaisuna kustannustehokkaaksi, sekä ympäristön kannalta hyödylliseksi. (Elia, 2022; National Grid Ventures, 2021.) Triton on puolestaan Belgian ja Tanskan välille suunnitteilla oleva rajayhteys, joka olisi valmistuessaan ensimmäinen merenalainen kahden keinotekoisien energiasaarekkeen välinen yhteys (Elia, 2021). Elwind on Viron ja Latvian yhteinen merituu-livoimaprojekti. Suunnitellun merituulipuiston kapasiteetin on suunniteltu olevan 700–1000 MW ja projektin on määrä valmistua vuoteen 2030 mennessä. (Ministry of Economics of Latvia, 2021.)

4 Energiaverkkojen tulevaisuus Euroopan merialueilla

Tämän luvun aiheena on siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen asema tulevaisuudessa. Luvussa esitetään keskeisiä eurooppalaisia ilmastotavoitesuunnitelmia, jotka tavoitteillaan myös edistävät merituulivoiman ja siirtoverkkojen kehittymistä.

4.1 Euroopan energiasektorin kehitys

Euroopan unionin tavoitteena on vähentää kasvihuonepäästöjä 55 prosenttia vuoden 1990 tasosta vuoteen 2030 mennessä, sekä vuoteen 2050 mennessä olla täysin ilmastoneutraali (Euroopan komissio, 2020a). Tavoitteita tukevien toimien seurauksena on odotettavissa, että uusiutuvilla energianlähteillä tuotetun energian osuus tulee kasvamaan keskeisimmillä loppukäyttöaloilla, kuten sähköntuotannossa, liikenteessä, lämmityksessä ja jäähdytyksessä. Uusiutuvien energialähteiden hyödyntämisen kasvun johdosta on ennustettu, että vuonna 2030 55 prosenttia EU:n jäsenmaiden sähkönkulutuksesta katetaan uusiutuvilla energianlähteillä. (European commission, 2020.)

EU:n ilmastotavoitesuunnitelmien tavoitteiden saavuttaminen edellyttää myös merituulivoimateollisuuden laajentamista. EU:n avomerellä tuotettavan energian strategiassa asetetaan EU:n merituulivoiman asennetun kapasiteetin tavoitteeksi 60 GW vuoteen 2030 mennessä ja 300 GW vuoteen 2050 mennessä. (Euroopan komissio, 2020b.) Rajasiirtoyhteyksien ollessa tärkeitä sähköverkon siirtovarmuuden takaamisessa ja sähkömarkkinoiden kaupankäynnin edistämiseksi EU on myös asettanut jäsenmaiden tavoitteeksi kasvattaa rajasiirtokapasiteetin vastaamaan 15 %:ia valtion asennetusta sähköntuotantokapasiteetista (European commission, 2014). Siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen yleistyminen palvelisi molempia em. tavoitteita. Merituulivoiman kasvutavoitteista huolimatta siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen yleistymistä Euroopassa rajoittaa mm. erilaiset juridiset ja säännöspäiset esteet.

EU:n direktiivin 2019/994/EU mukaan rajayhdysjohdolla tarkoitetaan: *“sähköverkkojen toisiinsa liittämiseen käytettäviä välineitä”*. Sähköntuotantoa ja rajayhteyksiä sisältävien

verkkoratkaisujen tapauksessa voi olla epäselvää ovatko ne em. määritelmän mukaisesti rajayhteyksiä. Esimerkiksi KF CGS-yhteys liittää toisiinsa kaksi merituulipuistoa, erillisten sähköverkkojen sijasta. (Avdic & Ståhl, 2019). Euroopan komissio (2017) on ehdottanut, että määritelmää rajayhdysjohdosta direktiivissä 2019/994/EU muutettaisiin, siten että, sillä tarkoitettaisiin: *“siirtojohtoa, joka ylittää tarjousalueiden, jäsenvaltioiden tai, EU:n lainkäyttöalueen rajalle asti, jäsenvaltioiden ja kolmansien maiden välisen rajan tai kulkee sen poikki”*. Euroopan komission ehdottamalla em. määritelmällä KF CGS-yhteys katsottaisiin rajayhteytenä (Avdic & Ståhl, 2019).

Siirtoverkkojen yhteiskäyttöille on ominaista, että ne ovat yhteydessä useamman valtion mannerverkkoon, jolla on myös suora vaikutus projektikohtaisten sidosryhmien määrään. Projekteihin osaa ottavien tahojen määrän lisääntyessä herää kysymys projektien hyötyjen ja vastuiden jakautumisesta. Erityisesti rajat ylittävien projektien tuomilla hyödyillä on tapana jakautua epäsymmetrisesti esimerkiksi asianomaisten valtioiden kesken. (NorthSeaGrid, 2014.) Useamman valtion siirtoverkonhaltijoilla voi olla myös intressejä yhteyden verkkoliitännän vastuun omaksumisessa. Intressit voivat perustua esimerkiksi siirtoverkonhaltijan haluun periä merituulipuiston liitännämaksuja. (Roland Berger GmbH, 2019.)

Siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen tapauksessa on mm. epäselvää kenelle vastuu puiston verkkoliitännöistä kuuluu lainsäädännöllisin perustein. Kansalliset lainsäädännöt määrittävät valtiokohtaiset tahot, jotka ovat vastuussa kunkin valtion alueella tapahtuvista verkkoonliittämisistä, mutta ne eivät ulotu valtioiden talousvyöhykkeiden ulkopuolelle. On siis epäselvää valtuuttavatko nämä lainsäädännöt myös merituulipuistojen verkkoliitännät, joissa puistot sijaitsevat ko. talousvyöhykkeen ulkopuolella. Useamman valtion talousvyöhykkeen alueella sijaitsevan kaapeliyhteyden teknistä toteutusta monimutkaistaa myös valtioiden oikeus määrittää omat tekniset vaatimuksensa, sekä ympäristöstandardit, jonka puitteissa kaapeliyhteys on toteutettava. Samanaikainen useamman valtion lainkäyttövalta voi johtaa myös tilanteisiin, jossa kaapeliyhteyttä koskevat säännökset ovat ristiriidassa keskenään. (Roland Berger GmbH, 2019.)

EU:n järjestelmävastaavien kantaverkkoyhtiöiden yhdistyksen ENTSO-E:n mukaan sähkömarkkinoiden sääntelykehys voi vaatia myös jatkokehitystä tulevaisuudessa, jotta siinä otetaan paremmin huomioon tulevaisuuden integroitujen energiajärjestelmien ominaispiirteet (ENTSO-E, 2020b). ENTSO-E (2020a) on ehdottanut useampaan valtioon yhteydessä olevien tuotantolaitosten markkinajärjestelyjen ratkaisuksi ns. offshore-tarjousalueiden muodostamista. Eurooppalaisen tarjousalueisiin perustuvan sähkökaupan markkinajärjestelyn perustana on oletus, että yksittäiset tarjousalueet eivät pidä sisällään merkittäviä rajoitteita sähkönsiirrolle, kun taas tarjousaluiden rajat toimivat rakenteellisina verkon rajoitteina. Tyypillisesti uutena liitettävän sähköntuotannon verkkoliitäntäpisteen maantieteellinen sijainti määrittää tarjousalueen johon ko. generaattori kuuluu, siitä huolimatta sijaitseeko tämä maalla vai merellä. Mikäli uutena liitettävä sähköntuotanto synnyttää merkittävän rakenteellisen pullonkaulan sähköverkkoon, niin tämä johtaa tyypillisesti uuden tarjousalueen luomiseen tai tarjousaluiden rajojen uudelleen määrittämiseen. Tämän perusteella offshore-tarjousalueet ovat myös perusteltu vaihtoehto useampaan valtioon liitettyjen merituulipuistojen markkinajärjestelyille niiden mahdollisesti lisätessä verkon pullonkauloja. (Energinet, et al. 2020.)

Offshore-tarjousalueilla merituulipuistot kilpailisivat kyseessä olevan rajayhteyden siirtokapasiteetista mantereella sijaitsevien tarjousalueiden markkinatoimijoiden kanssa. Tällöin offshore-tarjousalueen hinta ja merituulipuiston sähköntoimitus ovat riippuvaisia viereisistä mantereella sijaitsevista tarjousalueista, jonka seurauksena offshore-tarjousalueiden voidaan nähdä edistävän markkinatoimijoiden välistä kilpailua. (ENTSO-E, 2020b.) Offshore-tarjousalueet soveltuvat myös sähköasetuksen (2019/943) 16 artiklan 8 kohdan sääntelykehukseen, joka edellyttää, että 70 %:a rajayhteyksien yhteenliittämiskapasiteetista on oltava vuoro-kausimarkkinoiden käytettävissä (Energinet, et al. 2020).

Offshore-tarjousalueiden muodostaminen voi toisaalta vaikuttaa niissä sijaitsevien merituulipuistojen tulovirtoihin negatiivisesti, sillä kilpailu rajayhteyden siirtokapasiteetista voi rajoittaa puistojen tuotannon yhteyttä mantereella sijaitseviin tarjousalueisiin. Merituulipuistojen tulovirtojen pienentyminen offshore-tarjousalueilla voi heikentää yhteiskäytöllä toteutettujen puistojen verkkoliitäntöjen houkuttelevuutta. (ENTSO-E, 2020b.) Euroopan komission (2020b) mukaan hybridihankkeiden kannattavuutta voitaisiin edistää

sallimalla jäsenmaiden kohdistaa pullonkaulatuloja offshore-tarjousalueilla toimiville tuottajille.

4.2 Siirtoverkot tulevaisuudessa

Tulevaisuuden merituulivoiman laajamittainen käyttöönotto vaatii uudenlaista lähestymistapaa merialueiden verkko- ja aluesuunnitteluun. On odotettavissa, että merituulipuistojen siirtoverkkojen pituudet tulevat kasvamaan entisestään, kun lähellä rannikkoa sijaitsevien alueiden tuuliresurssit on jo valjastettu energiantuotantoon. Siirtoetäisyyksien kasvaessa myös puistojen verkkoliitännöjen merkitys korostuu. (ENTSO-E, 2020a.) HVDC-yhteydet ovat tulevaisuudessa keskeisessä roolissa Euroopan merialueiden hyödyntämisessä, sillä ne mahdollistavat suurien tehokapasiteettien siirron pitkillä etäisyyksillä. Avomerellä tuotettavan uusiutuvan energian käyttöönottoa voitaisiin myös tehostaa merellä sijaitsevan silmukoidun verkon kehittämisellä. (Euroopan komissio, 2020b.) Useamman valtion merialueet kattavan silmukoidun verkon avulla, jossa on aina enemmän kuin yksi yhteys, minkä tahansa kahden pisteen välillä voitaisiin saavuttaa korkea toimintavarmuus ja verkko toimisi samalla merituulivoiman siirtoverkkona, sekä valtioiden kantaverkkojen välisenä rajayhteytenä (PROMOTioN, 2020).

Silmukkaverkon onnistuneella kehittämisellä on mahdollisuus muuttaa tulevaisuuden energiajärjestelmiä, sekä vaikuttaa merkittävästi energiamarkkinoihin. Silmukkaverkolla voidaan saavuttaa merkittäviä etuja yhteiskunnan, ympäristön ja energian toimituksen kannalta. Silmukkaverkon tarjoama Euroopan maiden välisen rajasiirtokapasiteetin kasvun ennustetaan edistävän sähkömarkkinoiden yhdistymistä ja täten myös sähkön hintaerojen pienenemistä eri alueiden välillä. (European comission, 2014.) Suurempien markkina-alueiden yhdistäminen voi lisätä myös merituulivoimatuotannon kysyntämahdollisuuksia, joka pienentäisi todennäköisyyttä tilanteelle, jossa tuotannon mahdollinen ylijäämä vaikuttaisi negatiivisesti puistojen tuotannosta saatavaan korvaukseen. Tällä on myös suora korrelaatio merituulivoiman voittomarginaalien kasvamiseen ja projektien riskien pienemiseen, jotka molemmat toimivat kannustimina merituulivoiman kehittämiselle. Silmukkaverkon avulla voidaan myös valjastaa suuren maantieteellisen alueen tuuliresurssit yhteen siirtoverkkoon, jolloin verkon riippuvaisuus yhden puiston tuotannosta pienenee. Tämä puolestaan kasvattaa tuulituotannon mahdollistaman kapasiteettihyvityksen suuruutta. (PROMOTioN, 2020.) Kapasiteettihyvitys on suure, joka

ilmaisee tavanomaisen energian tuotannon määrän, joka on korvattavissa ko. tuulivoimalla (Milligan, 2002). Euroopassa sijaitsevien pumppuvoimalaitosten kapasiteetti ei välttämättä riitä tulevaisuudessa toimimaan laajamittaisen merituulivoimatuotannon ainoana energian varastointijärjestelmänä, johon ratkaisuna voi toimia power-to-x-teknologioiden tai akkuvarastojen hyödyntäminen. (PROMOTioN, 2020.)

Silmukkaverkko toisi myös merkittäviä etuja verkon käytön joustavuudessa verrattuna säteittäisiin siirtoyhteyksiin. Silmukoitu verkko tarjoaa enemmän vaihtoehtoisia reittejä tuotannon tehonsiirrolle, joka tuo mukanaan suuremman määrän vapausasteita verkon käyttäjän näkökulmasta. Verkon suurempi joustavuus on erityisen hyödyllistä poikkeustilanteissa, kuten katko-tilanteissa, pullonkaulojen selvittämisessä, verkon tasapainottamisessa ja huoltotoimenpiteissä. Silmukoidun verkon hajautettu rajasiirtokapasiteetti, sekä hajautettu tuulivoimatuotanto tekevät verkosta vähemmän alttiin mm. luonnonkatastrofien vaikutuksille. Vikaantuneiden alueiden rajaaminen ja verkkosaarekkeiden muodostaminen mahdollistavat verkon toiminnan myös poikkeustilanteissa. (PROMOTioN, 2020.) Silmukkaverkkojen laajat liitännämahdollisuudet voisivat myös nopeuttaa merituulivoiman rakentamista Euroopan merillä ja tuoda kustannussäästöjä manneverkkojen investointeihin (European commission, 2014).

5 Johtopäätökset ja yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin siirtoverkkojen yhteiskäyttöjä, joissa merituulipuiston siirtoverkkoa voidaan hyödyntää myös valtioiden välisessä sähkönsiirrossa. Tutkimuksessa tehtiin selvitys olemassa olevista, sekä suunnitelluista yhteiskäyttöprojekteista. Työssä tarkasteltiin myös erilaisia energiasektorin tavoitteita ja strategioita, jotka yhdessä muodostavat kehysraamin yhteiskäyttöratkaisujen yleistymiselle tulevaisuudessa. Tutkimusmateriaalina käytettiin tutkimusaihepiirin kannalta relevanttien tahojen julkaisemia, pitkälti julkisia dokumentteja ja tutkimusmateriaalin valinnassa pyrittiin huomioimaan eri sidosryhmien näkemyksiä yhteiskäyttöratkaisusta.

Siirtoverkkojen yhteiskäytöt ovat niiden määrän perusteella vielä tänä päivänä hyvin poikkeuksellinen tapa merituulivoiman verkkoliitännän toteuttamiseen, mutta suunniteltujen projektien perusteella niiden määrä on lisääntymässä lähitulevaisuudessa. Olemassa olevien yhteiskäyttöratkaisujen pieni lukumäärä ja ilmiön uutuus samalla lisäävät tutkimuksen haasteellisuutta. Siirtoverkkojen yhteiskäytöt voidaan nähdä tietyin edellytyksin kannattavina useiden eri tahojen, kuten siirtoverkonhaltijoiden ja merituulipuistojen kehittäjien näkökulmista. Siirtoverkkojen yhteiskäytöt voivat tarjota kustannustehokkaan tavan merituulivoiman verkkoliitännän toteuttamiseen ja tarjousalueiden rajasiirtokapasiteetin lisäämiseen. Yhteiskäyttöprojektien kannattavuuteen vaikuttaa mm. liitettävän merituulipuiston siirtoetäisyys ja yhteen liitettävien tarjousalueiden hintaerot. Yhteen liitettävien manerverkkojen jännite- ja taajuuserojen voidaan nähdä myös monimutkaistavan yhteiskäyttöprojektien teknistä toteutusta. Siirtoverkkojen yhteiskäytöt ovat monikäyttöisen luonteensa takia eräänlaisen väliinputoajan asemassa niitä koskevien säännösten ja lainsäädännön kannalta. Tämän ja muiden epävarmuustekijöiden nähdään erityisesti vaikuttaneen negatiivisesti siirtoverkkojen yhteiskäyttöjen yleistymiseen.

Tutkimusaihepiirin tulevaisuuteen tulee vaikuttamaan, miten merialueiden siirtoverkot, sekä merituulivoiman liittämiseen käytetyt menetelmät kehittyvät. Tässä työssä siirtoverkkojen yhteiskäyttöjä tarkasteltiin, sillä oletuksella, että liitettävä sähköntuotanto perustuu tuulivoimaan. Tutkimusta voitaisiin jatkaa sisällyttämällä tutkimusalueeseen muita merialueiden kehittyviä

uusiutuvan energian tuotantomenetelmiä, kuten aalto- tai vuorovesienergiaan perustuvia konsepteja ja tutkimalla vetytalouden tarjoamia mahdollisuuksia merialueilla.

Lähteet

- 3E. 2011. Offshore Electricity Grid Infrastructure in Europe: A Techno-Economic Assessment.
- 50Hertz. 2022. Kriegers Flak – Combined Grid Solution. Viitattu 26.2.2022. <https://www.50hertz.com/en/Grid/Griddevelopment/Offshoreprojects/CombinedGridSolution>
- Avdic, D. & Ståhl, P. 2019. Baltic InteGrid review: towards a meshed offshore grid in the Baltic Sea Final report. Viitattu 1.2.2022. <http://www.baltic-integrid.eu/index.php/download.html>
- Burton, T., Jenkins, N., Bossanyi, E., Sharpe, D. & Graham, M. 2021 Wind Energy Handbook, Newark: John Wiley & Sons. 771.
- Danish Energy Agency. 2020. Denmark's Energy Islands Viitattu 8.1.2022. <https://ens.dk/en/our-responsibilities/wind-power/energy-islands/denmarks-energy-islands>
- Direktiivi 2019/944/EU: Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi sähkön sisämarkkinoita koskevista yhteisistä säännöistä ja direktiivin 2012/27/EU muuttamisesta. Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32019L0944>
- Dragan, J. 2019. High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC grids, Newark: John Wiley & Sons. 4.
- Elia. 2021. Elia and Energinet's collaboration is advanced following preliminary study on hybrid interconnector between Belgium and Denmark. Viitattu 1.2.2022. https://www.elia.be/en/news/press-releases/2021/11/20211123_preliminary-study-on-hybrid-interconnector
- Elia. 2022. Nautilus. Viitattu 1.2.2022. <https://www.elia.be/en/infrastructure-and-projects/infrastructure-projects/nautilus>
- Energinet, Svenska Kraftnät & Vattenfall Europe Transmission. 2009. An Analysis of Offshore Grid Connection at Kriegers Flak in the Baltic Sea. Viitattu 1.2.2022. https://www.svk.se/siteassets/om-oss/rapporter/2015-och-aldre/090507_kriegers-flak-pre-feasibility-report-final-version.pdf

Energinet, Fingrid & Statnett. 2020. The ideal market design for offshore grids – A Nordic TSO perspective. Viitattu 20.2.2022. <https://en.energinet.dk/About-our-news/News/2020/11/04/Ideal-market-design-for-ofshore-grids>

Energinet. 2022a. ENERGY ISLANDS IN DENMARK. Viitattu 3.2.2022. <https://en.energinet.dk/Green-Transition/Energy-Islands>

Energinet. 2022b. KRIEGERS FLAK – COMBINED GRID SOLUTION. Viitattu 3.2.2022. <https://en.energinet.dk/Infrastructure-Projects/Projektliste/KriegersFlakCGS>

ENTSO-E. 2020a. ENTSO-E Position on Offshore Development. Viitattu 1.2.2022. https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/2021/entso-e_pp_Offshore_Development_01_200528.pdf

ENTSO-E. 2020b. ENTSO-E Position on Offshore Development Market and Regulatory Issues. Viitattu 1.2.2022. https://eepublicdownloads.azureedge.net/clean-documents/Publications/Position%20papers%20and%20reports/2021/entso-e_pp_Offshore_Development_02_Market_Reg_Issues_201014.pdf

Euroopan komissio. 2020a. EU:n ilmastotavoite vuodelle 2030 entistä korkeammalle. Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:52020DC0562>

Euroopan komissio. 2020b. EU:n strategia avomerellä tuotettavan uusiutuvan energian potentiaalın valjastamiseksi ilmastoneutraalin tulevaisuuden tarpeisiin. Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=COM:2020:741:FIN&qid=1605792629666>

Euroopan komissio. 2020c. KOMISSION PÄÄTÖS (EU) 2020/2123. Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/ALL/?uri=CELEX:32020D2123>

Euroopan komissio. 2017. Ehdotus EUROOPAN PARLAMENTIN JA NEUVOSTON DIREKTIIVI sähkön sisämarkkinoita koskevista yhteisistä säännöistä (uudelleenlaadittu). Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX%3A52016PC0864R%2801%29>

Euroopan komissio. 2014. Euroopan energiavarmuusstrategia. Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX%3A52014DC0330>

European comission. 2020. IMPACT ASSESSMENT Stepping up Europe’s 2030 climate ambition. Viitattu 1.2.2022. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020SC0176>

European commission. 2014. STUDY OF THE BENEFITS OF A MESHED OFFSHORE GRID IN THE NORTHERN SEAS REGION.

Hardy, S., Van Brusselen, K., Hendrix, S., Van Hertem, D. & Ergun, H. 2019. Techno-Economic Analysis of HVAC, HVDC and OFAC Offshore Wind Power Connections.

Kwapis, E. & Akhmatov, V. 2019. Kriegers Flak – Combined Grid solution, Experiences from project execution and preparing for operation.

Marten, A.-K., Akhmatov, V. & Stornowski, R. 2019a. Kriegers Flak combined grid solution – novel double use of offshore equipment.

Marten, A.-K., Akmatov, V., Sørensen, T., Stornowski, R., Westermann, D. & Brosinsky, C. 2019b. Kriegers flak-combined grid solution: coordinated cross-border control of a meshed HVAC/HVDC offshore wind power grid.

Milligan, M. 2002. Modeling Utility-Scale Wind Power Plants Part 2: Capacity credit. Viitattu 1.2.2021. <https://www.nrel.gov/docs/fy02osti/29701.pdf>

Ministry of Economics of Latvia. 2021. Winds of progress: an innovative Estonian – Latvian joint offshore wind farm project sets sail. Viitattu 1.2.2022. <https://www.em.gov.lv/en/article/winds-progress-innovative-estonian-latvian-joint-offshore-wind-farm-project-sets-sail>

Müller, H. 2015. A legal framework for a transnational offshore grid in the North Sea. University of Groningen. Viitattu 1.2.2022. <https://research.rug.nl/en/publications/a-legal-framework-for-a-transnational-offshore-grid-in-the-north->

National Grid Ventures. 2021. Nautilus Interconnector. Viitattu 16.3.2022. <https://www.nationalgrid.com/national-grid-ventures/interconnectors-connecting-cleaner-future/nautilus-interconnector>

Ng, C. & Ran, L. 2016. Offshore Wind Farms: Technologies, Design and Operation. Amsterdam: Woodhead Publishing. 10, 389–390, 393–394, 397–399, 400, 419, 444–446

NorthSeaGrid. 2014. Offshore Electricity Grid Implementation in the North Sea

PROMOTioN. 2020. D12.4 – Final Deployment Plan. Viitattu 1.2.2022. https://www.promotion-offshore.net/fileadmin/PDFs/D12.4_-_Final_Deployment_Plan.pdf

- Roland Berger. 2019. Hybrid projects: How to reduce costs and space of offshore developments. Viitattu 1.2.2022. <https://op.europa.eu/fi/publication-detail/-/publication/59165f6d-802e-11e9-9f05-01aa75ed71a1>
- Tavner, P. 2012. Offshore wind turbines reliability, availability and maintenance. London: Institution of Engineering and Technology. 19.
- Van Hertem, D., Gomis-Bellmunt, O. & Liang, J. 2016. HVDC grids: for offshore and super-grid future. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons. 109–112, 118.
- WindEurope. 2020. Offshore wind in Europe – key trends and statistics 2020. Viitattu 1.2.2022. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/offshore-wind-in-europe-key-trends-and-statistics-2020/>
- Wu, Q., Takarics, T. & Akhmatov, V. 2019. Coordinated Voltage and Reactive Power Control Scheme of HVAC Meshed Offshore Grid of Offshore Wind Power Plant at Kriegers Flak
- Xiang, X., Merlin, M. & Green, T. 2016. Cost analysis and comparison of HVAC, LFAC and HVDC for offshore wind power connection.
- Ørsted. 2022. Making green energy affordable. Viitattu 16.3.2022. <https://orsted.com/en/about-us/whitepapers/making-green-energy-affordable>