

Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto

LuK-tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikka
2024
Fil. yo. Jere Lehtonen
Tarkastajat:
FT H. Huhtinen
Prof. P. Paturi

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO

Fysiikan laitos

Lehtonen, Jere Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto

LuK-tutkielma, 21 s., liites.

Fysiikka

Huhtikuu 2024

Suprajohtavuuden löytyminen 1900-luvun alussa aloitti kiinteän olomuodon fysiikan yhden tämän päivän suurimmista vallankumouksista aineiden sähköisten ja magneettisten ominaisuuksien tutkimisessa. Yhteiskunnallisella tasolla suprajohtavuus ja sen tutkiminen saattavat olla avainasemassa energiakriisien ja ilmastonmuutoksen ratkaisussa.

Tässä tutkielmassa käsitellään lyhyesti suprajohtavuuden yleisiä ominaisuuksia ja historiaa sekä tutkielman pääaihetta, suprajohtavaa sähkömagneettista energiavarastoa SMES:iä, sen eri kehityksen vaiheita, teoriaa sekä tulevaisuutta.

Suprajohtavuus voidaan jaotella tyyppin I ja tyyppin II sekä matalan ja korkean lämpötilan suprajohteisiin, joilla kullakin on luonteenomaiset suprajohtavat ominaisuudet ja piirteet. Perinteinen energian varastointi perustuu usein potentiaalieron luomiseen ja vapauttamiseen. Useat uusiutuvat energiamuodot kohtaavat haasteita varastoinnin helppouden, kapasiteetin sekä varastoinnin pitkäaikaisuuden kanssa perinteisiä energiamuotoja käytettäessä. Suprajohtavuus sekä erityisesti SMES saattavat olla avainasemassa kyseisiä ongelmia ratkaistessa. SMES varastoi energiansa suprajohtavasta materiaalista rakennettuun käämiin, jossa energia saadaan säilymään tehokkaasti viöttömästi niin sanotusti aina. Suprajohtavasta käämistä on erilaisia geometrioita sekä tekniikkaa, joilla on omat hyödyt ja haitat.

SMES:in hyötysuhde muihin energiavarastoihin verrattuna on huippuluokkaa. Sen lisäksi ympäristöystävällinen, suuren tehokkuuden omaava, myrkytön ja turvallinen SMES tarjoaa lyhyen vasteajan energian käyttöönotossa. SMES:llä suuren energiamäärän valjastaminen suurienergiisiin kohteisiin on hyvin tehokasta perinteisiin varastointimenetelmiin verraten kyseisessä mittakaavassa. Suuren mittakaavan käyttöönottoa rajoittaa energiavaraston muun tekniikan haasteet kuten jäähdytysjärjestelmä, sen kustannukset sekä koko. Suprajohtavaan tilaan jäähdyttäminen vaatii jatkuvan kryotekniikan ylläpitämistä, joko nestemäisen heliumin tai typen avulla. Suprajohtava energiavarasto myös kilpailee perinteisten varastointimenetelmien, johtimien sekä komponenttien kanssa kasvavan kysynnän, niille jo olemassa olevan markkinan sekä niiden tutkimustyön kanssa.

SMES ei ole täysin uusi tutkimuskohde suprajohtavuuden tai energian varastoinnin aloilta ja vaikka menetelmän käyttöönottoaste on melko alhainen, on sen tulevaisuus silti valoisa. Korkean lämpötilan suprajohtavuus sekä sen kehitys saattavat positiivisesti vaikuttaa SMES:n käyttöönottoon, sillä jäähdytyskustannuksien alentaminen sekä erilaisten teknisten ongelmien ratkaisu tekevät SMES:stä houkuttelevamman yleisille markkinoille. Energiantarpeen eksponentiaalinen kasvu myös vauhdittaa suprajohteiden sekä energian varastoinnin tutkimusta ja kehitystä ja uusien menetelmien valjastusta ja käyttöönottoa.

Asiasanat: Suprajohtavuus, energian varastointi, suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto, SMES

Sisällys

Johdanto	1
1 Suprajohtavuus	2
1.1 Yleistä	2
1.2 Tyypin I ja II suprajohteet	5
1.3 Matalan ja korkean lämpötilan suprajohteet	7
1.4 Suprajohteiden materiaalit	8
2 Suprajohtavuus energian varastoinnissa	9
2.1 Perinteinen energian varastointi	9
2.2 Energiavarasto SMES:in teoria	11
2.3 SMES:in rakenne	12
2.3.1 Käämin tekniikka	12
2.3.2 Kryotekniikka ja suojausjärjestelmä	14
2.4 SMES:n hyödyntäminen erilaisissa sovelluksissa	15
2.4.1 Flexible AC Transmission System, FACTS	15
2.4.2 Uninterrupted power supply, UPS	15
2.4.3 Pulse power source, PPS	16
2.5 Suprajohteiden ja energiavarastojen tulevaisuus	16
2.5.1 SMES:n vahvuudet	16
2.5.2 SMES:n heikkoudet ja haasteet	18
3 Yhteenveto	19

Johdanto

Nyky-yhteiskunta on riippuvainen sähköstä, energiasta ja niiden tuotannosta. Sähkön- ja energiantuotanto kohtaavat haastavia ilmastokysymyksiä koskien kulutuksen kasvun ja puhtaamman tuotannon ollessa entistä tärkeämpiä. Ilmastokysymysten lisäksi tarjonnan ja kysynnän suhdetta on pyritty tasoittamaan tuotannon tehokkuutta lisäämällä. Ympäristöä säästäviä, uusiutuvia energiantuotantomenetelmiä kuten tuuli-, vesi- ja aurinkovoimaa on valjastettu käyttöön viime vuosikymmeninä runsaasti mutta niiden käyttö on rajoittunutta.

Ongelmiksi muodostuu uusiutuvien energian tuotantomuotojen tarjonnan ja kysynnän eriaikaisuus. Uusiutuvat energiamuodot ovat riippuvaisia esim. sääolosuhteista ja kyseisten energiamuotojen sähköntuotantoa ei voida säädellä mielivaltaisesti. Tällöin energiaa ei ole saatavilla sitä tarvittaessa ja toisaalta energiaa voi hukkaa puuttellisten varastointimenetelmien vuoksi. Myös energian siirrossa tapahtuu teho- ja jännitehäviöitä. Tulevaisuudessa energiantuotannon ongelmia ovat siis kulutuksen kasvun, tuotannon parantamisen ja ilmastoystävällisyyden lisäksi myös teho- ja jännitehäviöiden poistaminen sekä energiavarastojen kehittäminen ja valjastaminen.

Viime vuosisadan alussa löydettiin erilaisten materiaalien suprajohtava tila, jolla tarkoitetaan virran resistanssittonta kulkua materiaalin sisällä. Suprajohtava tila havaittiin jäädyttämällä tiettyjä johtavia materiaaleja alhaisiin, liki absoluuttisen nollapisteen lämpötiloihin, jolloin resistiivisyys pieneni ja lopulta hävisi. Korkean lämpötilan suprajohtavuus sen sijaan havaittiin vasta 80-luvulla kuparioksideja sisältävien materiaalien johdannaisissa ja tämä mahdollisti laajemman käytettävyyden kaupallisissa sovelluksissa. Suprajohtavuuden tutkiminen on kiivasta ja edellistä korkeampien lämpötilojen suprajohteiden aikakauden ennustetaan olevan hyvin lähellä esim. huoneenlämpöisten suprajohteiden tutkimuksen myötä.

Tässä työssä tutustutaan suprajohtavuuden historian ja teorian kautta erilaisiin energiatuotantoa hyödyttäviin varastointimenetelmiin ja sitä kautta tutkielman

pääaiheeseen, korkean lämpötilan suprajohteiden löytymisen myötä mahdollistuneen suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston, eli SMES:in (engl. Superconducting magnetic energy storage, SMES) tarjoamaan ratkaisuun energian varastoinnissa. SMES perustuu suprajohtavaan tilaan jäähdytetyn käämin käyttöön energian varastoinnissa. Tällöin SMES:iin tuotu tasavirtainen energia varastoidaan käämin magnetiikenttään, jonka seurauksena energia pysyy teho- ja jännitehäviöttömästi suprajohtavassa käämissä ja se voidaan vapauttaa käyttöön halutulla hetkellä hyvin nopeasti. SMES on hyödyllinen varsinkin uusiutuvien, vaikeasti varastoitavien energiamuotojen yhteydessä kuten myös sähköverkkoa stabiloivissa tehoelektronikan sovelluksissa.

Suprajohtava sähkömagneettinen energiavaraston soveltaminen ja tutkiminen on tärkeää yhteiskunnan eksponentiaalisesti kasvavan energiantarpeen tyydyttämisen kannalta. SMES tarjoaa sähkön- ja energiantuotantoon vakautta, ympäristöystävällisiin tuotantomenetelmiin luotettavaa varastointimuotoa sekä tasoittaa tarjonnan ja kysynnän eroja. SMES nykyisellään vaatii alkuinvestoinnin osalta suurta panosta verrattuna muihin energiavarastoihin, mutta tulevaisuus korkeamman ja jopa huoneenlämpöisten suprajohteiden myötä näyttää myönteiseltä ja sovelluksesta voi tulla täten paljon nykyistä kaupallisempi ja saavutettavampi.

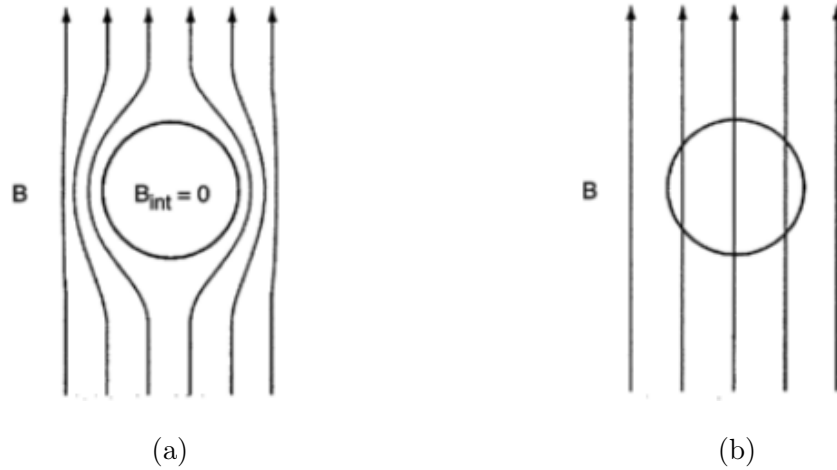
1 Suprajohtavuus

1.1 Yleistä

Suprajohteet löytänyt Kamerlingh Onnes havaitsi vuonna 1911 materiaaleille, kuten elohopealle, lyijylle ja tinalle, suprajohtavia ominaisuuksia. Hän havaitsi edellä mainittujen aineiden resistiivisyyden laskevan lämpötilan laskiessa kriittisen pisteen lähellä ja lopulta resistiivisyyden häviävän kun lämpötila laski alle kriittisen lämpötilan. Kriittinen lämpötila on materiaalille ominainen piste, joka Onnesin kokeissa ol-

leille materiaaleille oli hyvin alhainen, vain muutaman kelvinin luokkaa. Suprajohtavassa materiaalissa on havaittu resistiivisyyden ja lämpötilan verrannollisuuden johdosta se, että suprajohtavassa tilassa virta voi kulkea ilman tehohäviöitä, pitkilläkin aikaväleillä. Suprajohtavilla materiaaleilla on myös toinen tärkeä ominaisuus, Meissnerin ilmiö. Meissnerin ja Ochsenfeldin toimesta löydetty Meissnerin-ilmioksi kutsuttu ulkoisen magneettikentän läpäisemättömyys suprajohteessa löydettiin vuonna 1933. Meissnerin-ilmioitä havainnollistaa yksinkertaistettu malli suprajohteesta verrattuna normaaliin metalliin kuvassa 1. Meissnerin-ilmio näytti, että suprajohteet ovat siis täydellisiä diamagneetteja, mikä voitiin perustella äärettömällä johtavuudella. Erikoista kuitenkin oli matalilla lämpötiloilla magneettivuon sulkeutuminen pois suprajohteen sisällä ja häviäminen kun se jäähdytetään alle sen kriittisen lämpötilan T_c , jota ei voitu selittää pelkästään täydellisellä johtavuudella. Meissnerin-ilmioistä seurasi käänteisesti, että suprajohtavuus voitiin tuhota kriittisellä magneettikentällä H_c . Näin ollen suprajohtavaan tilaan vaikuttavat kriittinen lämpötila ja ulkoisen magneettikentän kriittinen arvo. [1]

Suprajohteiden tutkimuksessa ja ymmärtämisessä seuraava vaihe oli Londonien teoria, joka pyrki selittämään Meissnerin-ilmioitä, perustanaan suprajohteiden diamagneettisten ominaisuuksien perusoletus. Resistiivisyyden häviämiselle saatiin kuitenkin mikrotason selitys, kun BCS-teoria esiteltiin Bardeenin, Cooperin ja Schriefferin toimesta vuonna 1957 [2]. BCS-teoria johdettiin suprajohteen fermi-energiaan syntyvästä energia-aukosta perustilan ja virittyneen tilan välillä. Yksinkertaistettuna teorian mukaan negatiivisen elektronin ollessa kiteessä vetää se puoleensa positiivisesti varautuneita ioneja synnyttäen positiivisen varauksen kiteessä. Tämä aiheuttaa eri suuntaisen spinin omaavan elektronin attraktiota fermipinnan lähellä muodostaen pienempienergiaisia tiloja. Tilan syntyessä elektronien liike-energia on suurempi, mutta syntyy pienemmän kokonaisenergian omaavia tiloja. Tällöin syntyy kahden elektronin kytkentä, ns. Cooperin pari. Cooperin parin ollessa alhaisemmal-



Kuva 1: (a) Magneettikentän häviämisen yksinkertaistettu peruseriaate suprajoh-teessa. Kenttäviivoin kuvatussa magneettikentässä suprajohtavassa tilassa oleva pyö-reä materiaali on täydellinen diamagneetti. Kuvan suprajohde on I-tyypin suprajoh-de, jonka sisällä ei ole lainkaan magneettikenttää B . (b) Kuvaus magneettikentässä olevasta materiaalista sen ollessa normaalitilassa, jolloin suprajohtavia ominaisuuksia kuten diamagneettisuutta ei esiinny. [4]

la energiatilalla kuin normaalitilan energia, syntyy energia-aukko, jonka suuruus on kytkennän erottamiseen tarvittavan energian suuruinen. Kytkentä ei huoneenläm-pötilassa ole pysyvä, koska kiteen lämpövarähtely tuottaa juuri sen verran energiaa, mikä pystyy erottamaan Cooper-parin. Kuitenkin matalissa lämpötiloissa kytkentä on mahdollinen, sillä lämpövarähtely pienenee, joka mahdollistaa sen, että Cooperin pari pystyy kuljettamaan varausta ilman sähkövastusta.

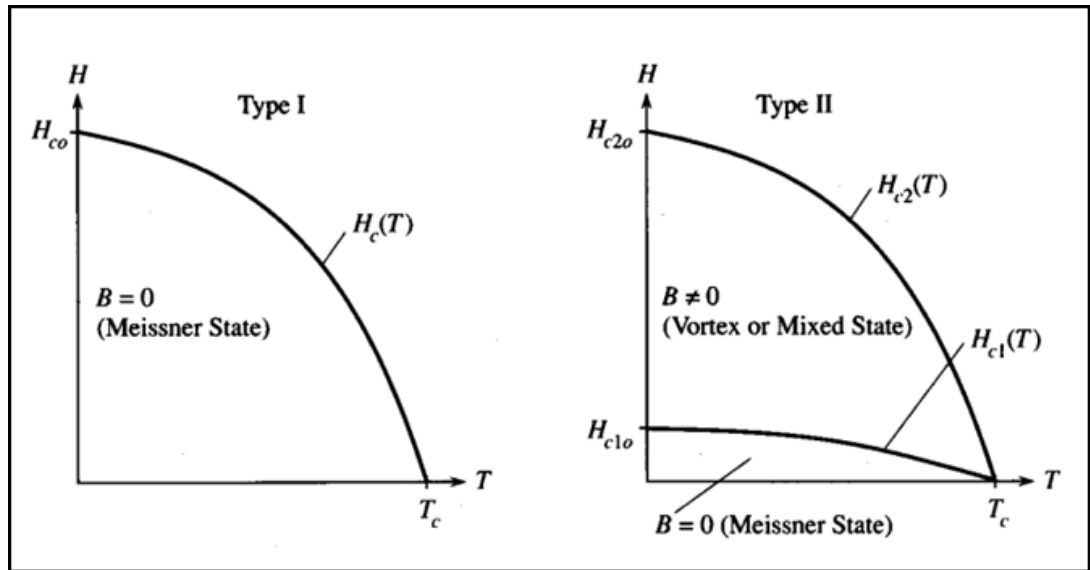
BCS-teoria ei kuitenkaan selitä kaikkia korkean lämpötilan suprajohteen ominai-suuksia aukottomasti. 1950 luvulla esitelty Ginzburg-Landau-teoria on teoria, jolla pystyttiin selittämään niin täydellisen diamagneetin tavoin toimivan I-tyypin lisäksi II-tyypin monimutkaisempia ominaisuuksia. [3]

1.2 Tyypin I ja II suprajohteet

Suprajohteet on jaettu kahteen tyyppiin, I- ja II-tyypin suprajohteisiin. Suprajohteella on ominainen suprajohtava tila, jonka saavuttaminen riippuu kahdesta kriittisestä suureesta. Nämä suureet ovat kriittinen lämpötila T_c ja kriittinen magneettikentän voimakkuus H_c . Lisäksi on kriittinen virrantiheys J_c . Kuvassa 2 nähdään diagrammi kuinka suprajohtavassa tilassa pysytään kun suureiden arvot pysyvät kriittisen arvon alapuolella. Suprajohtavasta tilasta poistutaan jos jokin kyseisistä suureista ylittää kriittisen pisteen. Suureet voivat yksitellen olla myös kriittisessä pisteessä, mutta tällöin muiden suureiden on kompensoitava tätä, eli oltava nollia. Esimerkiksi jos huomioidaan vain lämpötila ja magneettikentän voimakkuus, lämpötilan ollessa kriittisessä pisteessä T_c , täytyy magneettikentän voimakkuuden olla nolla. Kun lasketaan lämpötila alle kriittisen pisteen voidaan magneettikentän voimakkuutta nostaa niin, että suprajohtava tila silti säilyy. [1]

I-tyypin suprajohteet toimivat kuin täydellinen diamagneetti. Tyypin I suprajohteilla magneettikentän kriittinen piste on hyvin alhainen, jolloin materiaali on suprajohtavassa tilassa vain jos magneettikentän voimakkuudet ovat verrattain pieniä. Kriittisen magneettikentän ylitys aiheuttaa magneettikentän tunkeutumisen materiaaliin, tuhoten suprajohtavan tilan. Suprajohtava tila tuhoutuu yleensä hyvin herkästi kun tarkastellaan tyypin I suprajohteita.

Tyypin II suprajohteille taas magneettikentän voimakkuus voi olla suurempi, sillä ne eivät ole täydellisiä diamagneetteja. Suprajohtavalla tilalla pysytään tyypin-II suprajohteissa, vaikka lokaalisti magneettikenttä pääsisikin tunkeutumaan suprajohteen sisälle. Kuten kuvasta 2 nähdään, sisältää magneettikentän voimakkuuden ja lämpötilan relaation kuvaaja ns. sekatiilan, jossa siis esiintyy suprajohtavia ominaisuuksia vaikka magneettikentän voimakkuus olisi nolosta poikkeava. Kuvasta voidaan myös tulkita tyypin I suprajohteilla pysyttävän koko ajan niin kutsutussa Meissnerin tilassa, jossa Meissner-ilmioita havaitaan. Jos tilasta poistutaan



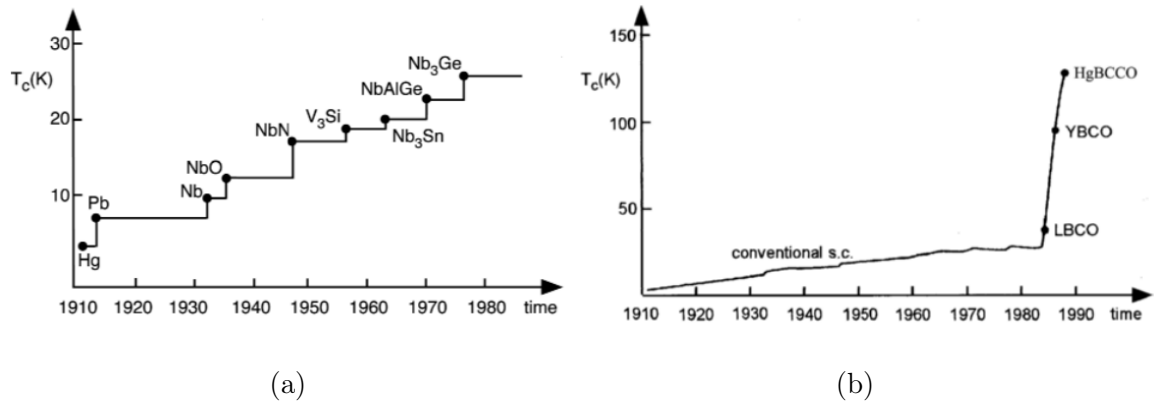
Kuva 2: Kuvaus suprajohtavista tyypeistä I ja II. Vasemmalla tyypin I suprajohte, jossa suprajohtava tila koostuu ainoastaan "Meissnerin tilasta", jossa kriittiset, suprajohtavuutta edellyttävät, suureet saavat vain tiettyjä arvoja ja ne ylitettyään magneettikenttä tunkeutuu suprajohteeseen ja suprajohtava tila katoaa. Oikealla tyypin 2 suprajohte, joka puolestaan koostuu kahdesta erilaisesta faasista, Meissnerin tilasta sekä sekatilasta. Sekatilalla tarkoitetaan tyypille 2 ominaista kykyä pitiä suprajohtavassa tilassa vaikka tietty ensimmäinen kriittinen magneettikentän suure ylittyisikin. Tällaisessa tapauksessa suprajohtavuutta esiintyy silloinkin kun magneettikenttä läpäisee suprajohteen osittain. Tiettyjen arvojen ylittyessä kuitenkin suprajohtava tila häviää myös tyypin 2 suprajohteilla. [5]

suprajohtavat ominaisuudet häviävät. Tyypin II suprajohteilla Meissner-tila on pieni magneettikentän voimakkuuden kriittiseen pisteeseen verrattuna, mikä mahdollistaa magneettikentän tunkeutumisen materiaaliin ilman, että se menettää suprajohtavia ominaisuuksiaan.

1.3 Matalan ja korkean lämpötilan suprajohteet

Suprajohteiden luokitus jakaantui matalan ja korkean lämpötilan suprajohteisiin vuonna 1986 kun Bednorz ja Müller havaitsivat suprajohtavuutta kuparioksidipinnoitetuille materiaaleille. Löytyneet korkean lämpötilan suprajohteet voivat saavuttaa jopa yli 100 K kriittisen lämpötilan kun normaalisti materiaali osoittaa suprajohtavia ominaisuuksia vain muutaman kelvinin lämpötiloissa [1]. Tämä mahdollistaa korkean lämpötilan suprajohteiden kaupallisen soveltamisen matalan lämpötilan suprajohteita paremmin, sillä matalan lämpötilan suprajohteet tarvitsevat jäähdyttämistä esim. nestemäisen heliumin avulla. II-typin korkean lämpötilan suprajohteet ovat erittäin käyttökelpoisia niiden magneettikentän kestävyytensä vuoksi, jolloin niitä voidaan hyödyntää pitkälti esimerkiksi erilaisissa magneetteja sisältävissä sovelluksissa. Korkean lämpötilan suprajohteet ovat myös avanneet uuden lupaavan tutkimusalan, jonka aikaansaannosta myös myöhemmin tutkielman pääaiheena toimiva suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto edustaa.

Korkean lämpötilan suprajohteilla on kuitenkin myös omat ongelmansa, sillä oksidia sisältävät materiaaleja on vaikeampaa valmistaa käyttökelpoisissa muodoissa. Perinteisiin metalleihin verrattuna myös oksidia sisältävien materiaalien elektronitiheys on yleensä pienempi. Resistanssia aiheuttavia flukтуаatioita tapahtuu siis tällöin useammin [1].



Kuva 3: Kuvassa (a) suprajohteiden kriittisen lämpötilan kehitys suprajohtavuuden löytymisestä 1911 noin 70 vuotta eteenpäin. Kuva (b) havainnollistaa kuinka korkean lämpötilan suprajohteiden löytyminen vaikutti kriittisen lämpötilan kasvuun. [4]

1.4 Suprajohteiden materiaalit

Suprajohteet jakautuvat karkeasti samalla tavalla kuin I- ja II-tyypin suprajohteet. Onnes löysi suprajohtavuuden ensimmäisenä alkuaineista kuten elohopeasta ja lyijystä. Suprajohtavia materiaaleja ja niille ominaisia resistanssittomia ominaisuuksia kuitenkin löydettiin 1973 mennessä useista metalleista ja metalliseoksista lämpötilan ollessa tarpeeksi alhainen. 1960-luvulla löydetyn niobium-titaanin korkean kriittisen magneettikentän, korkean kriittisen virran sekä hyvän saatavuuden ja muokattavuuden myötä niobium-seoksiset yhdisteet ovat vakiinnuttaneet asemaansa matalan lämpötilan suprajohteiden kaupallisten sovellusten pääasiallisena materiaalina. [6]

Kuva 3 havainnollistaa, kuinka vuonna 1986 löydetyt oksidiseoksiset metallit aloittivat korkean lämpötilan suprajohteiden kehityksen. Suprajohtavien ominaisuuksien löytäminen metallien oksidiseoksista vuonna 1986 oli alkusysäys erilliselle korkean lämpötilan suprajohteiden tutkimukselle.

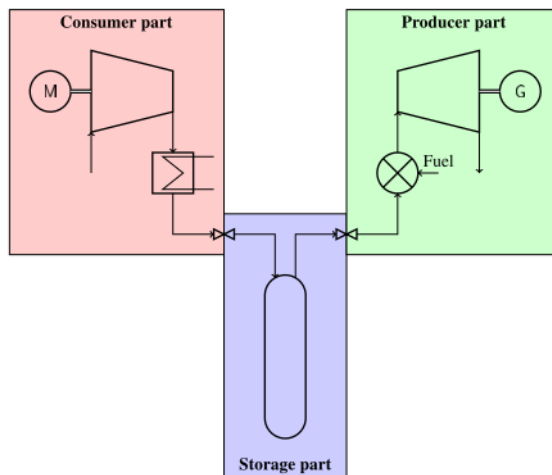
2 Suprajohtavuus energian varastoinnissa

2.1 Perinteinen energian varastointi

Energian varastoinnin kehitys on määrittänyt erilaisten energiantuotantomenetelmien kehitystä viimeisten vuosikymmenten aikana sekä myös lähitulevaisuuden suhteen. Nyky-yhteiskunta on riippuvainen varastoidusta energiasta, jota voidaan vapauttaa määrättyllä teholla milloin tahansa, erilaisten käyttökohteiden tarpeisiin. Akkuteknologian kehitys ja sen arkipäiväisyys on mullistanut kannettavien laitteiden ja teknologian kehitystä, parantanut logistiikkaa sekä mahdollistanut puhtaampien ja uusiutuvien energialähteiden ja -sovellusten käyttöä. Nykypäivän energiantuotanto ja -varastointi pohjautuu pitkälti kyseisiin uusiutuviin sekä ekologisiin lähtökohtiin.

Hyvin yleinen tapa varastoida energiaa nykypäivänä on hyödyntää potentiaalienergiaa erilaisissa pumppuvoimaloissa. Pumppuvoimalaitoksia on kahden tyyppisiä: ilma- ja vesipumppuvoimalaitoksia. Ilmapumppuvoimalaitoksissa toiminta perustuu energian sitomiseen ilmaan, joka on paineistettu yleensä maanalaiseen säiliöön. Ilmaa otetaan säiliöstä paineistettuna ja se ohjataan turbiinille kuten kuva 4 osoittaa. Lapamainen turbiini pyörii ja välittää akselin kautta sen liike-energiaa generaattorille muuttaen tämän lopulta sähköenergiaksi. Yleensä prosessissa voidaan käyttää ilman lisäksi muita kaasuja, kuten maakaasua, hyötysuhteen parantamiseksi. Vesipumppuvoimalat sen sijaan varastoivat energiaa veden avulla, sen potentiaalienergiana. Toimintaperiaate on lähes sama kuin vesivoimaloissa, mutta vettä varastoidaan vaan korkeampaan potentiaaliin, eli korkeammalle (esim. padot ja korkeat vesivarastot) ja veden laskiessa sen potentiaalienergia muuttuu turbiinin liike-energiaksi ja pyörittää turbiinia ja sitä myöten generaattori luo sähköenergiaa. [7]

Edellä esitetyissä voimalaitoksissa on kuitenkin ongelmansa. Ilmapumppulaitoksen hyötysuhde jää kuitenkin 30 % - 50 % välille [8]. Vesipumppuvoimalaitoksen hyötysuhde on ilmapumppuvoimalaitosta parempi, noin 70-85 % [7]. Energiavoimalai-



Kuva 4: Ilmapumppulaitoksen yksinkertaistettu kaaviokuva. Consumer-osassa nähdään kuinka sähkömoottori M puristaa ilmaa jäähdytyslaitteen läpi. Storage-osa kuvaa maanalaista paineistetun ilman säiliötä. Producer-osan tehtävänä on tuottaa turbiinin ja generaattorin G avulla sähköenergiaa. Producer-osassa nähdään myös kuinka prosessin hyötysuhdetta voidaan parantaa lisäämällä esim. maakaasua [8].

tosten ongelmiin lukeutuu myös niiden käynnistämisen viiveet, jotka voivat pisimmillään olla jopa minuutteja.

Energian varastoinnissa suprajohtavuus, suprajohtavat materiaalit sekä sitä varten kehitetyt menetelmät auttavat varastoinnin kohtaamia ongelmia. Energian varastointiin suprajohtavuuden tutkimusalalta esitelty suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto, SMES, ja siihen liittyvä teknologia on yksi aktiivisimmista soveltavan suprajohtavuuden alan aiheista. Korkean lämpötilan suprajohteet ovat mahdollistaneet energian varastoinnin ja sen sovellusten kehittymisen laaja-alaisesti myös kaupallisiin tarkoituksiin. Erityisesti uusiutuvien energiamuotojen, kuten aurinko- ja tuulivoiman, ongelmia ovat energian saannin epäsäännöllisyys. Etenkin uusiutuvissa, luonnonilmiöistä riippuvissa energiantuotantomenetelmissä kysyntä ja tarjonta eivät aina kohtaa, esim. tuulettomina ja pilvisinä päivinä, kun taas joskus energiasta voi olla ylitarjontaa. Tällaisissa tapauksissa energian varastoinnilla on

suuri merkitys tuotetun energian varastoinnissa. Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston sopivuus energian varastoinnissa perustuu suprajohtavuudelle tyypilliseen virran resistanssittomaan kiertoon, jolloin varastoinnin aikana energiaa ei häviä. [9]

2.2 Energiavarasto SMES:in teoria

Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto SMES on yksi aktiivisimpia tutkimuskohteita suprajohtavuuden alalta. Energiavarastoa ja sen kehitystä ovat erityisesti edistäneet korkean lämpötilan suprajohteiden löytyminen sekä niiden kaupallisten sovellusten käyttöönotto [10]. Korkean lämpötilan suprajohtavuus mahdollistaa suprajohtavan käämin kriittisen lämpötilan helpomman saavutettavuuden, koska kriittinen lämpötila on korkeampi. Matalan lämpötilan suprajohteet joudutaan useasti jäädyttämään nestemäisen heliumin avulla, joka on nestemäistä typpeä huonompi sen huonomman hyötysuhteen ja kalliimman hinnan vuoksi.

Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston toiminta perustuu tasasuunnatun sähkövirran energian muuttamisen käämin magneettiseksi energiaksi. SMES:iin varastoitu energia voidaan esittää yhtälöllä

$$E = \frac{LI_{smes}^2}{2}, \quad (1)$$

jossa energia on verrannollinen itseinduktanssiin L ja käämiin läpi kulkevan virran neliöön I . SMES:in purkautuessa vakioteholla P_0 ajassa t_s , voidaan sen virta ilmaista yhtälöllä

$$I = \frac{P_0}{v}, \quad (2)$$

jossa v on käämin jännite purkautumissyklin aikana.

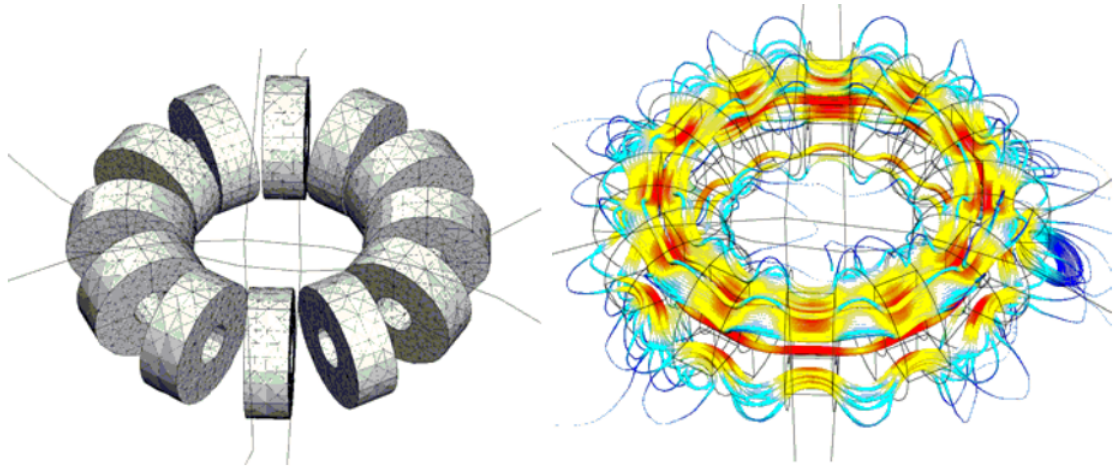
2.3 SMES:in rakenne

SMES:in pääkomponentti on sen suprajohtava käämi, jossa energia varastoidaan. Normaalissa käämissä on mahdotonta varastoida energiaa sen jännitteen tehohäviön vuoksi. Kuitenkin SMES:in tapauksessa suprajohtavalle tilalle jäähdytetty käämi pystyy varastoimaan lähes rajattomasti energiaa, koska siinä ei synny jännitehäviöitä [11]. Käämin lisäksi SMES:in rakenteeseen kuuluu kryotekniset osat, suojausjärjestelmä, jännitteenmuuntimet sekä SMES:in toiminnasta vastaava ohjain [10].

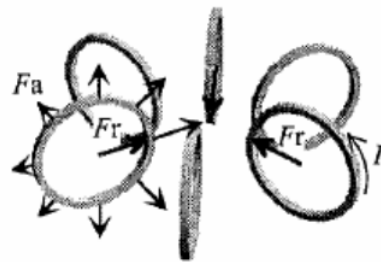
2.3.1 Käämin tekniikka

SMES:in käämissä käytetään kahta geometrisesti toisistaan poikkeavaa käämin muotoa, toroidia ja solenoidia. Geometrialtaan toroidin muotoinen käämi muodostetaan pienemmistä solenoidin kaltaisista osista, jotka yhdistämällä saadaan toroidin muotoon, kuvan 5 mukaan. Toroidin muotoinen käämi hukkaa magneettikenttää vähemmän ja sen synnyttämä elektromagneettinen voima, eli Lorentz voima, osoittaa toroidin keskustaan sen geometrian perusteella, kuten toroidisen käämin voimia esittävästä kuvasta 6 ilmenee. Toroidi on käytössä useammin silloin kun materiaali on korkean lämpötilan suprajohde.

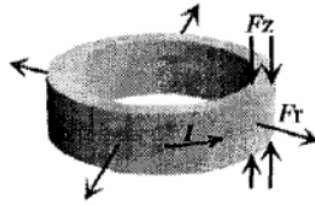
Solenoidi on rakenteeltaan toroidia yksinkertaisempi ja siitä syntyvät ulkoiset voimat ovat helpompia hallita. Solenoidin geometria ja Lorentz-voimat ovat esitetty kuvassa 7 ja siitä nähdään voimien suuntautuvan pääasiallisesti käämin ulkopuolelle, mikä on otettava huomioon erityisesti käämin suojausjärjestelmää sekä ulkoisten rakenteiden materiaaleja valitessa. Solenoidi on yksinkertaisuutensa ansiosta yleensä halvempi ja kestävämpi ja sen materiaali useammin matalan lämpötilan suprajohde. Kyseistä geometriaa suositaan yleensä esim. pienempien energiavarastojen käytössä. Käämin geometriaan valintaan saattavat vaikuttaa ympäröivän rakenteen kestävyys ja materiaalit tai esim. ulkopuoliset laitteet, joissa Lorentz-voimat halutaan minimoida. [12]



Kuva 5: Toroidin geometrian simulointi COMSOL Multiphysicsin avulla. Vasen kuva osoittaa käämien geometrian sekä niiden asettelun SMES laitteessa, jonka avulla simulointi on suoritettu havainnollistamaan kunkin käämin tuottamia magneettikenttiä. [13]



Kuva 6: Toroidin voimakuva. Toroidin elektromagneettiset voimat kohdistuvat käämin keskustaa kohden, jolloin rasitus on enemmän käämissä itsessään kuin sen ulkopuolisissa rakenteissa. [10]



Kuva 7: SMES:in solenoidi-geometrian voimakuva. Yksinkertaisemmassa käämin geometriassa Lorentz-voimat ovat suuremmat käämin ulkopuolella, joka vaikuttaa esim. rakenteiden suunnitteluun ja toteuttamiseen. [10]

2.3.2 Kryotekniikka ja suojausjärjestelmä

Energian varastointi normaalissa käämissä on mahdotonta sen ominaisen resistanssin vuoksi. Käämin jäädyttäminen sen suprajohtavaan tilaan kuitenkin mahdollistaa virran resistanssittoman kulun ja täten energian varastoiminen on mahdollista. Suprajohtava tila saavutetaan upottamalla käämi kryostaatin tyhjiöeristeiseen tilaan, missä jäädytteenä toimii yleensä nestemäinen helium. [9]

Millisekuntien purkaus- ja latausajat vaativat SMES:n tekniikalta normaalia käämiä enemmän, jolloin myös sen suojausjärjestelmä on hyvin kriittinen osa SMES:iä. Käämissä oleva suuri energia voi väärin purkautuessaan tai käämin ylikuumentessa aiheuttaa suprajohtavan tilan purkautumisen, josta ylikuumentumisen kautta koko SMES:n toiminta häiriintyy ja tekniikka voi vaurioitua. Suojausjärjestelmä koostuu yksinkertaisuudessaan SMES:n käämin suprajohtavan tilan tarkkailusta erilaisin menetelmin, kuten esim. lämpötilaa, painetta ja jännitettä mittaamalla. Jäähdytysjärjestelmä koostuu yleensä tyhjiöpumpun, lauhduttimen, venttiilien sekä ympäröivän vaipan erilaisista yhdistelmistä. Käämin jäähdytys tapahtuu joko kokonaan upottamalla se sovelluksessa valittuun nestemäiseen kaasuun tai käämin läpi paineistetun heliumin virtauksen avulla. Molemmissa järjestelmissä on etunsa ja haittansa, mutta suprajohtavan tilan säilyttämiseksi molemmat tavat vaativat jatkuvaa käämin jäähdytystä. [10]

2.4 SMES:n hyödyntäminen erilaisissa sovelluksissa

Suprajohteiden tehosovelluksista tässä tutkielmassa esiteltävää suprajohtavaa sähkömagneettista energiavarastoa voidaan myös hyödyntää monessa eri sovelluksessa. SMES:n hyötyjä ovat sen nopea vasteaika ja suuri tehokapasiteetti. Kyseisiä ominaisuuksia voidaan käyttää esim. Flexible AC Transmission Systemsissä, FACTS:issä, Uninterrupted power supply UPS:ssä sekä Pulse power source -tehosovelluksissa. [14]

2.4.1 Flexible AC Transmission System, FACTS

FACTS:in toimintaperiaate on tasoittaa ja kontrolloida erilaisia sähköverkkoon tulevia energiatarpeen epätasaisuuksia esim. vuorokausitasolla. Pienen energiatarpeen aikana, esimerkiksi öisin, SMES ottaa sähköverkosta energiansa latautuakseen ja suuren energiatarpeen tullen, esim. päivisin, SMES vapauttaa energiaa takaisin sähköverkkoon niin, että sähköverkon kokonaisrasitus (engl. grid load) pysyy tasaisempana.

2.4.2 Uninterrupted power supply, UPS

UPS nimensä mukaisesti toimii sähköverkkoon kiinnitettyä SMES:iä vastaavalla tavalla. Sitä käytetään kuitenkin pienemmissä sovelluksissa yksittäisenä lisäkomponenttina. Se takaa herkkien komponenttien säilyvyyttä jatkuvalla katkeamattomalla virransyötöllä. Elektroniikan komponentit ovat herkkiä esim. virran katkeamiselle, virtapiikeille, sekä erilaisille vaihteluille sovellusten sisällä. UPS:ää käytetään esim. tärkeiden servereiden yms. ylläpidon turvana. UPS:n yhteydessä oleva SMES antaa suuren varmuuden katkeamattoman virransyötön toimivuudelle, sillä sen varastoima energia ei häviä ja sitä voidaan nopealla vasteajalla käyttää UPS:n tarpeisiin.

2.4.3 Pulse power source, PPS

Pulse power source on laajempi kokonaisuus sovelluksia, joissa SMES:n suurta tehotiheyttä käytetään hyödyksi pulssimaisena suurena piikkinä. SMES:n energiatiheys ei ole kilpailukykyinen esim. akkujen kanssa mutta edellä mainitut PPS:t hyötyvät enemmän suuresta tehotiheydestä.

2.5 Suprajohteiden ja energiavarastojen tulevaisuus

Suprajohtavuuden tutkimus ja kehitys erityisesti entistä korkeamman lämpötilan suprajohteita kohtaan on osoittanut suuria edistymisen merkkejä viime vuosikymmeninä. Suprajohtavan tilan säilyttäminen huoneenlämpötilassa onkin tällä hetkellä erittäin merkittävä tutkimuskohde. Kiinteiden aineiden fysiikassa suprajohtavuus on yksi aktiivisimpia tutkimusalueita ja tutkimukset liittyvät niin uusien korkealämpöisten suprajohteiden kehittämiseen, edullisempien materiaalien jalostamiseen sekä erilaisten kaupallisten sovellusten kehitykseen.

SMES:in suunnittelu ja kehittäminen alkoi vuonna 1969 kehittyen läpi 1970-luvun, mutta otettiin kaupallisesti täysin käyttöön vasta 1980-luvulla. SMES:in käyttöönotto on hidastunut 2000-luvulla verrattuna käyttöönoton jälkeisiin ensimmäisiin vuosikymmeniin. SMES:in monet edut muihin energiavarastoihin verraten on ajanut SMES:iä ja sen kehitystä navakasti eteenpäin.

2.5.1 SMES:n vahvuudet

Energiavarastona SMES:n tekniikkaan kuuluu yksinkertaistettuna suprajohtava käämi, jäähdytysjärjestelmä ja erilaiset muuntaajat ja jakajat, jolloin myrkyllisiä tai suoraan ympäristölle vaarallisia aineita ei käytetä kuten esim. varastoidessa energiaa akkuihin. Jäähdytysjärjestelmissä käytetään nestemäistä heliumia tai typpeä, jotka eivät myöskään ole vaarallisia ympäristölle tai ihmiselle.

SMES:in suuri, yleensä jopa 95% ylittävä, energian varastointitehokkuus on pa-

rempi kuin aiemmin esitellyillä pumppulaitoksilla. Energian varastointitehokkuudella tarkoitetaan varaston tai laitteen kykyä ja suhdetta säilyttää sekä vapauttaa siihen varastoitua energiaa. Energian varastoinnin tehokkuutta kuvataan sen antaman ja siihen syötetyn tehon suhteella. SMES omaa korkean energian varastointitehokkuuden lisäksi myös korkean tehotiheyden eli tehon tilavuusyksikköä kohden. Teho voidaan tässä tapauksessa ilmoittaa energiansiirron nopeutena, yksikössä $\frac{W}{m^3}$. SMES:in hyvien varastointiominaisuuksien lisäksi sen varastoima energia on erittäin nopeasti käytettävissä. SMES:in vasteaika on millisekunneista alle kymmeneen sekuntiin. Energiaa saadaan vapautettua suurella teholla suurienergiisiin sovelluksiin mikä ei samassa mittakaavassa ole käytännössä mahdollista millään muulla metodilla. [9]

Suprajohtavana energiavarastona magneettiin varastoitu energia on lähes tehohäviötöntä suprajohtavan käämin ansiosta. Jännitehäviötön energian varastointi antaa huomattavan etuuden SMES:ille verraten muihin energiavarastoihin. SMES:in syklinen kestävyys, eli kuinka monesti energiavarastoa voidaan ladata ja purkaa, on pitkä. Syklinen kestävyys tekee SMES:istä luotettavan, jatkuvasti käytettävän ja pitkäikäisen energiavaraston. Pitkäikäisyyteen vaikuttaa myös SMES:in rakenne, joka muodostuu liikkumattomista osista, pääasiassa ladattavasta suprajohtavasta käämistä ja siihen liitetyistä kylmälaitteista. Täten SMES:n alkuinvestoinnin suuruus jakaa kustannuksia pidemmälle aikavälille verrattuna muihin energiavarastoihin. [9]

SMES parantaa tehon laatua ja tasoittaa heilahduksia sähköverkossa kun kysyntä ja tarjonta eivät kohta. SMES turvaa myös herkät sähkölaitteet, monimutkaiset systeemit ja prosessit, joiden komponentit eivät kestä sähköverkon heilahduksia. SMES on myös hyvin turvallinen energian varastointimetodi, sillä varastointi ei tapahdu kemiallisien reaktion kautta kuten esimerkiksi akuissa ja pattereissa. [9]

2.5.2 SMES:n heikkoudet ja haasteet

SMES ei ole täysin ongelmaton energiavarasto vaan myös sillä on ominaisia heikkouksia. Mikään energianvarasto ei ole täysin ongelmaton mutta käytettävän metodin kannalta on löydettävä hyötyjen ja heikkouksien keskitie, johon vaikuttaa metodin omat ominaisuudet ja varastoon yhdistettävät sovellukset.

Suurimpiin ongelmiin lukeutuu SMES:n jäähdytysjärjestelmä ja osittain siitä koostuvat kustannukset. Jäähdytysjärjestelmä on suuri, hankala ja yksi isoimmista investoinneista SMES:ssä. Jäähdytysjärjestelmä toimii yleensä joko nestemäisen typen tai heliumin avulla riippuen suprajohtavan käämin käytetystä materiaalista. Käämin jatkuva jäähdytys suprajohtavan tilan saavuttamiseksi on aloituskustannusten lisäksi hyvin kallista koko systeemin ollessa toiminnassa.

Toimivuuden vaatimuksia SMES:llä ovat myös vankka ympäröivä rakenne, sillä kuten SMES:n rakenne -kappaleessa todettiin, aiheuttuu SMES:n käämin rakenteesta ja luonteesta suuria sitä ympäröiviä Lorentz-voimia. Lorentz-voimat ovat SMES:n kaltaisessa sovelluksessa hyvinkin suuret ja materiaalivalinnat suojausjärjestelmissä vaikuttavat suuresti sen toimintaan. Suuret Lorentz-voimat voivat heikentää käämin suprajohtavia ominaisuuksia, jolloin energiaa hukkuu käämissä itsessään [9]. Kuitenkin elektromagneettiset voimat tunnetaan hyvin ja ovat helposti laskettavissa jo etukäteen, helpottaen SMES:n toteutusta jo suunnitteluvaiheessa.

SMES on tunnettu lyhyestä purkautumisajastaan, joka on millisekunneista muutamisiin sekunteihin, mikä on hyödyllistä esim. suojatessa sähköverkon kuormaa jännitteen vaihtelulta. Kuitenkin tilanteissa joissa pyritään tasoittamaan sähköverkon kuormaa, vaaditaan usein pitkiä purkautumisaikoja, joita SMES ei pysty tuottamaan. Ominaista SMES:lle on myös korkea tehotiheys (W/kg), joka muodostuu purkautumisajan ja energian virtauksen suhteesta energiayksikköä kohden. Kuitenkin SMES:n energiatiheys, eli energian suhde massayksikköä tai tilavuusyksikköä kohden tiettyä alueyksikköä kohden on huono.

Kilpailu perinteisten energiavarastojen kanssa on kovaa, sillä tutkimus ja kehitystyö perinteisillä johtimilla ja energiavarastoilla on helpompaa, halvempaa ja siksi yleisempää kuin SMES:n kaltaisilla perusteellista tutkimustyötä, suuria investointeja ja vain mahdollisia lupaavia tuloksia tuottavilla menetelmillä.

3 Yhteenveto

Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston SMES:in kehitys alkoi 1960-luvun lopulla ja kaupallinen hyödyntäminen alkoi 1980-luvulla. SMES:iä sovellettiin käytännössä ensimmäisen kerran sille ominaisella tavalla, käyttäen sitä sähköverkon taasaavana komponenttina vaihtelevaa kuormaa vastaan. SMES:n energiakapasiteetti sopiikin erityisen hyvin esim. Flexible AC Transmission System -sovellusten käyttöön, joilla kontrolloidaan sähköverkkoa ja sen tehonsiirtokapasiteetti yleensä kasvaa. 1980-luvulla SMES oli käytössä matalataajuisien teho-oskillaatioiden poistamisessa. Yleisesti useat SMES laitteet on käytössä keskeyttämättömien virranlähteiden yhteydessä (Uninterrupted Power Supply) ja ne toimivat noin MW suuruisella energialla. Keskeytymätöntä virtaa vaativia kohteita ovat esim. erilaiset puolijohdetekniikkaa valmistavat tuotantolaitokset, armeijan monipuoliset tarpeet tai herkäät, puhdasta stabiilia sähkötehoa vaativa, tutkimus ja tuotekehittely.

SMES:n suurin rajoite on oman kääminsä saaminen suprajohtavaan tilaan ja siitä syntyvät kustannukset. SMES tarvitsee kääminsä jäähdyttämiseen jatkuvasti jäähdytysjärjestelmän ylläpitoa, jossa kuluu käämin materiaalista riippuen nestemäistä typpeä tai heliumia. Muiden energiavarastojen suosiminen SMES:n sijaan perustuu usein käyttöönottokustannusten ja hyötyjen kompromissiin, joka saattaa johtaa muun energiavaraston käyttöön SMES:n sijasta. Korkean lämpötilan suprajohteiden kehittyminen saattaa antaa SMES:lle tilaa yleisillä markkinoilla. Nykyistä korkeamman lämpötilan, jopa huoneenlämpöisten suprajohteiden kehitys alentaisi kustannuksia ja helpottaisi käyttöönottoa yleisemmällä tasolla. Tällöin käyttäjän olisi

helpompi huoltaa jäähdytysjärjestelmää ja kryogeenisten nesteiden täyttö ei olisi edellytys käämin suprajohtavalle tilalle.

SMES:n vahvuudet ovat parhaimmillaan sovelluksissa, joissa vaaditaan vain lyhyt suuritehoinen pulssi, joka selittyy SMES:n tehotiheyden ollessa paljon sen energiatiheyttä suurempi. SMES toimii myös hyvin sähköverkkoa stabiloivissa aplikaatioissa, pääosin tehoelektroniiikan sovelluksissa. 2000-luvun alussa tehdyissä tieteellisissä julkaisuissa arvioitiin vuoden 2020 energian tarpeen tuplaantuvan ja energia-teollisuuden mukaan tämän lisäksi pitää paikkansa se, että energian tarve varsinkin teollisuudessa ja kuljetustoimissa tulee lisääntymään tasaisesti. Tämä kohdistaa suuria rasitteita teho- ja sähköntuotannolle ja SMES on ympäristöystävällisenä energiavarastona hyvin potentiaalinen vaihtoehto nykyisille hitaammille ja epäekologisille energiavarastoille.

Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston tulevaisuus näyttää hyvältä lisääntyneen mielenkiinnon myötä korkean- ja huoneenlämpöisten suprajohteiden tutkimuksen myötä. Myös tutkimustyö SMES:n parissa on vilkasta ja sitä vauhdittaa ympäristöpolitiikan valveutuminen ja uudet tiukemmat päästörajoitteet ja -määräykset. SMES:n tutkimusta voidaan nykyisellään myös tarkastella jo historian avulla, sillä tutkimuksia, sovelluksia ja käyttökohteita SMES:n kanssa on jo suoritettu. Tämä helpottaa tulevaisuudessa ongelmien ja haasteiden rajaamista ja ratkaisua tutkimuksessa ja erilaisten sovellusten kehityksessä.

Viitteet

- [1] M. Tinkham, *Introduction to Superconductivity*, 2 ed. (Dover Publications, 2004).
- [2] J. Bardeen, L. N. Cooper ja J. R. Schrieffer, *Phys. Rev.* **108**, 1175 (1957).
- [3] P. C. Hohenberg ja A. P. Krekhov, *Physics Reports* **572**, 1 (2015).
- [4] K. H. Bennemann ja J. B. Ketterson, *Superconductivity* (Springer Berlin Heidelberg Berlin, Heidelberg, 2008), pp. 3–26.
- [5] N. Haleeda, M. Awang Kechik ja R. Abd-Shukor, *Pertanika Journal of Science and Technology* **2**, (2016).
- [6] *Superconductivity Present and Future Applications* (Coalition for the Commercial Application of Superconductors (CCAS), 2014).
- [7] S. Rehman, M. Al-Hadhrami ja M. Alam, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **44**, 586 (2015).
- [8] B. Elmegaard ja W. Brix, *Proceedings of the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2011* **24**, 2512 (2011).
- [9] R. Holla, *The Journal of Undergraduate Research at the University of Illinois at Chicago* **8**, (2015).
- [10] J. Wen, J. X. Jin, Y. G. Guo ja J. G. Zhu, *Proceedings of the Australasian Universities Power Engineering Conference, Melbourne* (2006).
- [11] W. Hassenzahl, *IEEE Transactions on Magnetics* **25**, 750 (1989).
- [12] V. S. Vulusala G ja S. Madichetty, *International Journal of Energy Research* **42**, 358 (2018).
- [13] I. K. Dimitrov, X. Zhang, V. F. Solovyov, O. Chubar ja Q. Li, *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **25**, 5701208 (2014).
- [14] P. Tixador, *IEEE/CSC & ESAS Euro. Supercon. News. For.* 1 (2008).