

Heikki Nivala

**SUPRAJOHTAVUUS
SÄHKÖENERGIATEKNIIKAN
SOVELLUTUKSISSA**

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Huhtikuu 2019

TIIVISTELMÄ

Heikki Nivala: Suprajohtavuus sähköenergiatekniikan sovellutuksissa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Sähkötekniikan koulutusohjelma
Huhtikuu 2019
Pääaine: Uusiutuvat sähköenergiateknologiat

Tässä työssä käsitellään suprajohtavuutta sähköenergiatekniikan sovellutuksissa. Työssä kerrotaan eri sovellusten toimintaperiaatteita, hyviä ja huonoja puolia sekä käsitellään muutamia käytännön toteutuksia.

Sähköenergiatekniikassa pyritään koko ajan tehokkaampiin ja taloudellisempiin ratkaisuihin. Mielenkiinnon kohdistuminen suprajohtavuuteen ja sen ominaisuuksiin on siis luonnollista. On myös sovelluksia, joissa suprajohtavuuden hyödyntäminen ei ole pelkästään tehokkuuden lisäämistä, vaan välttämätöntä.

Työn alussa käsitellään suprajohtavuutta ilmiönä, sekä suprajohtavuuden teoriaa. Tämän jälkeen kerrotaan erilaisista suprajohtavuutta hyödyntävistä sähköenergiatekniikan sovellutuksista ja niiden toiminnasta. Lopuksi käydään hieman läpi muita kuin sähköenergiatekniikan, kuten tietotekniikan ja lääketieteen, sovellutuksia.

Avainsanat: suprajohtavuus, SMES, kaapeli, laakeri, sähkökone, virranrajoitin, ITER, CERN

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO.....	1
2. SUPRAJOHTAVUUDEN TEORIA.....	2
2.1 I-LAJIN JA II-LAJIN SUPRAJOHTEET	3
2.2 MATALAN JA KORKEAN LÄMPÖTILAN SUPRAJOHTEET	5
2.3 SUPRAJOHTIMET JA NIISSÄ KÄYTETTÄVÄT MATERIAALIT	6
3. SUPRAJOHTAVUUS SÄHKÖENERGIATEKNIKASSA.....	8
3.1 KAAPELIT	8
3.2 MOOTTORI JA GENERAATTORI	9
3.3 VAUHTIPYÖRÄ JA LAAKEROINTI	10
3.4 ENERGIAVARASTO	13
3.5 VIRRRANRAJOITIN	14
3.6 ITER.....	16
4. MUITA KÄYTTÖKOHTEITA.....	18
5. YHTEENVETO.....	21
LÄHTEET.....	22

1. JOHDANTO

Tämän päivän yhteiskunta on riippuvainen sähköstä. Sähköenergiaa tarvitaan yhä enemmän ja sitä tulisi tuottaa mahdollisimman tehokkaasti ja päästöttömästi. Myös häviöitä tulisi pienentää kaikilla osa-alueilla aina sähkön siirrosta varastointiin, tuotantoon ja kulutukseen.

Suprajohtavuus on aineen ominaisuus, jossa sähkövastus häviää kokonaan. Suprajohtavuuden ongelmana on, että se vaatii todella matalan, korkeimmillaankin alle 140K, lämpötilan. Jäähdyttäminen on usein hankalaa, ja se tapahtuu joko mekaanisesti niin kutsutulla kryojäähdyttimellä, nestejäähdytyksellä nesteheliumin, -neonin tai -typen avulla tai sekä jäähdytintä että nestettä hyödyntäen. Jäähdytysongelmista huolimatta motivaationa on, että suprajohteilla pystytään siirtämään tasavirtaa häviöttömästi ja suprajohteista pystytään tekemään hyvin voimakkaita magneetteja. Suprajohtavuus ja sen sovellukset ovat siis potentiaalinen keino energiatehokkuuden lisäämiseksi ja häviöiden vähentämiseksi tulevaisuudessa.

Suprajohtavuutta on tutkittu jo yli 100 vuotta. Markkinoilla on kaupallisia suprajohtavuuteen perustuvia laitteita, ja suunnitteilla on monia sovellutuksia sähköenergiatekniikan eri saroilla. Tässä työssä käsitellään erilaisia sähköenergiatekniikan sovellutuksia, joissa voidaan hyödyntää suprajohtavuutta, käydään läpi erilaisia käyttökohteita ja verrataan niitä perinteisiin vaihtoehtoihin.

Aluksi käydään läpi suprajohtavuuden taustaa ja tarkastellaan korkean ja matalan lämpötilan suprajohteita sekä jäähdytystä. Tämän jälkeen tutustutaan sovellutuksiin sähköenergiatekniikassa, niiden käyttökohteisiin ja toimintaan. Lopuksi tehdään lyhyt katsaus muihin suprajohtavuuden käyttökohteisiin esimerkiksi liikenteessä ja lääketieteessä, sekä yhteenveto.

2. SUPRAJOHTAVUUDEN TEORIA

Suprajohtavuus on aineen ominaisuus, jossa aineen sähkövastus häviää kokonaan ja havaitaan niin sanottu Meissner-ilmiö. Toisin sanoen suprajohteessa tasavirta kulkee häviöttömästi eikä ulkoinen magneettivuoto pääse tunkeutumaan aineeseen. Vaikka suprajohtavia materiaaleja on hyvin monia, vain muutamat niistä ovat ominaisuuksiltaan käytäntöön soveltuvia. [1]

Suprajohtavuuden havaitsi ensimmäisenä hollantilainen Heike Kamerlingh Onnes vuonna 1911. Hän tutki muun muassa resistiivisyyden käyttäytymistä matalissa lämpötiloissa sekä kaasujen nesteytymistä. Onnes oletti sähköisen resistiivisyyden alenevan absoluuttiseen nollopisteeseen saakka, missä resistiivisyys saavuttaisi minimiarvonsa. Tutkiessaan elohopean resistiivisyyttä resistanssi hävisi kuitenkin kokonaan 4,15 kelvinin lämpötilassa, ja Onnes havaitsi suprajohtavuuden.[1]

Parikymmentä vuotta myöhemmin, 1930-luvulla, saksalaiset tutkijat Walther Meissner ja Robert Ochsenfel huomasivat, ettei magneettikenttä pääse tunkeutumaan suprajohtavan materiaalin sisään. Suprajohteet ovat siis täydellisiä diamagneetteja. Tämä ei sinällään tee suprajohteesta erityistä, koska ilmiön pystyy perustelemaan äärettömällä sähkönjohtavuudella, jolloin magneettivuoto johteessa pysyy vakiona. Erikoisuutena suprajohteilla on, että kun suprajohtava aine jäähdytetään suprajohtavaan tilaan, suprajohteen läpäisevä magneettivuoto katoaa johteesta. Tätä havaittua ilmiötä kutsutaan Meissner-ilmiöksi. [2] Täydellinen Meissner-ilmiö voidaan havaita niin sanotuissa I-lajin suprajohteissa.

Suprajohtavuus ilmiönä pystyttiin selittämään vasta 1957, kun amerikkalaiset fyysikot John Bardeen, Leon Cooper ja John Schrieffer julkaisivat BCS-teorian. BCS-teorian mukaan suprajohtavassa aineessa kaksi elektronia kytkeytyvät toisiinsa positiivisten ionien välityksellä ja muodostavat niin sanotun Cooperin parin, joka pystyy kuljettamaan varausta häviöttömästi.[3] Cooperin pari syntyy, kun elektroni poikkeuttaa atomeja hilassa, ja näin aiheuttaa hilaan paikallisen positiivisen varauksen. Tämä positiivinen varaus vetää puoleensa toista elektronia, jolla on päinvastainen spin ja samansuuruinen magneettinen momentti. Näin kahden elektronin kineettinen energia kasvaa, mutta potentiaali- ja kokonaisenergia pienenevät. Näin syntyy niin sanottu energia-aukko, kun elektroniparin energiataso asettuu alhaisemmaksi kuin normaalitilan alhaisin energiataso. Tämä energia-aukko on suuruudeltaan sama kuin energia, joka tarvitaan Cooperin parin hajottamiseen. [4] BCS-teoria ei kuitenkaan selitä suprajohtavuutta aukottomasti korkean lämpötilan suprajohteissa.

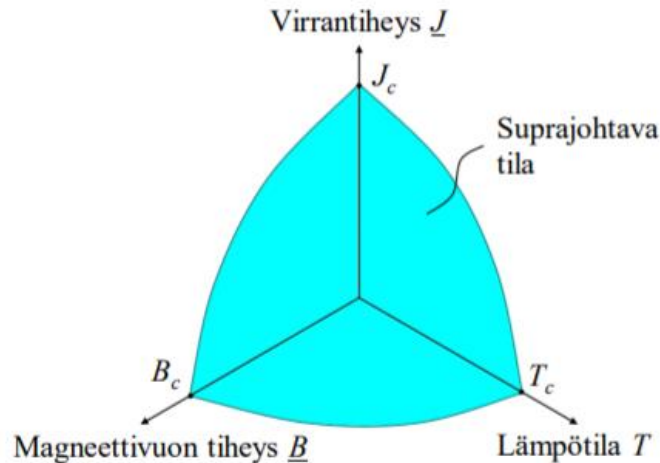
Seuraava merkittävä ilmiö, Josephsonin ilmiö, löytyi 1960-luvun alussa, kun Brian D. Josephson ennusti sähkövirran pystyvän etenemään kahden suprajohteen välillä jopa silloin, kun johteet on erotettu resistiivisellä materiaalilla tai eristeellä. [3] Tällaista rakennetta, jossa suprajohteiden välissä on ohut eristekerros, kutsutaan Josephson-liitokseksi. Cooperin parit havaitsevat eristeen kvanttimekaanisena potentiaalivallina, jonka läpi paria kuvaava aaltofunktio tunneloituu. Rakeisessa korkean lämpötilan suprajohteessa rakeiden välisten rajapintojen voidaan ajatella olevan virran kulkua rajoittavia Josephson-liitoksia. Cooperin parit, jotka eivät läpäise rajapintaa, jäävät kiertämään rakeen sisälle. Toisin sanoen rakeisiin jää kiertämään virta, minkä seurauksena rakeessa oleva virrantiheys on suurempi kuin kuormitusvirrantiheys. [1]

Suprajohteet voidaan jakaa kahteen luokkaan niiden ominaisuuksien tai kriittisten suureiden mukaan. Kriittisen lämpötilan mukaan suprajohteet voidaan jakaa matalan (LTS) ja korkean (HTS) lämpötilan suprajohteisiin, ja ominaisuuksien mukaan I-lajin ja II-lajin suprajohteisiin. Tutustutaan ensin kriittisiin suureisiin, ja niiden kautta I- ja II-lajin

suprajohteiden ominaisuuksiin. Sen jälkeen erotellaan matalan- ja korkean lämpötilan suprajohteet.

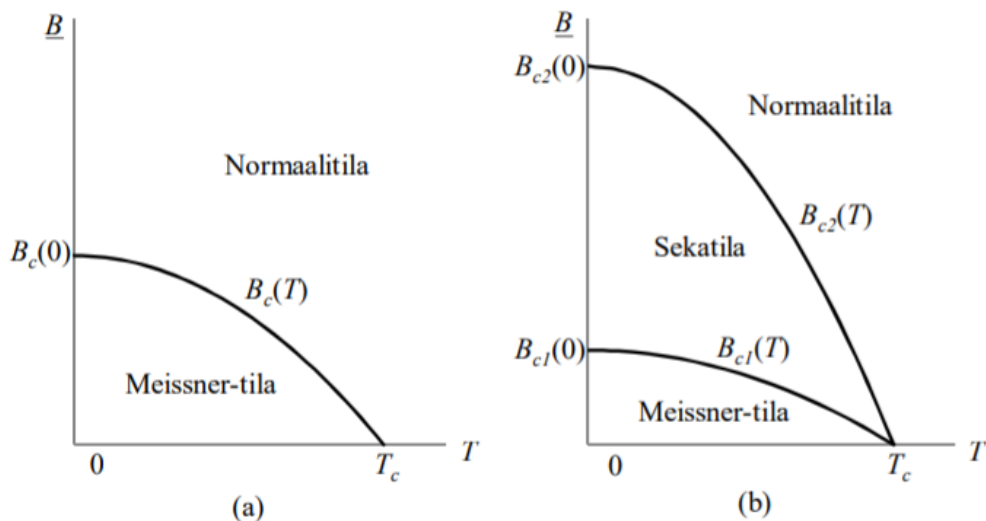
2.1 I-lajin ja II-lajin suprajohteet

Suprajohteen kriittisiä suureita ovat lämpötila T_c , magneettikentän voimakkuus H_c (tai magneettivuontiheys B_c) ja virrantiheys J_c . Kriittiset suureet riippuvat toisistaan, ja kun jokin näistä suureista ylittyy, johde menettää suprajohtavan tilansa. [1] Kuvassa 1 on esitetty niin sanottu suprajohtava pinta, eli kriittisten suureiden määrittämä alue, jossa materiaali on suprajohtavassa tilassa.



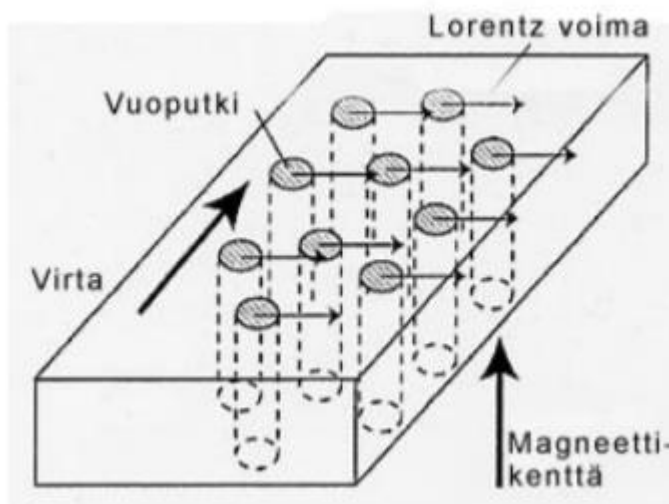
Kuva 1: Suprajohtavan tilan ja normaalitilan välinen J - B - T -rajapinta [4].

Kuvasta 1 nähdään suprajohtavan tilan riippuvuus kriittisistä suureista. Korkein lämpötila, jossa suprajohtava tila voidaan saavuttaa, on siis kriittinen lämpötila T_c , mutta tällöin kahden muun kriittisen suureen täytyy olla nolla. Kun lämpötilaa lasketaan edelleen, voidaan nostaa kahden muun suureen arvoa suprajohtavaa tilaa menettämättä. Kaksi muuta kriittistä suuretta toimivat samalla periaatteella. Poikkeuksena tähän on kriittinen magneettivuontiheys B_c II-lajin suprajohteissa, joissa kriittisen magneettivuontiheyden ylittyminen ei välttämättä tarkoita suprajohtavan tilan menettämistä. [4] I-lajin ja II-lajin suprajohteiden käyttäytymistä magneettikentässä on havainnollistettu kuvassa 2.



Kuva 2: Kriittiset magneettivuontiheydet lämpötilan funktiona I-lajin (a) ja II-lajin (b) suprajohteille. [4]

Kuten kuvasta 2 nähdään, I-lajin suprajohteilla pysytään Meissner-tilassa, jossa Meissner-ilmio havaitaan, kun ei yliteta kriittisen magneettivuontiheyden kayraa. Tama kriittinen magneettivuontiheys jaa tyypillisesti arvoltaan alle 0,1 Teslan, minka vuoksi I-lajin johteet eivat juurikaan sovi kaytettavaksi magneettisovelluksissa. II-lajin suprajohteisiin siirryttaessa ei kriittinen magneettivuontiheys ole enaa yksiselitteinen, vaan materiaalille loydetaan kaksi ominaista kriittista magneettivuontiheytta B_{c1} ja B_{c2} . [4] Magneettivuontiheyden ollessa pienempi kuin B_{c1} Meissner-ilmio suprajohteessa on taidellinen, mutta kyseisen arvon ylittyessa magneettikentta alkaa tunkeutua materiaaliin normaalijohteisia vuoputkia pitkin. Suprajohtava tila menetetaan vasta arvon B_{c2} ylittyessa. Tallaista valilla $B_{c1} < B < B_{c2}$ olevaa sekatilaa kutsutaan Schubnikov-tilaksi. [1] Schubnikov-tilaa havainnollistaa kuva 3.



Kuva 3: Vuoputket II-lajin suprajohteessa. [1]

Kuvassa 3 magneettikentta kulkee suprajohteen lapi vuoputkissa. Virran kulkiessa suprajohteessa kohtisuorassa magneettikenttaa vastaan syntyy niin sanottu Lorentz-voima, joka on kohtisuorassa sekä virtaa että magneettikenttaa vastaan. Lorentz-voiman seurauksena vuoputket alkavat liikkua johteessa, ja nopeudella \vec{v} liikkuva magneettikentta synnyttää materiaaliin sähkökentän \vec{E} , jolla on vastakkainen komponentti virrantiheyteen nähden. Vuoputkien liike siis vastustaa johteessa kulkevaa virtaa. [1]

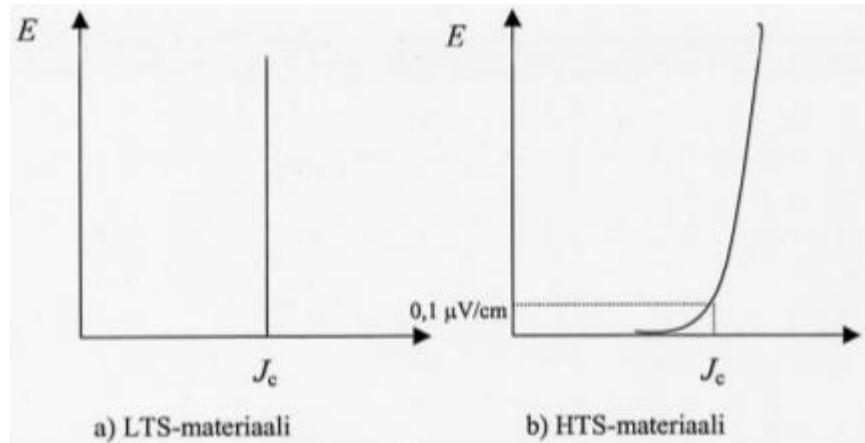
II-lajin suprajohteissa vuoputket takertuvat materiaalin epäpuhtauksiin. Suprajohteeseen siis voidaan tarkoituksella lisätä kidevirheitä ja epäpuhtauksia, joihin vuoputket takertuvat, eivätkä pääse liikkumaan. Tällaisia kohtia sanotaan pinning-keskuksiksi. Pinning-keskuksessa vuoputkeen vaikuttaa Lorentz-voiman lisäksi paikallaan pitävä pinning-voima, ja kun nämä kaksi vastakkaisista voimaa ovat yhtä suuret, johdin on kriittisessä tilassa. [1]

2.2 Matalan ja korkean lämpötilan suprajohteet

Suprajohteet voidaan jakaa matalan ja korkean lämpötilan suprajohteisiin, jotka poikkeavat toisistaan kriittisen lämpötilan lisäksi myös muun muassa suprajohtavasta tilasta normaalitilaan tapahtuvan transition suhteen. Tätä transitiota voidaan kuvata potenssilaililla

$$\bar{E}(\bar{J}, \bar{B}) = E_c \left(\frac{\bar{J}}{J_c(\bar{B})} \right)^{n(\bar{B})}, \quad (1)$$

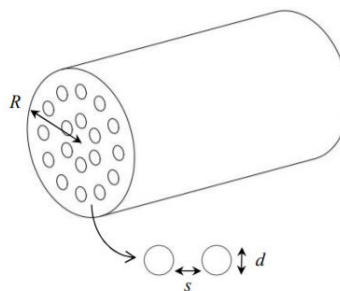
missä E_c on johtimen sähkökenttä kriittisellä virrantiheydellä J_c ja eksponentti n materiaalikohtainen vakio, joka kuvaa transition jyrkkyyttä. LTS-materiaaleilla transiatio on jyrkkä, ja n :n arvo on luokkaa 40-70. HTS-materiaaleilla transiatio suprajohtavan tilan ja normaalitilan välillä on loiva ja n :n arvo on luokkaa 10-15. [1] Kuva 4 havainnollistaa eroa transitioiden välillä.



Kuva 4: LTS- ja HTS-materiaalien transitioiden ideaaliset $E(J)$ -kuvaajat [1]

Yhtälöstä (1) ja kuvasta 4 havaitaan suuremman n :n arvon tarkoittavan jyrkempää transitiota tilojen välillä. Lisäksi HTS-materiaalin kuvaajasta (kuva 4 b) nähdään, että HTS-materiaalissa sähkökenttää syntyy jo ennen kriittisen virrantiheyden saavuttamista, ja materiaali kestää hetkellisesti kriittistä virrantiheyttä suurempia arvoja. Kriittisen virran määrittäminen HTS-materiaalille on haastavaa, ja yleensä se määritelläänkin vastaamaan jotain tiettyä sähkökentän arvoa, kuten kuvassa 4 arvoa $E_c = 0,1 \mu\text{V}/\text{cm}$.

Matalan lämpötilan suprajohteet toimivat alle 30 K:n lämpötiloissa. Hyvin alhaisesta lämpötilasta johtuen niiden jäädyttämisessä käytetään nestemäistä heliumia, tai mekaanista jäädytyslaitteistoa eli kryojäädytintä [8]. Rakenteeltaan LTS- johtimet ovat tyypillisesti komposiittijohtimia. Ne koostuvat ohuista suprajohtavista säikeistä eli filamenteista, jotka on upotettu matriisimetalliin. Matriisimetallin tarkoitus on tukea johdinta mekaanisesti ja toimia sekä termisenä että sähköisenä stabiliaattorina häiriötilanteessa. Yleisimmin käytetty matriisimetalli on kupari, mutta sitä voidaan korvata myös esimerkiksi alumiinilla. Filamenttien määrä johtimessa vaihtelee käyttötarkoituksen mukaan kymmenistä jopa kymmeniin tuhansiin. Johdinta suunniteltaessa tärkeimmät suuret ovat johtimen säde R , filamenttien halkaisija d sekä filamenttien keskinäinen etäisyys s . [1] Kuvassa 5 on periaatekuva komposiittijohtimesta.



Kuva 4: Komposiittijohtimen poikkileikkaus ja tärkeimmät suuret [4]

HTS-materiaalit saavuttavat suprajohdavan tilan korkeammissa, jotkin jopa yli 100 kelvinin lämpötiloissa, mikä helpottaa jäädyttämistä [8]. Näin korkeissa lämpötiloissa tosin harvoin pysytään, ja tyypillisemmin operointilämpötila on materiaalin ominaisuuksista riippuen 20-30 K tai nestetypellä jäädytettäessä 77 K. Ongelmana korkean lämpötilan suprajohdemateriaaleissa on, että ne ovat rakenteeltaan keraameja ja siksi hauraita, joten niistä on vaikea valmistaa laadukasta johdinta. HTS-materiaalin sähkömagneettinen käyttäytyminen on myös perinteistä niobi-pohjaista materiaalia huonompaa. Virrantiheyksiä saadaan tosin kasvatettua, jos johtimeen ei vaikuta ulkoista magneettikenttää tai jos johdin jäädytetään nesteheliumin lämpötilaan. Ja toisaalta kun lämpötila ja virrantiheys johtimessa lähestyvät nolaa, johtimen kriittinen magneettivuon tiheys voi olla lähes 150 T. [1]

2.3 Suprajohdintimet ja niissä käytettävät materiaalit

Vaikka lukuisilla materiaaleilla voidaan päästä suprajohdavaan tilaan, vain harvat niistä ovat ominaisuuksiltaan käytännön sovelluksiin sopivia. Kun materiaaleja karsitaan kriittisten suureiden, hinnan ja johtimeksi sopivuuden mukaan, jäljelle jää kuusi yleistynyttä suprajohdemateriaalia. Nämä materiaalit ja niiden toimintapisteet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1: Yleisimmät suprajohdemateriaalit [1] [5]

Materiaali	Lyhenne	Tyyppi	Toimintapiste	Hinta (\$/kAm) (2015)
Niobititaani	NbTi	II	8 T / 4K 2 T / 4K	0,5
Niobitina	Nb ₃ Sn	II	12 T / 4 K 21 T / 2 K 2 T / 8 K	3-7
Magnesiumdiboridi	MgB ₂	II	1 T / 25 K 2 T / 4 K 2 T / 20 K	7 20
Yttriumbariumkuparioksidi	YBCO	II	0 T / 77 K 5 T / 20 K 2 T / 4 K 2 T / 30 K	50 150
Vismuttistrontiumkalsiumkuparioksidi	Bi-2223	II	0 T / 77 K 25 T / 4 K 2 T / 30 K	125
	Bi-2212	II	0 T / 77 K 25 T / 4 K	

Taulukosta 1 nähdään, että yleisimmät suprajohdemateriaalit ovat kaikki II-tyyppiä. Kriittisten suureiden mukaan materiaalia voidaan käyttää eri toimintapisteissä eri tarkoituksiin. Myös johtimen hinta riippuu siitä, millaiseen käyttöön se on optimoitu.

Taulukossa 1 esitetyistä materiaaleista YBCO:sta konstruoidaan ohutkalvojohdinta menetelmällä, jota kutsutaan ohutkalvon kasvattamiseksi. Siinä ohutkalvon materiaali siirretään atomitasolla kohtiolta kasvatusalustalle niin, että aineen atomaarinen rakenne ei muutu. Tähän on kaksi menetelmää. Ensimmäinen on niin kutsuttu sputterointi, jossa pommitetaan kasvatusalustan päälle asetettua kohtiota argonioneilla. Toinen tapa on laserablaatiomenetelmä. Siinä kasvatusalustan päällä olevaa kohtiota ammutaan laserilla, jonka aallonpituus on 200-300 nm. Laser kuumentaa kohtiota, mutta ei saa

sulattaa sitä. Valmistusprosessissa tulee olla hyvin huolellinen, mikä johtaa siihen, että se on hidas ja vaatii investointeja. [1]

Taulukossa 1 esitetyistä materiaaleista Bi-pohjaisista sekä MgB_2 :sta valmistetaan johtimia niin sanotulla PIT-menetelmällä (Powder in Tube). Siinä hienojakoinen suprajohdepulveri sijoitetaan matriisimetallista valmistetun putken sisään, mikä sitten vedetään johtimeksi. Tällä tavoin saadut yksittäiset johtimet sijoitetaan uuden putken sisään, jota sitten vetämällä saadaan aikaiseksi monifilamenttijohdinta. Anisotrooppiset eli kiderakenteen ominaisuuksilta epäsymmetriset materiaalit valssataan usein ohuiksi ja teippimäisiksi, mikä vähentää anisotrooppisuudesta syntyviä haittoja.

3. SUPRAJOHTAVUUS SÄHKÖENERGIATEKNIKASSA

Suprajohtavuudella on useita potentiaalisia sovelluskohteita sähköenergiatekniikassa. Tutkittavia käyttökohteita ovat muun muassa kaapelit, muuntajat, moottorit ja generaattorit, energiavarastot, vauhtipyörät ja vikavirran rajoittimet. Yhteistä näissä sovellutuksissa kuitenkin on, että yleistyäkseen niiden täytyy olla käytäntöön soveltuvia, luotettavia ja taloudellisia.

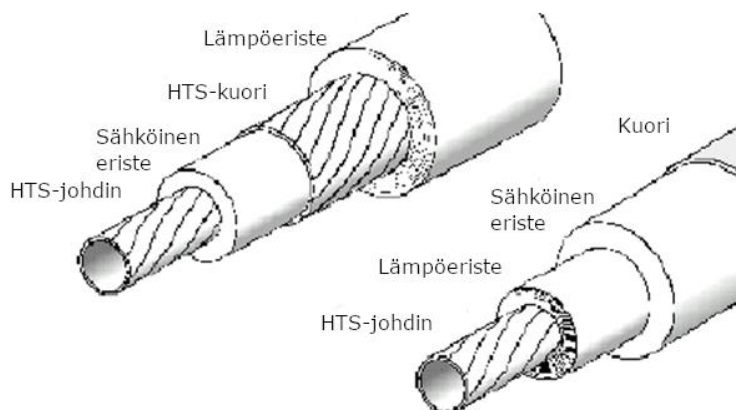
Suprajohtavuuden hyödyntämispotentiaali voidaan jakaa kahdentyyppisiin sovellutuksiin. Niihin, joissa suprajohtavuus on välttämätöntä ja niihin, joissa suprajohtavuuden täytyy kilpailla perinteisen konventionaalisen vaihtoehdon kanssa. Näistä ensimmäiseen kuuluu muun muassa fuusiojärjestelmät, sähkömagneettinen energiavarasto ja vikavirtarajoittimet. Jälkimmäiseen taas voidaan lukea esimerkiksi kaapelit ja erityyppiset sähkökoneet. Aloitetaan tarkastelu näistä konventionaalisten ratkaisujen kanssa kilpailevista sovellutuksista.

3.1 Kaapelit

Sähköenergiaa voidaan suuressa mittakaavassa siirtää ainoastaan johdoissa. Siirrettävät sähkötehot ovat tänä päivänä suuria, ja koko ajan sähköistyvän yhteiskunnan tehontarve vain kasvaa. Tämä johtaa siihen, että sähköverkkoa joudutaan rakentamaan lisää, mikä on sekä kallista että hankalaa suurissa asutuskeskuksissa.

Yhtenä ratkaisuna tehonsiirto-ongelmiin tulevaisuudessa on suprajohtavat kaapelit. Suprajohtavilla kaapeleilla on monia etuja perinteisiin kaapeleihin verrattuna, joista tärkeimmiksi nousee suuri virransiirtokapasiteetti ja pienet tehohäviöt. Tänä päivänä HTS-kaapelilla voidaan siirtää sähköä 3-5 kertaa enemmän kuin samanpaksuisella kuparikaapelilla, ja häviöt jäävät silti murto-osaan [1]. Tämä motivoi suprajohtavuuden hyödyntämiseen erityisesti suurjänniteverkoissa.

Suprajohtavia kaapeleita on kahdenlaisia; RTD- (Room Temperature Dielectric) ja CD-kaapeleita (Cold Dielectric). Jälkimmäisessä lämmöneriste on sähköisen eristeen ulkopuolella, ja edellisessä lämpöeriste on sähköisen eristeen sisäpuolella. Verkkoon integroitavissa kaapeleissa suurempi potentiaali on korkean lämpötilan suprajohteilla, ja johdinmateriaalin osalta mielenkiinto on YBCO-johtimissa sekä Bi-2223 -yhdisteissä [1]. Tähän on syynä kaapelin jäähditys. Kaapelien rakenteet näkyvät kuvassa 4.



Kuva 4: Suprajohtokaapelit. CD-kaapeli vasemmalla ja RTD-kaapeli oikealla. [9]

HTS-kaapeli koostuu jäähdytysjärjestelmän lisäksi viidestä pääkomponentista. Sisimpänä kaapelissa on kehys, jonka sisällä nestetyyppi virtaa. Kehyksen ulkokuorella on spiraalin muotoon kierretty suprajohdenauha. Lisäksi kaapelissa tulee olla lämpöeriste, sähköinen eriste ja kuori. [1]

HTS-kaapelin etuna on, että sitä voidaan käyttää pienemmillä jännitteillä ja suuremmilla virroilla kuin perinteisiä kaapeleita, mikä mahdollistaa muuntajien vähentämisen. Muuntajat voidaan myös sijoittaa kauemmas asutuskeskuksista, edullisemmille tonteille. Lisäksi suprajohtava kaapeli toimii itsessään vikavirtojen suodattimena, koska se menettää suprajohtavan tilansa kriittisen virran ylittyessä. [1]

Suprajohtavia kaapeleita on jo jonkin verran integroituna sähköverkkoon, joskin vain lyhyitä yksikköpituuksia. Yksi pisimmistä suprajohdekaapeleista on Essenissä, Saksassa. Se on kilometrin mittainen HVDC-kaapeli (High-Voltage Direct Current), jonka kapasiteetti on 6,4 gigawattia. [10] Nämä integroidut kaapelit toimivat testikappaleina, sillä niistä saadaan paljon tietoa kaapelin toiminnasta käytännön ongelmatilanteissa ja luonnonolosuhteissa. Tulevaisuudessa suprajohtavien kaapelien suurin potentiaali on kaupunkiolosuhteissa, missä suuri tehotiheys on tärkeää. Toinen potentiaalinen hyödyntämiskohde on sähköntuotantoyksikön ja muuntajan välillä, koska kyseisellä matkalla tehohäviöt voivat nousta hyvin suuriksi.

3.2 Moottori ja generaattori

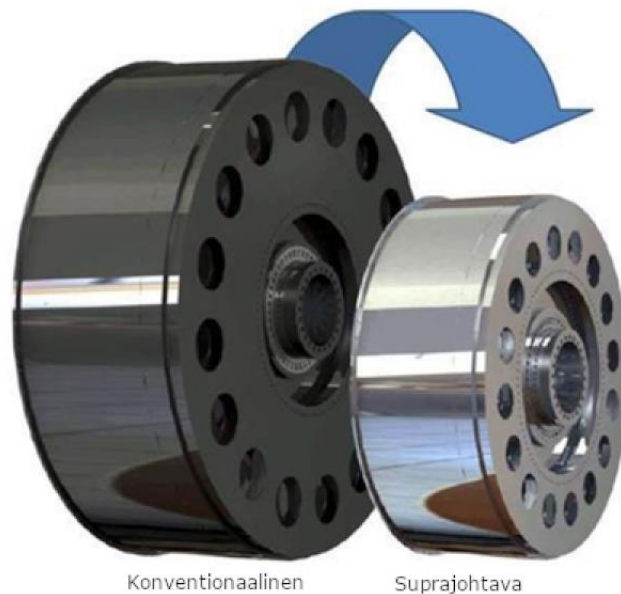
Moottorit ja generaattorit ovat sähkökoneita, joista sähkögeneraattori muuntaa mekaanista energiaa sähköksi, ja moottori sähköenergiaa mekaaniseksi energiaksi magneettikenttien avulla. Sähkökoneen paikallaan pysyvässä osassa eli staattorissa sijaitsee ulkoiseen verkkoon kytketty vaihtovirtakäämi, joka tuottaa koneeseen muuttuvan magneettikentän. Sen parina koneen pyörivässä osassa eli roottorissa on magnetointikäimitys. Magnetointikäimitys voidaan toteuttaa joko kestopagnetoinnilla tai sähköisellä magnetoinnilla, johon käytetään tasavirtaa. Suprajohtava on siis luonnollinen kiinnostuksen kohde magnetointikäimityksen suunnittelussa.

Suurissa moottoreissa ja generaattoreissa hyvä hyötysuhde on tärkeä. Erityisesti hyötysuhde korostuu generaattoreissa, jotka voivat toimia vuoden ympäri lähes keskeytyksettä, jolloin koneen häviöiden aiheuttamat kustannukset alkavat olla huomattavat. Pienempien häviöiden lisäksi toinen merkittävä suprajohtavuuden puoltaja on koko. Suprajohtava sähkökone on sekä mitoiltaan että massaltaan perinteistä konventionaalista moottoria huomattavasti pienempi. Hyvänä esimerkkinä tästä on vuonna 2008 konstruoitu 36,5 MW:n moottori, joka painaa noin 75 tonnia. Tätä voidaan verrata laivastossa käytetyn 20 MW:n induktiomoottorin painoon, joka on noin 89 tonnia. [1]

Tehotiheydensä ja hyötysuhteensa vuoksi suprajohtavia generaattoreita kehitetään muun muassa laivakäyttöön ja tuulivoimaloihin. Uusiutuvien energianlähteiden yleistyessä energiantuotannossa myös tuulivoimaloita rakennetaan koko ajan enemmän ja niiden teholuokkaa halutaan koko ajan kasvattaa. Perinteisesti tuulivoimalan generaattorissa käytetään joko sähköistä magnetointia, tai kestopagneetteja, jotka ovat raskaita ja yksikkökokojen kasvaessa myös kalliita. Tuulivoimalan generaattorin koon kasvaessa myös lapojen ja tornin koon täytyy kasvaa, mikä muodostuu ongelmaksi kasvavien kustannusten lisäksi myös käytännön toteutuksen kannalta.

Loppuvuodesta 2018 Tanskassa korvattiin 3,6 MW:n tuulivoimalan konventionaalinen generaattori suprajohtavalla generaattorilla. Tämä eurooppalainen EcoSwing-projekti on ensimmäinen, jossa tuotetaan sähköä suprajohtavuutta hyödyntävällä tuulivoimalalla. Sen magneeteissa on käytetty gadolinium-barium-kuparioksidi -teippiä (GdBaCuO) ja se

on jäädytetty 30 K lämpötilaan. Vaihdettu generaattori on sekä mitoiltaan että massaltaan noin 40% alkuperäistä pienempi. [11] Kuva 5 havainnollistaa kokoeroa.



Kuva 5: Konventionaalisen ja suprajohtavan generaattorin kokoero. [12]

3.3. Vauhtipyörä ja laakerointi

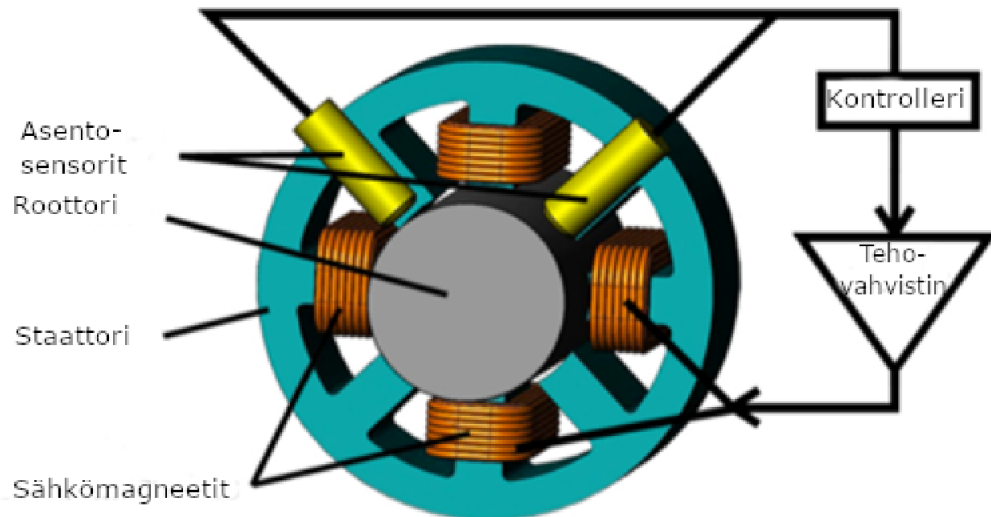
Vauhtipyörä on yleensä raskas pyörä, johon varastoituu energiaa, kun sitä pyöritetään akselinsa ympäri. Tätä hyödyntävä vauhtipyöräenergiavarasto FESS (Flywheel Energy Storage System) on omiaan lyhyiden energiapiikkien ja -vajausten tasaamisessa, sen nopean vasteajan ansiosta. Pyörään varastoituu energiaa liike-energiana E_v ja sen suuruus riippuu pyörimisnopeudesta ω yhtälön

$$E_v = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2)$$

mukaan, kun I on vauhtipyörän hitausmomentti, joka riippuu vauhtipyörän geometriasta ja massasta [1]. Vauhtipyörään varastoitunut energia on siis suoraan verrannollinen pyörän hitausmomenttiin ja pyörimisnopeuden neliöön. Laakerointi vaikuttaa näistä molempiin, ja on siis tärkeässä osassa vauhtipyörää suunniteltaessa.

Laakeroinnilla on vauhtipyörässä kaksi tehtävää; sen täytyy tukea liikkuvaa laakeroitua massaa ja pienentää kitkaa liikkuvien osien välillä. Vaikka liikkuvien osien kokemaa kitkavoimaa pystytään vähentämään laakeroinnilla, laakereissa olevissa mekaanisissa kontakteissa syntyy aina jonkin verran kitkahäviöitä. Erityisesti häviöiden vaikutus korostuu, kun vauhtipyörää käytetään energiavarastona pidemmän aikaa.

Kitkahäviöistä voidaan päästä lähes kokonaan eroon käyttämällä magneettilaakerointia. Magneettilaakeroinnissa ei ole fyysistä kontaktia pyörivän roottorin ja paikallaan pysyvän staattorin välillä, vaan roottori ja staattori hylkivät toisiaan magneettisten vuorovaikutusten seurauksena [13]. Kuvassa 6 on esitetty aktiivisen magneettilaakerin rakenne.

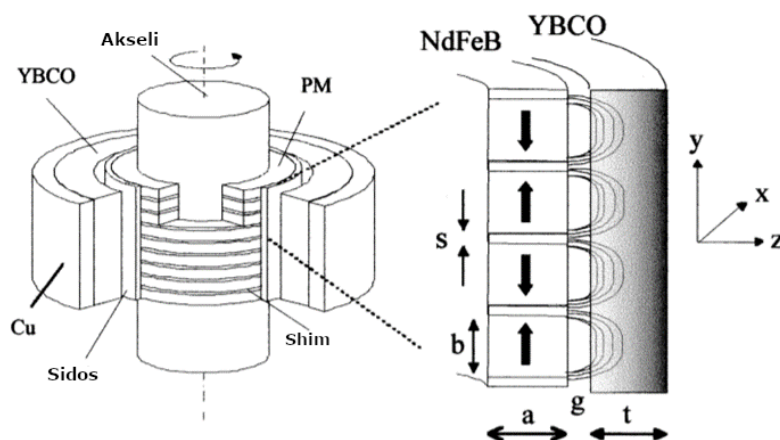


Kuva 6: Aktiivinen magneettilaakeri. [14]

Staattoriin aikaansaadaan sähkömagneettien avulla sen suuntainen magneettikenttä, että se hylkii roottorissa olevaa magneettikenttää. Staattorin magneetteja voidaan säätää siinä kiinni olevien sensorien perusteella. Tällainen aktiivinen magneettilaakeri ei kuitenkaan ole sinällään ongelmaton, vaan se menettää stabiilisuutensa välittömästi ohjausjärjestelmän sammuttua, minkä vuoksi se täytyy laakeroida myös mekaanisesti [1].

Magneettilaakeroinnit voidaan jakaa kahteen osaan; aktiiviseen ja passiiviseen magneettilaakerointiin. Kaupallisista toteutuksista suurin osa on toteutettu aktiivisella laakerointiperiaatteella, jonka heikkoutena on säätöjärjestelmän tehonkulutus ja monimutkaisuus. Passiivisessa magnetointilaakeroinnissa monimutkainen säätöjärjestelmä voidaan jättää pois. [1]

Passiivinen laakerointi voidaan konstruoida joko käyttämällä diamagneettista tai suprajohtavaa materiaalia, jolla voidaan toteuttaa stabiili levitaatio. Levitaatiossa suprajohteilla on merkittäviä etuja, sillä suprajohteissa esiintyvä Meissner-ilmiö on voimakkaampi, kuin diamagneettien levitaatiovaikutus. Tämän lisäksi korkean lämpötilan suprajohteilla esiintyvä pinning-ilmiö parantaa laakerin tukevuutta. [1] Kuvassa 7 on esitetty passiivinen radiaalinen suprajohtava laakeri.



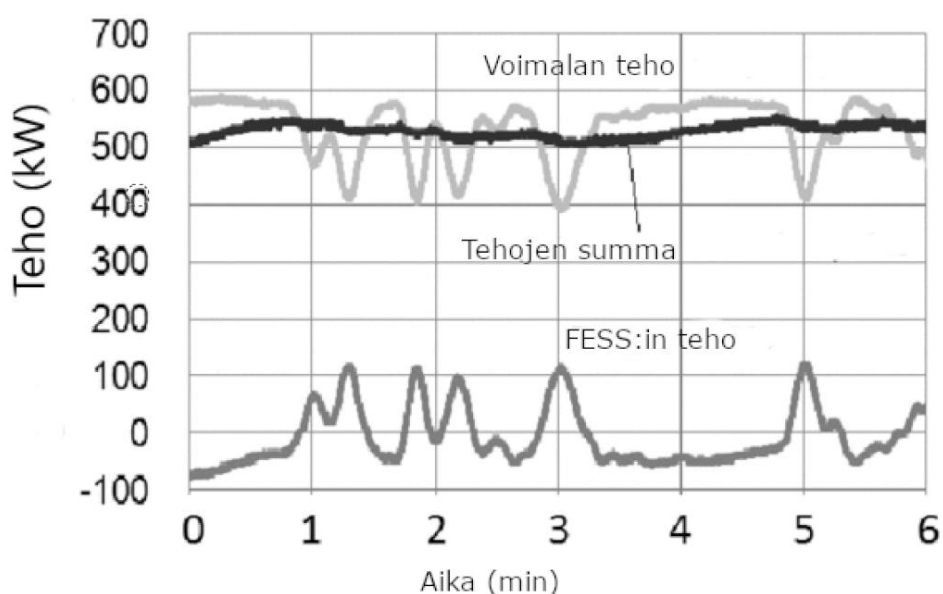
Kuva 7: YBCO:n ominaisuuksia hyödyntävä suprajohtava laakeri. [1]

Kuvassa keskellä on akseli, jossa on kiinnitettyä kestopagneetti (PM), jonka ympärillä staattorissa on suprajohtavasta materiaalista (YBCO) tehty magneetti. Tällä tavoin kryogeenistä jäädytystä vaativat osat on sijoitettu staattoriin, jolloin jäädyttäminen on helpompaa.

Mikäli magneettivuontiheys on ajan suhteen muuttumaton, suprajohtelaakerissa ei synny liikkeestä aiheutuvia häviöitä. Muuttuva magneettivuo sen sijaan aiheuttaa suprajohteessa magnesaatiohäviöitä, jolloin laakerin toiminta häiriintyy. Suprajohtavan laakerin suunnittelussa täytyy siis ottaa huomioon magneettikentän homogeenisuus liikesuunnassa tai pyörimisakselin ympäri. [1]

Vauhtipyöräsovelluksissa magneettilaakeroinnilla päästään aiempaa korkeampiin pyörimisnopeuksiin sekä pienempiin häviöihin. Suprajohtavalla magneettilaakeroinnilla voidaankin päästä hyötysuhteessa jopa 90%:n tasolle. Perinteisen laakerin korvaaminen magneettilaakerilla myös poistaa laitteesta yhden kuluosan, mikä vaikuttaa huoltokustannuksiin.

Maailmalla on käynnissä mielenkiintoisia FESS-kokeiluja. Yksi tällainen on Yamanashissa Japanissa, missä 300 kW:n vauhtipyörää käytetään tasaamaan 1 MW:in aurinkovoimalan verkkoon syöttämää tehoa. Vauhtipyörän halkaisija on 2 metriä, se painaa 4 tonnia ja sitä kannattelee suprajohtavat magneetit [15]. Kuvassa 8 nähdään FESS:in vaikutus voimalasta saatuun tehoon.



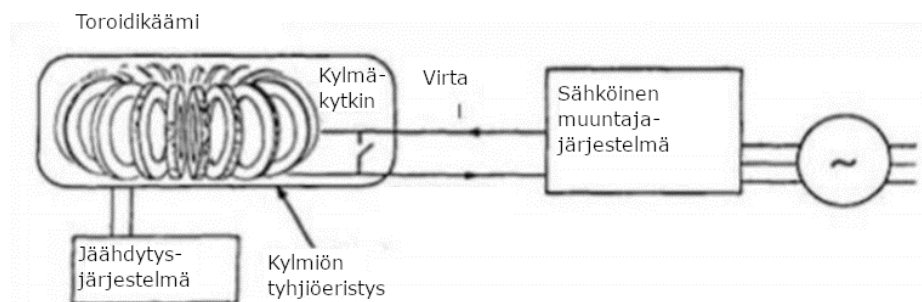
Kuva 8: FESS-järjestelmän vaikutus aurinkovoimalan tehoon. [15]

Aurinkovoimalan tuottama teho on tarkasteluajanjaksona vaihdellut välillä 400-600 kW. FESS:in tehokäyrässä negatiivinen luku tarkoittaa, että vauhtipyörään varastoidaan energiaa ja positiivinen, että vauhtipyörä purkaa energiaa. Kuvan 8 kuvaajasta huomataan, että FESS on tasoittanut verkkoon syötetyn tehon vaihtelun välille 500-550 kW. [15] Tällaista suuremman mittakaavan käytännön kokeiluja on vielä vähän, mutta vaikuttaa siltä, että tulevaisuudessa FESS saattaa nousta tärkeäksi osaksi aurinko- ja tuulivoimapuistojen tehojen tasaamisessa.

3.4. Energiavarasto

Energian varastointi suurissa määrin on haasteellista sekä teknisesti että taloudellisesti. Varastoinnin merkitys korostuu uusiutuvan energian, kuten tuuli- ja aurinkovoiman, lisääntyessä, sillä näissä tuotto- ja käyttöajankohta eivät aina kohtaa. Yksi tulevaisuuden energianvarastointi menetelmistä on suprajohtavan energiavaraston hyödyntäminen.

Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto, eli SMES perustuu toiminnaltaan suprajohteen hyvin pieniin häviöihin. Virtaa otetaan sähköverkosta, se muunnetaan tasavirraksi ja ajetaan suprajohtavaan käämiin. Tämän jälkeen käämi persistoidaan, jolloin virta jää häviöttömästi kiertämään käämiin ja energia varastoituu käämin magneettikenttään. [16] Kuvassa 9 on esitettyä SMES-järjestelmä.



Kuva 9: Suprajohtava energiavarasto. [17]

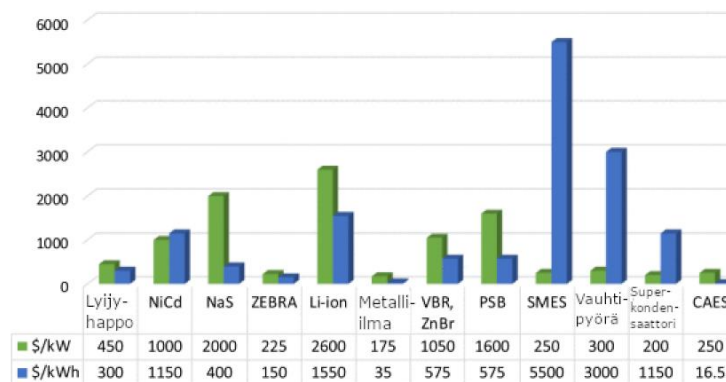
Järjestelmän pääkomponentit ovat käämin lisäksi jäähdytysjärjestelmä, tyhjiöeristetty kryostaatti ja käämin ja sähkönsyöttölähteen yhdistävät virtajohdot. Käytetyt käämigeometriat ovat solenoidi ja toroidi, joista jälkimmäisen tyyppinen on kuvassa 9. Solenoidikäämi on toroidia parempi vaihtoehto magneettisten voimavaikutusten kannalta, ja siihen varastoitunut energia johtimen pituusyksikköä kohden on noin kaksinkertainen toroidikäämiin verrattuna. Johtimen lisääminen kasvattaa toroidikäämin AC-häviöitä ja kustannuksia solenoidikäämiin verrattuna. Toroidigeometriaa puoltaa kuitenkin se, että sen ympäristöön leviävä hajakenttä on huomattavasti pienempi kuin solenoidilla. Tästä syystä kiinnostus on viime aikoina kasvavissa määrin kohdistunut toroidigeometriaan. [17]

SMES:ssä sähkö varastoidaan magneettikentän sisältämään energiaan. Kentän energiatiheys voidaan määrittää yhtälöllä

$$\bar{E} = \int \bar{B} \cdot d\bar{H} = \frac{B^2}{2\mu_0\mu}, \quad (3)$$

missä \bar{B} on magneettivuontiheys, \bar{H} magneettikentän voimakkuus, μ suhteellinen ja μ_0 tyhjiön permeabiliteetti [1]. Kentän energiatiheys on siis suoraan verrannollinen magneettivuontiheyteen, mikä saadaan suprajohtavan käämin keskustassa suureksi. Suprajohtavalla käämillä voidaankin saavuttaa jopa 10 000 kertainen energiatiheys (Wh/m^3) rautasydämiseen kuparikäämiin verrattuna. Kuitenkaan lyijy- ja litiumakkujen energiatihyeksiin ei vielä päästä [1].

SMES:n etuja ovat suuri tehotiheys, nopea vasteaika, hyvä hyötysuhde, ympäristöystävällisyys sekä pitkä elinikä. Heikkouksia järjestelmässä on pieni energiatiheys, ympärillä oleva magneettikenttä sekä toistaiseksi vielä korkea hinta. [17] Kuvassa 10 on vertailtu eri energianvarastointiteknologioiden kustannuksia.



Kuva 10: Energianvarastointiteknologioiden kustannuksia. [13]

Kuvassa 10 on kerrottu vihreällä värillä varastoitavan tehon ja sinisellä varastoitavan energian kustannus. Pylväistä nähdään, että SMES-järjestelmän hinta suhteessa tehotiheyteen alkaa olla kilpailukykyinen, kun taas energian suhteen SMES on verrattuista teknologioista selvästi kallein. Näin ollen SMES-järjestelmän investointikustannusten täytyy laskea huomattavasti, jotta siitä tulisi taloudellisesti kannattava vaihtoehto energian varastointiin. Suuren tehotiheydensä ansiosta konseptia voidaan kuitenkin soveltaa sähkön laadun hallinnassa esimerkiksi tasaamaan tuuli- ja aurinkovoimalan tehoa.

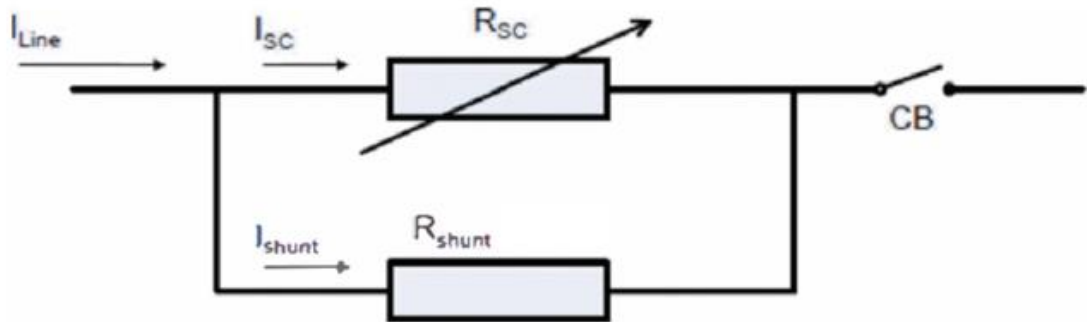
3.5. Virranrajoitin

Vikavirtojen hallinta on haastavaa. Siihen kuuluu perinteisesti uusien sähköasemien perustaminen, korkean impedanssitason muuntajat, korkeajännitesulakkeet ja muut sulakkeiden kaltaiset laitteet. Näillä kaikilla on kustannusten lisäksi omat ongelmansa. Esimerkiksi sulakkeen laukeaminen johtaa välittömästi huoltotoimenpiteisiin ja korkean impedanssitason muuntajat nostavat sähköverkon impedanssia.

Virranrajoittimen tehtävä on vaimentaa verkossa esiintyvän virtapiikin huippuarvoa ja siten estää verkkoon kytkettyjen komponenttien hajoamista sekä parantaa sähkön laatua. Virranrajoittimia tarvitaan verkon kaikissa osissa, niin jakeluverkossa kuin siirtoverkossakin. Ongelmana virranrajoittimissa on perinteiset materiaalit, sillä nykyaikaisten rajoittimien vikavirran yläraja on noin 80 kA, mikä jää tulevaisuudessa liian pieneksi [6].

Suprajohtava virranrajoitin, SFCL (Superconducting Fault Current Limiter), on tehokkaampi ja kestävämpi vaihtoehto kuin perinteinen virranrajoitin. Suprajohtavista rajoitintyypeistä yleisimmät ovat resistiivinen ja induktiivinen virranrajoitin. Tämän päivän virranrajoittimet perustuvat korkean lämpötilan suprajohteisiin, kuten Bi-2223, Bi-2212 ja YBCO. Tähän on syynä muun muassa HTS-materiaalien helpompi jäädytys.

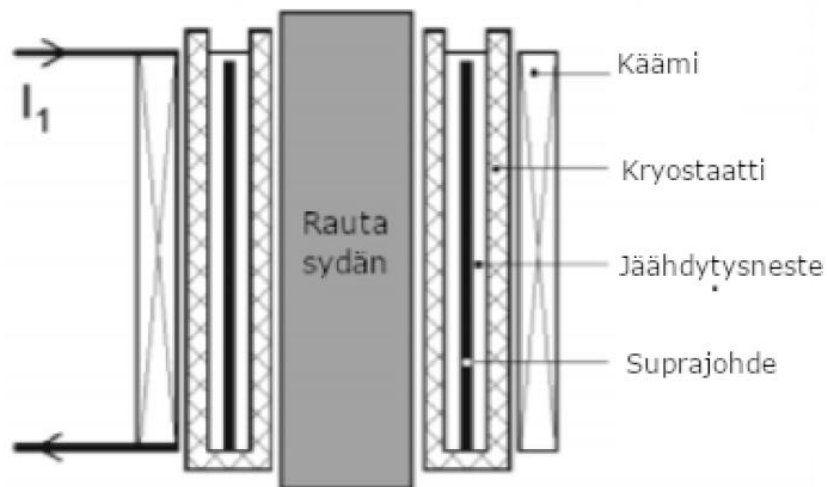
Resistiivinen virranrajoitin on rakenteeltaan yksinkertainen. Se koostuu suprajohtavasta käämistä jäädytysjärjestelmästä, ja johtimen kanssa rinnan olevasta vastuksesta. Suprajohtava käämi asennetaan sarjaan suojattavan johtimen kanssa, jolloin normaalitilassa se ei vaikuta verkon toimintaan. Vikavirran kasvaessa rajoitin siirtyy nopeasti suprajohtavasta tilasta normaaliin tilaan, sen resistanssi kasvaa, ja vikavirta siirtyy kulkemaan rinnakkaisvastuksen kautta. [7] Vastus estää suprajohteen vahingoittumisen sen siirryessä normaalitilaan. Se kuluttaa ylimääräisen lämmön sekä estää liian suuret ylijännitteet vikatilassa. [1] Resisttiivinen virranrajoitin on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9: Resistiivinen virranrajoitin. [7]

Kuvassa 9 on esitettyä resistiivisen suprajohdavan virranrajoittimen toimintaperiaate. Tavallisilla virransuuruuksilla virta kulkee suprajohdavan käämin kautta, jonka resistanssi $R_{sc} = 0$, ja vikavirran kasvaessa virta rajoittaa sarjaan kytketty vastus R_{shunt} . Tällaisen järjestelmän etuja ovat sen yksinkertainen ja kompakti rakenne. [7]

Toinen suprajohdavuutta hyödyntävä virranrajoitintyyppi on induktiivinen virranrajoitin. Induktiivinen virranrajoitin on periaatteeltaan muuntaja, jossa toisiopuolella on resistiivinen virranrajoitin. Käytännössä systeemi koostuu rautasydämen ympärillä olevasta suprajohdesylinteristä, jäähdytysjärjestelmästä ja kuparikäämistä. Konventionaalinen kuparikäämi on kierretty lieriön päälle ja voidaan kytkeä sarjaan voimalinjan kanssa. [1] Induktiivisen virranrajoittimen rakenne on esitetty kuvassa 10.



Kuva 10: Induktiivinen virranrajoitin. [1]

Kuvassa 10 on verkon kanssa sarjaan kytketty käämi, jonka sisällä on suprajohdesylinteri ja rautasydän. Verkon normaalitilassa magneettikenttä ei pääse tunkeutumaan rautasydämeen, mutta vikatilanteessa suprajohde siirtyy normaalitilaan, ja magneettikenttä pääsee tunkeutumaan rautasydämeen. Tällöin toisiopuolelle syntyvä resistanssi näkyy ensiöpuolella ja rajoittaa vikavirtaa.

Kun verrataan suprajohdavia virranrajoittimia perinteisiin konventionaalisiin vaihtoehtoihin, moni asia puoltaa suprajohdavia ratkaisuja. Ne ovat luotettavia, toimivat nopeasti eivätkä tarvitse toimenpiteitä vian jälkeen, suprajohdavat virranrajoittimet eivät myöskään lisää verkon impedanssia normaalikäytössä. Lisäksi ne ovat komponenteiltaan ja jäähdytysjärjestelmiltään ympäristöystävällisiä. [7]

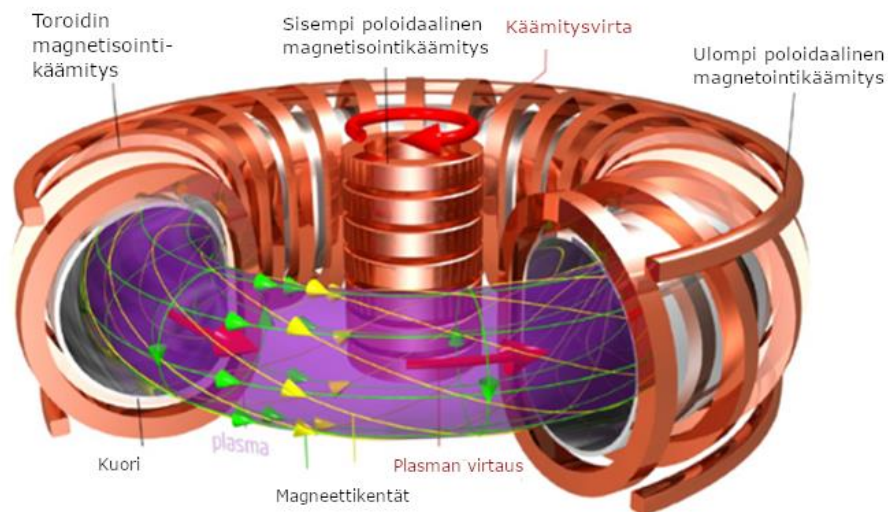
3.6 ITER

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) on yksi tämän päivän kunnianhimoisimmista energiaprojekteista. Se on tokamak-tyyppinen fuusiovoiman koelaitos, jonka puitteissa kehitetään teknologioita ja materiaaleja fuusiovoiman mahdollistamiseksi energiantuotannossa. Pää tavoitteena ITERillä on saada laitos tuottamaan energiaa ja osoittaa, että fuusiovoimalaitoksen rakentaminen on teknisesti mahdollista.

Fuusiovoimalassa ylläpidetään ydinreaktiota, jossa kaksi ydintä yhdistyy raskaammaksi ytimeksi ja energiaa vapautuu ydinten massaeron mukaan, kun $E = mc^2$. Tämä on vastakkainen reaktio perinteisessä ydinvoimalassa hyödynnettävälle fissiolle, jossa ydin hajotetaan kevyemmiksi. Polttoaineena reaktiossa voidaan käyttää helposti saatavia vedyn eri isotooppeja, jolloin reaktiotuotteena syntyy vaaratonta heliumia.

ITERissä tullaan käyttämään polttoaineena deuteriumia ja tritiumia, jolloin yhden reaktion reaktiotuotteena on helium-ydin ja neutroni [18]. Yksi tällainen reaktio vapauttaa 17,6 MeV energiaa, eli grammalla fuusioituvaa ainetta voi tuottaa 95 MWh sähköä. Tämä reaktio vaatii kuitenkin käynnistyäkseen yli 100 miljoonan asteen lämpötilan, ja ITERin polttoaine lämmitetään jopa 150 miljoonaan asteeseen. [19] Tällaisessa lämpötilassa aine on plasmaa, jota joudutaan pitämään kasassa voimakkailla magneeteilla.

Tokamak on tavallisin tapa toteuttaa koelaitos. Se on toruksen, eli munkkirinkilän, muotoinen tyhjiökammio, jota ympäröivät voimakkaat magneetit. Kuuma plasma kiertää kammion keskellä, koska sen ei voi antaa koskea kammion seinämiin. [19] Kuvassa 10 on esitetty tokamakin rakenne ja magneettikentät.



Kuva 10: Tokamakin periaate. [20]

Koska tokamakissa tarvitaan hyvin suuria magneettikenttiä, plasman koossapitämiseen täytyy käyttää suprajohtavia magneetteja. ITERin magneettijärjestelmä onkin valmistuessaan suurin koskaan rakennettu suprajohtomagneettijärjestelmä [18].

ITERin magneettijärjestelmän täytyy pystyä kontrolloimaan plasmaa täysin. Siihen kuluu 10 tuhatta tonnia magneetteja, jotka valmistetaan joko niobitinasta tai niobititaanista. Molemmista tapauksista magneetit tulee jäähdyttää aina 4 Kelvinin lämpötilaan. ITERissä käytettävät suprajohtimet rakennetaan niin, että suprajohtimet kiertävät

keskellä olevaa jäähdytinputkea teräskuoren sisässä. Näin jäähdytys voidaan hoitaa sisältä päin, kierrättämällä nestemäistä heliumia jäähdytinputkessa. [18] Kuvassa 11 on tällainen johdin.



Kuva 11: ITERissä käytettävän kaapeli leikkaus. [18]

Kuvassa 11 nähdään selvästi kaapelin rakenne, josta voidaan erottaa jäähdytinputki ja ulkokuori.

4. MUITA KÄYTTÖKOHTTEITA

Suprajohtavuutta hyödynnetään myös muualla kuin sähköenergiatekniikassa, kuten liikenteessä, elektroniikassa, hiukkasfysiikan tutkimuksessa, mineraalien puhdistuksessa ja lääketieteessä. Käytetyin suprajohtavuuteen perustuva sovellus, magneettikuvaus (MRI), onkin juuri lääketieteen sovellus. Magneettikuvaus on kuvantamismenetelmä, joka perustuu ydinmagneettiseen resonanssiin, jossa magneettikentässä oleva atomiydin absorboi energiaa radiotaajuisesta sähkömagneettisesta kentästä [21]. Tämä vaatii hyvin suuren magneettikentän, joka voidaan tuottaa suprajohtavilla magneeteilla. Magneettikuvauslaite on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12: Magneettikuvauslaite. [21]

Magneettikuvauksessa potilas viedään tutkimuspöydällä onttoon putkeen, jossa hän makaa liikkumattomana. Onton putken sisässä on kela, joka muodostaa tarvittavan magneettikentän, ja lähellä laitetta ovat vastaanotin- ja lähetinkela ydinmagneettisen resonanssin synnyttämiseen. Kuvan muodostamiseksi on myös erillinen gradienttikelasto, jonka avulla magneettikentän muotoa voidaan vaihtaa kuvauksen aikana. [21]

Yksi sovellus, jossa suprajohtavuutta hyödynnetään, on niin kutsuttu levitaatiojuna. Levitaatiojuna ei kulje tavalliseen tapaan pyörillä, vaan leijuu radan yllä koskettamatta siihen. Tämä luonnollisesti vaatii voimakkaita magneetteja ollakseen mahdollista. Levitaatiojunan edut perinteiseen verrattuna ovat vähäinen kitka, parempi ohjattavuus sekä suuremmat kulkunopeudet kaarteissa. Taloudellisesti tällainen juna ei kuitenkaan ole kannattava, sillä se vaatii erityisten junien lisäksi erityisen rautatien. Magneettiseen levitaation perustuvia junia on suunniteltu ja kokeiltu, ja Kiinassa tällainen juna liikennöikin Shanghaiin keskustan ja lentokentän väillä. [22]

Elektroniikassa suprajohtavuuden hyödyntämispotentiaali on kvanttietokoneissa. Kvanttietokone on kehitteillä oleva tietokone, joka hyödyntää kvanttitilojen superpositiota. Kvanttietokone ei perinteisen binääritietokoneen tapaan käytä bittejä, vaan kvanttibittejä eli kubittejä, jotka voivat sisältää bitteihin verrattuna moninkertaisen määrän lukuja samanaikaisesti. Fyysisesti kubitit voivat olla hiukkasia tai suprajohtavia

virtasilmukoita. Kvanttitietokoneita tutkitaan eripuolella maailmaa ja pieniä kvanttietokoneita on jo rakennettu. Kuitenkin niiden toimintaan ja käyttövarmuuteen liittyy vielä ongelmia, jotka vaativat ratkaisuja ennen kaupallistumista. [23]

ITERin lisäksi suprajohtavilla magneeteilla on ratkaiseva rooli myös toisessa tieteen suurhankkeessa, CERN:issä. CERN on Euroopan hiukkasfysiikan tutkimuskeskus, joka tutkii aineen perusolemusta ja sitä koossapitäviä voimia. Se sijaitsee Ranskan ja Sveitsin rajalla, työllistää vakituisesti noin 2500 henkilöä ja CERN-organisaatioon kuuluu 22 jäsenmaata [24].

Vuoden 2009 lopussa CERN:issä käynnistettiin maailman suurin hiukkaskiihdytin, LHC (Large Hadron Collider). Se on kahden syklotronikiihdyttimen muodostama rengas, joka on 27 kilometriä pitkä ja sijoitettu sata metriä maan alle. Sitä käytetään kiihdyttämään hiukkasia lähes valonnopeuteen, minkä jälkeen hiukkaset ajetaan törmäämään toisiinsa. Hiukkasten kiihdyttäminen tällaisiin nopeuksiin onnistuu suprajohtavien magneettien magneettikentillä. [24] Kuvassa 13 on LHC hahmoteltuna ilmakuvaan.



Kuva 13: CERN:in hiukkaskiihdyttimen hahmotelma. Kiihdytin on maan alla. [26]

LHC-laitteistossa on yhteensä noin 9600 magneettia, joilla pystytään tuottamaan 8,3 teslan magneettikenttä. Niissä käytetään niobitaanista tehtyjä kaapeleita ja ne pidetään 1,9 kelvinin lämpötilassa. Koko systeemin jäähdyttämiseen tarvitaan noin 120 tonnia heliumia. Suprajohtavia magneetteja käytetään 11,8 kA virralla, jolloin protonin liikeenergiaksi saadaan 7 TeV ja kahden protonin törmäysenergiaksi jopa 14 TeV. [25]

Magneettikenttiä voidaan hyödyntää erilaisten aineiden erottelemisessä ja esimerkiksi malmien puhdistamisessa. Magneettierottimet perustuvat eri materiaalien eri tapoihin reagoida magneettikenttään. Paramagneettisten materiaalien, joilla on pieni magneettinen susceptibiliteetti, erottelemiseen tarvitaan hyvin suurta magneettikentän voimakkuutta. Perinteisissä vahvamagneettierottimissa magneettikenttä on saatu aikaan ferromagneettisella teräksellä, jolloin erottimen koko on suuri ja investointikulut korkeita. Suprajohtavilla magneeteilla sen sijaan päästään suurempiin magneettikenttiin pienemmässä tilavuudessa sekä pienemmillä investoinneilla. [27]

Induktiokuumennin on laite, jota käytetään muun muassa metallien kuumentamiseen, sulattamiseen ja lämpökäsittelyyn ilman fyysistä kontaktia. Se on käytännössä kela, jonka sisään kuumennettava kappale asetetaan. Perinteinen induktiokuumennin perustuu vaihtosähkön tuottamaan muuttuvaan magneettikenttään, joka sähkömagneettisen induktion myötä kuumentaa kappaletta. [28] Suprajohtavassa induktiokuumentimessa käytetään tasavirtaa, ja kuumennettavaa kappaletta pyöritetään suprajohteilla muodostetussa magneettikentässä, jolloin se kokee magneettikentässä muutoksen. Suprajohtavalla induktiokuumentimella saadaan aikaan suurempia magneettikenttiä, joten kappaletta saadaan kuumennettua tehokkaammin ja kuumennuksen kokonaishyötysuhde voidaan saada 90% tasolle. [1]

5. YHTEENVETO

Tässä työssä käsiteltiin erilaisia suprajohtavuuden sovellutuksia pääpainoisesti sähköenergiatekniikassa, mutta myös sen ulkopuolelta. Sovellusten lisäksi käsiteltiin suprajohtavuutta ilmiönä, suprajohtavia materiaaleja sekä niiden kustannuksia.

Käsittelyn tuloksena voidaan todeta, että suprajohtavuus on laaja-alaisesti hyödynnettävissä oleva ominaisuus, jonka avulla voidaan päästä entistä tehokkaampiin, ympäristöystävällisempiin ja taloudellisempiin sovelluksiin. Sähköenergiatekniikan sovellutuksista erityisesti generaattorit ja energiavarastot ovat mielenkiintoisia aurinko- ja tuulivoimaloiden yleistyessä, jolloin energian varastoinnin ja tuotetun tehon tasaamisen tärkeys korostuu. Energiankulutuksen kasvaessa myös suprajohtavat kaapelit, joilla pystytään siirtämään suuria tehoja pienemmillä johdinpoikkipinta-aloilla ja pienemmillä häviöillä, tulevat luultavasti yleistymään.

Suprajohtavien sovellusten yleistymiseen on kuitenkin vielä matkaa. Konventionaalisten ratkaisujen kanssa kilpailevien sovellusten luotettavuus täytyy todeta käytännön kokeilujaksoilla, ennen kuin ne pystyvät kilpailemaan markkinoista. Lisäksi suprajohtavien materiaalien hintaa pitää tuoda alas, jotta taloudellinen kilpailu olisi mahdollista.

LÄHTEET

- [1] R. Mikkonen, Suprajohtavuus sähköverkossa, Luentomoniste, kevät 2014, Tampereen teknillinen yliopisto.
https://moodle2.tut.fi/pluginfile.php/577128/mod_resource/content/1/suprajohtavuus.pdf
- [2] Superconductors.org, The History of Superconductors,
<http://superconductors.org/History.htm>. Viitattu 16.3.2019
- [3] Wikipedia, Suprajohde,
https://fi.wikipedia.org/wiki/Suprajohde#Kvanttiteoreettinen_selitys. Viitattu 16.3.2019
- [4] A. Laine, Säiekoon vaihtelun vaikutus NBTI-suprajohteen suorituskykyyn
<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/22797/Laine.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Viitattu 7.4.2019
- [5] M. Tomsic, HyperTech, Commercial Rules For Making Money With Superconducting Applications,
https://www.nist.gov/sites/default/files/documents/pml/high_megawatt/Tomsic-DOE-NIST-Motor-Workshop-Sept-8-Mike-Tomsic-Hyper-Tech.pdf. Viitattu 8.4.2019
- [6] P. Matrikainen, Suprajohtava virranrajoitin hajautetussa energiantuotannossa,
<https://core.ac.uk/download/pdf/61398897.pdf>. Viitattu 9.4.2019
- [7] Sharma, Deeksha, and K. Bhushan Sahay. 2016. Basic concepts of superconducting fault current limiter. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee.org.libproxy.tuni.fi/document/7853069>. Viitattu 9.4.2019
- [8] R. Alanen, T. Koljonen, S. Hukari, P. Saari 2003. Energian varastoinnin nykytila. VTT tiedote. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2003/T2199.pdf>. Viitattu 16.2.2019
- [9] P. Paturi, Suprajohtavuuden sovellukset, Tehosovellukset, 2003, Turun yliopisto
<http://users.utu.fi/peetu/super/node17.html>. Viitattu 22.3.2019
- [10] Nexans, Super Cool Power Highways,
<https://www.nexans.com/newsroom/news/details/2017/03/Super-cool-power-highways.html>. Viitattu 22.3.2019
- [11] Elze de Vries, Turbines of the year 2018, 2019, Windpowermonthly
<https://www.windpowermonthly.com/article/1521608/turbines-year-2018-drivetrains>. Viitattu 16.3.2019
- [12] A. King, World first as wind turbine upgraded with high temperature superconductor, 2018, Shutterstock
<https://www.chemistryworld.com/news/world-first-as-wind-turbine-upgraded-with-high-temperature-superconductor/3009780.article>. Viitattu 16.3.2019
- [13] Wikipedia, Magnetic Bearing https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing. Viitattu 18.3.2019
- [14] How Magnetic Bearing Work, Synchronybearings

<http://www.synchronybearings.com/knowledge/how-magnetic-bearings-work.php>. Viitattu 18.3.2019

[15] Mukoyama, Shinichi, Kengo Nakao, Hisaki Sakamoto, Taro Matsuoka, Ken Nagashima, Masafumi Ogata, Tomohisa Yamashita, et al. 2017. Development of superconducting magnetic bearing for 300 kW flywheel energy storage system. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 27 (4): 1-4. <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/7815330>. Viitattu 9.4.2019

[16] A five minute guide to electricity storage.2014. Verkkodokumentti, ARUP. http://www.arup.com/Publications/5_minute_guide_to_electricity_storage.aspx. Viitattu 16.2.2019.

[17] J. Seppänen, Sähköenergian varastointitekniikat älykkäässä sähköverkossa,2014, Metropolian Ammattikorkeakoulu https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/74282/Seppanen_Juha.pdf?sequence=1. Viitattu 22.3.2019

[18] Iter, kotisivut, <https://www.iter.org/>. Viitattu 20.3.2019

[19] Wikipedia, Fuusioreaktori, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Fuusioreaktori>. Viitattu 20.3.2019

[20] Physics.stackexchange, How many times does plasma do a full loop tokamak before fusion, 2018 <https://physics.stackexchange.com/questions/333151/how-many-times-does-plasma-do-a-full-loop-tokamak-before-fusion>. Viitattu 20.3.2019

[21] Wikipedia, Magneettikuvaus <https://fi.wikipedia.org/wiki/Magneettikuvaus>. Viitattu 10.4.2019

[22] supraconductivite.fr, MAGLEV the flying train, <http://www.supraconductivite.fr/en/index.php?p=applications-trains-maglev-more> Viitattu 10.4.2019

[23] Wikipedia, Kvanttitietokone, <https://fi.wikipedia.org/wiki/Kvanttitietokone>. Viitattu 10.4.2019

[24] Cern, kotisivut <https://home.cern/>. Viitattu 21.3.2019

[25] Education, Communications and Outreach Group, February 2017 CERN-Brochure-2017-002-Eng https://home.cern/sites/home.web.cern.ch/files/2018-07/CERN-Brochure-2017-002-Eng_0.pdf. Viitattu 21.3.2019

[26] <http://www.infomondo.ro/cel-mai-mare-accelerator-de-particule-din-lume-a-fost-repornit-6894.html>. Viitattu 21.3.2019

[27] S. Saarinen, Magneettierotus, Toukokuu 2017, Centria-Ammattikorkeakoulu <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/128555/Opinnaytetyo%20Theseus.pdf?sequence=1&isAllowed=y> Viitattu 27.4.2019

[28] T. Miilunpalo, Induktiokuumentimen suunnittelu ja toteutus, 2014, Metropolia
Ammattikorkeakoulu

[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77282/Miilunpalo_Toni.pdf?sequence=1
&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77282/Miilunpalo_Toni.pdf?sequence=1&isAllowed=y) Viitattu 27.4.2019

