

Lauri Puoskari

SUPRAJOHTAVA SÄHKÖMAGNEETTI- NEN ENERGIAVARASTO

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Risto Mikkonen
Toukokuu 2023

TIIVISTELMÄ

Lauri Puoskari: Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatintutkinto
Toukokuu 2023

Energiamurros on tuonut mukanaan kasvavan tarpeen energiavarastoille, joiden eräs teknologia on suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto (engl. Superconducting magnetic energy storage, SMES). Työssä käydään läpi SMES:n toimintaan liittyvää teoriaa ja käytännön haasteita, vertaillaan SMES:n teknillisiä ja taloudellisia tunnuslukuja muiden tyyppisten energiavarastoteknologioiden vastaaviin tunnuslukuihin ja tarkastellaan SMES:n tyyppisimpiä käyttökohteita sekä globaalia tilannetta.

SMES on suprajohdekäämistä, tehonmuunnin-, jäähdytys- ja ohjausjärjestelmästä koostuva sähköinen energiavarasto. Tasasähkövirran kulkiessa sen suprajohdekäämin läpi SMES varastoi sähköverkosta saadun energian magneettikenttäänsä. Energia säilyy suprajohdekäämin magneettikentässä muuttumattomana myös lataustilanteen päätyttyä käämin olemattoman resistanssin ansiosta. Käämissä käytetyllä suprajohteella on ominainen kriittinen lämpötila, jonka ylitettyään suprajohde menettää suprajohtavan tilansa. Suprajohdekäämi on siis pidettävä kriittisen lämpötilansa alapuolella jäähdytysjärjestelmän avulla. Jäähdytyksen välttämättömyyden lisäksi SMES:n käytännön haasteita ovat muun muassa energian varastoinnissa syntyvät voimakkaat magneettikentät ja suprajohteiden toiminnalliset ominaisuudet, kuten esimerkiksi herkkyys ulkoisten magneettikenttien vaikutuksille.

Työssä vertaillaan SMES:n teknillisiä tunnuslukuja muihin tyyppisiin energiavarastoihin. Vertailukohteita ovat muun muassa erilaiset akkuteknologiat, vetypolttokennot, mekaaniset energiavarastot ja superkondensaattorit. Vertailu osoittaa, että SMES:n vahvuuksia ovat korkea hyötysuhde, korkea tehotiheys, suuri nimellisteho, lyhyt purkausaika ja pitkä käyttöikä. SMES:n heikkouksia taas ovat pieni energiatiheys, pieni nimellinen energiakapasiteetti ja merkittävä itsepurkautumisnopeus. Työssä vertaillaan myös SMES:n taloudellisia tunnuslukuja muihin tyyppisiin energiavarastoihin. Vertailu osoittaa, että SMES:n kustannukset energiayksikköä kohti ovat hyvin suuret, mutta tehoyksikköä kohti pienet. Vertailun lisäksi työssä käydään läpi SMES:n kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä, joista merkittävimmät ovat suprajohdekäämin ja tehonmuunninjärjestelmän kustannukset. Muutaman lähteen mukaan suprajohteiden kustannukset ovat kuitenkin laskussa.

Työssä esitellään SMES:n tyyppisimmät käyttökohteet, jotka suurimmaksi osaksi liittyvät sähkövoimajärjestelmien tukemiseen, esimerkiksi tuotannon ja kuormituksen vaihtelun tasaimiseen. SMES:llä on eniten potentiaalia suuren tehon, mutta pienen energiakapasiteetin sovelluksissa. Lisäksi työssä tarkastellaan SMES:n tilannetta maailmalla ja Suomessa. SMES:jä ei olla maailmalla otettu paljoa käyttöön, eikä käynnissä olevista demonstraatioista juurikaan löydy tietoa. SMES:iin liittyviä hankkeita on ollut myös Suomessa, muttei kuitenkaan lähivuosina. Suprajohtavuuteen liittyvää tutkimusta toteutetaan kuitenkin Suomessa ja maailmalla edelleen, mikä voi uusien läpimurtojen myötä parantaa SMES:n asemaa.

Avainsanat: SMES, suprajohtavuus, suprajohde, energiavarasto, sähkömagnetiikka.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SMES-KONSEPTIN TOIMINTA	2
2.1 Suprajohtavuus	2
2.2 Kryogeniikka	5
2.3 SMES:n teoreettinen toiminta	6
2.4 SMES:n käytännön haasteita	9
3. SMES TEKNILLISESTÄ NÄKÖKULMASTA	11
3.1 SMES hyötysuhteen näkökulmasta	11
3.2 SMES energiatihyden näkökulmasta	12
3.3 SMES tehosiheyden näkökulmasta	14
3.4 SMES muiden teknillisten suureiden näkökulmasta	16
4. SMES TALOUDELLISESTA NÄKÖKULMASTA	22
4.1 SMES:n kustannuksiin vaikuttavat tekijät	22
4.2 SMES:n kustannus energiayksikköä kohti	23
4.3 SMES:n kustannus tehoyksikköä kohti	24
5. SMES:N KÄYTTÖKOHTEET JA GLOBAALI TILANNE	26
5.1 SMES:n käyttökohteet	26
5.2 SMES maailmalla	28
5.3 SMES Suomessa	29
6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	30
LÄHTEET	32

KUVALUETTELO

Kuva 1.	<i>Esimerkki tyyppin I (sininen) ja tyyppin II (punainen) suprajohteiden sisäisten magneettikenttien voimakkuuksien riippuvuudesta ulkoisen magneettikentän voimakkuudesta [6, s. 40 mukailten].....</i>	<i>3</i>
Kuva 2.	<i>NbTi:n, MgB₂:n, Bi-2223:n ja YBCO:n kriittiset pinnat [10, s. 3].</i>	<i>4</i>
Kuva 3.	<i>SMES:n yleispiirteinen rakenne [26, s. 9 mukailten].</i>	<i>7</i>
Kuva 4.	<i>Yleispiirteinen kaavio SMES:stä [27, s. 18 mukailten].</i>	<i>7</i>

TAULUKKOLUETTELO

<i>Taulukko 1.</i>	<i>Yleisimmät kaupalliset suprajohteet ja niiden toimintaparametrit.</i>	<i>4</i>
<i>Taulukko 2.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien hyötysuhteet.</i>	<i>12</i>
<i>Taulukko 3.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien energiatiheydet massan suhteen.</i>	<i>13</i>
<i>Taulukko 4.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien energiatiheydet tilavuuden suhteen.</i>	<i>14</i>
<i>Taulukko 5.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien tehotiheydet massan suhteen.</i>	<i>15</i>
<i>Taulukko 6.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien tehotiheydet tilavuuden suhteen.</i>	<i>16</i>
<i>Taulukko 7.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien teholuokitukset.</i>	<i>18</i>
<i>Taulukko 8.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien energialuokitukset.</i>	<i>18</i>
<i>Taulukko 9.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien purkausajat.</i>	<i>19</i>
<i>Taulukko 10.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien itsepurkautumisnopeudet.</i>	<i>19</i>
<i>Taulukko 11.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien käyttöiät vuosissa.</i>	<i>20</i>
<i>Taulukko 12.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien käyttöiät lataus-purkaus-kierroksissa.</i>	<i>20</i>
<i>Taulukko 13.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien kustannukset energiayksikköä kohti.</i>	<i>23</i>
<i>Taulukko 14.</i>	<i>Eri energiavarastotyyppien kustannukset tehoyksikköä kohti.</i>	<i>24</i>

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Alternating Current, suom. vaihtovirta
BSCCO	Bismuth Strontium Calcium Copper Oxide, suom. vismuttistrontiumkalsiumkuparioksidi
Bi-2212	BSCCO:n alalaji
Bi-2223	BSCCO:n alalaji
CAES	Compressed Air Energy Storage, suom. paineilmaenergiavarasto
CEPRI	China Electric Power Research Institute
DC	Direct Current, suom. tasavirta
EERA	European Energy Research Alliance
FES	Flywheel Energy Storage, suom. vauhtipyöräenergiavarasto
HTS	High-Temperature Superconductor, suom. korkean lämpötilan suprajohde
IHA	International Hydropower Association
LTS	Low-Temperature Superconductor, suom. matalan lämpötilan suprajohde
MTS	Medium-Temperature Superconductor, suom. keskitason lämpötilan suprajohde
PHES	Pumped Hydroelectric Energy Storage, suom. pumppuvoimalaitos
SMES	Superconducting Magnetic Energy Storage, suom. suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto
UPS	Uninterruptible Power Supply, suom. keskeytymätön virransyöttö
YBCO	Yttrium Barium Copper Oxide, suom. yttriumbariumkuparioksidi
B	magneettivuon tiheys
E	energia
H	magneetikentän voimakkuus
I	sähkövirta
J	sähkövirran tiheys
L	itseinduktanssi
T	lämpötila
μ	permeabiliteetti
η	hyötysuhde

1. JOHDANTO

Energiamurroksen myötä yleistyvät hajautetut sekä sääriippuvaiset sähköntuotantomuodot, kuten aurinko- ja tuulivoima, lisäävät tarvetta energian varastoinnille [1, s. 124]. Suuren mittaluokan energiavarastot auttaisivat myös sähköverkon kulutushuppujen vaikutusten hillitsemisessä [2, s. 6]. Sähköverkossa lisääntyneiden tehoelektronikkalaitteiden myötä myös sähkötehon laadunhallinnan merkitys on kasvanut [3, s. ix]. Eräs energian varastointiteknologia, joka voisi olla ratkaisu edellä mainittuihin ongelmiin, on suprajohdettava sähkömagneettinen energiavarasto (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) [4, s. 1].

Tässä työssä tarkastellaan SMES:n toimintaan liittyvää teoriaa sekä käytännön haasteita, sen ominaisuuksia teknillisestä ja taloudellisesta näkökulmasta muihin yleisiin energian varastointiteknologioihin verrattuna, sen tyypillisimpiä käyttökohteita ja sen tämänhetkistä tilannetta sekä Suomessa että maailmalla. SMES:iä verrataan muun muassa erilaisiin akkuteknologioihin, polttokennoihin, mekaanisiin energiavarastoihin, kuten pumppuvoimalaitoksiin, sekä superkondensaattoreihin.

Työn toisessa luvussa esitellään SMES-konseptin teoreettinen tausta, toiminta ja käytännön haasteet. Kolmannessa luvussa tarkastellaan SMES-konseptia teknillisestä näkökulmasta ja verrataan sen teknillisiä tunnuslukuja muihin ajankohtaisiin energiavarastoteknologioihin, kun taas neljännessä luvussa tarkastellaan SMES-konseptia taloudellisesta näkökulmasta edelleen verraten muihin vastaaviin teknologioihin. Viidennessä luvussa tutkitaan SMES-konseptin yleisimpiä käyttökohteita sekä globaalia tilannetta ja kuudennessa luvussa kootaan yhteen työn tärkeimmät havainnot sekä johtopäätökset.

2. SMES-KONSEPTIN TOIMINTA

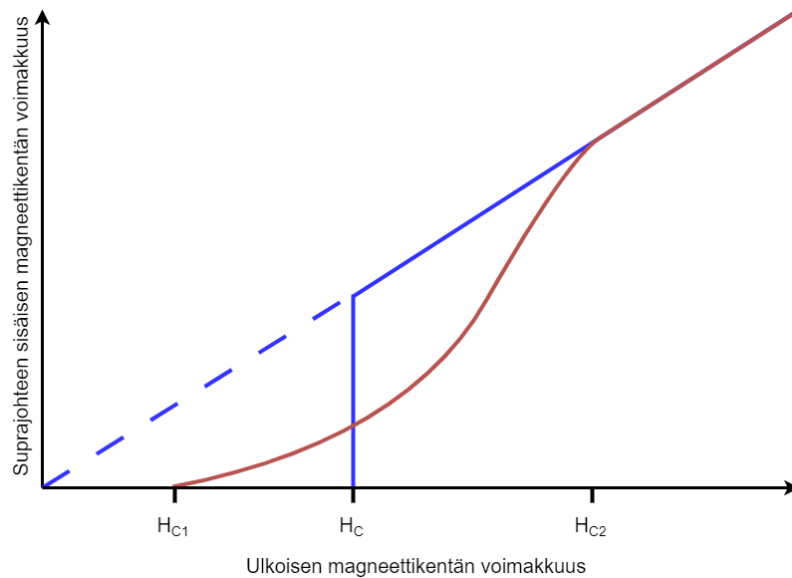
Tässä luvussa käsitellään SMES-konseptin toimintaan liittyvää teoriaa. Ensiksi käydään läpi SMES:n kannalta tärkeää suprajohtavuuden sekä kryogeniikan teoriaa yleisellä tasolla ja sen jälkeen esitetään SMES:n teoreettinen toimintamalli ja erilaiset ominaisuudet. Lopuksi käydään vielä läpi SMES:n soveltamiseen liittyviä haasteita käytännön tasolla.

2.1 Suprajohtavuus

Täydellinen suprajohde on materiaali, joka tietyn niin kutsutun kriittisen lämpötilan T_C alituttuaan saavuttaa täydellisen sähkönjohtavuuden ja diamagnetismin. Täydellinen diamagnetismi tarkoittaa materiaalissa sitä, että ulkoinen magneettikenttä ei pääse tunkeutumaan sen sisälle, mitä kutsutaan Meissner-ilmiöksi. Täydellinen sähkönjohtavuus voidaan taas mieltää materiaalin sähköisen resistiivisyyden katoamisena. Kriittisen lämpötilansa T_C yläpuolella suprajohteet ovat tyypillisesti johteina huonompia kuin yleisesti käytetyt hyvät johteet, ja ne ovat joko heikosti diamagneettisia tai paramagneettisia. Suprajohtavia alkuaineita ovat esimerkiksi lyijy, tantaali ja tina. [5, s. 23–24]

Suprajohteet jaetaan kahteen tyyppiluokkaan niiden diamagneettisten ominaisuuksiensa perusteella. Tyypin I suprajohteet poissulkevat ulkoisen magneettikentän kokonaan, kunnes ulkoinen magneettikenttä kasvaa liian suureksi, jolloin suprajohteet siirtyvät normaaliin johtavuustilaan. Tyypin II suprajohteet taas poissulkevat ulkoisen magneettikentän vain osittain, mutta säilyttävät kuitenkin siitä huolimatta suprajohtavan tilansa tiettyyn pisteeseen asti. Tyypin II suprajohteet tyypillisesti päästävät sisäänsä heikomman ulkoisen magneettikentän kuin tyypin I suprajohteet, mutta ne kestävät voimakkaamman ulkoisen magneettikentän menettämättä suprajohtavaa tilaansa verrattuna tyypin I suprajohteisiin. [6 s. 36–40]

Tyyppien I ja II suprajohteiden eroavaisuutta on havainnollistettu kuvassa 1. Kuvassa 1 tyypin I suprajohteen käyrä on merkitty sinisellä ja tyypin II punaisella. Kuvassa 1 H_{C1} on ulkoisen magneettikentän voimakkuus, jolla tyypin II suprajohde päästää osan magneettikentästä sisälleen, H_{C2} ulkoisen magneettikentän voimakkuus, jolla tyypin II suprajohde menettää suprajohtavan tilansa, ja H_C ulkoisen magneettikentän voimakkuus, jolla tyypin I suprajohde päästää ulkoisen magneettikentän sisälleen ja menettää suprajohtavuutensa.



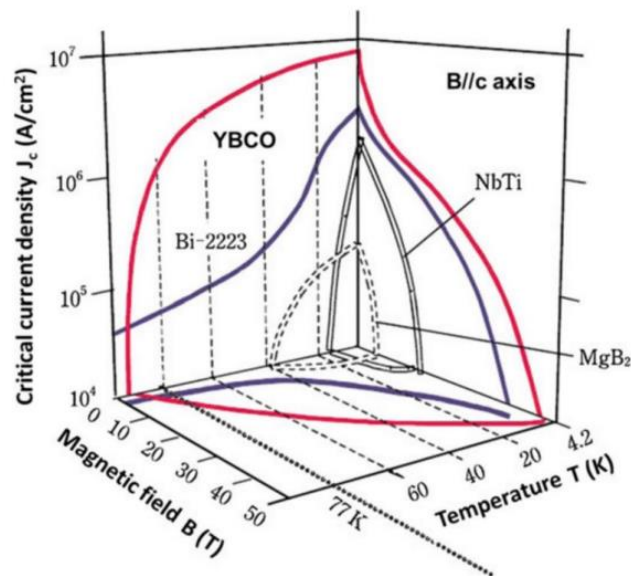
Kuva 1. Esimerkki tyypin I (sininen) ja tyypin II (punainen) suprajohteiden sisäisten magneettikenttien voimakkuuksien riippuvuudesta ulkoisen magneettikentän voimakkuudesta [6, s. 40 mukailten].

Suprajohteita luokitellaan myös niiden kriittisten lämpötilojen T_C perusteella matalan (LTS) ja korkean lämpötilan suprajohteisiin (HTS) [6, s. vii]. Joskus suprajohteita luokitellaan myös keskitason lämpötilan suprajohteisiin (MTS), jos niiden kriittiset lämpötilat ovat LTS-suprajohteiden (4,2 K) ja HTS-suprajohteiden (77–90 K) kriittisten lämpötilojen välissä. Tästä esimerkkinä magnesiumdiboridi (MgB_2), jonka kriittinen lämpötila on 39 K. [7, s. 69][8, s. 6] MgB_2 :n lisäksi muita yleisiä kaupallisia suprajohteita ovat niobiumtitaani (NbTi) ja niobiumtina (Nb_3Sn), jotka ovat LTS-suprajohteita, ja yttriumbariumkuparioksidi (YBCO) sekä vismuttistrontiumkalsiumkuparioksidi (BSCCO), jotka ovat HTS-suprajohteita [9].

Kriittisen lämpötilan T_C lisäksi suprajohteilla on kaksi muuta rajoittavaa suuretta: kriittinen ulkoinen magneettivuon tiheys B_C ja kriittinen sähkövirran tiheys J_C . Kuten jo aiemmin todettiin, voimakas ulkoinen magneettikenttä saa materiaalin menettämään suprajohtavan tilansa. Tämä voi johtua suuresta ulkoisesta magneettivuon tiheydestä tai materiaalin läpi kulkevasta suuresta sähkövirran tiheydestä, joka indusoi voimakkaan magneettikentän materiaalin pinnalle. Nämä kolme kriittistä suuretta muodostavat JTB-akselistoon niin kutsutun kriittisen pinnan. [5, s. 52]

Taulukko 1. Yleisimmät kaupalliset suprajohteet ja niiden toimintaparametrit.

Supra- johde	Kriittinen lämpötila T_c (K)	Kriittinen ulkoinen magneetti- vuon tiheys B_{c2} (T) (T (K))	Kriittinen säh- kövirran tiheys J_c (T (K) / B (T)) (kA/mm ²)	Lähteet
NbTi	9	12 (4,2)	3 (4,2 / 5)	[11, s. 100–102, 121]
Nb ₃ Sn	18,5	24 (4,2)	4,5 (4,2 / 5)	[11, s. 100–102] [12, s. 97]
MgB ₂	39	4 (25)	0,4 (25 / 0,9)	[11, s. 113] [13, s. 1263–1264]
Bi-2212	96	>100 (4,2)	6,5 (4,2 / 16)	[11, s. 109–110] [14, s. 1]
Bi-2223	107	>100 (10)	0,83 (4,2 / 0)	[11, s. 109–110] [15, s. 433][16, s. 12]
YBCO	92	150 ± 20 (0)	4 (39 / 5)	[11, s. 109–110] [17, s. 6][18, s. 3]

**Kuva 2.** NbTi:n, MgB₂:n, Bi-2223:n ja YBCO:n kriittiset pinnat [10, s. 3].

Taulukossa 1 on esitetty toimintaparametrit kuudelle yleisimmälle kaupalliselle suprajohdeelle ja kuvassa 2 on esitetty kriittiset pinnat NbTi:n, MgB₂:n, Bi-2223:n ja YBCO:n osalta. Bi-2212 ja Bi-2223 ovat BSCCO:n alalajeja [10, s. 3]. Taulukossa 1 kriittisellä ulkoisella magneettivuon tiheydellä B_c tarkoitetaan magneettivuon tiheyttä, jolla suprajohde menettää suprajohtavuutensa. Kriittinen ulkoinen magneettivuon tiheys B_c ja kriittinen sähkövirran tiheys J_c on ilmoitettu tietyssä toimintapisteessä, eli lämpötilassa ja ulkoisessa magneettivuon tiheydessä. Suprajohteet on jaettu LTS-, MTS- ja HTS-suprajohteisiin. HTS-suprajohteiden tapauksessa B_c :n arvot ovat lähinnä arvioita niiden suuruutensa vuoksi.

Taulukosta 1 nähdään, että LTS-suprajohteiden kriittiset toimintaparametrit ovat tyypillisesti HTS-suprajohteiden toimintaparametreja huomattavasti tiukemmat. Bi-2212 ja YBCO esimerkiksi saavuttavat saman suuruusluokan kriittiset sähkövirran tiheydet suuremmassa lämpötilassa ja joko yhtä voimakkaassa tai voimakkaammassa ulkoisessa magneettikentässä. Toisaalta näiden kriittisten sähkövirran tiheyksien saavuttamiseen Bi-2212 ja YBCO vaativat huomattavasti omia kriittisiä lämpötiloja ja ulkoisia magneettivuon tiheyksiä vaativammat toimintaolosuhteet.

Kuvan 2 havainnollistama kriittinen pinta tarkoittaa käytännössä sitä, että suprajohteelle ominaisten kriittisten suureiden J_c , T_c ja B_c suuruudet riippuvat toisistaan. Jos suprajohde läpi kulkee sähkövirran tiheys J , menettää suprajohde suprajohtavuustilansa matalammalla lämpötilalla T kuin sille ominaisella kriittisellä lämpötilalla T_c , ja pienemmällä ulkoisella magneettivuon tiheydellä B kuin sille ominaisella kriittisellä ulkoisella magneettivuon tiheydellä B_c . [5, s. 56] Suprajohde on siis suprajohtavassa tilassa vain silloin, kun siihen vaikuttavien kriittisten suureiden määrittämä piste on kriittisen pinnan ja origon välissä JTB-koordinaatistossa.

2.2 Kryogeniikka

Nimityksestään huolimatta myös merkittävä osa korkean lämpötilan suprajohteista vaatii toimiakseen kryogeenisen lämpötilan [19, s. 5]. Kryogeenisiksi lämpötiloiksi luokitellaan tyypillisesti alle 120 K:n (-153 °C) lämpötilat ja kryogeniikaksi kutsutaan näiden lämpötilojen tuottamiseen ja käsittelyyn kohdistuvaa tiedettä ja tekniikkaa [20, s. 3]. Suprajohteiden vaatimien matalien lämpötilojen vuoksi kryogeniikka on oleellinen osa suprajohtavuuden sovelluksia. Suprajohtavuuden lisäksi kryogeniikkaa hyödynnetään esimerkiksi erilaisten kaasujen käsittelyssä ja biologisissa sekä lääketieteellisissä sovelluksissa [21, s. 7].

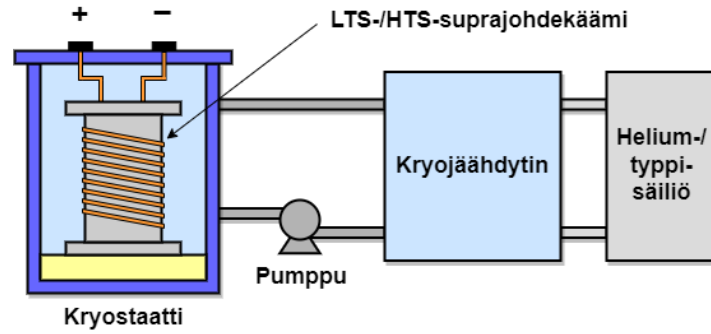
Suprajohteiden jäädyttämiseen käytetään tyypillisesti nestemäisiä kaasuja, yleisimmin nestemäistä heliumia tai nestemäistä typpeä. Nestemäisen heliumin yleisimmän esiintymismuodon (^4He) höyrystymislämpötila on 4,2 K (-269 °C), joka on matalin yleisten kryogeenisten nesteiden joukossa. Matalan lämpötilan suprajohteet tyypillisesti vaativat jäädytysnesteekseen nestemäisen heliumin, mutta osa korkean lämpötilan suprajohteista voidaan jäädyttää nestemäisellä typellä, jonka höyrystymislämpötila on 77 K (-196 °C). HTS-suprajohteiden sähköiset ja magneettiset ominaisuudet kuitenkin tyypillisesti paranevat matalammassa lämpötiloissa, joten nestemäistä heliumia käytetään myös joissain HTS-suprajohtesovelluksissa. [20, s. 161–162][21, s. 54 & 399]

Suprajohde voidaan jäähdyttää joko kryogeeniin eli jäähdytysseokseen upottamalla ilman jäähdytyskiertoa tai mekaanisesti kryogeenisellä jäähdyttimellä eli kryojäähdyttimellä. Mekaaninen jäähdytys on tyypillisesti kryogeeniin upottamista tehokkaampi ratkaisu. [22, s. 1955]. Mekaaninen jäähdytys perustuu ensisijaisesti termodynaamiseen prosessiin, jossa kylmäainetta, esimerkiksi heliumia, puristetaan kokoon, laajennetaan ja sen lämpöä siirretään siten, että saadaan aikaan jäähtyminen. Useimmissa kaasujäähdytysprosesseissa jäähtyminen saadaan aikaan kaasun laajentumisesta suuresta paineesta pieneen paineeseen. [21, s. 317] Typen käyttäminen jäähdytysnesteenä heliumin sijasta johtaa yksinkertaisempiin ja halvempiin jäähdytysjärjestelmiin, mikä nostaa HTS-suprajohteiden kysyntää [23, s. 1–2].

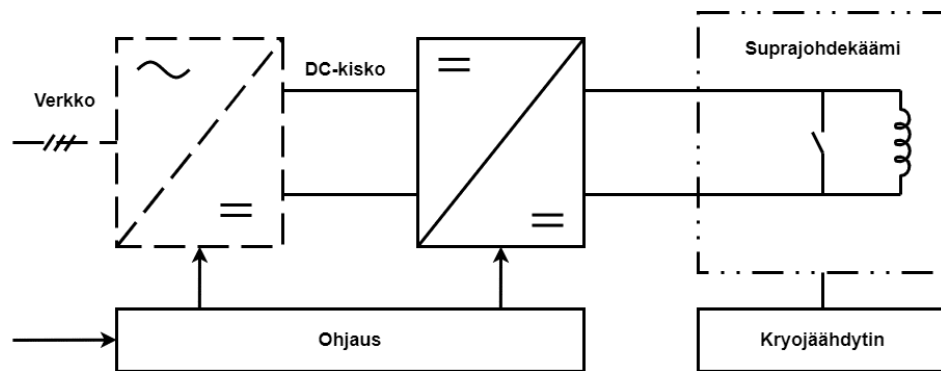
Kryogeeniikassa yksi keskeisistä haasteista on lämpövuoto, joka otetaan huomioon järjestelmän lämpöeristyksellä. Lämpöeristyksen tehtävä on minimoida lämmön siirtyminen järjestelmän ja sen ympäristön välillä säteilyn tai johtumisen kautta. [20, s. 120] Timmerhausin ja Reedin [20, s. 120–131] mukaan 1950- ja 2000-lukujen välisenä aikana kryogeeniikassa pääasiassa käytetyt eristystekniikat olivat tyhjö-, jauhe-, vaahto-, kuitu- sekä monikerroseristys. Kaksi suurinta eristyksen valintaan vaikuttavaa tekijää ovat eristyksen tehokkuus ja kustannus, mutta myös muut tekijät kuten tarvittu tilavuus ja eristykseen liittyvä massa vaikuttavat asiaan. Kuitenkin eristyksen valinnan tarkoitus on tasapainottaa eristysjärjestelmän asennuksesta aiheutuvat kustannukset vähennettyjen energiakustannusten aiheuttamien säästöjen kanssa. [20, s. 120]

2.3 SMES:n teoreettinen toiminta

Suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto (SMES) varastoi sähköenergian magneettikenttäänsä. SMES:n kryogeenisessä lämpötilassa olevaan suprajohtokäämiin syötetään tasavirtaa, joka kulkiessaan käämin läpi synnyttää sen sisälle magneettikentän. [24, s. 116–117] Kun tasavirtalähde kytketään irti, olemattoman resistanssinsa ansiosta suprajohtokäämi säilyy virrallisena, jolloin tasavirtalähteestä saatu energia säilyy käämin magneettikentässä [25, s. 358]. Varastoitu energia saadaan takaisin käyttöön synnyttämällä suprajohtokäämin päiden väliin vastakkaisen polariteetin jännite, jolloin syöttävä verkko mukailee kuormaa, mikä saa energian purkautumaan käämistä. [4, s. 2]



Kuva 3. SMES:n yleispiirteinen rakenne [26, s. 9 mukailten].



Kuva 4. Yleispiirteinen kaavio SMES:stä [27, s. 18 mukailten].

SMES koostuu tyypillisesti supraohdekäämistä, tehonmuunninjärjestelmästä, kryojäähdyttimestä ja ohjausjärjestelmästä [4, s. 2–4]. SMES:n yleispiirteinen rakenne supraohdekäämin ja kryojäähdyttimen osalta on esitetty kuvassa 3 ja yleispiirteinen kaavio SMES:stä on esitetty kuvassa 4. Kuva 3 havainnollistaa SMES:n mekaanista rakennetta sen supraohdekäämin ja jäähdytysjärjestelmän osalta ja kuva 4 havainnollistaa SMES:n sähköistä rakennetta.

Tyypillisesti SMES:ssä käytetään joko solenoidi- tai toroidikäämityksiä. Solenoidikäämitykseen kohdistuva mekaaninen rasitus on pienempi, mutta magneettinen hajakenttä on suurempi. Vastaavasti toroidikäämityksen kohdistuva mekaaninen rasitus on suurempi, mutta magneettinen hajakenttä on pienempi. [7, s. 69] Solenoidikäämitys on tyypillisesti toroidikäämistä kustannustehokkaampi ja yksinkertaisempi valmistaa [28, s. 1]. Ominaisuuksiensa vuoksi solenoidikäämityksiä käytetään tyypillisesti pienissä ja keskikokoisissa SMES-yksiköissä ja toroidikäämityksiä suurissa SMES-yksiköissä. [7, s. 69]

Kuvassa 4 AC/DC- ja DC/DC-muuntajat kuvaavat SMES:n tehonmuunninjärjestelmää, joka muodostaa rajapinnan suprajohdekäämin ja verkon välille, hoitaen niiden välisen tehon siirron [4, s. 2][29, s. 38]. Tyypillisimmät kolme SMES:ssä käytetyt tehonmuunninjärjestelmät ovat tyristoreihin perustuvat, voltage source controllereihin (VSC) eli jännitelähdemuuntimiin perustuvat ja current source controllereihin (CSC) eli virtalähdemuuntimiin perustuvat järjestelmät [4 s. 2]. Tyristoreihin perustuvia tehonmuunninjärjestelmiä käytetään yleensä silloin, kun tarvitaan vain pätötehon ohjausta, ja VSC:hin ja CSC:hin perustuvia silloin, kun tarvitaan joko loistehon ohjausta tai sen lisäksi myös pätötehon ohjausta [29, s. 38].

Kryostaatin tehtävä on pitää sen sisällä sijaitseva suprajohdekäämi sen vaatimassa lämpötilassa, joka on tyypillisesti tuotettu kryojäähdyttimellä [30, s. 699][22, s. 1955]. Kryojäähdytin on tyypillisesti Gifford-McMahon-jäähdytin [31, s. 361], joka kierrättää jäähdytinainetta korkeassa ja matalassa paineessa ympäri järjestelmää, muodostaen järjestelmän toiselle puolelle kylmän ja toiselle lämpimän alueen [32, s. 1–3]. SMES:ssä voidaan käyttää myös useampaa kryojäähdytintä, joilla jäähdytetään SMES:n eri osia. Esimerkiksi toinen kryojäähdyttimistä voi hoitaa itse suprajohdekäämin jäähdytyksen ja toinen lämpösäteilysuojan ja käämistä lähtevien johtimien jäähdytyksen. [31, s. 361]

Ohjausjärjestelmä muodostaa yhteyden verkon vaatimusten ja suprajohdekäämin teho-
virtojen välille. Se saa tilannesignaaleja sekä verkosta että suprajohdekäämistä ja se
valvoo SMES-järjestelmän turvallisuutta. [4, s. 4, katso [17]] Kuten kuvasta 4 nähdään,
suprajohdekäämin rinnalla on tyypillisesti myös ohituskytkin pitkän aikavälin ylläpitoa
varten sekä turvallisuussyistä [27, s. 18]. Ohituskytkimen avulla voidaan vähentää ener-
giahäviöitä SMES:n ollessa valmiustilassa ja suojata suprajohdekäämi, jos jäähdytys
lakkaa toimimasta [30, s. 700].

SMES-yksikköön varastoitu energia E_{SMES} voidaan määrittää jouleina kaavalla

$$E_{SMES} = \frac{1}{2}LI^2, \quad (1)$$

jossa L on käämin induktanssi ja I on käämissä kulkevan sähkövirran suuruus [24, s. 118]. Varastoitu energia voidaan esittää myös magneettikentän voimakkuuden H avulla kaavalla

$$E_{SMES} = \frac{1}{2}\mu H^2, \quad (2)$$

jossa μ on magneettikentän väliaineen permeabiliteetti [2, s. 85]. Kaavoista 1 ja 2 nähdään, että varastoitu energia on suoraan verrannollinen suorajohdekäämissä kulkevan virran ja sen sisäisen magneettikentän voimakkuuden neliöihin. Varastoidun energiamäärän kasvaessa siis sekä virta että magneettikentän voimakkuus kasvavat.

SMES:llä on monia vahvuuksia muihin energiavarastoihin verrattuna [26, s. 9]. Se voi saavuttaa hyvin korkean, jopa yli 95 %:n hyötysuhteen [26, s. 9], sillä varastoitavaa energiaa ei tarvitse muuttaa sähköisestä olomuodosta esimerkiksi mekaaniseen tai kemialliseen olomuotoon [30, s. 699]. Tehonmuunninjärjestelmä aiheuttaa tyypillisesti noin 2–3 %:n tehohäviön sekä lataus- että purkaustilanteessa [2, s. 90], kun taas itse suprajohdekäämissä syntyvät häviöt ovat tyypillisesti hyvin pieniä [24, s. 117]. SMES-yksikkö pystyy siirtymään täysin latautuneen ja purkautuneen tilan välillä hyvin nopeasti molempiin suuntiin, mikä johtaa suuriin lataus- ja purkutehoihin [25, s. 358]. SMES on tyypillisesti myös hyvin käyttövarma, sillä itse energian varastoimiseen ei käytetä liikkuvia osia [26, s. 9].

SMES:llä on kuitenkin myös heikkouksia. Itse varastoitu energiamäärä ei ole SMES-yksiköillä tyypillisesti kovin suuri verrattuna muihin saman suuruusluokan energiavarastoihin [4, s. 6]. SMES-yksiköiden itsepurkautumisnopeus on myös melko suuri, tyypillisesti noin 10–15 % nimellisestä energiakapasiteetista vuorokaudessa [33, s. 8]. Itsepurkautumisen syynä on suprajohdekäämin vaatima jäähdytys [25, s. 358]. Varastoitu energia ei siis käytännössä katoa magneettikentästä mihinkään, vaan vastaava määrä kulutetaan suprajohdekäämin ylläpitävään jäähdytykseen.

2.4 SMES:n käytännön haasteita

SMES-yksiköiden hyödyntämiseen liittyy useita käytännön haasteita, jotka täytyy ottaa sovelluksissa huomioon. Haasteet tyypillisesti liittyvät SMES-järjestelmän kustannuksiin, jäähdytykseen, pieneen energian varastointikapasiteettiin, energian varastoinnin aiheuttamiin voimakkaisiin magneettikenttiin ja suprajohdemateriaalien ominaisuuksiin [33, s. 8]. SMES-järjestelmien kustannuksia käsitellään myöhemmin luvussa 4.

Kuten osiossa 2.1 todettiin, useimmat suprajohdeet vaativat kryogeenisen toimintalämpötilan säilyttääkseen ominaisuutensa. Jäähdytys on siis välttämätön osa SMES-yksikköä ja se kattaa tyypillisesti merkittävän osan SMES-yksikön kustannuksista [34, s. 1]. Kryogeenisen lämpötilan ylläpitäminen on myös tärkeää turvallisuussyistä. Jos suprajohdekäämi menettää suprajohdevuutensa, sen resistanssin yhtäkkinen nousu voi johtaa suureen ja vaaralliseen määrään ohmista lämpenemistä [2, s. 91].

Koska SMES-yksiköiden energian varastointikapasiteetti on tyypillisesti melko pieni, kapasiteetin lisääminen johtaa yleensä kooltaan suuriin rakenteisiin [33, s. 8]. Esimerkiksi 1 GWh:n SMES-yksikkö vaatisi noin 160 km pituisen suprajohdesilmukan [4, s. 8, katso [193]]. Yli 1 GWh:n SMES-yksiköitä ei enää juurikaan suunnitella niiden suurien investointikustannusten ja kyseenalaisen käyttövarmuuden takia [35, s. 13]. SMES siis rajoittuu tyypillisesti suuren tehon, mutta pienen energiamäärän vaativiin käyttökohteisiin [4, s. 8].

SMES:n rakenteessa on myös otettava huomioon suprajohdekäämissä syntyvä voimakas magneettikenttä [33, s. 8], jonka vuon tiheys voi ylittää jopa 9 T [26, s. 9]. Voimakas magneettikenttä voi aiheuttaa käämiin suuren Lorentzin voiman lisäten sen mekaanista rasitusta [4, s. 8][33, s. 8]. Magneettikentän vaikutus ympäristöön on otettava myös huomioon sekä Lorentzin voiman [2, s. 90] että mahdollisten terveysvaikutusten näkökulmasta [33, s. 8]. Voimakkaat magneettikentät voivat aiheuttaa ihmiselle esimerkiksi kudosten lämpenemistä, lihasten, hermojen ja aistinelimien stimuloitumista sekä lääkinällisten laitteiden häiriytymistä [36].

Myös itse suprajohteisiin liittyvät ominaisuudet tuovat haasteita SMES-yksiköiden käytännön sovelluksiin. Esimerkiksi BSCCO:n kriittinen sähkövirran tiheys laskee jyrkästi ulkoisen magneettikentän voimakkuuden kasvaessa, mikä rajoittaa sen käyttöä. [33, s. 8] Tyypillisesti suprajohteiden kriittinen sähkövirran tiheys on suurimmillaan, kun lämpötila on absoluuttisessa nollapisteessä, eli 0 K (-273 °C) ja ulkoinen magneettivuon tiheys on 0 T [5, s. 55–56]. Absoluuttisen nollapisteen saavuttaminen on kuitenkin termodynamiikan 3. lain mukaan mahdotonta [21, s. 14]. Kaikki kolme kriittistä suuretta ja niiden väliset vuorovaikutukset on siis otettava huomioon.

3. SMES TEKNILLISESTÄ NÄKÖKULMASTA

Tässä luvussa esitellään SMES:n merkittävimmät teknilliset tunnusluvut ja verrataan niitä muiden tyypillisimpien energian varastointitekniikoiden vastaaviin tunnuslukuihin. Vertauskohteita ovat erilaiset akut, vetypolttokennot, pumppuvoimalaitos (Pumped Hydroelectric Energy Storage, PHES), paineilmaenergiavarasto (Compressed Air Energy Storage, CAES), vauhtipyöräenergiavarasto (Flywheel Energy Storage, FES) ja superkondensaattorit. Energiavarastot on jaettu akkuteknologioihin, polttokennoihin, mekaanisiin energiavarastoihin ja sähköisiin energiavarastoihin. Energiavarastoja vertaillaan ensin hyötysuhteen, energiatiheuden ja tehosiheyden näkökulmasta ja sitten teho- ja energialuokituksen, purkausajan ja itsepurkautumisnopeuden sekä käyttöiän näkökulmasta.

3.1 SMES hyötysuhteen näkökulmasta

Lataus-purkaus-hyötysuhteella η_c tarkoitetaan energiavarastosta takaisin saadun energian E_d suhdetta energiaan E_{ch} , joka kulutettiin energiavaraston lataamiseen. Hyötysuhde lasketaan keskiarvona yhtä lataus- ja purkauskierrosta kohden. [27, s. 11] Käytännössä hyötysuhde siis kertoo, kuinka suuri osa varastoidusta energiasta saadaan takaisin hyödynnettäväksi.

Yleisimpien energian varastointitekniikoiden tyypilliset hyötysuhteet on esitetty taulukossa 2. Useamman lähteen tapauksessa hyötysuhteen rajat on valittu siten, että jokaisen lähteen ilmoittamat arvot tai rajat sisältyvät niihin. Eri energiavarastotyyppien eri tekniikoiden välisiä eroja ei olla otettu huomioon.

Taulukosta 2 nähdään, että SMES:llä on erittäin korkea hyötysuhde muihin energian varastointitekniikoihin verrattuna. Hyötysuhteen ala- ja yläraja ovat suurimpien joukossa ja niiden välinen etäisyys on pienimpien joukossa. Hyötysuhteen kannalta SMES:n merkittävimpiä kilpailijoita ovat superkondensaattorit, FES:t ja litiumioniakut. Nämä energian varastointitekniikat yltyvät yhtä suuriin hyötysuhteisiin, mutta superkondensaattoreita lukuun ottamatta niiden hyötysuhteiden alarajat ovat alhaisemmat. Tarkasteltujen energian varastointitekniikoiden joukossa vetypolttokennoilla on huomattavasti alhaisin hyötysuhde.

Taulukko 2. Eri energiavarastotyyppien hyötysuhteet.

Energiavarastotyyppi	Hyötysuhde η	Lähteet
Lyijyhappoakut	70–90 %	[37, s. 308][38, s. 20][39, s. 3882]
Litiumioniakut	85–98 %	[37, s. 308][38, s. 21][40, s. 368]
Nikkelikadmiumakut	59–90 %	[37, s. 308][41, s. 185]
Natriumrikkiakut	75–90 %	[37, s. 308][38, s. 23][40, s. 368]
Vanadiiniredoksivirtausakut	75–90 %	[37, s. 308][40, s. 368][42, s. 66]
Sinkkibromivirtausakut	65–80 %	[37, s. 308][40, s. 368][43]
Vetypolttokennot	40–60 %	[44, s. 2]
PHES	65–87 %	[38, s. 18][40, s. 368][41, s. 176]
CAES	50–89 %	[37, s. 308][40, s. 368][41, s. 176]
FES	85–95 %	[37, s. 308][39, s. 3882][40, s. 368]
Superkondensaattorit	90–99 %	[37, s. 308][38, s. 28][40, s. 368]
SMES	90–98 %	[37, s. 308][40, s. 368][45, s. 1]

Korkea hyötysuhde on SMES:n [33, s. 2] ja yleisesti myös suprajohdeiden yksi merkittävimpiä vahvuuksia [35, s. 2]. Suprajohdeiden yksi tehtävistä on nimenomaan minimoida SMES:ssä syntyvät ohmiset häviöt [27, s. 18]. Kuten osiossa 2.3 mainittiin, itse suprajohdekämin heikentävä vaikutus hyötysuhteeseen on hyvin pieni verrattuna esimerkiksi tehonmuunninjärjestelmän vaikutukseen, joka on tyypillisesti noin 2–3 % luokkaa. Muita hyötysuhteeseen vaikuttavia tekijöitä ovat jäähdytyksestä aiheutuvat häviöt, joita pyritään tyypillisesti minimoimaan korkean hyötysuhteen turvaamiseksi [4, s. 4].

3.2 SMES energiatiheyden näkökulmasta

Eräs tärkeä suure energian varastointitekniikoiden suhteen on energiatiheys. Energiatiheyttä käytetään tyypillisesti joko painoon tai tilavuuteen suhteutettuna ja sillä ilmaistaan, kuinka suuren energiamäärän energiavarastoon voi varastoida paino- tai tilavuusyksikköä kohti. Energiatiheyden yksikkönä käytetään tyypillisesti Wh/kg tai kWh/t painoon suhteutettuna ja kWh/m³ tai Wh/l tilavuuteen suhteutettuna. Energiatiheys auttaa energiavarastojen vertailussa, sillä se kertoo kuinka painava tai tilavuudeltaan suuri energiavarasto tarvitaan tietyn energiamäärän varastointiin eri teknologioilla. [27, s. 23–25]

Yleisimpien energian varastointitekniologioiden energiatiheddet on esitetty taulukossa 3 massan suhteen ja taulukossa 4 tilavuuden suhteen. Useamman lähteen tapauksessa arvojen rajat on valittu siten, että jokaisen lähteen ilmoittamat arvot tai rajat sisältyvät niihin. Eri energiavarastotyyppien eri teknologioiden välisiä eroja ei olla otettu huomioon.

Taulukoista 3 ja 4 nähdään, että SMES:n energiatiheys on yksi pienimmistä sekä painon että tilavuuden suhteen. Esimerkiksi litiumioniakkuihin verrattuna samansuuruisen energiamäärän varastointiin SMES vaatisi vähintään 12-kertaisen painon omaavan yksikön. Muita pienen energiatihedden omaavia energian varastointitekniologioita ovat superkondensaattorit ja PHES massan sekä tilavuuden suhteen ja CAES tilavuuden suhteen. Ylivoimaisesti suurin energiatiheys sekä tilavuuden että painon suhteen tarkastelluista energiavarastotyypeistä kuuluu vetypolttokennoille.

Taulukko 3. Eri energiavarastotyyppien energiatiheddet massan suhteen.

Energiavarastotyyppi	Energiatiheys massan suhteen (Wh/kg)	Lähteet
Lyijyhappoakut	30–50	[37, s. 308][38, s. 72] [46, s. 1515]
Litiumioniakut	60–200	[38, s. 72][39, s. 3882] [40, s. 368]
Nikkelikadmiumakut	15–75	[37, s. 308][38, s. 72] [39, s. 3882]
Natriumrikkiakut	100–250	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	10–50	[38, s. 72][40, s. 368][41, s. 197]
Sinkkibromivirtausakut	30–50	[37, s. 308][40, s. 368]
Vetypolttokennot	800–10 000	[37, s. 308][40, s. 368]
PHES	0,2–2	[38, s. 72][40, s. 368][41, s. 176]
CAES	10–60	[37, s. 308][39, s. 3882] [40, s. 368]
FES	5–100	[39, s. 3882][40, s. 368] [46, s. 1522]
Superkondensaattorit	0,5–15	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
SMES	0,5–5	[37, s. 308][40, s. 368]

Taulukko 4. Eri energiavarastotyyppien energiatiheydet tilavuuden suhteen.

Energiavarastotyyppi	Energiatiheys tilavuuden suhteen (Wh/l)	Lähteet
Lyijyhappoakut	50–80	[37, s. 308][38, s. 72]
Litiumioniakut	200–500	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
Nikkelikadmiumakut	15–150	[37, s. 208][38, s. 72][41, s. 185]
Natriumrikkiakut	150–300	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
Vanadiiniredoksivirtausakut	10–70	[37, s. 308][38, s. 72][41, s. 197]
Sinkkibromivirtausakut	30–60	[37, s. 308][40, s. 368]
Vetypolttokennot	500–3 000	[37, s. 308][40, s. 368]
PHES	0,2–2	[38, s. 72][40, s. 368][41, s. 176]
CAES	2–6	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
FES	20–80	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
Superkondensaattorit	10–32	[37, s. 308][38, s. 72][47, s. 2]
SMES	0,2–2,5	[37, s. 308][40, s. 368]

Kuten osiossa 2.3 mainittiin, 1 GWh:n SMES-yksikkö vaatisi noin 160 km pituisen suprajohdesilmukan ja pieni energiatiheys rajoittaa SMES:n soveltuvuutta suurien energiämäärien varastoinnissa. SMES:n energiatiheys on kuitenkin suurempi kuin esimerkiksi PHES:illä ja SMES:iä voidaankin käyttää sijainneissa, joissa PHES olisi epäkäytännöllinen. [4, s. 2 & 8] SMES:n pienen energiatiheyden aiheuttamaa rajoitusta voidaan kuitenkin lieventää esimerkiksi SMES-akku-hybridien energiavarastojen avulla, joissa SMES:n huonoa energiakapasiteettia kompensoidaan akun avulla ja samalla akun huonoa teho-kapasiteettia kompensoidaan SMES:n avulla [48, s. 1].

3.3 SMES tehosiheyden näkökulmasta

Tehosiheys on myös tärkeä suure energian varastointitekniologioiden kannalta. Kuten energiatiheyttä, myös tehosiheyttä käytetään sekä painoon että tilavuuteen suhteutettuna. Tehosiheydellä ilmaistaan, kuinka suuri teho energiavarastosta saadaan paino- tai tilavuusyksikköä kohti. Tehosiheyden yksikkönä käytetään tyypillisesti W/kg tai kW/t painoon suhteutettuna ja Wh/l tai kW/m³ tilavuuteen suhteutettuna. [27, s. 25] Tehosiheys auttaa energiavarastojen välisessä vertailussa, sillä se kertoo kuinka painava tai tilavuudeltaan suuri energiavarasto vaaditaan tietyn teho vaatimuksen täyttämiseen.

Yleisimpien energian varastointiteknologioiden tehottiheydet on esitetty taulukossa 5 massan suhteen ja taulukossa 6 tilavuuden suhteen. Useamman lähteen tapauksessa arvojen rajat on valittu siten, että jokaisen lähteen ilmoittamat arvot tai rajat sisältyvät niihin. Eri energiavarastotyyppien eri teknologioiden välisiä eroja ei olla otettu huomioon.

Taulukoista 5 ja 6 nähdään, että SMES:n tehottiheydet sekä massan että tilavuuden suhteen ovat suurimpien joukossa. Massan suhteen SMES:n tehottiheyden alaraja on suurin ja yläraja toiseksi suurin ja tilavuuden suhteen alaraja on kolmanneksi suurin ja yläraja neljänneksi suurin. SMES on siis tehottiheydeltään massan suhteen hieman paremmissa asemassa kuin tilavuuden suhteen muihin energian varastointiteknologioihin verrattuna. SMES:n merkittävimpiä kilpailijoita tehottiheyden suhteen ovat superkondensaattorit, FES:t ja litiumioniakut. Ylivoimaisesti suurin tehottiheys sekä massan että tilavuuden suhteen kuuluu superkondensaattoreille.

Taulukko 5. Eri energiavarastotyyppien tehottiheydet massan suhteen.

Energiavarastotyyppi	Tehottiheys massan suhteen (W/kg)	Lähteet
Lyijyhappoakut	75–300	[37, s. 308][46, s. 1522]
Litiumioniakut	500–2 000	[40, s. 368][46, s. 1516]
Nikkelikadmiumakut	50–1 000	[37, s. 308][41, s. 185][46, s. 1522]
Natriumrikkiakut	150–230	[37, s. 308][40, s. 368]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	30–170	[39, s. 3882][41, s. 197]
Sinkkibromivirtausakut	5,5–110	[41, s. 197]
Vetypolttokennot	500+	[37, s. 308]
PHES	0,01–0,12	[41, s. 176]
CAES	2,2–24	[41, s. 176]
FES	400–1 500	[37, s. 308][40, s. 368][46, s. 1522]
Superkondensaattorit	500–10 000	[37, s. 308][40, s. 368][46, s. 1518]
SMES	500–2 000	[37, s. 308][40, s. 368]

Taulukko 6. Eri energiavarastotyyppien tehotiheydet tilavuuden suhteen.

Energiavarastotyyppi	Tehotiheys tilavuuden suhteen (W/l)	Lähteet
Lyijyhappoakut	10–700	[37, s. 308][38, s. 72][41, s. 184]
Litiumioniakut	1 300–10 000	[38, s. 72]
Nikkelikadmiumakut	35–700	[38, s. 72][41, s. 185]
Natriumrikkiakut	120–160	[38, s. 72]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	0,5–34	[38, s. 72][41, s. 197]
Sinkkibromivirtausakut	2,5–8,5	[41, s. 197]
Vetypolttokennot	500+	[37, s. 308][40, s. 368]
PHES	0,01–0,2	[38, s. 72][41, s. 176]
CAES	0,2–2	[37, s. 308][38, s. 72]
FES	1 000–5 000	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]
Superkondensaattorit	40 000–120 000	[37, s. 308][38, s. 72]
SMES	1 000–4 000	[37, s. 308][38, s. 72][40, s. 368]

Suuri tehotiheys on yksi SMES:n vahvuuksista, eikä sillä ole massan suhteen teoreettista ylärajaa [33, s. 3]. Vaikka SMES:n energiatiheys on pieni suhteessa muihin energian varastointiteknologioihin, SMES:iin varastoitu energia on hyvin nopeasti saatavilla, mikä johtaa suuriin hetkellisiin ulostulotehoihin ja suureen tehotiheyteen [25, s. 358]. Suuri tehotiheys parantaa SMES:n soveltuvuutta suuren tehon vaativissa kohteissa [4, s. 8]

3.4 SMES muiden teknillisten suureiden näkökulmasta

Hyötysuhteen sekä energia- ja tehotiheyden lisäksi merkittäviä energian varastointiteknologioihin liittyviä suureita ovat teho- ja energialuokitukset, purkaus aika ja itsepurkautumisnopeus sekä käyttöikä. Teholuokitus kuvaa energiavaraston nimellistehoa, joka tarkoittaa tehoa, jolla energiavarasto on suunniteltu käytettäväksi [49], ja energialuokitus energiakapasiteettia, joka tarkoittaa täyden latauksen jälkeen energiavarastoon varastoitunutta energiamäärää [50, s. 1237]. Purkaus aika kertoo, kuinka pitkässä ajassa energiavarasto tyhjenee sen maksimiteholla, ja itsepurkautumisnopeus kuvaa varastoitua energiamäärää, joka on hävinnyt tai kulutettu jollain aikavälillä, kun energiavarasto on ollut kuormittamattomana [50, s. 1238 & 1241]. Käyttöikä taas kertoo, kuinka pitkän ajan energiavarasto tyypillisesti säilyy käyttökelpoisena normaalissa käytössä [51].

Eri energian varastointiteknologioiden teholuokitukset on esitetty taulukossa 7, energialuokitukset taulukossa 8, purkautumisajat taulukossa 9, itsepurkautumisnopeudet taulukossa 10 ja käyttöiät taulukossa 11 vuosissa ja taulukossa 12 lataus-purkaus-kierroksissa. Suureiden arvojen rajat on valittu siten, että jokaisen lähteen ilmoittamat arvot tai rajat sisältyvät niihin. Eri energiavarastotyyppien eri teknologioiden välisiä eroja ei olla otettu huomioon.

Taulukoista 7 ja 8 nähdään, että SMES:n teholuokitus on suurimpien ja energialuokitus pienimpien joukossa, mikä todennäköisesti johtuu SMES:n suuresta tehotiheydestä ja pienestä energiatiheudesta. Samansuuruisia teholuokkaa SMES:n kanssa ovat CAES:t, vanadiiniredoksivirtausakut ja litiumioniakut ja samansuuruisia energialuokkaa ovat FES:t ja lyijyhappoakut. Suurin teholuokitus kuuluu PHES:lle, ja suurin energialuokitus vetypolttokennoille. Vetypolttokennojen tapauksessa tarkoitetaan kuitenkin lähinnä vedyn yleisiä varastointimahdollisuuksia.

Taulukosta 9 nähdään, että SMES:n purkaus aika on lyhyin verrattuna muihin energiavarastointiteknologioihin. Myös FES:t ja superkondensaattorit yltyvät millisekuntien purkaus aikoihin, mutta niiden ylärajat ovat huomattavasti suuremmat. Pienen purkausajan ansiosta SMES:iin varastoitu energia on hyvin nopeasti käytettävissä. Millisekuntien purkaus aikoja rajoittaa kuitenkin käytetty tehonmuunninjärjestelmä [33, s. 2]. Lyhyt purkaus aika myös osaltaan rajoittaa SMES:n käyttöä muissa kuin suuren tehon ja pienen energian vaativissa käyttökohteissa [4, s. 8].

Taulukosta 10 taas nähdään, että SMES:n itsepurkautumisnopeus on suurimpien joukossa. Kuten osiossa 2.3 mainittiin, tämä ei kuitenkaan tarkoita, että varastoitu energia katoaisi suprajohdekäämin magneettikentästä, vaan että vastaava määrä kulutetaan jäähtyöksessä. SMES:n lisäksi suuren itsepurkautumisnopeuden omaavat superkondensaattorit, FES:t ja natriumrikkiakut, joista suurin itsepurkautuminen kuuluu FES:lle. Suuri itsepurkautumisnopeus rajoittaa SMES:n soveltuvuutta pitkäaikaiseen energian varastointiin [24, s. 120], sillä se lisää energiahäviöitä.

Taulukko 7. Eri energiavarastotyyppien teholuokitukset.

Energiavarastotyyppi	Teholuokitus (MW)	Lähteet
Lyijyhappoakut	0–21	[52, s. 960]
Litiumioniakut	0–400	[53]
Nikkelikadmiumakut	0–45	[37, s. 307][54, s. 2156]
Natriumrikkiakut	0–50	[55]
Vanadiiniredoksivirtausakut	0,005–200	[56, s. 3][57]
Sinkkibromivirtausakut	0,003–2	[58][59]
Vetypolttokennot	0–50	[37, s. 307]
PHES	100–5 000	[37, s. 307]
CAES	5–350	[37, s. 307][60]
FES	0–20	[37, s. 307][61][62]
Superkondensaattorit	0–0,7	[37, s. 307][63, s. 1]
SMES	0,1–200	[37, s. 307][64, s. 1374 & 1378]

Taulukko 8. Eri energiavarastotyyppien energialuokitukset.

Energiavarastotyyppi	Energialuokitus (MWh)	Lähteet
Lyijyhappoakut	0–40	[52, s. 960]
Litiumioniakut	0–1600	[53]
Nikkelikadmiumakut	0–6,75	[54, s. 2156]
Natriumrikkiakut	0–300	[55]
Vanadiiniredoksivirtausakut	0,03–800	[56, s. 3][57]
Sinkkibromivirtausakut	0,01–2	[58][59]
Vetypolttokennot	0–10 ⁵	[65]
PHES	500–40 000	[66][67, s. 2631]
CAES	4–1400	[60][68]
FES	0–5	[62]
Superkondensaattorit	0–0,02	[63, s. 1]
SMES	0,015–6	[64, s. 1374 & 1378][69, s. 1]

Taulukko 9. Eri energiavarastotyyppien purkausajat.

Energiavarastotyyppi	Purkaus aika	Lähteet
Lyijyhappoakut	s–h	[37, s. 307][38, s. 73]
Litiumioniakut	min–h	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
Nikkelikadmiumakut	s–h	[37, s. 307][38, s. 73]
Natriumrikkiakut	s–h	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	s–10 h	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
Sinkkibromivirtausakut	s–10 h	[37, s. 307][40, s. 368]
Vetypolttokennot	s–24+ h	[37, s. 307][40, s. 368]
PHES	1–24+ h	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
CAES	1–24+ h	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
FES	ms–15 min	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
Superkondensaattorit	ms–1 h	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]
SMES	ms–8 s	[37, s. 307][38, s. 73][40, s. 368]

Taulukko 10. Eri energiavarastotyyppien itsepurkautumisnopeudet.

Energiavarastotyyppi	Itsepurkautumisnopeus (%/vrk)	Lähteet
Lyijyhappoakut	0,1–0,3	[37, s. 307]
Litiumioniakut	0,03–0,33	[37, s. 307][41, s. 184]
Nikkelikadmiumakut	0,07–0,71	[37, s. 307][41, s. 185]
Natriumrikkiakut	0–20	[37, s. 307][41, s. 190]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	pieni	[37, s. 307]
Sinkkibromivirtausakut	pieni	[37, s. 307]
Vetypolttokennot	melkein 0	[37, s. 307]
PHES	hyvin pieni	[37, s. 307][41, s. 176]
CAES	pieni	[37, s. 307][41, s. 176]
FES	20–100	[37, s. 307][41, s. 176] [46, s. 1515]
Superkondensaattorit	0,46–40	[37, s. 307][41, s. 201]
SMES	1–15	[37, s. 307][41, s. 201]

Taulukko 11. Eri energiavarastotyyppien käyttöiät vuosissa.

Energiavarastotyyppi	Käyttöikä (v)	Lähteet
Lyijyhappoakut	3–15	[37, s. 308][38, s. 73]
Litiumioniakut	5–15	[37, s. 308][38, s. 73]
Nikkelikadmiumakut	5–20	[37, s. 308][38, s. 73]
Natriumrikkiakut	10–15	[37, s. 308][38, s. 73]
Vanadiiniredoksivirtausakut	5–20	[37, s. 308][38, s. 73][40, s. 368]
Sinkkibromivirtausakut	5–20	[37, s. 308][40, s. 368][41, s. 197]
Vetypolttokennot	5–15	[37, s. 308][40, s. 368]
PHES	40–60	[37, s. 308][38, s. 73][40, s. 368]
CAES	20–40	[37, s. 308][40, s. 368][41, s. 176]
FES	15–20	[38, s. 73][40, s. 368][41, s. 176]
Superkondensaattorit	4–20+	[37, s. 308][38, s. 73][41, s. 201]
SMES	20–30	[37, s. 308][40, s. 368][41, s. 201]

Taulukko 12. Eri energiavarastotyyppien käyttöiät lataus-purkaus-kierroksissa.

Energiavarastotyyppi	Käyttöikä (kierrosta)	Lähteet
Lyijyhappoakut	100–2 000	[37, s. 308][38, s. 73][41, s. 184]
Litiumioniakut	250–10 000+	[37, s. 308][38, s. 73][41, s. 184]
Nikkelikadmiumakut	500–3 000	[37, s. 308][38, s. 73]
Natriumrikkiakut	1 000–4 500	[38, s. 73][40, s. 368][41, s. 190]
Vanadiiniredoksivirtausakut	800–16 000	[38, s. 73][40, s. 368][41, s. 197]
Sinkkibromivirtausakut	800–5 000	[37, s. 308][40, s. 368][41, s. 197]
Vetypolttokennot	1 000+	[37, s. 308][40, s. 368]
PHES	10 000–60 000	[38, s. 73][41, s. 176]
CAES	8 000–30 000	[38, s. 73][41, s. 176]
FES	10 000–10 ⁷	[38, s. 73][41, s. 176][46, s. 1514]
Superkondensaattorit	10 000–10 ⁶	[37, s. 308][38, s. 73][41, s. 201]
SMES	10 000–10 ⁵⁺	[37, s. 308][40, s. 368][41, s. 201]

Taulukoista 11 ja 12 nähdään, että SMES:n käyttöikä on suurimpien joukossa. Samaan joukkoon kuuluvat superkondensaattorit, FES:t, CAES:t ja PHES:t, joista PHES:ien käyttöikä on ylivoimaisesti suurin vuosien suhteen ja FES:ien lataus-purkaus-kierrosten suhteen. Käyttöikä on merkittävä suure energian varastointiteknologioihin liittyen, sillä se vaikuttaa kokonaiskustannuksiin, esimerkiksi lyhyt käyttöikä lisää käyttö- ja kunnossapitokustannuksia [70, s. 26]. SMES:n pitkä käyttöikä siis tekee siitä taloudellisesta näkökulmasta suotuisamman vaihtoehdon. SMES:n käyttöikä vuosissa ei myöskään riipu perinteisten akkujen tapaan käyttökiertoista [26, s. 9]. Tämän vuoksi SMES sopii hyvin sovelluksiin, jotka vaativat jatkuvaa käyttöä ja täysiä lataus-purkaus-kierroksia, kuten jännitteen stabiliteetin ja tehon laadun parantamiseen suurille teollisuuden sähkön kuluttajille [37, s. 303].

4. SMES TALOUDELLISESTA NÄKÖKULMASTA

Tässä luvussa esitellään SMES:n yleisimmät kustannuksiin vaikuttavat tekijät ja merkittävimmät taloudelliset tunnusluvut, joita verrataan muiden tyypillisimpien energian varastointiteknologioiden vastaaviin tunnuslukuihin. Vertauskohteita ovat erilaiset akut, vetypolttockennot, pumppuvoimalaitos (Pumped Hydroelectric Energy Storage, PHES), painelmaenergiavarasto (Compressed Air Energy Storage, CAES), vauhtipyöräenergiavarasto (Flywheel Energy Storage, FES) ja superkondensaattorit. Energiavarastot on jaettu akkuteknologioihin, polttockennoihin, mekaanisiin energiavarastoihin ja sähköisiin energiavarastoihin. Ensiksi tarkastellaan SMES:n tyypillisimpiä kustannuksiin vaikuttavia tekijöitä ja sitten verrataan SMES:n kustannuksia muiden energiavarastojen kustannuksiin energia- ja tehoyksikköä kohti.

4.1 SMES:n kustannuksiin vaikuttavat tekijät

SMES:n kustannukset koostuvat pääasiassa [34, s. 3]:

- suprajohdekäämin kustannuksista,
- jäähdytysjärjestelmän kustannuksista,
- tehonmuunninjärjestelmän kustannuksista,
- käyttö- ja kunnossapitokustannuksista,
- kryostaatin kustannuksista,
- sekä yleiskustannuksista.

Suprajohdekäämin, tehonmuunninjärjestelmän sekä tyhjiösäiliön kustannukset ovat kertaluontoisia, kun taas muut kustannukset ovat vuosittain toistuvia. Suprajohdekäämin ja tehonmuunninjärjestelmän kustannukset ovat tyypillisesti suurimmat. [34, s. 3]

Käytetyillä suprajohdemateriaaleilla on merkittävä vaikutus suprajohdesovelluksien kustannusten rakentumiseen. Esimerkiksi suprajohtavien tuulivoimageraattorien yhteydessä HTS-generaattorin kustannukset ovat yli nelinkertaiset LTS-generaattoriin verrattuna ja suurin osa niistä liittyy suprajohdemateriaaliin. Tämä johtuu siitä, että HTS-suprajohteet ovat tyypillisesti huomattavasti kalliimpia kuin LTS-suprajohteet ja niitä tarvitaan suurempi määrä teknillisiltä ominaisuuksiltaan saman suuruusluokan generaattoriin. Toisaalta LTS-generaattorin kustannuksista suurin osa liittyy jäähdytyskustannuksiin, jotka ovat suuremmat kuin HTS-generaattorilla. [71, s. 4–5]

Adetokun et al. [4, s. 8] mukaan lähivuosina SMES:n suprajohdekäämin ja siihen liittyvien lisäkomponenttien hinta on kuitenkin ollut laskussa uusien tuotantoprosessien ja paremmin saatavilla olevien ominaisuuksiltaan vastaavien suprajohdemateriaalien käytön ansiosta. Wang et al. [10, s. 22] mukaan vuonna 2017 toisen sukupolven HTS-teipien, kuten YBCO:n, hinta oli 270–470 €/kAm:n luokkaa ja nykyään 90–140 €/kAm:n luokkaa. Kehityksen ansiosta SMES:n kustannukset vaihtelevat hyvin suurella välillä riippuen käytetyistä suprajohteista [4, s. 8].

4.2 SMES:n kustannus energiayksikköä kohti

Tyypillisesti energian varastointijärjestelmien kokonaiskustannukset ovat riippuvaisia järjestelmän energiakapasiteetista, joten niitä mitataan usein kustannuksina energiayksikköä kohti (€/kWh) [4, s. 8]. Niiden avulla voidaan myös helposti vertailla eri energian varastointitekniikoiden kustannuksia toisiinsa [34, s. 1].

Kokonaiskustannukset energiayksikköä kohti tyypillisimmille energian varastointitekniikoille on esitetty taulukossa 13. Useamman lähteen tapauksessa arvojen rajat on valittu siten, että jokaisen lähteen ilmoittamat arvot tai rajat sisältyvät niihin. Eri energiavarastotyyppien eri teknologioiden välisiä eroja ei olla otettu huomioon.

Taulukko 13. Eri energiavarastotyyppien kustannukset energiayksikköä kohti.

Energiavarastotyyppi	Kustannus energiayksikköä kohti (€/kWh)	Lähteet
Lyijyhappoakut	330–730	[72, s. 1635][73, s. 4.4]
Litiumioniakut	360–550	[73, s. 4.4]
Nikkelikadmiumakut	750–1 420	[72, s. 1635][73, s. 4.4]
Natriumrikkiakut	560–1 220	[73, s. 4.4]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	140–950	[37, s. 307][72, s. 1635] [73, s. 53]
Sinkkibromivirtausakut	140–1 270	[37, s. 307][72, s. 1635] [73, s. 56]
Vetypolttokennot	390–780	[72, s. 1635]
PHES	90–190	[72, s. 1635][73, s. 4.5]
CAES	40–280	[72, s. 1635][73, s. 4.5]
FES	4 060–10 840	[73, s. 4.5][74, s. 34]
Superkondensaattorit	280–1 890	[37, s. 307][72, s. 1635]
SMES	940–9 400	[37, s. 307][72, s. 1635]

Taulukosta 13 nähdään, että SMES:n kustannukset energiayksikköä kohti ovat suurimpien joukossa. Ainoastaan FES:n kustannukset energiayksikköä kohti ovat hieman suuremmat. Suuret kustannukset energiayksikköä kohti heikentävät edelleen SMES:n asemaa pitkäaikaisena energiavarastona, pienen energiatihedyyden ja suurehkon itsepurkautumisnopeuden lisäksi. SMES:n kustannukset vaihtelevat myös suurimmalla välillä muihin energian varastointitekniologioihin verrattuna. Tämä todennäköisesti johtuu eri tuotantoprosessien ja materiaalien tuomista eroista, mikä mainittiinkin jo osiossa 4.1.

4.3 SMES:n kustannus tehoyksikköä kohti

Energian varastointijärjestelmien kokonaiskustannukset ovat tyypillisesti riippuvaisia myös järjestelmän tehokapasiteetista, joten niitä mitataan usein myös kustannuksina tehoyksikköä kohti (€/kW) [4, s. 8]. Myös niiden avulla voidaan helposti vertailla eri energian varastointitekniologioiden kustannuksia toisiinsa [34, s. 1].

Kokonaiskustannukset tehoyksikköä kohti tyypillisimmille energian varastointitekniologioille on esitetty taulukossa 14. Useamman lähteen tapauksessa arvojen rajat on valittu siten, että jokaisen lähteen ilmoittamat arvot tai rajat sisältyvät niihin. Eri energiavarastotyyppien eri tekniologioiden välisiä eroja ei olla otettu huomioon.

Taulukko 14. Eri energiavarastotyyppien kustannukset tehoyksikköä kohti.

Energiavarastotyyppi	Kustannus tehoyksikköä kohti (€/kW)	Lähteet
Lyijyhappoakut	1 340–3 260	[72, s. 1635][73, s. 4.4]
Litiumioniakut	1 480–2 190	[73, s. 4.4]
Nikkelikadmiumakut	470–1 420	[37, s. 307][72, s. 1635]
Natriumrikkiakut	2 250–4 870	[73, s. 4.4]
Vanadiiniiredoksivirtausakut	2 100–3 480	[72, s. 1635][74, s. 53]
Sinkkibromivirtausakut	650–2 360	[37, s. 307][72, s. 1635] [74, s. 56]
Vetypolttokennot	2 390–4 680	[72, s. 1635]
PHES	1 030–3 010	[72, s. 1635][73, s. 4.5]
CAES	770–2 400	[72, s. 1635][73, s. 4.5]
FES	590–2 710	[72, s. 1635][73, s. 4.5]
Superkondensaattorit	90–290	[37, s. 307][72, s. 1635]
SMES	180–570	[37, s. 307][72, s. 1635]

Taulukosta 14 nähdään, että SMES:n kustannukset tehoyksikköä kohti ovat pienimpien joukossa. Ainoastaan superkondensaattorien kustannukset tehoyksikköä kohti ovat pienemmät. Matalat kustannukset tehoyksikköä kohti edelleen parantavat SMES:n asemaa suuren tehokapasiteetin energiavarastojen joukossa suuren tehotiheyden, lyhyen purkausajan, pitkän käyttöiän ja suuren hyötysuhteen lisäksi. SMES:n kustannukset tehoyksikköä kohti vaikuttavat vakiintuneemmilta verrattuna kustannuksiin energiayksikköä kohti.

5. SMES:N KÄYTTÖKOHTEET JA GLOBAALI TILANNE

Tässä luvussa esitellään SMES:n tyypillisimmät käyttökohteet ja SMES:n globaali tilanne. Ensiksi tarkastellaan SMES:n tyypillisimpiä käyttökohteita, sitten SMES:n tilannetta maailmalla ja lopuksi SMES:n tilannetta Suomessa. SMES:n lisäksi tarkastellaan myös hieman suprajohteiden globaalia tilannetta yleisesti.

5.1 SMES:n käyttökohteet

Ominaisuuksiensa vuoksi SMES-yksiköitä käytetään lähinnä lyhyen aikavälin energian varastointiin, esimerkiksi sähköverkon tehonlaadun ja stabiiliuden parantamiseen [2, s. 91]. SMES:n tyypillisimpiä käyttökohteita ovat:

- sääriippuvaisen tuotannon tasaaminen [25, s. 360],
- jännitteen stabiloiminen [75, s. 378],
- sähkövoimajärjestelmän oskillointien vähentäminen [75, s. 378],
- pyörivä reservi [75, s. 378],
- kuormituksen vaihtelun tasaaminen [75, s. 379],
- aluesäätövirheen pienentäminen [75, s. 379],
- kulutushuippujen tasaaminen [75, s. 379],
- varateholähteenä toimiminen kriittisille kuormille [75, s. 379],
- epäsymmetrisen kuorman tasapainottaminen [75, s. 380],
- pimeäkäynnistys [76, s. 254],
- taajuuden säätö [77, s. 83],
- sähkötehon laadun parantaminen [77, s. 83],
- ja hybridienergiavarastot [4, s. 9].

Suurin osa listatuista SMES:n käyttökohteista liittyy sähkövoimajärjestelmien tukemiseen. Käyttökohteet liittyvät pääasiassa sähköenergian tuotannon, siirron ja kulutuksen tukemiseen.

SMES voi tukea sähköenergian tuotantoa esimerkiksi tasaamalla sääriippuvaista tuotantoa, kuten aurinko- tai tuulivoimaa, toimimalla pyörivänä reservinä, toimimalla teholähteenä pimeäkäynnistyksessä ja pienentämällä aluesäätövirhettä. Sääriippuvaista tuotantoa SMES tukee pitämällä voimalan ulostulojännitteen ja -virran vakiona [25, s. 366]. Pyörivä reservi tarkoittaa tuotannossa mahdollisen vian sattuessa reservituotantoyksikköä, joka on valmiiksi käynnissä ja joka voi syöttää verkkoon energiaa, kunnes hitaampi

varatuotantoyksikkö saadaan käyntiin [78]. Pimeäkäynnistyksellä taas tarkoitetaan tuotantolaitoksen käynnistämistä ilman syöttävästä verkosta saatavaa tehoa [76, s. 254]. Aluesäätövirheellä tarkoitetaan verkon kahden säätöalueen välisen tehon siirron suunnitellun ja todellisen määrän eroa, jonka pienentäminen johtaa sähkön tuotannon tehokkaampaan käyttöön [75, s. 379].

SMES voi myös tukea sähköenergian siirtoa esimerkiksi stabiloimalla jännitettä, vähentämällä oskillointia siirtoverkossa ja tasapainottamalla epäsymmetristä kuormitusta. SMES voi stabiloida siirtoverkon jännitettä tarjoamalla pätö- ja loistehoa kuorman puolelta. Pätö- ja loistehon säädöllä SMES voi myös vaimentaa siirtoverkossa tapahtuvaa matalataajuisia oskillaatiota parantaen verkon tehonsiirtokapasiteettia. Kompensoimalla kuorman ja syöttävän verkon symmetrisyyden erot SMES voi tasapainottaa epäsymmetristä kuormitusta, joka aiheuttaa siirtoverkkoon ja sen laitteisiin tehohäviöiden lisääntymistä ja toiminnallista heikkenemistä. [75, s. 378]

SMES voi tukea kuormitusta toimimalla varateholähteenä kriittisille kuormille, parantamalla sähkötehon laatua ja toimimalla hybridienergiavarastoissa. Jos esimerkiksi vika sähköverkossa aiheuttaa jännitekuoppia tai sähkökatkoja kriittiselle kuormalle, SMES voi suuren reaktionopeutensa ansiosta syöttää kuormalle energiaa ilman näennäistä häiriötä kuorman kannalta. [75, s. 379] Samalla toimintaperiaatteella SMES voi parantaa sähkötehon laatua kuorman näkökulmasta [77, s. 83]. SMES voi tukea sähkötehonlaatua myös toimimalla Flexible AC Transmission System -laitteiden (FACTS) energiavarastona [75, s. 378]. Hybridienergiavarastoissa SMES:iä on suunniteltu käytettävän akkujen tai nestemäisen vedyn kanssa [4, s. 9]. SMES toimisi hybridienergiavarastossa tehopuskurina esimerkiksi sähköajoneuvon käynnistys- ja liikkeellelähtötilanteissa [48, s. 1].

Yleisesti sähkövoimajärjestelmää SMES voi tukea taajuuden säädöllä sekä tasaamalla kulutushuippuja ja kuormituksen vaihteluja. Esimerkiksi tuotantolaitoksen irrotessa verkosta verkon taajuus voi alkaa tippumaan, kunnes tasapaino sähkön tuotannon ja kulutuksen välillä on taas saavutettu. SMES voi toimia varateholähteenä estäen taajuuden tippumisen. [77, s. 83] SMES voi tasata vaihtelevaa kuormitusta samalla toimintaperiaatteella kuin sääriippuvaisen tuotannon tasaamisessa. Lisäksi SMES voi tasata kulutushuippuja latautumalla silloin, kun kulutus on vähäistä ja purkautumalla silloin, kun kulutus on suurta. [75, s. 379]

5.2 SMES maailmalla

Suurimmillaan 10 MW:n ja 5,6 kWh:n LTS-SMES-järjestelmiä on jo otettu maailmalla käyttöön [4, s. 7]. Esimerkiksi Japanissa oltiin vuonna 2011 otettu käyttöön kolme kaupallista 2–10 MVA:n SMES-yksikköä äkillisten jännitekuoppien ohitukseen [79, s. 708 & 711]. SMES-yksiköitä on kehitetty myös Kiinassa, Koreassa, Intiassa, Australiassa, Saksassa ja Ranskassa [7, s. 68]. European Energy Research Alliancen (EERA) [45, s. 2] mukaan vuonna 2019 maailmanlaajuinen asennettujen SMES:ien yhteinen tehokapasiteetti oli noin 325 MW. Tämä lukema on kuitenkin hyvin pieni verrattuna esimerkiksi PHES:ien maailmanlaajuiseen asennettuun tehokapasiteettiin, joka oli vuonna 2021 International Hydropower Associationin (IHA) [80, s. 7] mukaan noin 1 360 GW.

LTS-SMES:t eivät ole suurten kustannustensa vuoksi saaneet merkittävää jalansijaa energiavarastomarkkinoilla, vaikka teknologia on jo onnistuneesti testattu ja demonstroitu. HTS-SMES:t, jotka voisivat korvata LTS-SMES:t, taas ovat edelleen tutkimus- ja kehitystyön kohteena. [4, s. 7–8] Marchionini et al. [81, s. 5] konsulttoimien asiantuntijoiden arvioiden mukaan 10–20 MJ:n HTS-SMES:ien sovellus jännitekuoppien hallinnassa saavuttaisi kypsyyssasteen markkinoilla 2025–2035, mutta tämä vaatisi sen, että käytetyn suprajohteen hinta putoaisi alle 4,65 €/kAm.

Käynnissä olevia ja onnistuneesti verkkoon kytkettyjä toimintakuntoisia SMES-demonstraatioita ei ole kovinkaan monta [82, s. 3]. Kuitenkin Italian Minister of Economic Development rahoitti vuonna 2018 DRYSMES4GRID-tutkimusprojektin, jonka päämäärä on demonstroida kustannustensa suhteen kilpailukykyisen MgB₂-suprajohteeseen perustuvan kryogeenittömän SMES:n toteutettavuus [83, s. 2]. China Electric Power Research Institute (CEPRI) taas toteutti vuonna 2015 demonstraation, jossa valmistettiin ja testattiin kJ-luokan ja 20 kW:n YBCO-kääminen HTS-SMES ja simuloitiin sen käyttö Zhangbein tuulivoimaverkossa [84, s. 692–693 & 698]. Lisäksi YBCO:sta valmistettuja HTS-käämejä on kehitetty Yhdysvalloissa, Japanissa ja Koreassa [81, s. 5].

SMES:n kehitys riippuu hyvin paljon myös suprajohteiden kehityksestä, joten myös niiden kehitystyö voidaan katsoa SMES:n eduksi. Viime aikoina paljon tutkimus- ja kehitystyötä on kohdistettu suprajohteiden ja jäähdytysjärjestelmien kustannusten madaltamiseen ja uusien sekä vähemmän jäähdytysherkkien suprajohtemateriaalien löytämiseen [85, s. 521, katso [13, 109, 131]]. Wang et al. [10, s. 1] mukaan korkealaatuisia toisen sukupolven HTS-teippejä on jo tuotettu kilometrien pituusluokassa ja käytetty suprajohtavuutta hyödyntävissä demonstraatioprojekteissa.

5.3 SMES Suomessa

Vuonna 2010 Suomessa oli käynnissä Tekes-hanke, jonka päämääränä oli rakentaa MW-luokan SMES konttinostureiden tehonsyöttöä varten. Hanke ei kuitenkaan johtanut odotettuihin tuloksiin. [86] SMES:iin liittyvää tutkimusta on tuotettu myös Tampereen yliopistolla vuodesta 1984 lähtien. Yliopistolla on rakennettu mekaanisesti jäähdytetty Nb_3Sn -SMES, jota testattiin Uninterruptible Power Supply -sovelluksessa (UPS), ja joi-takin demonstraatiojärjestelmiä NbTi-suprajohteesta. Tampereen yliopistolla on ollut myös 1996 käynnissä demonstraatiohanke, jonka tavoitteena oli rakentaa ja demon-stroida 5–10 kJ:n HTS-SMES. [87][88]

Suomessa on lisäksi yleisesti suprajohtavuuteen ja suprajohteisiin liittyvää tutkimusta. Esimerkiksi Tampereen yliopistolla on viiden suomalaisen yrityksen kanssa yhteinen Bu-siness Finlandin rahoittama innovaatiohanke SMARAGDI [89]. SMARAGDI tähtää älyk-käiden ratkaisujen kehittämiseen tulevaisuuden korkean lämpötilan suprajohtemag-neetteihin liittyen [9]. Myös esimerkiksi Aalto-yliopistossa KVANTTI-ryhmä tutkii supra-johtavuutta kvanttitasolla [90] ja Jyväskylän yliopisto on osallisena SUPERTED-projek-tissa, jonka päämäärä on luoda maailman ensimmäinen suprajohtava lämpösähköinen sähkömagneettisen säteilyn mittari [91].

6. YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä käsiteltiin suprajohtavia sähkömagneettisia energiavarastoja ja niiden ominaisuuksia. Ensiksi työssä käsiteltiin suprajohtavuuden ja kryogeniikan teoriaa yleisellä tasolla ja sitten SMES:n teoreettista toimintaa ja käytännön haasteita. Sitten esiteltiin SMES:n merkittävimmät teknilliset ja taloudelliset tunnusluvut ja verrattiin niitä muiden energiavarastojen vastaaviin lukuihin. Lopuksi tarkasteltiin SMES:n tyypillisimpiä käyttökohteita ja SMES:n globaalia tilannetta.

Suprajohtavan sähkömagneettisen energiavaraston teknillisiin vahvuuksiin lukeutuvat korkea hyötysuhde, korkea tehotiheys, lyhyt purkaus aika ja pitkä käyttöikä. Toisaalta sen teknillisiin heikkouksiin lukeutuvat matala energiatiheys ja jäähtymisen energiakulutus. Ominaisuuksiensa ansiosta SMES soveltuu hyvin suuren tehokapasiteetin, mutta pienen energiakapasiteetin käyttökohteisiin, esimerkiksi sähkötehon laadunhallintaan. Perinteisenä pitkäaikaisena energiavarastona SMES ei kuitenkaan ole kovinkaan käyttökelpoinen verrattuna muihin jo pitkään käytettyihin energian varastointiteknologioihin, ellei SMES:iä käytetä niiden rinnalla hybridienergiavarastoissa. Tällöinkin SMES:n tehtävä on tyypillisesti pienentää rinnakkaisena käytetyn energiavaraston tehokuormaa.

Taloudellisesta näkökulmasta SMES on suhteellisen halpa tehokäyttöä kohti, mutta kallis energiayksikköä kohti. Suprajohteiden sekä tehokkaiden jäähtymis- ja tehonmuunninjärjestelmien korkeat hinnat heikentävät SMES:n kustannustehokkuutta, eikä SMES ole tästä syystä vielä saanut merkittävää jalansijaa energiavarastomarkkinoilla. Tilanteen muuttuminen vaatii vielä merkittävää kehitystä varsinkin suprajohteiden osalta. Toisaalta energiavarastojen ja varsinkin SMES:n taloudelliset tunnusluvut ovat hyvin vaihtelevia ja tapauskohtaisia. Osa työssä käytetyistä tunnuslukujen lähteistä ovat melko vanhoja, esimerkiksi Chen et al. [37], joka on vuodelta 2009, joten osa tiedoista eivät välttämättä ole enää täysin todenmukaisia.

Kuten aiemmin mainittiin, SMES:n käyttökohteet rajoittuvat tyypillisesti suuren tehon, mutta pienen energiakapasiteetin vaativiin käyttökohteisiin. SMES:n käyttökohteet liittyvätkin suurimmalta osin sähköverkon stabiloimiseen, sen kuormituksen ja tuotannon tasaamiseen ja sähkötehon laadunhallintaan. Näissä käyttökohteissa SMES:llä vaikuttaa olevan paljon potentiaalia, mutta se ei välttämättä kuitenkaan ole kustannustehokkain ratkaisu tällä hetkellä.

SMES-yksiköitä ei olla otettu käyttöön maailmalla vielä kovinkaan monta, eikä käynnissä olevista demonstraatiohankkeista löydy paljoa tietoa. SMES:t eivät vaikuta olevan enää nykyisin yhtä suuren tutkinnan kohteena kuin 2000-luvun alkupuolella. Suomessa SMES:iin liittyvää tutkimusta, kehitystä tai tuotantoa ei työn kirjoitushetkellä juurikaan vaikuta olevan. Suprajohtavuus yleisesti vaikuttaa kuitenkin olevan edelleen suuren huomion kohteena ja uudet läpimurrot voivat parantaa SMES:n asemaa vaihtoehtoisena energiavarastona.

LÄHTEET

- [1] E. Heiskanen, K. Matschoss, S. Laakso, J. Rinkinen, E. Apajalahti, Energiämurroksen jännitteet kansalaisten arjessa, Alue ja ympäristö, 2021, s. 124. Saatavissa: <https://aluejaymparisto.journal.fi/issue/view/7780>
- [2] R. Huggins, Energy Storage: Fundamentals, Materials and Applications, Springer, 2016, p. 6, 85, 90–91. Saatavissa: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-21239-5>
- [3] J.G.O. Pinto, Power Electronics and Power Quality, MDPI, 2020, p. ix. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/books/book/2237>
- [4] B.B. Adetokun, O. Oghorada, S.J. Abubakar, Superconducting magnetic energy storage systems: Prospects and challenges for renewable energy applications, Elsevier Ltd, 2022, p. 1–4 & 6–9. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22016516>
- [5] C.P. Poole Jr., H.A. Farach, R.J. Creswick, R. Prozorov, Superconductivity, Elsevier Science & Technology, 2007, p. 23–24, 52, 55–56.
- [6] V.L. Ginzburg & E.A. Andriushin, Superconductivity, World Scientific Publishing Company, 2004, p. vii & 36–40.
- [7] P. Mukherjee, V.V. Rao, Design and development of high temperature superconducting magnetic energy storage for power applications - A review, Elsevier B.V., 2019, p. 68–69. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453419301066>
- [8] J. Akimitsu, J. Nagamatsu, N. Nakagawa, T. Muranaka, Y. Zenitani, Superconductivity at 39 K in magnesium diboride, Nature Publishing, 2001, p. 63. Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/35065039>
- [9] Smart Magnets for Accelerator Research And diagnostic Data Infrastructure (SMARAGDI), Tampere University, viitattu 22.3.2023. Saatavissa: <https://projects.tuni.fi/smaragdi/>
- [10] K. Wang, H. Dong, D. Huang, H. Shang, B. Xie, Q. Zou, L. Zhang, C. Feng, H. Gu, F. Ding, Advances in second-generation high-temperature superconducting tapes and their applications in high-field magnets, Soft Science vol. 2, 2022, p. 1, 3, 22. Saatavissa: <https://softscijournal.com/article/view/5031>
- [11] A.V. Narlikar, Superconductors, Oxford University Press, 2014, p. 100–113, 121.
- [12] M.D. Sumption, S. Bhartiya, C. Kovacks, X. Peng, E. Gregory, M.J. Tomsic, E.W. Collings, Critical current density and stability of Tube Type Nb₃Sn conductors, Elsevier Ltd, 2012, p. 97. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227511002165>

- [13] D.A. Cardwell, N. Hari Babu, M. Kambara, A.M. Campbell, Magnetic properties and critical currents of bulk MgB₂ polycrystalline superconductor, *Physica. C, Superconductivity*, 2002, p. 1263–1264. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921453402009887>
- [14] S. Barua, D.S. Davis, Y. Oz, J. Jiang, E.E. Hellstrom, U.P. Trociewitz, D.C. Larbalestier, Critical Current Distributions of Recent Bi-2212 Round Wires, *IEEE*, 2021, p. 1. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9340259>
- [15] A.B. Sneary, C.M. Friend, D.P. Hampshire, Design, fabrication and performance of a 1.29 T Bi-2223 magnet, *IOP Publishing*, 2001, p. 433. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/231032943_Design_fabrication_and_performance_of_a_129_T_Bi-2223_magnet
- [16] D.C. van der Laan, J. Schwartz, B. ten Haken, M. Dhallé, H.J.N van Eck, Limits to the critical current in Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O_x tape conductors: The parallel path model, *Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics)*, 2008, p. 12. Saatavissa: <https://www.nist.gov/publications/limits-critical-current-bi2sr2ca2cu3ox-tape-conductors-parallel-path-model>
- [17] G. Grissonnanche, O. Cyr-Choinière, F. Laliberté, S. René de Cotret, A. Juneau-Fecteau, S. Dufour-Beauséjour, M.É. Delage, D. LeBoeuf, J. Chang, B.J. Ramshaw, D.A. Bonn, W.N. Hardy, R. Liang, S. Adachi, N.E. Hussey, B. Vignolle, C. Proust, M. Sutherland, S. Krämer, J.H. Park, D. Graf, N. Doiron-Leyraud, L. Taillefer, Direct measurement of the upper critical field in cuprate superconductors, *Nature Publishing Group*, 2014, p. 6. Saatavissa: <https://www.nature.com/articles/ncomms4280>
- [18] A. Koblishka-Veneva, M.R. Koblishka, K. Berger, Q. Nouailhetas, B. Douine, M. Miryala, M. Murakami, Comparison of Temperature and Field Dependencies of the Critical Current Densities of Bulk YBCO, MgB₂, and Iron-Based Superconductors, *IEEE*, 2019, p. 3. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8649756>
- [19] R. Wesche, *Physical properties of high-temperature superconductors*, Wiley, 2015, p. 5. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118696644>
- [20] K.D. Timmerhaus & R.P. Reed. *Cryogenic Engineering: Fifty Years of Progress*, Springer, 2007, p. 3, 120–131, 161–162. Saatavissa: <https://link.springer.com/book/10.1007/0-387-46896-X>
- [21] S.W. Van Sciver, *Helium Cryogenics*, Springer, 2012, p. 7, 14, 54, 399, 317. Saatavissa: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4419-9979-5>
- [22] H.K. Yeom, Y.J. Hong, S.J. Park, T.B. Seo, K.C. Seong, H.J. Kim, Study of Cryogenic Conduction Cooling Systems for an HTS SMES, *IEEE*, 2007, p. 1955. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4277829>
- [23] S.M. Schoenung, R.L. Bieri, T.C. Bickel. The advantages of using high-temperature superconductors in high-duty-cycle applications of SMES, *IEEE*, 1995, p. 1–2. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/402559>

- [24] A. Sumper, F. Díaz-González, O. Gomis-Bellmunt, *Energy Storage in Power Systems*, John Wiley & Sons, 2016, p. 116–118. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118971291>
- [25] V.S. Vulusala G & S. Madichetty, *Application of superconducting magnetic energy storage in electrical power and energy systems: a review*, John Wiley & Sons, 2017, p. 358, 360, 366. Saatavissa: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/er.3773>
- [26] M.J. Acosta, *Advances in Energy Research Volume 6*, Nova Science Publishers, Inc., 2011, p. 9.
- [27] A. Rufer, *Energy Storage: Systems and Components*, CRC Press, 2018, p. 11, 18, 23–25.
- [28] A. Morandi, M. Fabbri, B. Gholizad, F. Grilli, F. Sirois, V.M.R. Zermeno, *Design and Comparison of a 1-MW/5-s HTS SMES With Toroidal and Solenoidal Geometry*, IEEE, 2016, p. 1. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7420614>
- [29] M.H. Ali, B. Wu, R.A. Dougal, *An Overview of SMES Applications in Power and Energy Systems*, IEEE, 2010, p. 38. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5433171>
- [30] L. Chen, Y. Liu, A.B. Arsoy, P.F. Ribeiro, M. Steurer, M.R. Iravani, *Detailed modeling of superconducting magnetic energy storage (SMES) system*, IEEE, 2006, p. 699–700. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1610681>
- [31] P. Han, Y. Wu, H. Liu, L. Li, H. Yang, *Structural Design and Analysis of a 150 kJ HTS SMES Cryogenic System*, Elsevier B.V., 2014, p. 361. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875389215004228>
- [32] R. Vikas & S. Kasthuriengan, *Recent Advances in Gifford-McMahon Cryocoolers*, IOP Publishing, 2020, p. 1–3. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1473/1/012052/pdf>
- [33] Y. Huang, Y. Ru, Y. Shen, Z. Zeng, *Characteristics and Applications of Superconducting Magnetic Energy Storage*, IOP Publishing, 2021, p. 2–3 & 8. Saatavissa: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2108/1/012038/meta>
- [34] R. Soman, H. Ravindra, H. Xiaohua, K. Schoder, M. Steurer, Y. Weijia, Z. Min, S. Venuturumilli, C. Xi, *Preliminary Investigation on Economic Aspects of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) Systems and High-Temperature Superconducting (HTS) Transformers*, IEEE, 2018, p. 1 & 3. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8320868>
- [35] T. Hartikainen, *Environmental impacts of superconducting power applications*, Tampere University of Technology, 2005, p. 2 & 13. Saatavissa: <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/115190>
- [36] *Sähkömagneettiset kentät*, Työsuojeluhallinto, 2020, viitattu 11.2.2023. Saatavissa: <https://www.tyosuojelu.fi/> -> Työolot -> Fysikaaliset tekijät -> Sähkömagneettiset kentät

- [37] H. Chen, T.N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, Elsevier Ltd, 2009, p. 303 & 307–308. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S100200710800381X?via%3Dihub>
- [38] Electrical Energy Storage White Paper, IEC, 2011, p. 18, 20–21, 23, 28, 72–73. Saatavissa: <https://www.iec.ch/basecamp/electrical-energy-storage>
- [39] S. Vazquez, S.M. Lukic, E. Galvan, L.G. Franquelo, J.M. Carrasco, Energy Storage Systems for Transport and Grid Application, IEEE, 2010, p. 3882. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5582228>
- [40] M. Aneke & M. Wang, Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review, Elsevier Ltd, 2016, p. 368. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916308728>
- [41] S. Sabihuddin, A.E. Kiprakis, M. Mueller, A Numerical and Graphical Review of Energy Storage Technologies, MDPI AG, 2015, p. 176, 184–185, 190, 197, 201. Saatavissa: <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/1/172>
- [42] Q. Xu, T.S. Zhao, C. Zhang, Performance of a vanadium redox flow battery with and without flow fields, Elsevier Ltd, 2014, p. 66: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468614014510>
- [43] Zinc-Bromine (ZNBR) Flow Batteries, Energy Storage Association, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://energystorage.org/> > Why Energy Storage > Technologies > Batteries > Zinc-Bromine (ZNBR) Flow Batteries
- [44] Fuel Cells Fact Sheet, U.S. Department of Energy, 2015, p. 2. Saatavissa: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/fuel-cells-fact-sheet>
- [45] EERA Joint Program SP5 – Superconducting Magnetic Energy Storage Fact Sheet 01, EERA, 2019, p. 1–2. Saatavissa: <https://www.eera-energystorage.eu/about/sub-programmes/sp5-smes.html> > SP5 Factsheet
- [46] I. Hadjipaschalis, A. Poullikkas, V. Efthimiou, Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications, Elsevier Ltd, 2009, p. 1514–1516, 1518 & 1522. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032108001664>
- [47] Y. Yao, Y. Yu, D. Ge, Y. Zhang, C. Du, H. Ye, L. Wan, J. Chen, M. Xie, Nanocarbon of moderate microporosity doped with oxygenate redox pairs to achieve superior gravimetric/volumetric supercapacitor performances, Elsevier B. V., 2023, p. 2. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433222033396>
- [48] J. Li, M. Zhang, Q. Yang, Z. Zhang, W. Yuan, SMES/Battery Hybrid Energy Storage System for Electric Buses, IEEE, 2016, p. 1. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7403905>
- [49] Nimellisteho, Termipankki, viitattu 16.2.2023. Saatavilla: <https://termipankki.fi/tepa/fi/haku/nimellisteho>
- [50] H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron, Energy storage systems—Characteristics and comparisons, Elsevier Ltd, 2008, p. 1237–1238 & 1241. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032107000238>

- [51] Service life, Electropedia, IEC, 2004, viitattu 15.3.2023. Saatavissa: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=482-03-46>
- [52] J. McDowall, Integrating energy storage with wind power in weak electricity grids, Elsevier B. V., 2006, p. 960. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877530500950X>
- [53] Vistra Completes Expansion of Battery Energy Storage System at its Flagship California Facility, Vistra Corp, 2021, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://investor.vistracorp.com/2021-08-19-Vistra-Completes-Expansion-of-Battery-Energy-Storage-System-at-its-Flagship-California-Facility>
- [54] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, R. Villafila-Robles, A review of energy storage technologies for wind power applications, Elsevier Ltd, 2012, p. 2156: <https://www.sciencedirect.com.libproxy.tuni.fi/science/article/pii/S1364032112000305?via%3Dihub>
- [55] Mitsubishi Electric Delivers High-capacity Energy-storage System to Kyushu Electric Power's Buzen Substation, Mitsubishi Electric, 2016, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://www.mitsubishielectric.com/news/2016/0303-b.html>
- [56] H. Wang, S.A. Pourmousavi, W.L. Soong, X. Zhang, N. Ertugrul, Battery and energy management system for vanadium redox flow battery: A critical review and recommendations, Elsevier Ltd, 2023, p. 3. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22023738>
- [57] 30kWh VFB Battery, StorEn Technologies, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://www.storen.tech/30-kwh-vfb-battery>
- [58] ZBM3 flow battery, Redflow, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: [https://redflow.com/> Solutions > ZBM3 flow battery](https://redflow.com/>Solutions>ZBM3flowbattery)
- [59] Redflow completes 2 MWh installation in California, Redflow, 2021, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://redflow.com/project/redflow-completes-2-mwh-installation-in-california>
- [60] C. Murray, Construction starts on 1.4GWh compressed air energy storage unit in China, Energy Storage News, 2022, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://www.energy-storage.news/construction-starts-on-1-4gwh-compressed-air-energy-storage-unit-in-china/>
- [61] Operating Plants: Stephentown, New York, Beacon Power, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://beaconpower.com/stephentown-new-york/>
- [62] Carmen, Beacon Power Stephentown – Flywheel Energy Storage System, US, Power Technology, 2021, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://www.power-technology.com/marketdata/beacon-power-stephentown-flywheel-energy-storage-system-us/>
- [63] D.M. Conenna, M.G. Fadda, C. Boccarrato, F. Gasparotto, M. Pietrucci, Features and functionalities of a supercapacitorbased storage system to support the Italian transmission grid, AEIT, 2020, p. 1. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9241158>

- [64] S. Nomura, T. Shintomi, S. Akita, T. Nitta, R. Shimada, S. Meguro, Technical and Cost Evaluation on SMES for Electric Power Compensation, IEEE, 2010, p. 1374 & 1378. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5422821>
- [65] Hydrogen Energy Storage, Energy Storage Association, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://energystorage.org/> > Why Energy Storage > Hydrogen Energy Storage
- [66] I. Todorović, China's State Grid puts world's biggest pumped storage hydro-power plant online, Balkan Green Energy News, 2022, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://balkangreenenergynews.com/chinas-state-grid-puts-worlds-biggest-pumped-storage-hydropower-plant-online/>
- [67] S.J. Kazempour, M.P. Moghaddam, M.R. Haghifam, G.R. Yousefi, Electric energy storage systems in a market-based economy: Comparison of emerging and traditional technologies, Elsevier Ltd, 2009, p. 2631. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148109001906>
- [68] C. Murray, Energy Dome launches world's first multi-megawatt 'CO2 Battery' project in Sardinia, Italy, Energy Storage News, 2022, viitattu 12.3.2023. Saatavissa: <https://www.energy-storage.news/energy-dome-launches-4mwh-demonstrator-project-in-italy-plans-series-b/>
- [69] T. Nakano, T. Yamanaka, M. Minami, S. Akita, H. Kasahara, H. Sakaguchi, The research and development of superconducting magnetic energy storage system: Parameter survey for high temperature superconducting 15 kW h SMES, Physica C: Superconductivity, 2001, p. 1. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453401004890>
- [70] G. Smdani, M. R. Islam, A. N. Ahmad Yahaya, S. I. Bin Safie, PERFORMANCE EVALUATION OF ADVANCED ENERGY STORAGE SYSTEMS: A REVIEW, Energy & Environment, 2022, p. 26. Saatavissa: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0958305X221074729>
- [71] J. Wang, R. Qu, Y. Liu, J. He, Z. Zhu, H. Fang, Comparison Study of Superconducting Wind Generators With HTS and LTS Field Windings, IEEE, 2015, p. 4–5. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6983559>
- [72] B. Zakeri, S. Syri, Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis, Elsevier Ltd, 2015, p. 1635. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114008284>
- [73] K. Mongird, V. Viswanathan, P. Balducci, J. Alam, V. Fotedar, V. Koritarov, V. Hadjerioua, Energy Storage Technology and Cost Characterization Report, HydroWIREs, 2019, p. 4.4–4.5. Saatavissa: <https://energystorage.pnnl.gov/pdf/PNNL-28866.pdf>
- [74] R. Carnegie, D. Gotham, D. Nderitu, P.V. Preckel, Utility Scale Energy Storage Systems, Benefits, Applications, and Technologies, State Utility Forecasting Group, 2013, p. 34, 53, 56. Saatavissa: <https://www.purdue.edu/discovery-park/sufg/docs/publications/SUFG%20Energy%20Storage%20Report.pdf>

- [75] D. Sutanto, K.W.E. Cheng, Superconducting magnetic energy storage systems for power system applications, IEEE, 2009, p. 378–380. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5306614>
- [76] P.D. Baumann, Energy conservation and environmental benefits that may be realized from superconducting magnetic energy storage, IEEE, 1992, p. 254. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/136217>
- [77] W.V. Torre & S. Eckroad, Improving Power Delivery Through The Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES), IEEE, 2001, p. 83. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/916869>
- [78] Spinning Reserve, Energy Storage Association, 2013, viitattu 10.4.2023. Saatavissa: <https://energystorage.org/spinning-reserve/>
- [79] S. Nagaya, N. Hirano, T. Katagiri, T. Tamada, K. Shikimachi, Y. Iwatani, F. Saito, Y. Ishii, The state of the art of the development of SMES for bridging instantaneous voltage dips in Japan, Elsevier Ltd. 2012, p. 708 & 711. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0011227512000859>
- [80] Hydropower Status Report, Sector trends and insights, IHA, 2022, p. 7. Saatavissa: <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report>
- [81] B.G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, H. Ohsaki, High-Temperature Superconductivity: A Roadmap for Electric Power Sector Applications, 2015–2030, IEEE, 2017, p. 5. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7859266>
- [82] P. McGuckin & G. Burt, Overview and Assessment of Superconducting Technologies for Power Grid Applications, IEEE, 2018, p. 3. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8541928>
- [83] A. Morandi, A. Anemona, G. Angeli, M. Breschi, A. Della Corte, C. Ferdeghini, C. Gandolfi, G. Grandi, G. Grasso, L. Martini, U. Melaccio, D. Nardelli, P.L. Ribani, S. Siri, M. Tropeano, S. Turtu, M. Vignolo, The DRYSMES4GRID Project: Development of a 500 kJ/200 kW Cryogen-Free Cooled SMES Demonstrator Based on MgB₂, IEEE, 2018, p. 2. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8259264>
- [84] J. Zhu, W. Yuan, M. Qiu, B. Wei, H. Zhang, P. Chen, Y. Yang, M. Zhang, X. Huang, Z. Li, Experimental demonstration and application planning of high temperature superconducting energy storage system for renewable power grids, Elsevier Ltd, 2015, p. 692–693 & 698. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030626191400703X>
- [85] X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke, Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation, Elsevier Ltd, 2015, p. 521. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914010290>
- [86] J. Lukkari, Suomalainen suprajohdava energiavarasto kariutui, Tekniikka&Talous, 2010, viitattu 22.3.2023. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomalainen-suprajohdava-energiavarasto-kariutui/b99701ab-b89e-316a-a367-8dd6b67e17e6>

- [87] R. Mikkonen, μ -SMES, Korkean lämpötilan suprajohtava sähkömagneettinen energiavarasto, Vuosiraportti 1996, Tampereen teknillinen korkeakoulu, 1996.
- [88] R. Mikkonen, T. Kalliohaka, A. Korpela, J. Lehtonen, R. Perälä, A 0.2 MJ cryo-
gen free Nb₃Sn SMES in UPS application, Tampere University of Technology
(TUT), 2003.
- [89] Suomessa panostetaan suprajohtavien magneettien kehitykseen, Tampereen
yliopisto, 2020. Saatavissa: <https://www.tuni.fi/fi/ajankohtaista/suomessa-panos-tetaan-suprajohtavien-magneettien-kehitykseen>
- [90] Superconducting Qubits and Circuit QED (KVANTTI), Aalto University, viitattu
22.3.2023. Saatavissa: <https://www.aalto.fi/en/department-of-applied-physics/superconducting-qubits-and-circuit-qed-kvantti>
- [91] SUPERTED, Thermoelectric detector based on superconductor-ferromagnet
heterostructures, University of Jyväskylä, 2019, viitattu 22.3.2023. Saatavissa:
<https://superted-project.eu/>