

Jaakko Ekman

SUPRAJOHTAVUUDEN HYÖDYNTÄMINEN TUULIVOIMALAN GENERAATTOREISSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja Risto Mikkonen
Joulukuu 2020

TIIVISTELMÄ

Jaakko Ekman: Suprajohtavuuden hyödyntäminen tuulivoimalan generaattoreissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikka, TkK
Joulukuu 2020

Työn tarkoituksena on tutkia suprajohtavuuden hyödyntämistä tuulivoimalan generaattoreissa. Työ jakautuu kolmeen osaan. Ensimmäisessä osassa käydään läpi suprajohtavuuden ja tuulivoiman teoriaa. Toisessa osassa käydään läpi, kuinka suprajohteita voidaan hyödyntää tuulivoimaloissa ja mitä erityisvaatimuksia sille voidaan asettaa. Kolmannessa osassa tarkastellaan Tanskan rakennettua tuulivoimalaa, jossa on hyödynnetty suprajohteita.

Suprajohtavuuden ilmiöllä tarkoitetaan aineen resistiivisyyden katoamista sen lämpötilan laskeutumisesta kriittisen lämpötilan alapuolelle. Ilmiö on tunnettu jo pitkään ja uusia suprajohteita löydetään jatkuvasti. Suprajohteet voidaan jakaa I- ja II-lajin suprajohteisiin, joista vain II-lajin suprajohteet soveltuvat energiatekniikan käyttöön. Kaupalliset suprajohteet jaetaan niiden kriittisen lämpötilan mukaan LTS- ja HTS-johtimiin. Näistä HTS-johtimet soveltuvat parhaiten energiatekniikan käyttöön niiden suhteellisen korkean kriittisen lämpötilan takia. Suprajohteita voidaan jäähdyttää uppojähdyttämällä, kaasujähdyttämällä tai mekaanisella jäähdytyksellä.

Tuulivoiman kysyntä kasvaa maailmalla jatkuvasti. Tuulivoimaloita suunniteltaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota niiden sijoituspaikkaan ja sen tuuliolosuhteisiin. Tuulivoimalat voivat olla muuttuva- tai vakionopeuksisia. Niiden generaattorit ovat yleensä vaihtosähkögeneraattoreita. Generaattorit ovat joko tahtigeneraattoreita tai epätahtigeneraattoreita.

Suprajohteita voidaan hyödyntää tuulivoimalan generaattoreissa useimmilla eritavoilla. Generaattoreista voidaan tehdä joko täysin suprajohtavia tai vain osittain. Suprajohtavilla generaattoreilla tuulivoimaloiden nimellisteho kasvaa ja niiden pienentää niiden nasellin kokoa. Suprajohtavat generaattorit tarvitsevat toimiakseen jäähdytyksen sekä ohjauslaitteistoa. Suprajohtavat generaattorit ovat materiaalikustannuksiltaan kilpailukykyisiä perinteisten generaattorien kanssa.

Tanskassa tehdyssä EcoSwing-projektissa valmistettiin onnistuneesti 3,6 MW suprajohteita hyödyntävä suoravetoinen tuulivoimala. Tuulivoimalan roottori oli tehty suprajohtavaksi. Roottorin jäähdytys toteutettiin mekaanisella jäähdytyksellä. Generaattoria testattiin laboratoriossa ja sen jälkeen se asennettiin tuulivoimalaan. Generaattori läpäisi testit pääosin onnistuneesti ja se oli kytkettynä sähköverkkoon 650 h ajan tuottaen 600 MWh sähköenergiaa.

Työn lopputuloksena todettiin suprajohteiden hyödyntämisen olevan teknisesti mahdollista tuulivoimalan generaattoreissa. Tulevaisuudessa suprajohtavien generaattorien potentiaali on merkittävä energiantuotannossa.

Avainsanat: suprajohtavuus, tuulivoima, generaattori

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SUPRAJOHTAVUUS	2
2.1 I- ja II-lajin suprajohteet.....	3
2.2 Quench	4
2.3 Kaupalliset suprajohdemateriaalit.....	4
2.4 LTS-johteet	4
2.5 HTS-johteet.....	5
2.6 Suprajohteiden jäähditys.....	6
3. TUULIVOIMA.....	8
3.1 Tuulen teho.....	8
3.2 Tuulivoimaloiden rakenne	9
3.3 Tuulivoimaloiden generaattorityypit.....	10
4. SUPRAJOHTEET TUULIVOIMALAN GENERAATTOREISSA.....	11
4.1 Suprajohteiden hyödyntämismvaihtoehdot.....	11
4.2 Vaatimukset suprajohdegeneraattorille kaupallisessa käytössä	11
4.3 Tuulivoimalan suprajohdegeneraattorin oheislaitteet.....	12
4.4 Suprajohtavan tuulivoimalan generaattorin kustannukset.....	12
5. MALLIVOIMALA ECOSWING-PROJEKTI.....	14
5.1 Ominaisuudet.....	14
5.2 Roottori	15
5.3 Suprajohdemateriaalit	17
5.4 Jäähditys.....	18
5.5 Mittauslaitteisto ja quench-suojaus.....	20
5.6 Laitoksella testaus	21
5.7 Tuulivoimalaan asennus	23
6. YHTEENVETO.....	26
LÄHTEET.....	27

LYHENTEET JA MERKINNÄT

DAQ	engl. data acquisition, tiedonkeruulaite
double pancake	spiraalimainen käämigeometria
HTS	korkean lämpötilan suprajohde
IGBT	engl. insulated-gate bipolar transistor, bipolaaritransistori
IWES	engl. Institute for Wind Energy and Energy System Technology
kryostaatti	astia, jossa ylläpidetään supraohdemagneetin toimintalämpötila
LTS	matalan lämpötilan supraohde
off-shore	merellä sijaitseva
REBCO	engl. rare earth barium copper oxide

E_k	<i>liike-energia</i>
H_c	kriittinen magnettikenttä
m	<i>massa</i>
ρ	<i>ilman tiheys</i>
$P_{kappale}$	<i>ilmavirran teho kappaleessa</i>
P_w	<i>ilmavirran teho.</i>
T_c	kriittinen lämpötila
V	<i>tuulen nopeus</i>

1. JOHDANTO

Uusiutuvan energian kysynnän lisääntyessä on noussut tarve valmistaa suurempia ja tehokkaampia tuulivoimaloita. Perinteisillä menetelmillä valmistetun tuulivoimalan koon kasvattaminen on kuitenkin haasteellista ja ongelmiin tarvitaan uusia ratkaisuja.

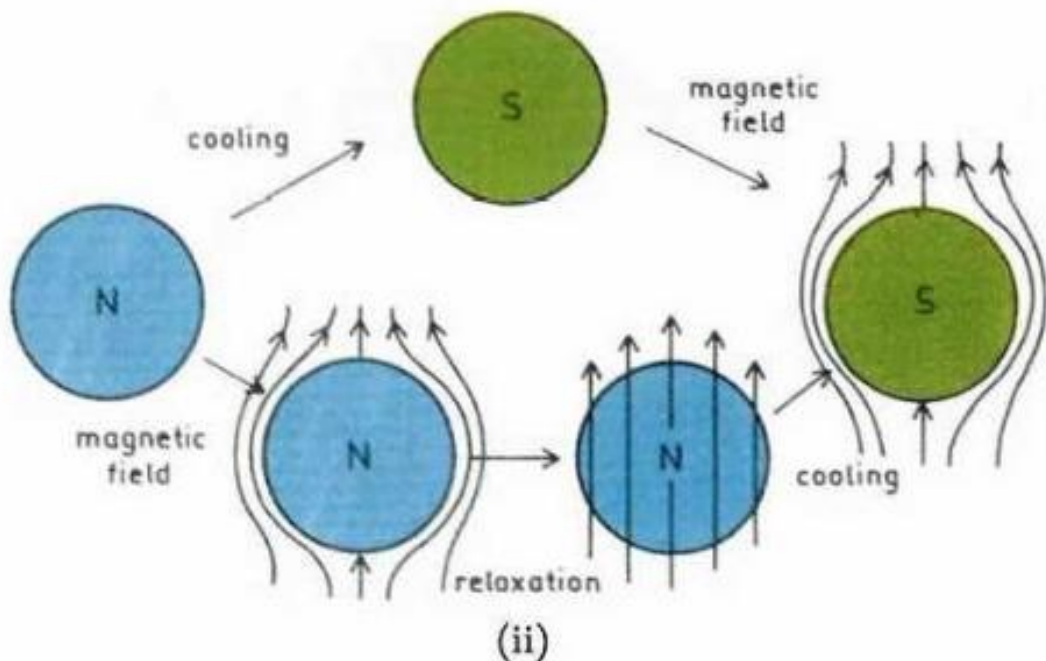
Tässä työssä tarkastellaan suprajohteiden hyödyntämismahdollisuuksia tuulivoimaloissa. Tuulivoimalan tehoa kasvattaessa sen generaattorin koon kasvaminen on ongelmallinen tekijä. Työssä tutkitaan mitä hyötyjä voitaisiin saavuttaa käyttämällä suprajohteita tuulivoimalan generaattorissa. Erityisesti halutaan selvittää, onko suprajohteiden käyttäminen teknillistaloudellisesti järkevää verrattuna perinteisiin vaihtoehtoihin. Työn tavoitteena on myös selvittää nykyhankkeiden tila.

Työn alkupuolella käsitellään suprajohtavuutta ilmiönä ja tarjolla olevia kaupallisia suprajohteita, joita voitaisiin hyödyntää tuulivoimaloissa. Seuraavaksi tarkastellaan tuulivoimaa sekä yleisimpiä tuulivoimaloiden rakenteita. Samalla selvitetään generaattorivaihtoehdot tuulivoimaloissa. Lopuksi selvitetään, miten suprajohteita voidaan hyödyntää tuulivoimaloissa ja tarkastellaan esimerkkituulivoimalaa.

2. SUPRAJOHTAVUUS

Suprajohtavuudella tarkoitetaan aineen resistiivisyyden katoamista lämpötilan laskiessa materiaalille ominaiselle kriittisen lämpötilan T_c alapuolelle. Vuonna 1911 H. Kamerlingh-Onnes havaitsi ilmiön tutkiessaan elohopean sähkönjohtavuutta alhaisissa lämpötiloissa [1]. Kun elohopean lämpötilaa laskettiin alle 4,15 K-asteeseen, sen resistiivisyys katosi lähes välittömästi. Myöhemmissä tutkimuksissa Onnes havaitsi saman ilmiön myös muilla metalleilla.

Vuonna 1933 W. Meissner ja R. Ochsenfeld löysivät suprajohteiden toisen perusominaisuuden. Suprajohteiden havaittiin hylkivän täydellisesti ulkoista magneettikenttää[2]. Tätä havaintoa kutsutaan Meissner-ilmiöksi. Kuvassa 1 nähdään suprajohteen käyttäytyminen ulkoisessa magneettikentässä. Suprajohteen pinnalle muodostuu suojavirta, joka indusoi ulkoiseen magneettikenttään nähden vastakkaisen magneettikentän. Tällöin se hylkii ulkoista magneettikenttää eli se toimii täydellisenä diamagneettina.



Kuva 1 Meissner-ilmiö suprajohteissa [2].

Suprajohtavuuden ilmiötä selittämään muodostettiin kvanttimekaaninen teoria vuonna 1957. J. Bardeen, L. Cooper ja J. R. Schrieffer kehittivät BCS-teorian kuvaamaan elektronien käyttäytymistä suprajohteessa. BCS-teorian mukaan elektronit muodostavat suprajohteessa Cooperin pareja, jotka mahdollistavat varauksen siirtymisen johteessa ilman resistanssia[3]. Elektronin liike hilalla aiheuttaa hilan siirtymisen epätasapainoon, jolloin

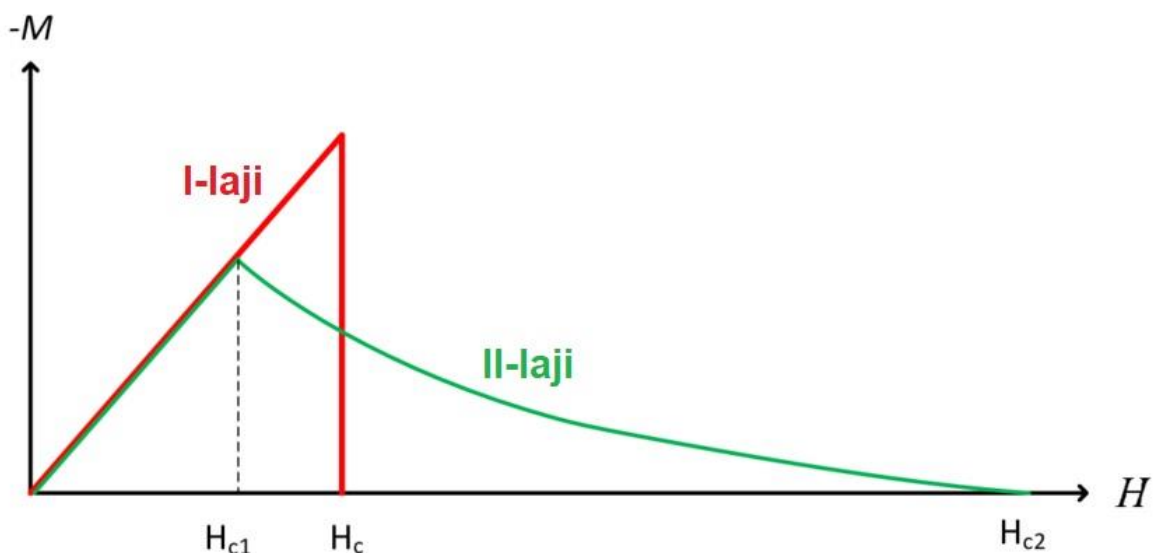
syntyy kasvaneen positiivisen varauksen alue. Toinen elektroni kokee tämän attraktiivisen vuorovaikutuksen, joka saa aikaan elektronien liikkeen suprajohteessa.

Keskeinen läpimurto suprajohteiden kehittämisessä tehtiin vuonna 1986, kun Bednorz ja Müller löysivät ensimmäisen korkean lämpötilan suprajohteen. Lantaanipohjaisilla yhdisteillä saavutettiin 40 K-asteen kriittinen lämpötila[4]. Sitten on löydetty myös huomattavasti korkeamman kriittisen lämpötilan omaavia suprajohteita. HTS-materiaalien löytäminen avaa mahdollisuuksia suprajohteiden hyödyntämiselle energiatekniikan sovelluksissa.

2.1 I- ja II-lajin suprajohteet

Suprajohteet voidaan jakaa kahteen tyyppiin, I- ja II-lajin suprajohteisiin. Kuvassa 2 nähdään I- ja II-lajin suprajohteiden magnetoituminen ulkoisessa magneettikentässä. I-lajin suprajohteissa Meissner-ilmiö esiintyy täydellisenä, kunnes ulkoinen magneettikenttä saavuttaa materiaalille ominaisen kriittisen magneettikentän voimakkuuden H_c . Tällöin suprajohtava tila menetetään äkillisesti. [5] I-lajin suprajohteiden alhaisen kriittisen magneettikentän arvon takia ne eivät sovellu hyvin energiatekniikan sovelluksiin.

II-lajin suprajohteissa Meissner-ilmiö esiintyy täydellisenä vain hyvin heikoilla ulkoisilla kentänvoimakkuuksilla. Ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvaessa II-lajin suprajohteeseen alkaa muodostua vuoputkia, joita pitkin ulkoinen magneettikenttä läpäisee suprajohteen. [6]



Kuva 2 I- ja II-lajin suprajohteiden magnetoituminen.

Suprajohteen kriittisillä arvoilla tarkoitetaan sitä raja-arvoa, jolla suprajohde pysyy vielä suprajohtavassa tilassa. Näitä ovat kriittinen lämpötila, magneettivuon tiheys sekä virrantiheys. Kriittinen virrantiheys pienenee, jos siihen kohdistuva ulkoinen magneettikenttä kasvaa tai johteen lämpötila nousee. [6]

2.2 Quench

Magneetissa olevan suprajohtimen paikallisesti ylittäessä sen kriittisen lämpötilan, siihen syntyy resistiivinen normaalialue. Jos häiriö on tarpeeksi voimakas, se leviää läpi koko magneetin, jolloin käämitykseen varastoitunut energia dissipoituu lämmöksi. Suprajohteissa virrantiheydet ovat erittäin suuria, joten quench voi vaurioittaa magneettia. [7]

2.3 Kaupalliset suprajohtemateriaalit

Kaupalliset suprajohtemateriaalit jaetaan yleisesti kahteen luokkaan matalan (LTS) ja korkean (HTS) lämpötilan suprajohteisiin. Kriittisen lämpötilan T_c raja näiden kahden luokan välillä ei ole tarkka, mutta LTS-materiaalit jäädytetään yleensä selvästi alle 10 K:iin. Tämän lisäksi LTS-materiaalit noudattavat BCS-teoriaa. [8]

LTS-johtimilla tarkoitetaan yleisimmin Nb-pohjaisia yhdisteitä. Niistä erityisesti niobititaani sekä niobitina ovat yleisimmin käytettyjä metalliseoksia. Vuonna 2014 yli 95 % suprajohtavista magneeteista oli valmistettu näitä yhdisteitä hyödyntävistä suprajohteista. Niiden tyypillinen toimintalämpötila on 4,2 K ja niiden jäädyttämiseen käytetään nesteheliumia. Joissain tapauksissa kuten LHC-hiukkaskiihdyttimessä tarvitaan vielä alempia 2 K lämpötiloja, jolloin jäädytykseen käytetään superheliumia. Superhelium sisältää supernestekomponentin, jolla ei ole lainkaan sisäistä kitkaa. Tällöin siinä ei muodostu kiehumiskuplia, koska nesteen lämmönjohtavuuskyky on tavattoman suuri. [9]

2.4 LTS-johteet

Niobititaani, NbTi, on tämän hetken kaupallisista suprajohteista ylivoimaisesti käytetyin materiaali. Sen pääasiallinen käyttökohde on lääketieteen magneettikuvauslaitteissa, mutta sitä käytetään myös muun muassa hiukkaskiihdyttimissä ja fuusioreaktoreissa. NbTi:n kriittisen lämpötilan T_c arvo on noin 10,2 K ja kriittisen magneettivuontiheys H_{c2} noin 10,2 T. Niobititaanin etuina ovat sen taivuteltavuus, helppo valmistus sekä edulliset kustannukset. [8]

Niobitina, Nb₃Sn, on toinen kaupallinen matalan lämpötilan suprajohde ja se kuuluu A15-yhdisteisiin. A15-yhdisteet ovat kemialliselta kaavaltaan muotoa A₃B, jossa siirtymämetalli A ympäröi toisen elementin B. Niobitinaa käytetään, kun käyttökohteessa vaaditaan

suprajohteelta parempia kriittisiä arvoja kuin niobititaanilla. Niobititaanin kriittinen lämpötila on 18,3 K ja kriittinen magneettivuontiheys on 22–25 T. Niobitina on kuitenkin niobititania huomattavasti mekaanisesti heikompi. Tämän takia niobitinasta valmistetut magneetit joudutaan tekemään kalliilla ja hitaalla wind and react -menetelmällä. Siinä johdin ensin käämitään magneetiksi ja sen jälkeen hehkutetaan yli 650 asteen lämpötilassa, jotta se saavuttaa suprajohtavan faasin. [8]

Magnesiumdiboridi, MgB_2 , on 2001 löydetty suprajohtemateriaali ja se voidaan luokitella sekä LTS- että HTS-johteeksi. Se noudattaa BCS-teoriaa, jolloin se voidaan luokitella LTS-johteeksi. Sen korkean kriittisen lämpötilan (39K) johdosta se voidaan kuitenkin myös luokitella HTS-johteeksi. MgB_2 :n kriittisen magneettivuontiheys on melko korkea 16 T. Sen valmistuskustannukset ovat matalat ja sitä on helppo valmistaa. Tämän takia sillä uskotaan olevan potentiaalia useissa sähkötekniikan sovelluksissa. Sitä ei kuitenkaan voida jäähdyttää nestetyypellä. Sen käyttö vaihtovirtasovellutuksissa on ongelmallista, koska siinä käytetään usein matriisimetallina ferromagneettista rautaa. [8]

2.5 HTS-johteet

HTS-materiaaleille on ollut kaupallista kiinnostusta niiden löytämisestä saakka. Niillä voidaan tuottaa voimakkaampia magneettikenttiä kuin LTS-johteilla. Korkeammat toimintalämpötilat myös avaavat uusia mahdollisuuksia suprajohteiden hyödyntämiseen. Niiden valmistus on kuitenkin ollut tähän asti haastavaa ja kallista. HTS-johteet ovat keraamisen rakenteensa takia hauraita ja niistä on vaikeaa tehdä tarpeeksi pitkiä yksikköpituuksia. Kaupallisessa käytössä on kuitenkin yleistynyt Bi-pohjaiset Bi2212- ja Bi2223- sekä REBCO-johtimet. [8]

Bi-pohjaisilla suprajohteyhdisteillä on LTS-johtimiin verrattuna huomattavasti korkeampi kriittinen lämpötila. $Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+x}$ (Bi-2212) kriittinen lämpötila on 85 K ja $(Bi, Pb)_2Sr_2Cu_3O_{10+x}$ (Bi-2223) se on noin 110 K. Bi2212-johde voidaan valmistaa pyöreänä, jolloin siitä voidaan valmistaa paremmin vahvoja magneetteja. Bi2223 valmistetaan teippimäisenä. Molemmissa käytetään hopeaa matriisimetallina. Bi-pohjaiset suprajohteet sietävät huonosti ulkoista magneettikenttää erityisesti korkeissa lämpötiloissa. [8]

$YBa_2Cu_3O_{7-x}$ eli YBCO-suprajohtemateriaali on tällä hetkellä monin tavoin lupaavin HTS-johde. Sen kriittinen lämpötila on noin 90 K, jolloin se voidaan jäähdyttää nestetyypellä. Yhdisteen yttrium voidaan korvata muilla harvinaisilla maametalleilla, jolloin päästään vielä korkeampiin lämpötiloihin. Sillä päästään korkeisiin kriittisen virrantiheyden arvoihin korkeissakin magneettikentissä. YBCO-johdin valmistetaan teippimäiseksi ohutkalvojohtimeksi, jossa suprajohteen osuus matriisimetallista on vain joitain prosent-

teja. YBCO-johtimien valmistusmenetelmät ovat kehittyneet viime aikoina, jolloin päästään pidempiin yksikköpituuksiin ja halvempaan hintaan. Se on kuitenkin tällä hetkellä vielä huomattavasti kalliimpaa perinteisiin LTS-johtimiin verrattuna. [8]

2.6 Suprajohteiden jäähdytys

Suprajohtavat järjestelmät vaativat toimiakseen jäähdytyksen, jotta suprajohteet saadaan niiden vaatimaan operointilämpötilaan. Kryostaatti on astia, jossa ylläpidetään suprajohtemagneetin vaadittu toimintalämpötila. Kryostaatin tehtävänä on absorboida järjestelmään kohdistunut lämpökuorma, jota syntyy sisäisistä ja ulkoisista lähteistä. Sen tulee myös suojella järjestelmää quenchin aikana dissipoituneelta energialta. Jäähdytykselle voidaan asettaa myös vaatimuksia kustannuksien, luotettavuuden ja jäähdytyskapasiteetin osalta. [10]

Suprajohteen operointilämpötila vaikuttaa merkittävästi kryostaatin monimutkaisuuteen ja hintaan. HTS-johteiden korkeampi operointilämpötila mahdollistaa edullisempien kryogeenisten nesteiden käytön ja jäähdytyslaitteiden jäähdytysteho paranee. Tämä on erityisen tärkeää sähköntuotannossa, jossa tavoitellaan alhaisia tuotantokustannuksia. [10]

Suprajohteiden jäähdytykseen käytetään kahdella periaatteella toimivia kryostaatteja. Avoimen kierron järjestelmissä suprajohte upotetaan kryogeeniseen nesteeseen, joka kiehuu vapaasti ympäristöönsä. Nestettä lisätään tarpeen mukaan erillisestä astiasta. Suljetun kierron järjestelmissä jäähdytysainetta ei lisätä, vaan se kierrätetään nesteyttimessä tai kryojäähdyttimessä. Suljetut järjestelmät ovatkin kaupalliseen käyttöön varteenotettavimpia, koska silloin säästetään kalliita kryonesteitä. [10]

Suprajohteiden jäähdytykseen sopivia kryogeenisiä nesteitä ovat helium, vety, neon ja typpi. Näistä käytetyimpiä ovat helium ja typpi. Vedyn käyttö on ongelmallista sen räjähdysherkkyyden takia. Neonin tuottaminen taasen on hyvin kallista, sillä se joudutaan erottamaan ilmakehästä, jossa sitä on hyvin vähän. Helium soveltuu ominaisuuksiensa puolesta hyvin kryogeeniseksi nesteeksi ja sillä päästään alhaisiin lämpötiloihin. Typen tuottaminen on kuitenkin huomattavasti halvempaa, jolloin sitä kannattaa käyttää, jos suprajohteen operointilämpötila sen sallii. [10]

Suprajohtemagneetit jäähdytetään suljetuissa järjestelmissä pääsääntöisesti kolmella eri tavalla. Käytetyin tapa on upotusjäähdytys, jossa magneetti upotetaan kryogeeniseen nesteeseen. Nesteen höyrystyessä se sitoo lämpöä. Lämpötilaan voidaan vaikuttaa kryonesteen valinnalla sekä painetta säätämällä. Upotusjäähdytysmenetelmällä päästään jopa 1,3K lämpötilaan. Tämä onnistuu astian painetta alentamalla. Upotusjäähdytyksen etuina on sen nopeus sekä sen tarjoamat isotermiset olosuhteet magneetille.

Haittapuolina on quenchin yhteydessä mahdollisesti tapahtuva raju kiehumia ja paineen nousu kryostaatissa. [10]

Toinen tapa on kaasujäähdytys. Siinä jäähdytysaineena toimiva kaasu johdetaan suoraan kontaktiin magneetin kanssa jäähdyttäen sitä. Kaasua paineistamalla sen tiheyttä saadaan kasvatettua, jolloin lämmönsiirtokyky paranee. Heliumia käyttämällä kaasujäähdytyksellä päästään noin 10 K lämpötilaan. Kaasujäähdytyksen etuna on sen säädettävyyden ja kaasun erillinen jäähdytysjärjestelmä voidaan viedä kauemmaksi magneetista. Kaasujäähdytys on kuitenkin melko hidasta, eikä käytettävissä ole nesteen höyrystymislämpöä. [10]

Kolmas tapa on käyttää mekaanista jäähdytystä eli kryojäähdytintä. Kryojäähdyttimet ovat erillisiä jäähdytyslaitteita, jotka kytketään hyvin lämpöä johtavalla materiaalilla kuten kuparilla magneettiin. Kryojäähdyttimen toiminta perustuu työkaasun puristamiseen ja laajentamiseen. Työkaasuna käytetään yleensä heliumia. Kaasua puristaessa sen lämpötila ja paine nousee, jolloin siitä voidaan poistaa lämpöä huoneenlämmössä. Tämän jälkeen jäähdytty kaasu palautetaan alhaiseen paineeseen, jolloin sen lämpötila laskee ja sillä voidaan jäähdyttää kylmäsiirtimena toimivaa materiaalia. Kryojäähdyttimen päästään jopa 4 K lämpötilaan, mutta niiden jäähdytyskapasiteetti on parempi suuremmilla lämpötiloilla. Niiden etuna on luotettavuus. Haittapuolena on jäähdytyksen hitaus ja huono jäähdytyskapasiteetti, jota voidaan kuitenkin nostaa kytkemällä useampi kryojäähdytin rinnan. [10]

Jäähdytysmenetelmistä lupaavin tuulivoimalan generaattorin suprajohdeissa on kryojäähdyttimet. Tuulivoimalassa jäähdytykseltä vaaditaan ennen kaikkea luotettavuutta, jota kryojäähdyttimet tarjoavat. Kryojäähdyttimiä on myös saatavana jo markkinoilta kaupalliseen käyttöön.

3. TUULIVOIMA

Tuulivoimalla tarkoitetaan tuulen liike-energian muuntamista sähköksi. Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa ja se on tärkeä työkalu ilmastotavoitteiden saavuttamiseen.

Vuonna 2018 tuulivoimalla katettiin 14% Euroopan sähkönkulutuksesta. Uusien asennettujen tuulivoimaloiden tehontuotantokapasiteetti oli 11,7 GW samana vuonna. Tuulivoima oli myös merkittävin investointikohde uusiutuvien energialähteiden joukossa. [11]

3.1 Tuulen teho

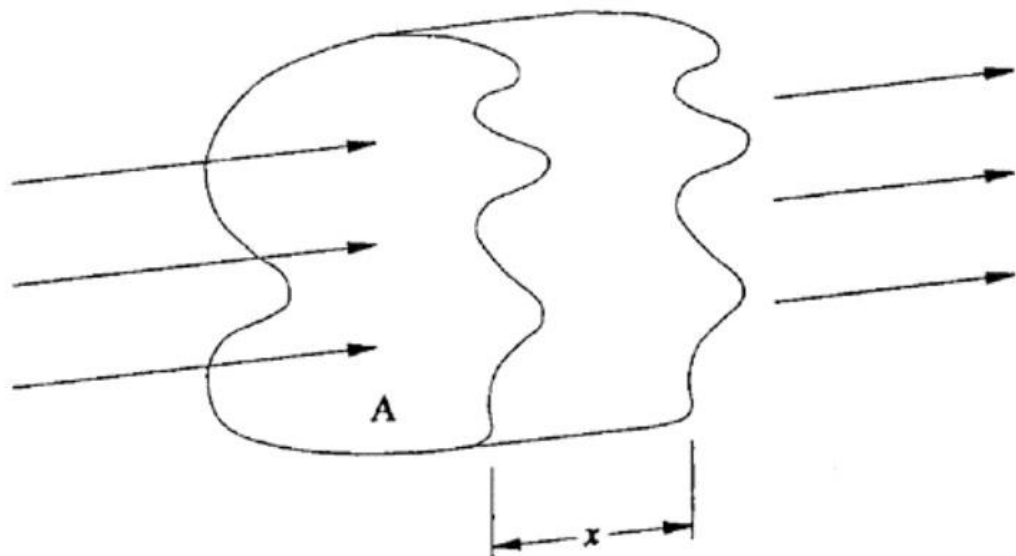
Tuulen eli ilmapirtauksen liike-energian muuntamisessa sähköenergiaksi kaksi tärkeintä tekijää ovat ilmapirtauksen nopeus sekä ilman tiheys. Ilmamassan liike-energia voidaan laskea klassisen fysiikan kaavalla

$$E_k = \frac{1}{2}mV^2,$$

jossa m on ilmapirtauksen massa ja V on nopeus. Jos oletetaan ilman virtaavan tasaisesti ja kohtisuorasti pinnan A muodostaman kappaleen lävitse kuvan 3 mukaisesti, saadaan ilman massa kappaleen sisällä yhtälöstä

$$m = \rho Ax,$$

jossa ρ on ilman tiheys ja x on kappaleen paksuus.



Kuva 3 Ilmanvirtaaminen kappaleen lävitse [12].

Yhdistämällä nämä edelliset yhtälöt saadaan kappaleen Ax sisältämän ilman liike-energia

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A x V^2.$$

Derivoimalla tätä yhtälöä ajan suhteen saadaan kappaleen läpivirtaavan ilman liike-energian määrä aikayksikköä kohden eli ilmavirtauksen teho

$$P_{kappale} = \frac{d(E_k)}{dt} = \frac{1}{2} \rho A V^2 \frac{dx}{dt}.$$

Tuulennopeus V voidaan myös kirjoittaa ilmassan siirtymänä ajan suhteen

$$V = \frac{dx}{dt}.$$

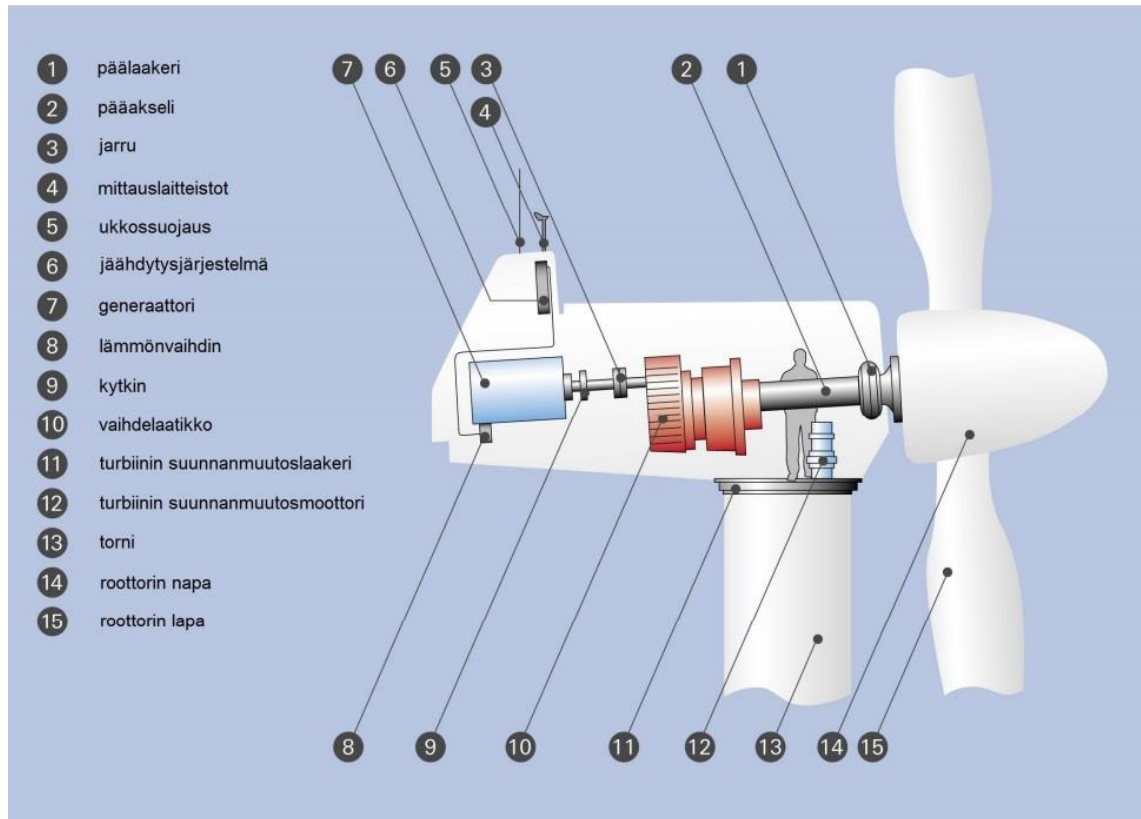
Sijoittamalla tämä kaavaan x ilmanvirran tehon yhtälöksi saadaan

$$P_w = \frac{1}{2} \rho A V^3.$$

Tämä yhtälö toimii perustana tuulivoimalan tehoa laskiessa. [12] Yhtälöstä huomataan, että tuulennopeus vaikuttaa tehoon kolmannessa potenssissa. Tämän vuoksi tuulivoimalaa suunniteltaessa tulee kiinnittää erityistä huomiota sijoituspaikkaan ja sen tuuliolosuhteisiin.

3.2 Tuulivoimaloiden rakenne

Tuulivoimalat koostuvat yleisesti tornista, roottorista ja nasellista eli konehuoneesta. Tuulivoimalan rakenne on esitetty kuvassa 4. Roottorin lapojen määrä vaihtelee mutta kaksi- ja kolmilapaiset ovat yleisimpiä. Tuulivoimalat jaetaan kahteen luokkaan muuttuva- ja vakionopeuksisiin voimaloihin. Muuttuvanopeuksisen voimalan roottorin pyörimisnopeus muuttuu tuulennopeuden mukana. Tuulivoimala voi olla vaihteellinen tai vaihteeton eli suoravetoinen. Suoravetoiset tuulivoimalat ovat viime vuosina kasvattaneet suosiotaan niiden luotettavuuden takia. Ne ovat kuitenkin vaihteellisia kalliimpia. [13]



Kuva 4 Tuulivoimalan rakenne [13].

3.3 Tuulivoimaloiden generaattorityypit

Tuulivoimaloiden generaattorit ovat yleisimmin vaihtosähkögeneraattoreita. Vaihtosähkögeneraattori voi olla joko tahtigeneraattori tai epätahtigeneraattori. Generaattorit sisältävät aina paikallaan olevan staattorin sekä pyörivän roottorin. [13]

Tahtigeneraattori sisältää kenttä- ja ankkurikäämit. Tahtigeneraattorin toiminta perustuu siihen, että kenttäkäämiin syötetään tasavirtaa, jolloin se synnyttää ajan suhteen muuttumattoman magneettikentän. Kun kenttäkäämejä aletaan pyörittämään, ankkurikäämi kokee ajan suhteen muuttuvan magneettikentän synnyttäen ankkurikäämin napojen välille jännitteen. Ankkurikäämin jännitteen taajuus on yhtä suuri kuin roottorin pyörimisnopeus. [13]

Epätahtigeneraattorissa staattori- ja roottorikäämeissä kulkee vaihtovirta. Tämän lisäksi roottorin käämit ovat oikosuljettu. Staattorikäämeihin syötetty vaihtovirta indusoi roottorikäämeihin jännitteen ja niissä alkaa kulkea vaihtovirta. Staattori- ja roottorikäämien vääntömomentti saadaan aikaan magneettikenttien vaihde-erolla. Epätahtigeneraattorissa roottoria pyöritetään hieman staattorin herätevirran määrittämää tahtinopeutta nopeammin. [13]

4. SUPRAJOHTEET TUULIVOIMALAN GENERAATTOREISSA

Tuulivoiman kysynnän kasvaessa on tullut tarve valmistaa suurempia ja tehokkaampia tuulivoimaloita. Generaattorin nimellistehon kasvattamiseksi sen paino kasvaa huomattavasti perinteisillä valmistusmenetelmillä. Tämä vaikeuttaa erityisesti merellä sijaitsevien off-shore voimaloiden rakentamista. Uudet korkean lämpötilan suprajohteet mahdollistavat niiden käytön tuulivoimaloiden generaattoreissa. Suprajohteita käyttämällä generaattorit voidaan valmistaa huomattavasti kevyempänä. Suprajohdegeneraattorit ovat erityisen potentiaalisia suoravetoisissa tuulivoimaloissa.

4.1 Suprajohteiden hyödyntämisvaihtoehdot

Tuulivoimaloissa suprajohteita voidaan hyödyntää useammalla tavalla. Generaattorit voidaan valmistaa joko täysin tai vain osittain suprajohtaviksi. Täysin suprajohtavissa generaattoreissa sekä ankkuri- että kenttäkäänitys toteutetaan suprajohteilla. Täysin suprajohtavat generaattorit ovat teoriassa hyötysuhteeltaan erinomaisia, sillä suprajohteilla voidaan vähentää ohmisia häviöitä. Tällä hetkellä niiden toteuttaminen on kuitenkin vaikeaa kenttäkäänityksessä tapahtuvista AC-häviöistä johtuen. [14] Tulevaisuudessa uudet suprajohteet voivat soveltua paremmin tähän käyttöön.

Osittain suprajohtavissa generaattoreissa vain generaattorin kenttäkäänitys toteutetaan suprajohteilla. Tässä generaattorityypissä AC-häviöt eivät muodostu ongelmaksi, sillä kenttäkäänityksen magnetointivirta on tasavirtaa. Suprajohteita käyttämällä kenttäkäänityksessä voidaan saavuttaa huomattavia magneettivuon tiheyksiä pienillä johdemäärillä, jolloin generaattorin kokonaiskoko pienenee. [14] Osittain suprajohtavat generaattorit ovatkin tällä hetkellä varteenotettavin vaihtoehto suprajohteiden hyödyntämiseen tuulivoimaloissa.

Suprajohteita voidaan hyödyntää myös off-shore voimaloiden tehonsiirtokaapeleissa. Tuulivoimalat voivat sijaita kaukana merellä, jolloin siirtohäviöt muodostuvat merkittäväksi tekijäksi. Tulevaisuudessa suprajohteiden yleistyessä ja edullistuessa niitä voidaan käyttää myös näiden siirtohäviöiden torjumiseen.

4.2 Vaatimukset suprajohdegeneraattorille kaupallisessa käytössä

Suprajohtavalle generaattorille voidaan asettaa joitain vaatimuksia, jotta sen käyttö on järkevää kaupallisessa käytössä tuulivoimaloissa. Tuulivoimaloiden generaattorien tulee

olla luotettavia, sillä niiden huoltoväli on usein varsin pitkä. Generaattorin huoltoon kuuluva aika tulisi olla myös mahdollisimman pieni eli sen tulisi onnistua operointilämpötilassa. Suprajohteiden käytön tulee myös olla taloudellisesti järkevää perinteisiin generaattoreihin verrattuna.

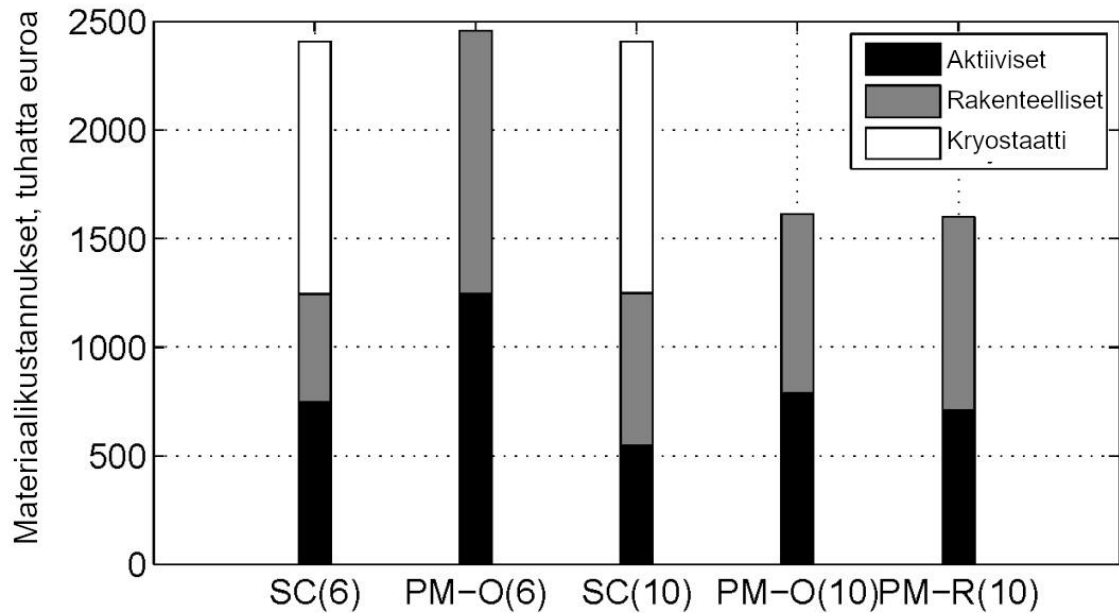
4.3 Tuulivoimalan suprajohdegeneraattorin oheislaitteet

Suprajohdegeneraattorit vaativat toimiakseen oheislaitteita, joita ei ole perinteisissä generaattoreissa. Suprajohteet tulee jäähdyttää niiden toimintalämpötilaan, joten ne tarvitsevat jäähdytyslaitteiston. Lisäksi tarvitaan mittaus- ja suojauslaitteistoa suprajohteiden toiminnan varmistamiseksi.

Suprajohteiden jäähdytys voidaan toteuttaa luvussa 2.5 mainituilla tavoilla. Tuulivoimaloissa varteenotettavin jäähdytystapa on mekaaninen jäähdytys niiden luotettavuuden takia. Suprajohteet tulee myös eristää hyvin, jotta niiden lämpötila pysyy tasaisena ja jäähdytystehon tarve pieneenä.

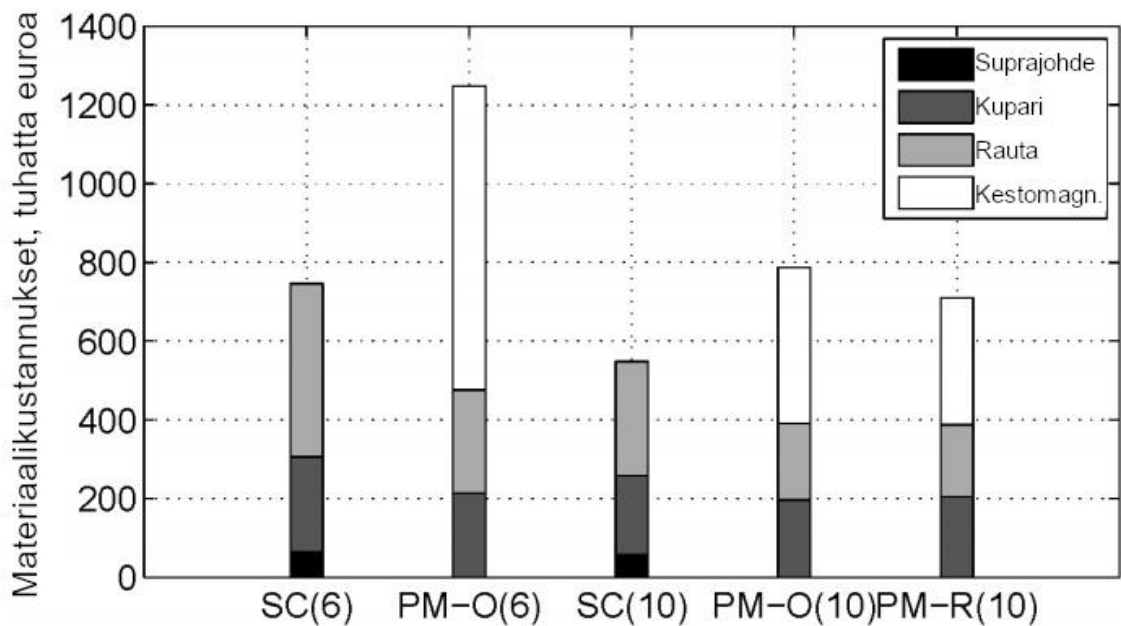
4.4 Suprajohtavan tuulivoimalan generaattorin kustannukset

Suprajohtavia generaattoreita ei ole vielä sarjatuotannossa, joten niiden kustannuksien vertailu perinteisiin generaattoreihin on ongelmallista. Kustannuksia voidaan kuitenkin vertailla materiaalien osalta. Otetaan tarkasteluun 10 MW:n suoravetoinen tuulivoimala ja vertaillaan kustannuksia suprajohtavan ja perinteisen kestopagneetilla toteutetun generaattorin kustannuksia. Kuvassa 5 nähdään materiaalikustannukset suunnitelluille generaattoreille, joiden halkaisijat ovat 6 ja 10 m. PM-R on referenssinä käytetty kestopagneettigeneraattori ja PM-O on siitä muutettu versio. Suprajohtavageneraattori SC on osittain suprajohtava ja siinä käytetään MgB_2 -johdetta, jonka yksikköhinnaksi on arvioitu 4 €/m. [15] Vertailusta nähdään, että suprajohtavageneraattori on pienemmällä halkaisijalla kilpailukykyinen kestopagneettigeneraattorin kanssa, mutta suuremmalla halkaisijalla se on huomattavasti kalliimpi.



Kuva 5 Generaattorien materiaalikustannukset [15].

Suprajohtavan generaattorin kryostaatin kustannuksien arvioiminen on hankalaa, joten tarkastellaan seuraavaksi vain generaattorin aktiivisten osien materiaalikustannuksia. Kuvasta 6 nähdään, että suprajohtavat generaattorit ovat materiaalikustannuksiltaan huomattavasti edullisempia. [15] Jos suprajohtavien generaattorien kryostaattien kustannuksia saadaan kehitystyöllä alennettua, niistä voi tulla hyvin kilpailukykyinen vaihtoehto perinteisille generaattorivaihtoehdoille. Seuraavassa luvussa tarkastellaan esimerkkiä tuulivoimalasta, jossa sen generaattori on tehty osittain suprajohtavaksi.



Kuva 6 Generaattorien aktiivisten osien materiaalikustannukset [15].

5. MALLIVOIMALA ECOSWING-PROJEKTI

Vuonna 2019 Tanskassa valmistettiin ensimmäinen suprajohteita hyödyntävä tuulivoimalan generaattori, joka kytkettiin sähköverkkoon. EU-rahoitteisen EcoSwing-projektin tavoitteena oli demonstroida suprajohteiden käyttömahdollisuuksia tuulivoimalan generaattoreissa. Projektin kokonaiskustannukset olivat 13,8 miljoonaa euroa. Neljän vuoden projekti onnistui tavoitteissaan, sillä tuulivoimala saavutti tavoitellun yli 3 MW:n tehon ja se oli kytkettynä sähköverkkoon 650 tuntia. Suprajohteita hyödyntämällä generaattorin kokonaispainoa saatiin vähennettyä 40% perinteisiin generaattoreihin verrattuna. Sarja-valmisteisen suprajohteita hyödyntävän generaattorin kustannukset ovat myös 40% pienemmät. [16]

5.1 Ominaisuudet

EcoSwing-projektissa valmistettiin 3,6 MW:n suoravetoinen HTS-materiaaleja hyödyntävä tahtigeneraattori, joka asennettiin jo olemassa olevaan tuulivoimalaan. Generaattorin roottorissa käytetään suprajohteita, mutta sen staattori on valmistettu perinteisillä kuparijohteilla. Tähän ratkaisuun päädyttiin, sillä täysin suprajohtavan generaattorin valmistus osoittautui vielä liian vaikeaksi staattorin AC-häviöiden aiheuttamasta lämpökuormasta johtuen. [17] Generaattorin pääominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

TAULUKKO 1 ECOSWING GENERAATTORI

NIMELLISTEHO	3,6 MW
PYÖRIMISNOPEUS	15 rpm
ILMAVÄLI	13 mm
HYÖTYSUHDE	92 %
STAATTORIN JÄNNITE	710 V
ROOTTORIN TOIMINTALÄMPÖTILA	<30 K
GENERAATTORIN PAINO	65 t
GENERAATTORIN HALKAISIJA	4 m
GENERAATTORIN PITUUS	2,5 m

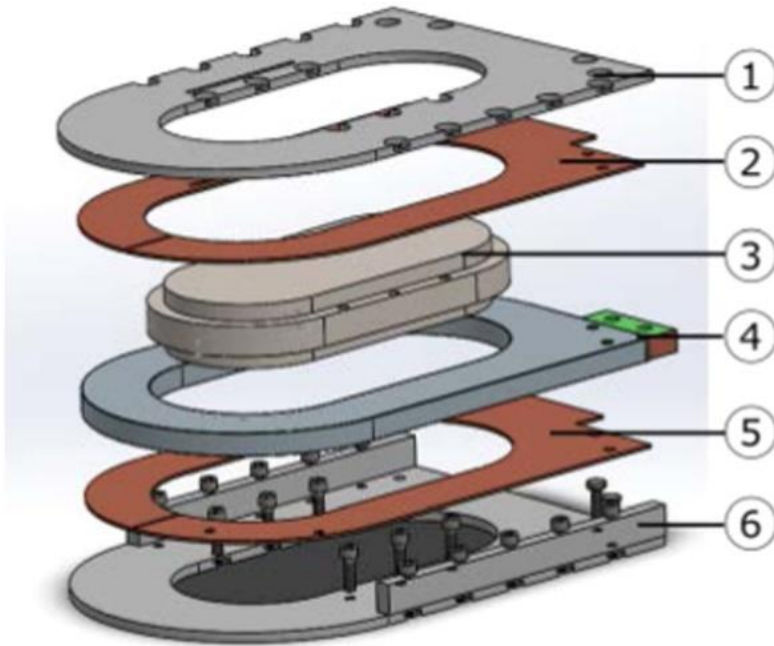
Suprajohdegeneraattorin halkaisija on 4,0 m ja sen pituus on 2,5 m. Generaattorin 1,4 m pienempi halkaisija verrattuna perinteiseen generaattoriin helpottaa sen kuljetusta ja asennusta olemassaoleviin tuulivoimaloihin. Generaattorin kokonaispaino on 65 tonnia ja roottorin osuus siitä on 30 tonnia. [18]

Olemassaolevaan tuulivoimalaan pyrittiin tekemään mahdollisimman vähän muutoksia suprajohdegeneraattorin asennuksessa. Suprajohdegeneraattori kuitenkin aiheuttaa joitain muutoksia. Generaattorin ilmaväli on huomattavasti normaalia suurempi, sillä suprajohdettava roottori tarvitsee tilaa eristykselle ja tällä vähennetään myös AC-häviöitä HTS-kenttäkäämityksissä. Tämä aiheuttaa huomattavia vääntömomenteja oikosulkutilanteessa. Staattorin kenttäkäämitykset jaettiin neljään osaan pienentämään vääntömomenttia. Generaattorin mekaaniset rakenteet mitoitettiin myös kestämään nämä vikatilanteet. [18]

Toinen suunnittelussa huomioitava asia on suprajohderoottorin tarvitsemat oheislaitteet. Suprajohteet tulee eristää ja jäähdyttää niiden toimintalämpötilaan, johon tarvitaan jäähdytyslaitteisto. Tämän laitteiston tulee toimia luotettavasti, mutta sitä pitää pystyä myös huoltamaan tarpeen mukaan. Lisäksi suprajohderoottori tarvitsee mittauslaitteistoa, jolla tarkkaillaan käämien jännitteitä ja lämpötiloja. [18]

5.2 Roottori

EcoSwing-projektin pääpainopiste oli valmistaa generaattorin roottori suprajohdettavilla materiaaleilla. Roottorien operointilämpötila on noin 30 K. Kuvassa 8 nähdään testeissä käytetyn lyhyemmän napakäämin pääkomponentit. Roottorin käämeissä käytettiin double pancake -geometriaa, jossa suprajohde kääritään spiraalimaiseksi. Yhdessä napakäämissä on yli 500 metriä suprajohdetta ja sen kokonaispaino on 48 kg. Käämityspakkaus (4) valmistetaan käärimällä HTS-johde eristyskalvolla, jonka jälkeen käämitykset tyhjökyläistetään. Tyhjökylästyksessä käämit kuivataan ja niihin valutetaan epoksihartsia. Tätä rakennetta vielä edelleen vahvistetaan lasikuitukankaalla. Käämityspakkaus sijoitetaan kuparilevyjen (2 ja 5) väliin, jotka toimivat lämmönsiirtäjinä jäähdytyksessä. Kuparilevyihin on tehty pieni rako, jotta pyörrevirtahäviöt voidaan minimoida. Kuparilevyjen päälle tulee ruostumattomasta teräksestä valmistetut levyt (1 ja 6), jotka parantavat navan mekaanista lujuutta. Napakokoonpanon keskellä sijaitsee vielä rautasydän (3), joka ohjaa ja vahvistaa magneettikenttää. [17] Kuvassa 9 nähdään valmis napakäämi.



Kuva 7 Lyhyempi testinapakäämi [17].



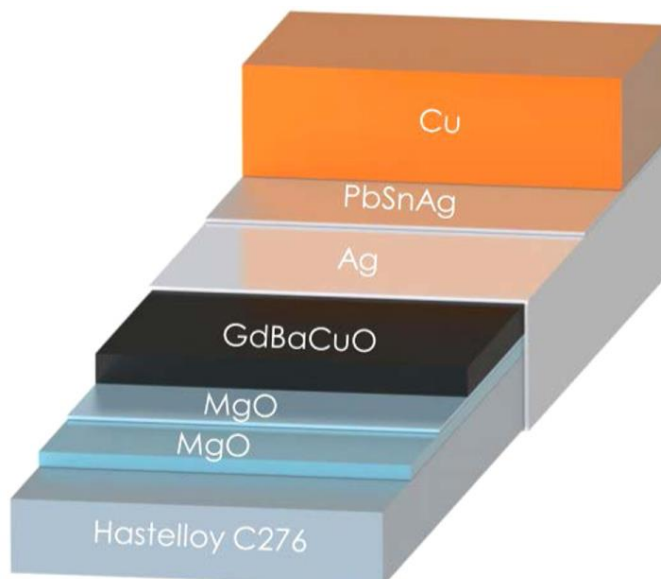
Kuva 8 Kokoonpanettu käämi [19].

5.3 Suprajohdemateriaalit

Suprajohteeksi generaattoriin valikoitui THEVAn valmistama Pro-Line TPL2100 ja sen pääominaisuudet on esitetty kuvassa 10. Se on teippimäinen 12 mm leveä ja 0,21 mm paksu suprajohde. Suprajohteen rakenne on esitetty kuvassa 11. Sen suprajohdekerros on valmistettu GdBaCuO-yhdisteestä. HTS-teipin kriittisen lämpötilan arvo on 92 K, mutta sen suorituskyky paranee alemmissa lämpötiloissa. 77 K lämpötilassa suprajohteen kriittisen virranarvo I_c on 250–360 A. Suprajohteen maksimiyksikköpituus on 300 m. Projektissa tarvittiin huomattavia määriä suprajohdetta ja sen tuotantoa saatiin nostettua 10 km:iin kuukaudessa. [17]

THEVA Pro-Line TPL2100	
Teipin leveys	12 mm
Teipin paksuus	0.21 mm
Kuparin paksuus	100 μm
Minimi taivutussäde huoneenlämmössä	60 mm
Teipin jännityslujuus huoneenlämmössä	300 MPa
Jännitys-venymä 77 K lämpötilassa	0.3%
Kriittinen virta (77 K, 0 T)	250–360 A

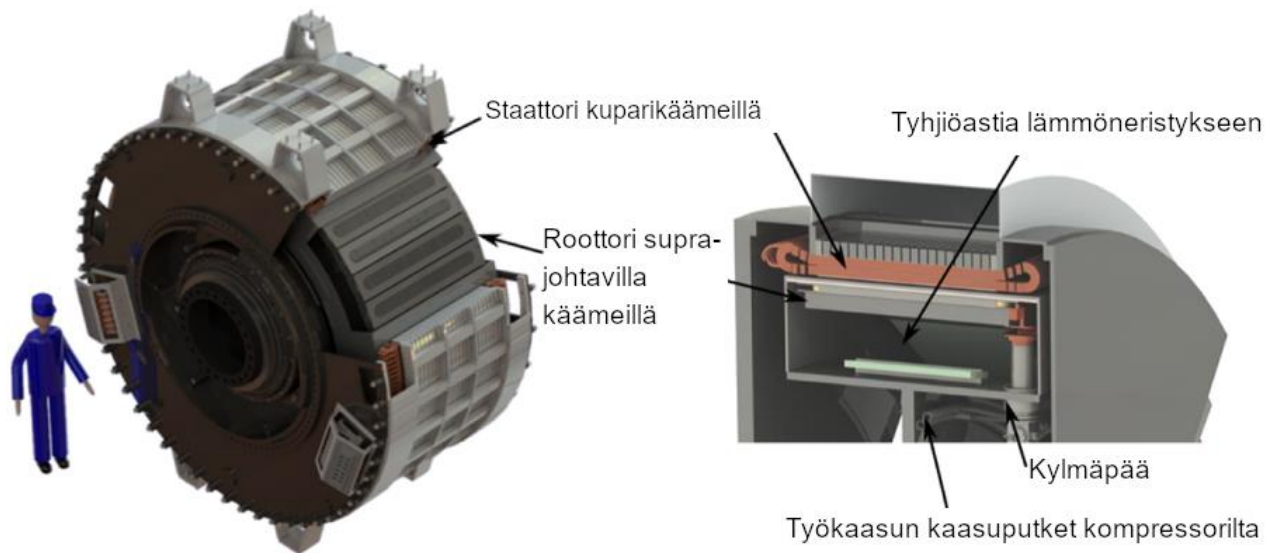
Kuva 9 THEVA Pro-Line TPL2100 suprajohtimen ominaisuudet [17].



Kuva 10 THEVA Pro-Line TPL2100 suprajohde [17].

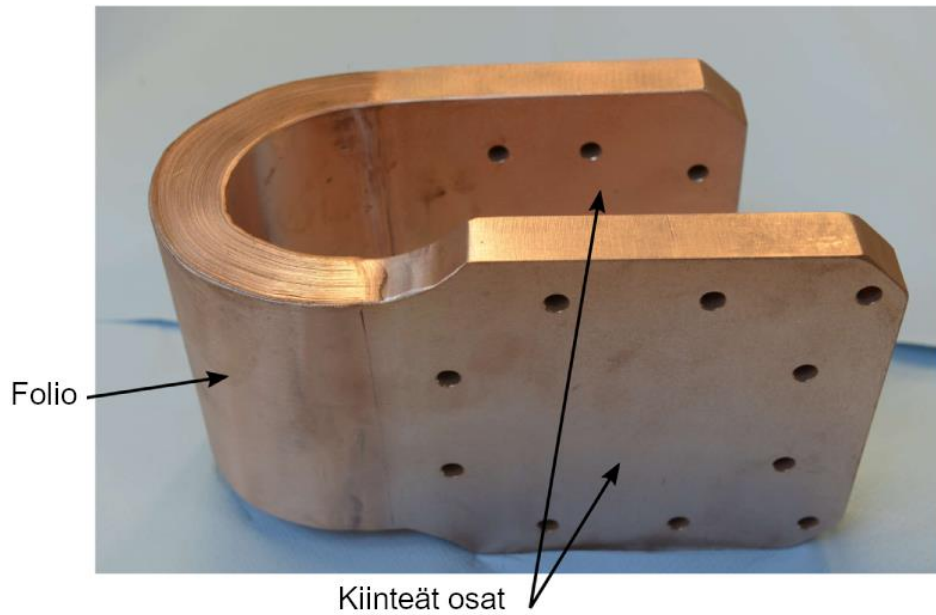
5.4 Jäähdytys

Suprajohtavat roottorin käämit vaativat toimiakseen noin 30 K toimintalämpötilan. Roottorin jäähdytys on toteutettu Gifford-McMahon-periaatteella toimivilla kryojäähdyttimillä. Kuvassa 12 nähdään generaattorin kokonaisrakenne. Leikkauskuvassa nähdään staattorin kuparikäämit, joiden alapuolella sijaitsevat roottorin HTS-käämit. HTS-käämit on sijoitettu rengasmaiseen tyhjiöastiaan, joka toimii lämmöneristeenä käämeille. Napakäämit pultataan astian sisäpintaan kiinni, jonka jälkeen liitos vahvistetaan täyttämällä väliin jäänyt tila epoksilla. Tyhjiöastian toisessa reunassa sijaitsee rengasmaisen kuparinen kylmäsilta, johon kytketään mekaanisten jäähdyttimien kylmäpää. Tämä kuparirengas on jaettu neljään osaan pyörrevirtojen minimoimiseksi ja valmistamisen helpottamiseksi. [17]



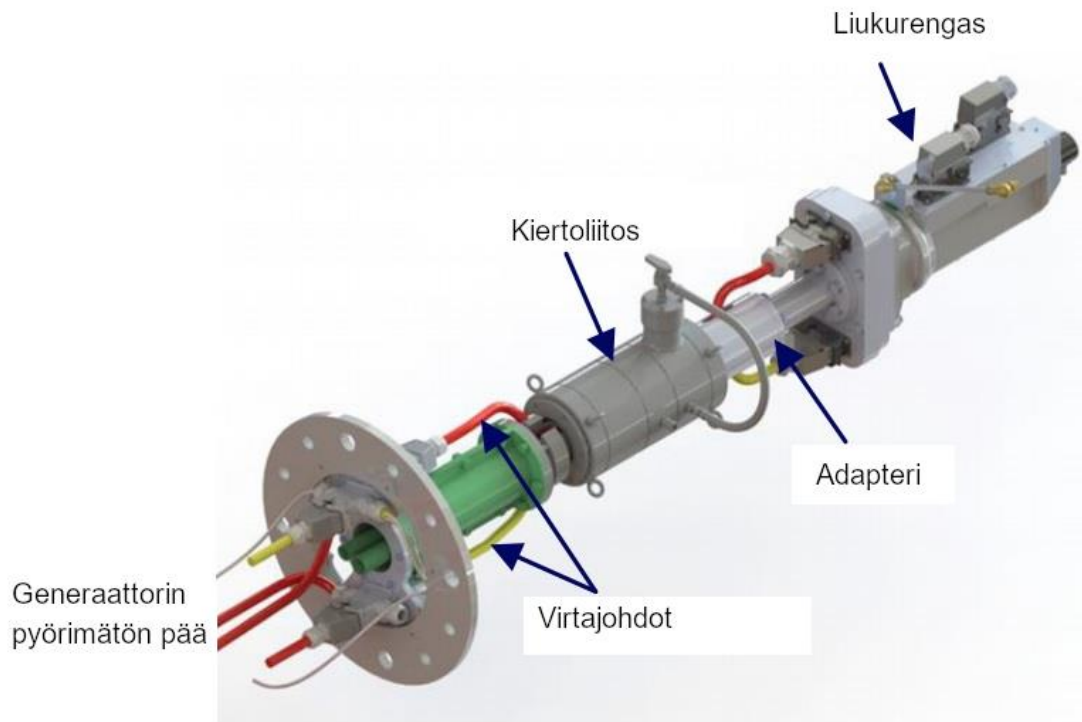
Kuva 11 EcoSwing generaattorin rakenne [17].

Yksittäiset napakäämit on kytketty kylmäsiltaan kuparilinkillä, jonka rakenne nähdään kuvassa 13. Nämä kappaleet ovat valmistettu hitsaamalla yhteen kuparilevyjä sekä päällekkäin pinottuja kuparifolioita. Mahdollisimman suuren kontaktipinnan varmistamiseksi käämin ja kuparilinkin väliin laitetaan lämpötahnaa. [17]



Kuva 12 Käämin ja kylmäsilan kuparilinkki [17]

Jäähdytysjärjestelmän kylmäpäätt pyörivät roottorin mukana ja ne ovat Sumitomon RDK-500B-mallia. Kylmäpäille niiden tarvitsemaa korkeapaineista heliumkaasua tuottavat Sumitomo F70-H kompressorit. Kompressorit eivät sijaitse roottorissa, vaan niiden tuottama työkaasu johdetaan kylmäpäille kiertoliitoskokoontalon avulla. Tämä kokoontalon sisältää myös liukurenkaat sähkövirran siirrolle roottorille. Kokoontalona on havainnollistettu kuvassa 14. Roottorin jäähdytykseen käytetään yhteensä yhdeksää kylmäpäätt, joista jokainen on kytketty omaan kompressoriinsa. Näistä yksi on varattu roottorin magnetointiin käytettävien virtajohtojen jäähdyttämiseen ja loput napakäämeille. Järjestelmän konservatiivisesti arvioitu jäähdytystehon tarve on noin 278 W. Yhden kylmäpään jäähdytysteho 20 K lämpötilassa on 40 W, jolloin jäähdytysteho on riittävä, vaikka arvioitu tarve olisi liian alhainen. [17]

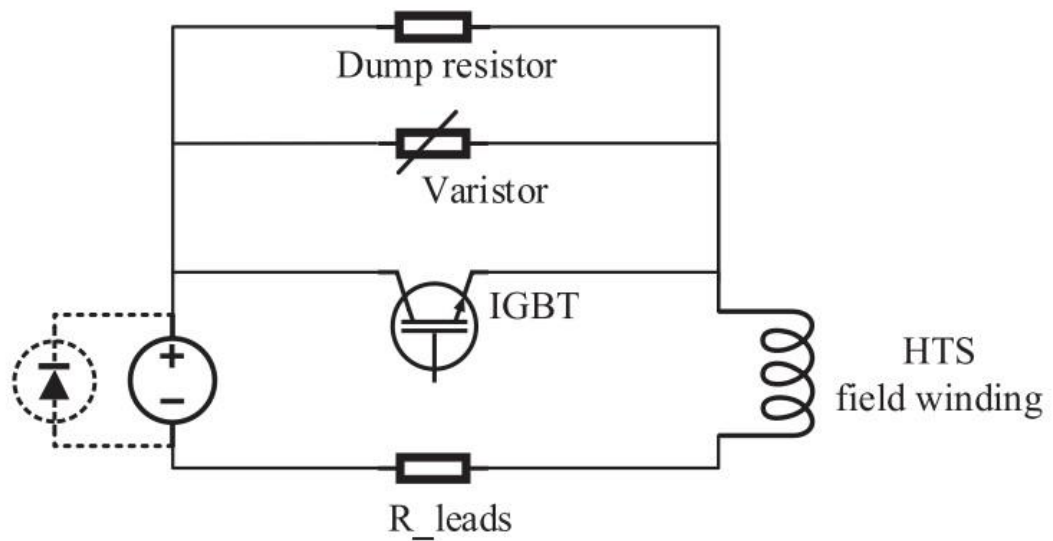


Kuva 13 Roottorin kiertoliitoskokoonpano [18].

5.5 Mittauslaitteisto ja quench-suojaus

Roottorin lämpötilaa tarkkaillaan 68 keraamisella lämpömittarilla, jotka sietävät hyvin voimakkaita magneettikenttiä ja tärinää. Jokaiseen napakäämiin on kytketty yksi lämpömittari. Lopuilla mittareilla tarkkaillaan tukirakenteiden, kylmäsiltojen ja virtajohtojen lämpötiloja. Lisäksi kahdessa napakäämissä on CERNOX-tyyppiset lämpömittarit sekä Hallanturit magneettivuon tiheyden mittaamiseen. [18]

Roottorin magnetointipiirin jännitettä tarkkaillaan neljän napakäämin välein sijoitetuista jännitteensäätäjistä, jotka on kytketty roottorin lämpimässä osassa sijaitseviin DAQ-kortteihin. Jännitteensäätäjät ovat ylijännitesuojattuja, jotta mittauslaitteiston toiminta ei häiriinny mahdollisen quenchin aikana. Quenchin havaitsemiseen käytetään sekä lämpötilan että jännitteiden arvoja. Järjestelmä vertailee näitä arvoja vierekkäisiin napakäämiin. Järjestelmän havaitessa quenchin, se aukaisee napoihin virtaa syöttävän IGBT:n pakottaen virran rinnankytkettyyn vastukseen suojaten käämejä. Napakäämin kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 15. [18]

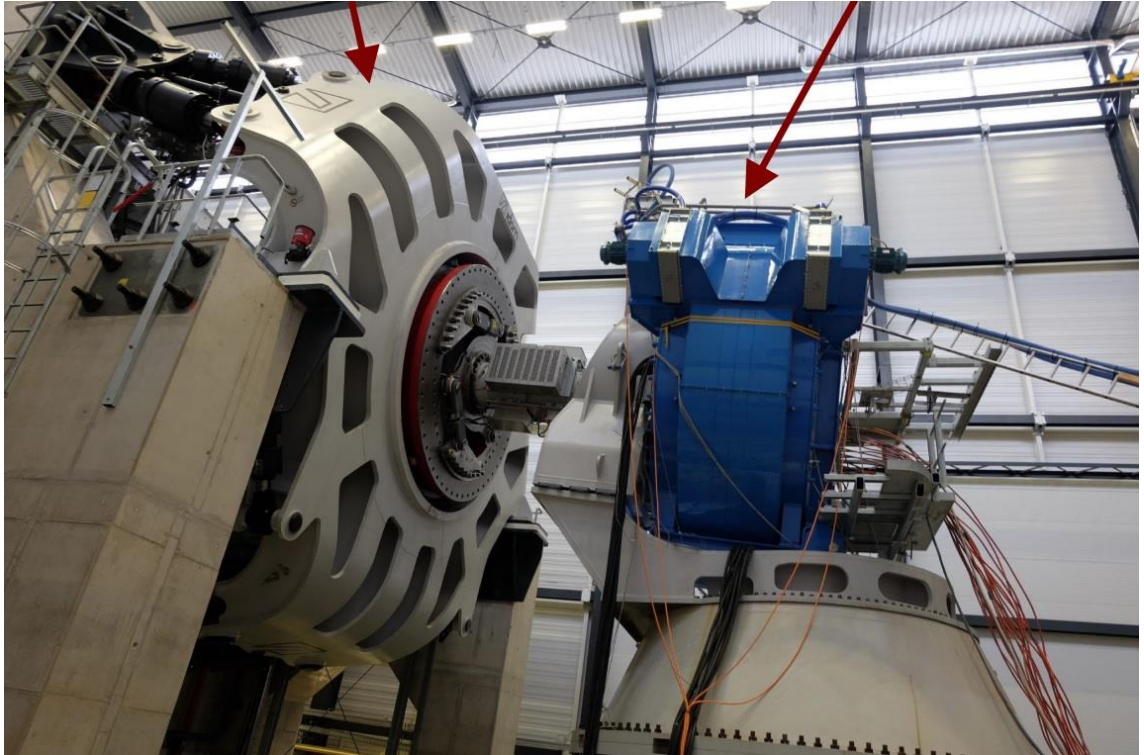


Kuva 14 Napakäämin kytkentäkaavio [20].

EcoSwing-projektissa toteutettiin maailman ensimmäisiä HTS-magneettien quenchin havainnointijärjestelmiä, jota käytetään pyörivässä roottorissa. Jännitteiden vertailuun perustuvaa menetelmää käytetään laajasti paikallaan olevissa LTS-magneeteissa ja sitä päätettiin käyttää myös tässä tapauksessa. Voimakkaat magneettikentät kuitenkin vaikeuttavat järjestelmän toimintaa. Quenchin havainnointi- ja suojauslaitteiston toimivuus on erittäin tärkeää suprajohdavissa järjestelmissä luotettavuuden varmistamiseksi. [18]

5.6 Laitoksella testaus

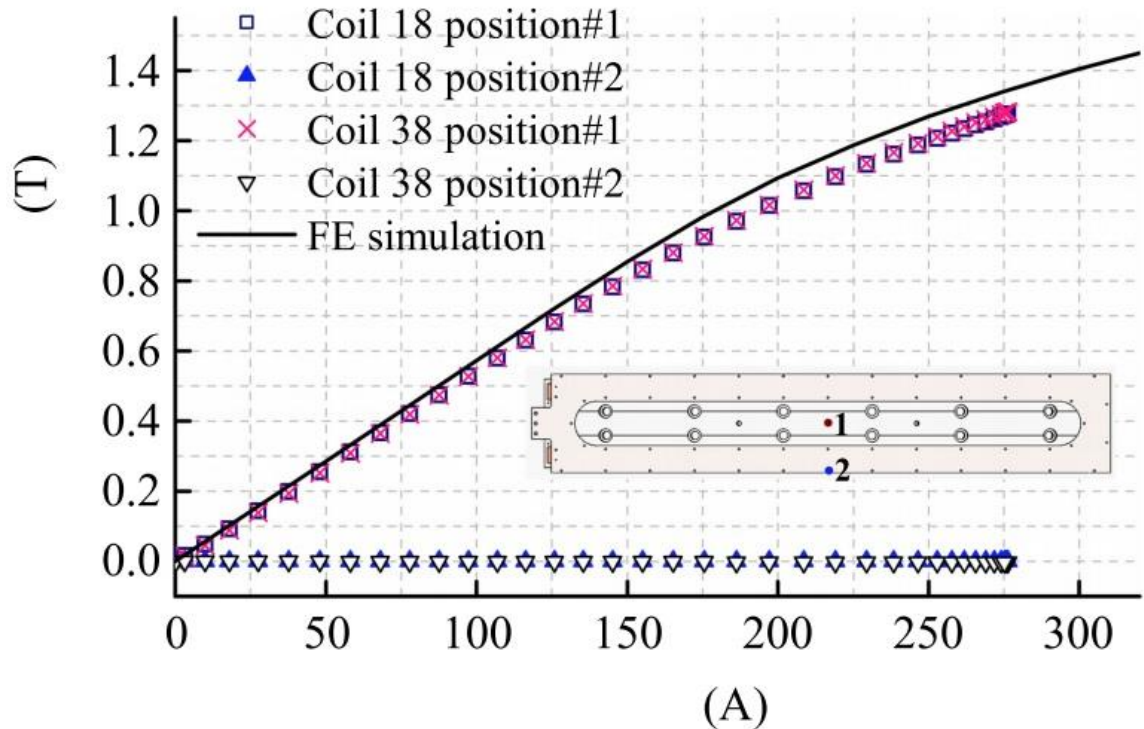
Kokoonpanon jälkeen valmista generaattoria testattiin kahdessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa generaattori asennettiin testipenkkiin Fraunhoferin IWES -laitoksella. Testipenkki on esitettyä kuvassa 16. Laitoksella voidaan simuloida oikean tuulivoimalan olosuhteita ja tehdä tarvittavia muutoksia järjestelmään. Laitoksella testattiin roottorin jäähdytystä operointilämpötilaan, napakäämien magnetointia, quenchin havainnointilaitteistoa sekä tehtiin tyhjäkäynti-, oikosulku- ja tehontuotantokokeet. [20]



Kuva 15 Generaattori testipenkissä IWES laitoksella [20].

Roottorin jäähdytys operointilämpötilaan kesti 14 päivää, joka sisälsi sen nostoon kulu-
neen ajan. Mallinnuksessa jäähdytyksen arvioitiin kestävän 18 päivää, joten jäähdytys
toimi odotettua paremmin. Roottorin ollessa paikallaan käämeissä saavutettiin 20–22 K
lämpötila, joka oli 30 K tavoitelämpötilaa parempi tulos. Kaikissa napakäämeissä nähtiin
niiden odotettu muutos suprajohdaviksi. Roottorien pyöriessä napakäämien lämpötila
laski edelleen noin 2,5 K alemmaksi. Tämä johtuu kylmäpäiden asennon vaikutuksesta
niiden jäähdytystehoon, jolloin lämpötilat tasaantuivat roottorin pyöriessä. [20]

Napakäämien magnetointia testattiin vaiheittain. Aluksi käämeihin syötettiin 42 A virta,
jotta quenchin havainnointilaitteisto saatiin kalibroitu. Tämän jälkeen käämeihin syötet-
tyä virtaa nostettiin asteittain 275 A asti. Kuvassa 17 nähdään magneettivuon tiheyden
kasvu, kun virtaa nostettiin. Saavutetut magneettivuon tiheydet ovat huomattavasti suu-
rempia kuin perinteisten magneettien noin 1 T arvot. Kaikkien käämien lämpötilat pysyi-
vät tasaisena testin aikana. [20]



Kuva 16 Napakäämien magnetointi [20].

Tyhjäkäyntikokeen lopussa yhdessä napakäämissä tapahtui quench magnetointivirran ollessa 282 A. Quenchin aikana käämin lämpötila nousi 4,5 K:llä ja se ehti vaurioitua, sillä suojauslaitteisto ei toiminut tarpeeksi nopeasti signaalihäiriöiden takia. Myöhemmissä tutkimuksissa käämin havaittiin olleen heikkolaatuinen ja sen kriittisen virran arvo oli vaadittua alempi. Vaurioitunut käämi vaihdettiin uuteen myöhemmissä testeissä. [20]

Vaurioituneesta käämistä johtuen tehontuotantoa voitiin testata vain osittaisella kuormalla. Roottorin magnetointivirran ollessa 130 A ja pyörimisnopeus 14.5 rpm generaattorin tehon tuotanto oli 1 MW. Generaattorin testaus onnistui kokonaisuudessaan hyvin ja seuraavaksi se voitiin asentaa tuulivoimalaan. [20]

5.7 Tuulivoimalaan asennus

Toisessa testivaiheessa generaattori asennettiin jo olemassa olevaan tuulivoimalaan Thyborønissa Tanskassa. Generaattori asennettiin kaksilapaiseen GC-1 tuulivoimalaan, jonka roottorin halkaisija on 128 m. Tuulivoimalan kestmagneeteilla toimiva generaattori vaihdettiin uuteen suprajohdavaan generaattoriin. Generaattorien huomattava ko-koero nähdään kuvassa 18. Tuulivoimalaa testattiin kahdessa vaiheessa eri roottorin magnetointivirroilla. Ensimmäisessä vaiheessa roottorin ollessa paikallaan magnetointia testattiin 285 A virralla ja sen jälkeen roottorin pyöriessä tehontuotantoa testattiin 250 A

magnetointivirralla. Toisessa vaiheessa magnetointivirta oli roottorin paikallaan ollessa 380 A ja tehon tuotannossa 330 A. [21]



Kuva 17 Kestomagneettigeneraattorin (vasemmalla) ja suprajohdegeneraattorin (oikealla) kokoverailu [17].

Roottorin jäähditys tapahtui onnistuneesti ja sen operointilämpötila 30 K saavutettiin 12 päivässä. Tuulivoimalan tehonkulutus jäähdytysvaiheessa oli 75 kW, joka on vain 2 % tuulivoimalan 3,6 MW nimellistehosta. Käämien magnetoinnin testaus tehtiin onnistuneesti 285 A virralla. Tehontuotantoa testatessa quenchin havainnointilaitteisto säädettiin suodattamaan roottorin pyörimisen aiheuttamaa huomattavaa kohinaa signaalissa. Alemmalla 255 A magnetointivirralla tuulivoimala tuotti onnistuneesti sähkötehoa verkkoon 2 MW teholla 20 tunnin ajan. [21]

Toisessa vaiheessa käämit magnetoitiin onnistuneesti roottorin paikallaan ollessa 380 A virralla 8 tunnin ajaksi. Testin aikana käämien lämpötilat ja jännite-erot pysyivät tasaisena. Tehontuotantoa testattiin 330 A magnetointivirralla ja sen aikana saavutettiin hetkellisesti 3 MW:n teho roottorin pyörimisnopeuden ollessa 14 rpm. Testin aikana generaattorin muuntaja kuitenkin vaurioitui oikosulun takia, jolloin testit jouduttiin lopettamaan. [21]

Tuulivoimala oli kokonaisuudessaan kytkettynä verkkoon 650 h ajan tuottaen 600 MWh sähköenergiaa. Tuulivoimala on esitetty kuvassa 19. Generaattorin roottorin suoritus-

kyvyn perusteella 3,6 MW tehon arvioitiin olevan mahdollinen, jos generaattorin muuntajat saadaan optimoitua oikein. [21] Projekti osoitti suprajohdavan generaattorin soveltuvan tuulivoimaloiden käyttöön.



Kuva 18 EcoSwing tuulivoimala [16].

6. YHTEENVETO

Työn alkupuolella käsiteltiin lyhyesti suprajohteiden ja tuulivoiman teoriaa. Seuraavaksi käsiteltiin suprajohteiden hyödyntämistä tuulivoimalan generaattorissa, sen vaatimuksia ja kustannuksia. Viimeisessä osassa käsiteltiin EcoSwing mallivoimalaa, jossa työssä esiintyvää teoriaa sovellettiin käytännössä.

EcoSwing-projekti osoittaa suprajohteiden hyödyntämisen olevan teknisesti mahdollista tuulivoimalan generaattoreissa. Projektissa hyödynnettiin uusia korkean lämpötilan suprajohteita uusilla tavoilla. Projekti tehtiin yhteistyössä kaupallisten toimijoiden kanssa, jolloin generaattorin valmistamiseen liittyvien osien tuotantoa saatiin kehitettyä. Hankkeessa osoitettiin myös suprajohdettavien järjestelmien autonomisen toiminnan olevan mahdollista pitkälläkin aikavälillä.

Tulevaisuudessa suprajohteita käyttöä tuulivoimaloissa tulee kuitenkin vielä kehittää, jotta ne voivat aidosti kilpailla perinteisten voimaloiden kanssa. Hankkeessa tuli ilmi ongelmia muuntajien kanssa ja näiden optimointia tulee parantaa, jotta suprajohdegeneraattorin luotettavuus saadaan perinteisten generaattorien tasolle. Myös quenchin havainnoinnin huomattiin olevan ongelmallista ja tähän käytettävää laitteistoa tulee kehittää eteenpäin.

Suprajohteiden käytölle on kuitenkin huomattavaa potentiaalia tulevaisuudessa. Tuulivoiman kysyntä kasvaa jatkuvasti ja voimaloiden kokoa halutaan kasvattaa. Suurien yli 10 MW:n tehoisten tuulivoimaloiden rakentaminen erityisesti merellä on hyvin vaikeaa, jolloin suprajohteiden käyttäminen olisi hyödyllistä. Myös pienempien tuulivoimaloiden generaattoreita voidaan pienentää suprajohdeteknologialla, jolloin niiden kuljetus ja asennus helpottuu. Sarjatuotantisena suprajohdegeneraattorit voivat tulla myös halvemmaksi, kun materiaalikustannuksissa säästetään.

LÄHTEET

1. Delft D. v. 2012. History and significance of the discovery of superconductivity by Kamerlingh Onnes in 1911. *Physica C: Superconductivity*. 479: 30-35.
2. Ginzburg V. L. & E. A. Andryushin. 2004. *Superconductivity (Revised Edition)*. World Scientific. Singapore.
3. Kleiner R. & W. Buckel. 2016. *Superconductivity : An Introduction*. John Wiley & Sons, Incorporated. Weinheim.
4. Kresin V. Z., H. Morawitz & S. A. Wolf. 1993. *Mechanisms of Conventional and High Tc Superconductivity*. Oxford University Press. New York.
5. Bennemann K., J. B. Ketterson, K. H. Bennemann *et al.* 2008. *Superconductivity*. Springer Berlin Heidelberg.
6. Huebener R. P. 2019. The Path to Type-II Superconductivity. *Metals*. 9: 682.
7. Mikkonen R. 2014. *Suprajohtavuus Sähköverkossa -Luentomoniste*. Tampere University of Technology.
8. *Superconductors in the Power Grid : Materials and Applications*. 2015. Elsevier Science & Technology. Cambridge.
9. Low-Temperature Superconductors, verkkosivu Saatavissa (viitattu 10.12.2020) <https://nationalmaglab.org/magnet-development/applied-superconductivity-center/research-areas/low-temperature-superconductivity>.
10. Ventura G. & L. Risegari. 2008. *The Art of Cryogenics Low-Temperature Experimental Techniques*. Elsevier. Amsterdam ;.
11. Komusanac I., D. Fraile & G. Brindley. 2019. Wind energy in Europe in 2018. *WindEurope Business Intelligence*.
12. Shepherd W. & L. Zhang. 2011. *Electricity Generation using Wind Power*. World Scientific. London; Singapore.
13. Aki Korpela. 2014. *Tuulivoiman Perusteet*. Luentomoniste .
14. Haran K. S., S. Kalsi, T. Arndt *et al.* 2017. High power density superconducting rotating machines—development status and technology roadmap. *Supercond. Sci. Technol.* 30: 123002.
15. Liu D., H. Polinder, A. B. Abrahamsen *et al.* 2016. Comparison of superconducting generators and permanent magnet generators for 10-MW direct-drive wind turbines. *ICEMS*. : 1-6.
16. EcoSwing - Energy Cost Optimization using Superconducting Wind Generators, verkkosivu Saatavissa (viitattu 20.3.2020):<https://cordis.europa.eu/project/id/656024>.

17. Bergen A., R. Andersen, M. Bauer *et al.* 2019. Design and in-field testing of the world's first ReBCO rotor for a 3.6 MW wind generator. *Superconductor science and technology*. 32: urn:issn:0953-2048.
18. Song X., A. Bergen, T. Winkler *et al.* 2019. Designing and Basic Experimental Validation of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator. *TEC*. 34: 2218-2225.
19. Winkler T. 2019. The EcoSwing Project. IOP conference series. *Materials Science and Engineering*. 502: 12004.
20. Song X., C. Buhner, P. Brutsaert *et al.* 2020. Ground Testing of the World's First MW-Class Direct-Drive Superconducting Wind Turbine Generator. *TEC*. 35: 757-764.
21. Song X., C. Buhner, A. Molgaard *et al.* 2020. Commissioning of the World's First Full-Scale MW-Class Superconducting Generator on a Direct Drive Wind Turbine. *TEC*. 35: 1697-1704.