

Ida Lähde

ERISTETYT, OSITTAIN ERISTETYT JA ERISTÄMÄTTÖMÄT KORKEAN LÄMPÖ- TILAN SUPRAJOHDEMAGNEETIT

Kandidaatintutkielma
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastajat: Tiina Salmi ja Risto Mikkonen
Lokakuu 2023

TIIVISTELMÄ

Ida Lähde: Eristetyt, osittain eristetyt ja eristämättömät korkean lämpötilan suprajohdemagneetit
Kandidaatintutkielma
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka
Lokakuu 2023

Suprajohtavuuden kaksi perusominaisuutta mahdollistavat energiatehokkuuden lisäämisen sähkönsiirrossa vähentyneiden häviöiden ansiosta. Suprajohtavia materiaaleja on kahdenlaisia: matalan lämpötilan suprajohteita sekä korkean lämpötilan suprajohteita. Tällä hetkellä matalan lämpötilan suprajohteilla on suurin markkinaosuus, mutta korkean lämpötilan suprajohteet tulevat lisääntymään tulevaisuuden sähköenergiatekniikassa, sillä ne mahdollistavat entistä suurempien magneettikenttien synnyttämisen ja ne ovat termisesti stabiilimpia. Korkean lämpötilan suprajohtodemagneetteja voidaan valmistaa kolmella tavalla. Perinteisin näistä kolmesta on eristetyt suprajohtodemagneetit ja uudempaa teknologiaa ovat eristämättömät ja osittain eristetyt suprajohtodemagneetit. Tässä työssä esitellään perinteisten eristettyjen HTS-magneettien (High Temperature Superconductor) toimintaa sekä avataan eristämättömien ja metallilla eristettyjen magneettien toimintaperiaatetta.

Eristettyjen korkean lämpötilan HTS-magneettien suurimmat haasteet ovat hidas resistiivinen transiatio eli quench ja hidas quenchin etenemisnopeus. Hitaalla resistiivisellä transitiolla tarkoitetaan sitä, että johtimessa generoituu Joulelämpöä jo alikriittisillä virrantiheyksillä. Hidas quenchin etenemisnopeus vastaavasti johtaa siihen, että magneetti saattaa ehtiä tuhoutumaan ennen kuin quench ehditään havaita. Tutkijat ovat lähteneet ratkomaan tätä ongelmaa kehittämällä eristämättömät ja osittain eristetyt suprajohtodemagneetit. Eristämättömien suprajohtodemagneettien toiminta perustuu magneetin kykyyn siirtää virta pois vioittuneelta alueelta, kun se quenchaa. Magneetista puuttuu eristys käämikierrosten välistä. Eristyksen puuttumisen ansiosta quenchanneessa kierroksessa kulkeva virta pääsee jakautumaan viereiseen kierrokseen, mikäli se on vielä suprajohtavassa tilassa. Eristämättömien magneettien haasteena on magneetin lataamiseen ja purkamiseen kuluva pitkä aika. Tätä pitkää aikaa on pyritty lyhentämään osittain eristettyjen magneettien kehittämisellä.

Osittain eristettyjen eli metallinauhalla eristettyjen (Metal-as-Insulation, MI) magneettien avulla saadaan lyhennettyä magneettien lataus-purkausviivettä kasvattamalla käämikierrosten välissä olevaa kosketusresistanssia. Samalla pystytään kuitenkin vielä säilyttämään NI-teknologian (No-Insulation) avulla saavutettu magneetin kyky suojautua välittömältä ylikuumenemiselta, mikäli se quenchaa. Tässä magneettityypissä suurimpana haasteena on kosketusresistanssin arvon määrittäminen ja optimointi.

Jotta korkean lämpötilan suprajohtodemagneetit saadaan tulevaisuudessa laajaan käyttöön, on tärkeää ymmärtää, mitä niissä tapahtuu quenchin aikana. Quenchin kehittymistä voidaan analysoida erilaisilla numeerisilla menetelmillä, joiden avulla voidaan tutkia esimerkiksi virran ja jännitteen käyttäytymistä. Työssä esitellään kahden erilaisen HTS-sovelluksen mallintamisen vaiheita ja tutkimustuloksia.

HTS-magneettien suojaus vaatii aktiivisen havainnointijärjestelmän, joka mahdollistaa suojausjärjestelmän päällekytkemisen. Havaitsemismenetelmät voidaan jakaa jännitteellisiin ja jännitteettömiin menetelmiin. Korkean lämpötilan suprajohteet vaativat uusien kehitteillä olevien jännitteettömien menetelmien käyttöä, sillä perinteisten jännitteellisten menetelmien toimintanopeus ei välttämättä ole riittävä. Työssä esitellään muutamia havaitsemiseen käytettäviä menetelmiä sekä suojausratkaisuja.

Avainsanat: suprajohtavuus, eristämättömät suprajohtodemagneetit, osittain eristetyt suprajohtodemagneetit, NI-teknologia, MI-teknologia, quench

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. SUPRAJOHTAVUUDEN TEORIA JA KÄYTÄNNÖN SUPRAJOHTEET	3
2.1 Suprajohtavuus ilmiönä	3
2.2 Kaupalliset suprajohdemateriaalit.....	5
2.3 Käytännön materiaalit ja sovellukset	6
3. KORKEAN LÄMPÖTILAN HTS-JOHTIMET	8
3.1 HTS-johtimien potentiaali	8
3.2 HTS-johtimien haasteet.....	9
3.3 Quench-suojauksen haasteet.....	12
4. KORKEAN LÄMPÖTILAN ERISTÄMÄTTÖMÄT SUPRAJOHDEMAGNEETIT ...	13
4.1 Toimintaperiaate	13
4.2 Hyödyt.....	14
4.3 Haasteet.....	14
5. KORKEAN LÄMPÖTILAN OSITTAIN ERISTETYT SUPRAJOHDEMAGNEETIT	15
5.1 Toimintaperiaate	15
5.2 Hyödyt.....	15
5.3 Haasteet.....	16
6. QUENCHIN ANALYSOINTI- JA HAVAITSEMISMENETELMÄT JA SUOJAUSRATKAISUT	17
6.1 Analysointimenetelmät	17
6.1.1 Lämpötilan nousun mallintaminen	17
6.1.2 Käämin geometria	18
6.1.3 Numeeriset menetelmät	18
6.2 Eristämättömien HTS-magneettien mallintaminen.....	19
6.3 Suojausratkaisut.....	23
6.4 Havaitsemismenetelmät	25
7. YHTEENVETO.....	27
LÄHTEET	29

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	Engl. Alternating Current, vaihtovirta
FGB	Engl. fiber Bragg grating, Bragg-kuituritulä
FEM	Engl. Finite Element Method, elementtimenetelmä
HI	Engl. Heat Input, lämmön syöttö
HTS	Engl. High Temperature Superconductor, korkean lämpötilan suprajohde
LTS	Engl. Low Temperature Superconductor, matalan lämpötilan suprajohde
Maglev	Engl. Magnetic levitation, magneettinen levitaatio
MI	Engl. Metal-as-Insulation, metallilla eristetty
MQE	Engl. Minimum Quench Energy, pienin quench-energia
MRI	Engl. Magnetic Resonance Imaging, magneettiresonanssikuvaus
MSU	Engl. Michigan State University, Michiganin yliopisto
NI	Engl. No-Insulation, eristämätön
NMR	Engl. Nuclear Magnetic Resonance, ydinmagneettinen resonanssi
NZPV	Engl. Normal Zone Propagation Velocity, normaalialueen etenemisnopeus
REBCO	Engl. Rare-earth Barium Copper Oxide, harvinaisten maametallien bariumkuparioksidi
RF	Engl. Radio Frequency, radiotaajuus
SMES	Engl. Superconducting Magnetic Energy Storage, sähkömagneettinen energiavarasto
TDFR	Engl. Time-Frequency Domain Reflectometry, aika-taajuusalue- fleksimetria
YBCO	Engl. Yttrium Barium Copper Oxide, yttriumbariumkuparioksidi
B_c	Kriittinen magneettivuon tiheys, T
B_z	z-suuntainen magneettivuon tiheys, T
c	Ominaislämpö, $\frac{J}{K \cdot kg}$
E_r	Kimmoerotoin r-suunnassa (Youngin mooduli)
E_θ	Kimmoerotoin θ -suunnassa (Youngin mooduli)
E_z	Kimmoerotoin z-suunnassa (Youngin mooduli)
H_{c1}	Alempi kriittinen magneettivuon voimakkuus, A/m
H_{c2}	Ylempi kriittinen magneettivuon voimakkuus, A/m
I	Virta, A
I_θ	Atsimuutillinen virta, A
I_c	Kriittinen virta, A
I_{op}	Käyttövirta, A
J_c	Kriittinen virrantiheys, $\frac{A}{m^2}$
J_θ	Atsimuutillinen virrantiheys, $\frac{A}{m^2}$
L	Induktanssi, H
L_{coil}	Induktanssi, H
MgB_2	Magnesiumdiboridi
MQE	Pienin quench-energia, J
n	n-luku
Nb_3Sn	Niobitina
$NbTi$	Niobititaani
NZPV	Normaalialueen etenemisnopeus, $\frac{m}{s}$

Q	Lämpenemä tilavuutta kohden
r	Säteittäinen asento
R_c	Säteen suuntainen resistanssi (kosketus-, eristys- ja substraatti-resistanssi), Ω
R_{sc}	REBCO-kerroksen resistanssi, Ω
R_{ct}	Kosketusresistanssi, Ω
R_{dump}	Suojausvastuksen resistanssi, Ω
R_{mt}	Matriisiresistanssi, Ω
R_Q	Magneetin quenchavaan osan resistanssi, Ω
R_θ	Atsimuutillinen resistanssi, Ω
T_c	Kriittinen lämpötila, K
V	Jännite, V
V_c	Jännitekriteeri, $\frac{\mu V}{cm}$
ν_{12}	Poissonin suhde
σ_r	Säteittäinen rasitus
σ_θ	Sylinterirasitus
λ	Lämmönjohtavuus, $\frac{W}{K \cdot m}$
ρ	Massatiheys, $\frac{kg}{m}$

1. JOHDANTO

Suprajohtavuuden havaitsi ensimmäisenä hollantilainen Heike Kamerlingh Onnes vuonna 1911. Onnes huomasi, että suprajohteilla sähkövastus katoaa kokonaan, kun se jäähdytetään sille ominaisen kriittisen lämpötilan alapuolelle. Vuonna 1933 saksalaiset Walther Meissner ja Robert Ochsenfel huomasivat, että ulkoinen magneettikenttä poistuu suprajohtavasta materiaalista, vaikka se altistettaisiin sille ennen jäädyttämistä. Nämä kaksi suprajohtavien materiaalien perusominaisuutta inspiroivat uusien sovellusten kehittämisen, joissa tavoitteena on energiatehokkuuden lisääminen ja häviöiden vähentäminen sähkönsiirrossa. Suprajohtavuutta osataan hyödyntää nykyisin useissa sovelluksissa, mutta sillä on vielä valtavasti potentiaalia tulevaisuuden sähköenergiateknikassa.

Markkinoita hallitsevat matalan lämpötilan suprajohteet, mutta niiden rajat ovat tulossa vastaan, ja tämä avaa tietä korkean lämpötilan suprajohteille. Matalan lämpötilan suprajohteisiin verrattuna korkean lämpötilan suprajohteet ovat termisesti stabiilimpia, ja niiden toimintalämpötilat voivat olla suurempia. Korkean lämpötilan suprajohteilla voidaan lisäksi saavuttaa huomattavasti suurempia virran tiheyksiä ja magneettikentän voimakkuuksia. Korkean lämpötilan suprajohteista voidaan tehdä magneetteja, joissa käämin kierrokset ovat eristettyjä, eristämättömiä, tai osittain eristettyjä. Tässä työssä perehdytään tarkemmin korkean lämpötilan suprajohteisiin niiden yllä mainitun potentiaalinvuoksi. Luvussa 2 käsitellään suprajohtavuutta ilmiönä, sekä esitellään suprajohtavuuden sovelluskohteita ja kaupallisia suprajohtavia materiaaleja. Luvussa 3 esitellään perinteiseen tapaan eristettyjen HTS-johtimien toimintaa.

Eristämättömissä korkean lämpötilan suprajohdemagneeteissa ei ole sähköeristettä käämikerrosten välissä. Eristämättömien magneettien etuna on parempi kestävyys resistiivistä transitiota eli quenchia vastaan, mutta niiden teknisenä haasteena on hidas latausnopeus. Latausaikaa on pyritty lyhentämään kehittämällä osittain eristetyt suprajohdemagneetit. Luvussa 4 käsitellään eristämättömiä suprajohdemagneetteja ja luvussa 5 osittain eristettyjä suprajohdemagneetteja. Luvuissa 4 ja 5 esitellään magneettien potentiaalia ja haasteita, sekä selvitetään kuinka eristysaste vaikuttaa niiden toimintaan. Luvussa 6 käsitellään analysointi- ja laskentamenetelmiä, joita voidaan käyttää erilaisten raja-arvojen laskennassa ja mallintamisessa, kun tutkitaan quenchin etenemistä

johtimessa. Luvussa 6 esitellään lisäksi HTS-magneettien suojausratkaisuja sekä quen-
chin havaitsemiseen käytettäviä menetelmiä.

2. SUPRAJOHTAVUUDEN TEORIA JA KÄYTÄNNÖN SUPRAJOHTEET

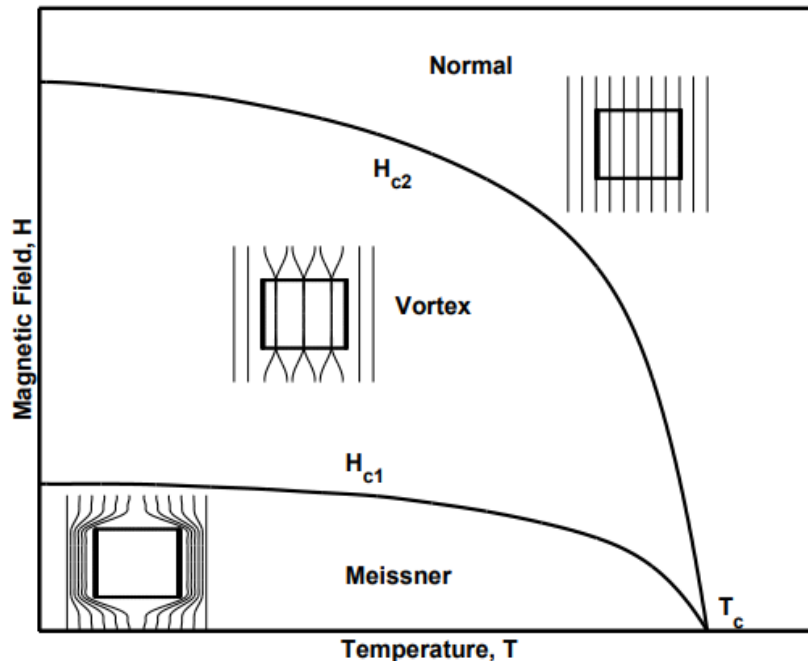
Tässä luvussa esitellään suprajohtavuutta ilmiönä, sekä avataan, kuinka suprajohteet voidaan luokitella niiden ominaisuuksien perusteella. Luvussa kerrotaan lisäksi erilaisista kaupallisista suprajohtomateriaaleista sekä käytännön sovelluksista, jotka hyödyntävät suprajohtavuutta. Suprajohteet voidaan luokitella matalan lämpötilan suprajohteisiin ja korkean lämpötilan suprajohteisiin, sekä ne voidaan myös jakaa tyyppin I ja tyyppin II suprajohteisiin sen perusteella, kuinka ne käyttäytyvät ulkoisen magneettikentän läsnä ollessa.

2.1 Suprajohtavuus ilmiönä

Suprajohtavuudella tarkoitetaan ilmiötä, jossa sähköä johtavan materiaalin resistiivisyys katoaa materiaalille ominaisen kriittisen lämpötilan T_c alapuolella. Suprajohteet hylkivät ulkoista magneettikenttää ja tätä kutsutaan Meissner-ilmiöksi. Tarkemmin Meissner-ilmiöllä tarkoitetaan suprajohtavan materiaalin ominaisuutta, jossa magneettikenttä poistuu materiaalista, vaikka se altistettaisiin ulkoiselle magneettikentälle ennen jäädyttämistä. [1]

Suprajohteet voidaan jakaa tyyppin I ja tyyppin II suprajohteisiin sen perusteella, kuinka ne käyttäytyvät ulkoisen magneettikentän läsnä ollessa. Tyyppin I suprajohteet hylkivät ulkoista magneettikenttää täydellisesti kriittisen magneettikentän voimakkuuden H_c arvoon saakka. Vastaavasti tyyppin II suprajohteet hylkivät ulkoista magneettikenttää täydellisesti sen ollessa pieni, mutta magneettikenttä pääsee tunkeutumaan materiaaliin, kun sen voimakkuus kasvaa. [1] Kuvasta 1 nähdään, että tyyppin I suprajohteilla on yksi kriittinen magneettivuon tiheys H_{c1} ja tyyppin II suprajohteilla kaksi kriittistä magneettivuon tiheyttä H_{c1} ja H_{c2} [2]. Kuvasta 1 nähdään lisäksi, kuinka ulkoisen magneettikentän tunkeutuminen suprajohtavaan materiaaliin tapahtuu. Magneetti on täysin suprajohtavassa tilassa, kun pysytään kriittisen lämpötilan ja ensimmäisen magneettivuon tiheyden arvon alapuolella. Vasemmassa alanurkassa oleva pieni kuva havainnollistaa, kuinka ulkoinen magneettikenttä kiertää materiaalin (Meissner). Magneetti on osittain suprajohtavassa tilassa, kun pysytään kriittisen lämpötilan alapuolella ja magneettivuon tiheys on ensimmäisen ja toisen arvon välissä. Keskimmäisestä pienestä kuvasta nähdään, kuinka vuoputket (vortex) ovat tunkeutuneet materiaaliin osittain. Suprajohtava tila menetetään kokonaan, kun kriittinen lämpötila ylitetään ja magneettivuon tiheys ylittää jälkimmäisen arvon. Tällöin ulkoinen magneettikenttä on päässyt tunkeutumaan materiaalin kokonaan,

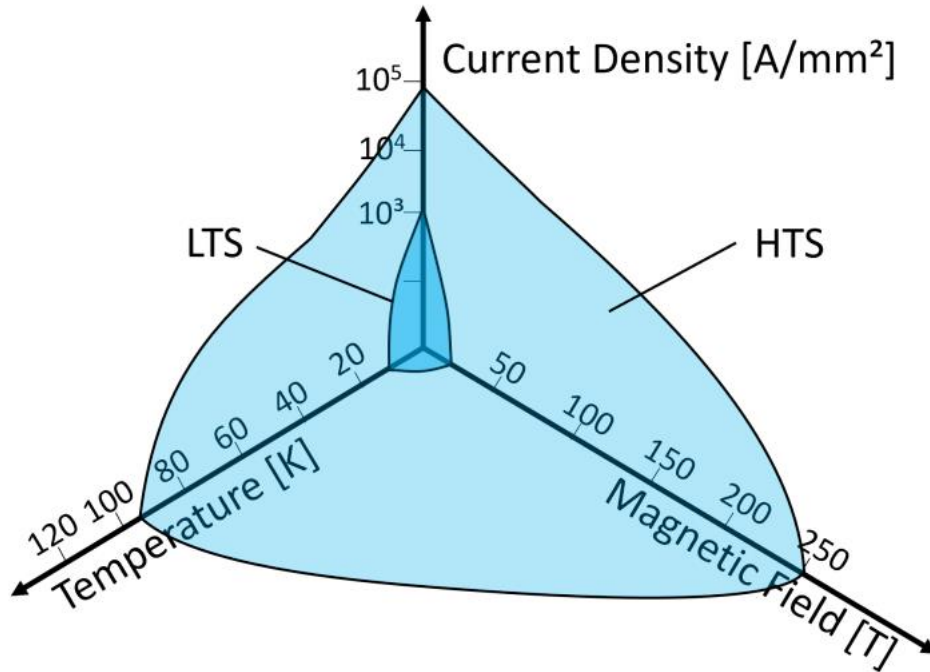
ja tätä havainnollistaa oikean ylänurkan pieni kuva (normal). [2] Tyypin II suprajohteet kestävät huomattavasti suurempia magneettikentän voimakkuuksia verrattuna tyypin I suprajohteisiin [1].



Kuva 1. Tyypin I ja tyypin II suprajohteiden käyttäytyminen ulkoisessa magneettikentässä. [3]

Suprajohteet voidaan lisäksi luokitella matalan ja korkean lämpötilan suprajohteisiin. Matalan lämpötilan suprajohteita kutsutaan lyhyesti LTS-materiaaleiksi (Low Temperature Superconductor) ja korkean lämpötilan suprajohteita HTS-materiaaleiksi. Nimensä mukaisesti LTS-materiaalit vaativat toimiakseen alhaisempia lämpötiloja kuin HTS-materiaalit. [2] Matalan ja korkean lämpötilan suprajohtemagneeteilla on suuria eroavaisuuksia muun muassa materiaaliominaisuuksien, johtimen suorituskyvyn, jäähdytysjärjestelmien sekä hinnan suhteen [4].

Suprajohteiden käyttäytymistä voidaan mallintaa kriittisen pinnan avulla, jolla kuvataan magneettivuon voimakkuuden, virrantiheyden ja lämpötilan keskinäisiä suhteita. Suprajohtava tila säilytetään, kun magneettivuon tiheys B_c , virrantiheys J_c ja lämpötila T_c pysyvät kriittisen pinnan alapuolella. Tila menetetään, mikäli yksikin arvoista ylittää kriittisen arvonsa $B_c(T, J)$, $T_c(J, B)$, tai $J_c(T, B)$. [1] Kuvasta 2 nähdään, että HTS-materiaaleilla kriittisen pinnan sisään rajautuva tilavuus on LTS-materiaaleja huomattavasti suurempi.



Kuva 2. LTS- ja HTS-materiaalien kriittinen pinta. [5]

2.2 Kaupalliset suprajohtemateriaalit

Tähän mennessä on löydetty tuhansittain suprajohtavia materiaaleja, mutta vain harva niistä on päätyntä kaupallisiin sovellutuksiin. Kaupallisia matalan lämpötilan suprajohtemateriaaleja ovat niobititaani ja niobitina, jotka ovat tärkeimmät kaupalliset suprajohtemateriaalit. Matalan lämpötilan suprajohtemateriaalien käyttöä rajoittaa niiden vaatima jäähdytys nesteheliumin lämpötilaan, joka on 4.2 K:iä, sekä joissain tapauksissa myös virran ja magneettikentän sietokyky. Korkean lämpötilan kaupallisia suprajohtemateriaaleja ovat YBCO (Yttrium Barium Copper Oxide) ja REBCO (Rare-earth Barium Copper Oxide), sekä vismuttipohjaiset Bi-2223 ja Bi-2212. [6] Vuonna 2001 löydetty magnesiumdiboridi MgB_2 asettuu ominaisuuksiltaan näiden kahden yllä mainitun kategorian välimaastoon [7].

Suprajohtavan materiaalin tulee täyttää tiettyjä ominaisuuksia, jotta se voidaan kaupallistaa. Tällaisia ominaisuuksia ovat muun muassa riittävän korkea kriittinen lämpötila ja virrantiheys, sekä tyypin II suprajohteiden tapauksessa riittävän korkea ylempi magneettikentän voimakkuus. Muita tärkeitä ominaisuuksia ovat riittävä terminen- ja sähkömagneettinen stabiilisuus, suuri rasituksen ja taivutuksen kesto, alhaiset AC-häviöt ja kohtuulliset valmistuskustannukset. [7] Termisellä stabiilisuudella tarkoitetaan sitä, että magneetin lämpötila saadaan pysymään kriittisen lämpötilan alapuolella, eli että Joulelämpö ei pääse lämmittämään magneettia niin, että se palaa takaisin resistiiviseen tilaan. Sähkömagneettisella stabiilisuudella tarkoitetaan vuoputkien liikettä, eli sitä, että vuoputket

kiinnittyvät pinning-keskuksiin, eikä vuohyppyjä pääse tapahtumaan. Vuohypyllä tarkoitetaan vuoputken irtautumista pinning-keskuksesta, joka voi aiheuttaa magneetin quenchaamista.

2.3 Käytännön materiaalit ja sovellukset

Suprajohtavuutta voidaan hyödyntää useissa käytännön sovelluksissa, mutta sillä on vielä paljon potentiaalia tulevaisuuden sähköenergiatekniikassa. Suprajohteiden teolliset sovellukset voidaan luokitella toimintalämpötilan, tarvittavan magneettikentän voimakkuuden ja materiaalien ominaisuuksien mukaan. Sovelluksia, joissa suprajohtavuutta voidaan hyödyntää ovat muun muassa tehonsiirtokaapelit, vikavirtarajoittimet, muuntajat, induktiokuumentimet, moottorit, generaattorit, Maglev (magnetic levitation), sähköenergiavarastot, MRI-laitteet (Magnetic Resonance Imaging), magneettiset erottimet, hiukkaskiihdyttimet, fuusioreaktorit ja NMR-laitteet (Nuclear Magnetic Resonance). [6]

Matalan lämpötilan suprajohteista niobititaania (NbTi) käytetään tyypillisesti MRI-laitteissa, laboratorioissa tarvittavissa magneeteissa sekä levitaatiojumissa. Niobititaanilla voidaan luoda esimerkiksi 9 T:n magneettikenttiä 4.2 K:ssä tai 11 T:n magneettikenttiä 1.8 K:ssä. Niobitinaa (Nb₃Sn) käytetään MRI-laitteissa, NMR-laitteissa, hiukkaskiihdyttimissä, tokamak-reaktoreissa ja tutkimuksessa käytettävissä korkean magneettikentän sovelluksissa. Niobitinasta rakennetuilla johtimilla voidaan synnyttää jopa 23 T:n magneettikenttiä. Niobitin toimintalämpötilat ovat samat kuin niobititaanilla, mutta lämpömarginalli on pienempi. [6]

Korkean lämpötilan Bi-2223-teippiä on suunniteltu käytettäväksi esimerkiksi valmistettaessa tehonsiirtokaapeleita, moottoreita, generaattoreita, muuntajia ja vikavirranrajoittimia. Vuonna 2012 Kiinaan valmistettiin maailman ensimmäinen HTS-sähköasema hyödyntäen Bi-2223-teippiä. Bi-2223 suurin haaste on sen hauras anisotrooppinen rakenne, joka tekee siitä mekaanisesti kestävämmän. [6] Anisotropian käsitettä on avattu paremmin luvussa 3.2.

Korkean lämpötilan Bi-2212-materiaalista voidaan valmistaa pyöreitä johtimia, jotka ovat rakenteeltaan isotrooppisempia kuin Bi-2223-materiaalista valmistettu teippi, ja näin ollen mekaanisesti kestävämpiä. Bi-2212-johdinta voidaan hyödyntää valmistettaessa korkean kentän NMR-laitteita, Rutherford-kaapeleita, kiihdyttimissä käytettäviä magneetteja ja fuusiomagneetteja. Vuonna 2014 saavutettiin 34 T:n magneettikenttä hyödyntäen Bi-2212-johtimia. [6] HTS-materiaaleista rakennetuilla magneeteilla on teknisesti mahdollista saavuttaa suurempia magneettikentän voimakkuuksia verrattuna LTS-materiaaleista rakennettuihin magneetteihin lämpötilan ollessa riittävän alhainen.

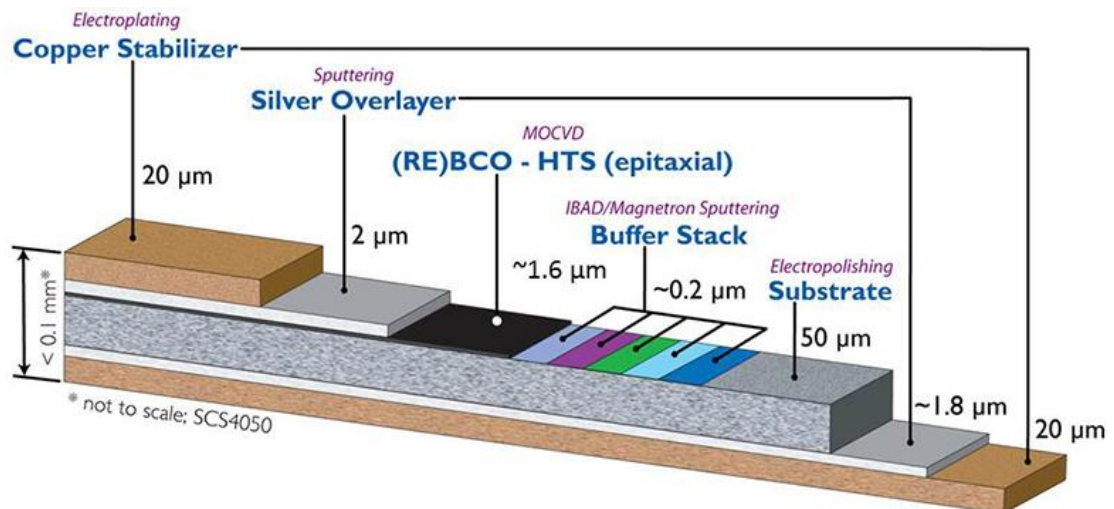
Kaupallistamisen alkuvaiheessa olevia REBCO-johtimia (Rare-earth Barium Copper Oxide) on käytetty usean yhtiön toimesta. Vuonna 2008 ensimmäinen kilometriluokan REBCO-johdin otettiin käyttöön Yhdysvalloissa, ja tällöin kriittiseksi virraksi saatiin $227 \frac{A}{cm}$ 77 K:ssä. Viime vuosina kaupallistamista on tapahtunut lisäksi muun muassa Japannissa, Koreassa, Saksassa, Venäjällä ja Kiinassa. REBCO-johtimia on suunniteltu käytettävän esimerkiksi tehonsiirtokaapeleissa, moottoreissa, generaattoreissa, muuntajissa ja vikavirranrajoittimissa. Esimerkiksi vuonna 2019 Koreassa toteutettiin ensimmäinen kaupallinen projekti, jossa REBCOsta valmistettuja kaapeleita asennettiin todelliseen sähköverkkoon. Projektissa yhdistettiin kaksi 23 kV:n sähköasemaa yli kilometrin mittaisella REBCO HTS-kaapelilla. [6]

3. KORKEAN LÄMPÖTILAN HTS-JOHTIMET

Luvussa esitellään perinteisesti eristettyjen HTS-johtimien potentiaalia sekä merkittävimmät haasteet. Luvussa kuvataan lisäksi näiden perinteisesti eristettyjen HTS-johtimien quench-suojauksen haasteita, joiden perusteella tutkijat ovat lähteneet kehittämään uudenlaista HTS-teknologiaa. Tämä uudenlainen HTS-teknologia kattaa osittain eristetyt ja eristämättömät suprajohdemagneetit, joiden toiminnasta kerrotaan tarkemmin luvuissa 4 ja 5.

3.1 HTS-johtimien potentiaali

Tyypillinen HTS REBCO -johdin rakennetaan kuvan 3 mukaisesti. Suprajohtavuuden kannalta merkittävin kerros on noin 1–2 μm paksu REBCO-kerros. Johtimessa on lisäksi kaksi kupari- ja hopeakerrosta sekä yksi puskurikerros ja yksi substraattikerros. [8]



Kuva 3. REBCO-johtimen rakenne. [8]

HTS-kaapelit voivat tulevaisuudessa korvata osan sähkönsiirrossa käytettävistä kaapeleista. Ne mahdollistavat jopa viisinkertaisen tehonsiirron pienemmillä häviöillä, mutta toisaalta ne vaativat asianmukaisen jäähdytyksen. Korkean lämpötilan suprajohdekaapeleilla voidaan kasvattaa tehonsiirtokapasiteettia, jolloin sähköä tarvitsee tuottaa vähemmän, sillä suurempi osa tuotetusta sähköstä saadaan käyttöön. HTS-teknologiaa voidaan hyödyntää kaapelien lisäksi myös muuntajissa, generaattoreissa, vikavirtarajoitimissa ja SMES-järjestelmissä (Superconducting Magnetic Energy Storage). [10,11]

HTS-magneetit toimivat LTS-magneetteja korkeammassa lämpötiloissa, joten niiden jäähdyttäminen on huomattavasti helpompaa. Korkean lämpötilan suprajohdemagneettien toimintalämpötiloja ovat esimerkiksi 20 K ja 77 K. LTS-magneetit tulee vastaavasti

jäähdyttää esimerkiksi 1.9 K tai 4.2 K lämpötilaan. Näin ollen HTS-kaapelit ovat termisesti stabiilimpia. [9]

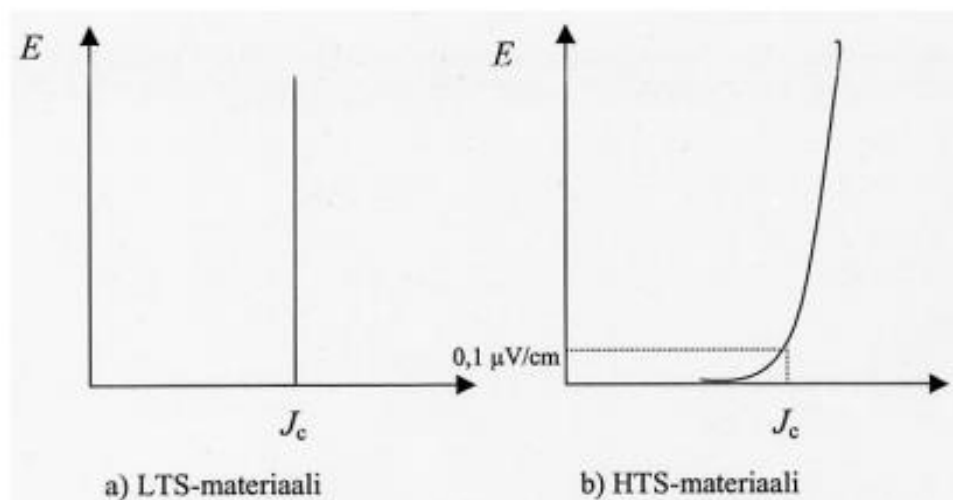
3.2 HTS-johtimien haasteet

HTS-johtimien merkittävimmät haasteet ovat hidas resistiivinen transiio ja hidas quenchin etenemisnopeus. Quench-suojauksen haasteita on avattu paremmin alaluvussa 3.3. n -luvulla voidaan kuvata resistiivisen transition jyrkkyyttä yhtälön (1) mukaisesti, jonka avulla voidaan mallintaa suprajohteiden virta-jännite käyttäytymistä. [13]

$$V = V_c \left(\frac{I}{I_c} \right)^n, \quad (1)$$

Yhtälössä (1) V on näytteen yli oleva jännite, V_c jännitekriteeri, I näytteen kautta kulkeva virta, I_c näytteen kriittinen virta ja n transition jyrkkyyttä kuvaava lukuarvo. [14] Jännitekriteeri on tyypillisesti joko $0,1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$ tai $1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$ ja määräytyy transition jyrkkyyden mukaan. Yleisin käytettävä jännitekriteeri on $1 \frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}$. [14].

LTS-materiaaleilla n -luku on tyypillisesti luokkaa 40–60, kun HTS-materiaaleilla vastaava arvo on 15–25 [15]. Matalampi n -luku tarkoittaa sitä, että joulelämpöä generoituu jo alikriittisillä virran arvoilla, mikä on tyypillistä HTS-magneeteilla. LTS-materiaaleilla transiio tapahtuu siis HTS-materiaaleja jyrkemmin. Lämmön generoituminen alikriittisillä virroilla tulee ottaa suunnittelussa huomioon, jotta suprajohtavaa tilaa ei menetetä lämmöstä syntyvien häviöiden takia [14].

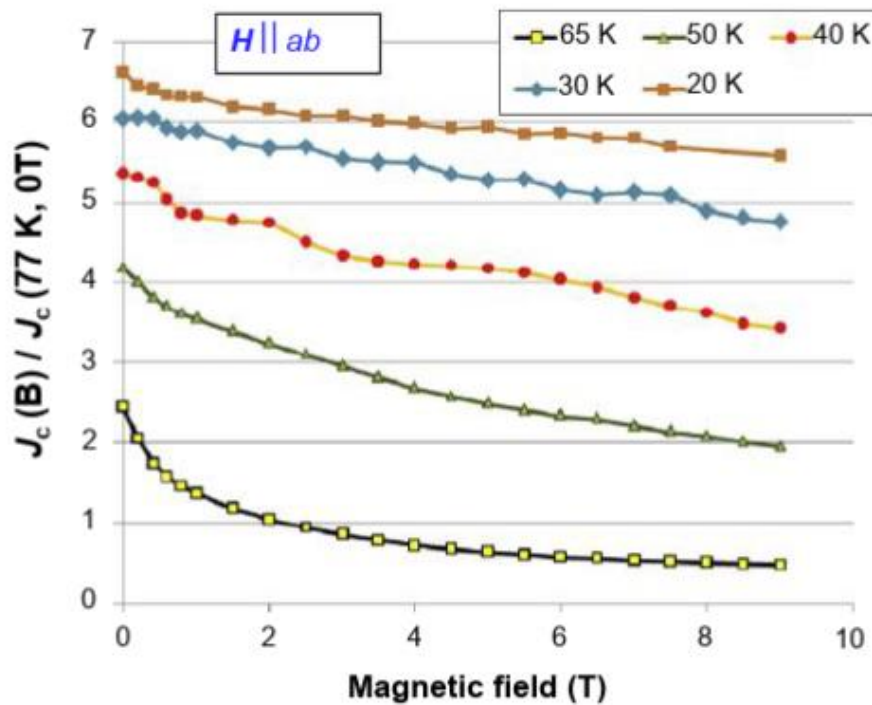


Kuva 4. Transition jyrkkyyks LTS- ja HTS-materiaaleilla. [16]

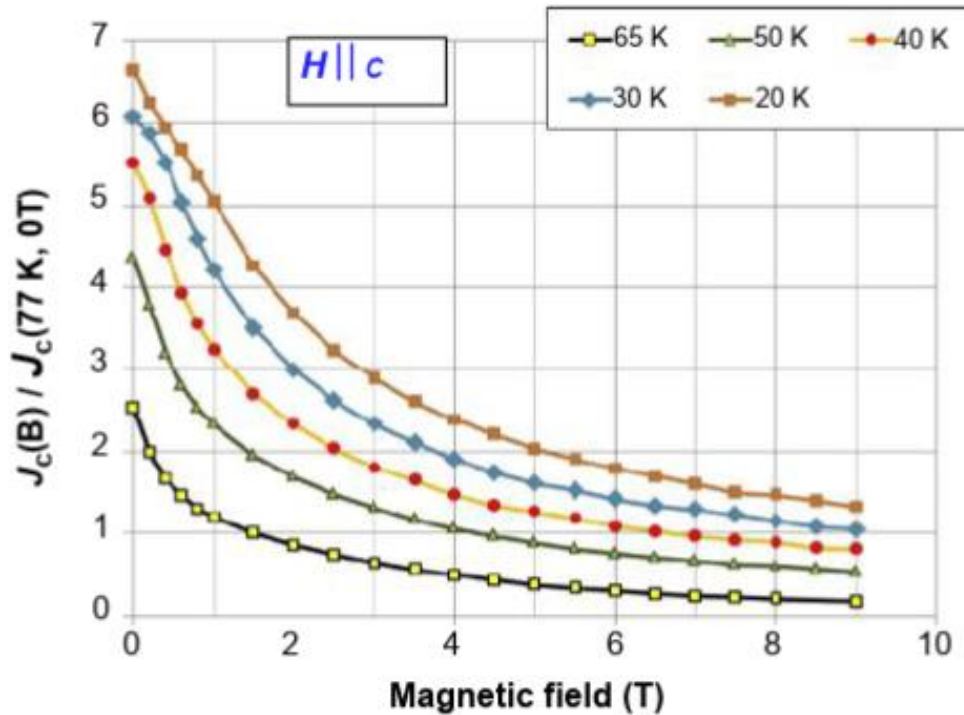
Erityisesti kaupallistamisen kannalta merkittävä haaste on HTS-johtimien hinta verrattuna LTS-johtimiin [10]. Johtimien hinta ilmoitetaan muodossa €/kAm, millä kuvataan

hinnan ja suorituskyvyn suhdetta. Korkean lämpötilan supraohdekaapelit ovat kertaluokan tai enemmän matalan lämpötilan supraohdekaapeleita kalliimpia. HTS- ja LTS-kaapeleiden hintojen keskinäistä vertailua ei kuitenkaan pidetä erityisen mielekkäänä, sillä niiden kiderakenteet, toimintalämpötilat ja magneettikentän voimakkuudet poikkeavat toisistaan merkittävästi. [2]

Yhtenä haasteena voidaankin pitää edellä mainittua kiderakennetta. HTS-materiaalien anisotrooppisuudesta johtuen johtimeen syötetyn magneettikentän suunnalla ja kulmalla on vaikutusta kriittisen virrantiheyden suuruuteen [2]. Kuvan 5 tapauksessa magneettikenttä on suunnattu johtimeen johtimen suuntaisesti ja kuvassa 6 kohtisuoraan johdinta. Kuvan 5 kriittiset virrantiheyden arvot ovat huomattavasti suurempia verrattuna kuvan 6 arvoihin.



Kuva 5. Virrantiheys suhteessa magneettikentän voimakkuuteen. Ulkoinen magneettikenttä on suunnattu johtimeen johtimen suuntaisesti. [2]



Kuva 6. Virrantiheys suhteessa magneettikentän voimakkuuteen. Ulkoinen magneettikenttä on suunnattu kohtisuoraan johtimeen. [2]

Virrantiheyden suuruudella on merkitystä, sillä pienin kriittisen virrantiheyden arvo määrittää sen virran, jonka sähköverkossa kiinni oleva laite voi kuljettaa. Anisotrooppisuudesta johtuvat alhaisemmat virrantiheyden arvot vaikuttavat negatiivisesti laitteen kokoon, massaan ja hintaan, sillä magneetit vaativat suuremman määrän käämikierroksia ampeerikierrosta kohden. [2] Tämän vuoksi on edullista suunnata magneettikenttä johtimeen sen suuntaisesti. Magneettikäytössä teippimuotoinen johdin on haastava, sillä siitä on vaikea valmistaa kaapeleita, joissa virta kulkee rinnan useassa teipissä. Tämä korostuu erityisesti silloin, kun kaapelien kytkeminen vaatii transponointia. Transponoinnilla tarkoitetaan johtimien symmetristä vuorottelua, jonka avulla voidaan vähentää sähkötaattista epätasapainoa.

Suprajohteilla tulee olla hyvä mekaaninen kesto lämmöstä ja sähkömagnetismista aiheutuvaa rasitusta vastaan. Esimerkiksi Bi-2212 ja Bi-2223 kestävät sähkömagneettista rasitusta suhteellisen huonosti niiden rakenteessa olevan pehmeän hopean takia. Lisäksi Bi-2223:n, Bi-2212:n ja YBCO:n prosessoiminen johdoiksi ja teipiksi on haastavaa, sillä ne ovat keraamisesti hauraita. Haastavan valmistusprosessin takia materiaaleista on vaikea saada suuria pituuksia tasalaatuista johdinta, mikä tarkoittaa sitä, että johtimien välillä tarvitaan useampia resistiivisiä liitoksia, jotka tuottavat lisää sähköhäviöitä. [6]

3.3 Quench-suojauksen haasteet

Quenchissa suprajohde lämpenee paikallisesti ja suprajohtava tila menetetään, jolloin materiaalin quenchaaava osa muuttuu normaalijohteiseksi. Tällainen lämpenemä voi syntyä esimerkiksi johtimen liikkeestä tai ulkoisesta häiriöstä. Suprajohteet ovat normaalitilassa huomattavasti huonompia sähkön- ja lämmönjohteita, joten johtimessa kulkeva virta aiheuttaa suuren resistiivisen häviön, jolloin johdin pääsee kuumenemaan paikallisesti ja on vaarassa tuhoutua kokonaan. [17] Johtimien suojaaminen quenchilta on edelleen haaste suprajohdeteknologiassa. LTS-magneettien quench-käyttäytyminen tunnetaan hyvin, mutta tätä ei voida täysin soveltaa HTS-magneetteihin, sillä ne osoittavat selvästi erilaista kvantitatiivista käyttäytymistä. [12] Tässä tapauksessa kvantitatiivisella käyttäytymisellä tarkoitetaan MQE- (Minimum Quench Energy) ja NZPV-arvojen (Normal Zone Propagation Velocity) suuruuksien eroavaisuuksia LTS- ja HTS-magneettien välillä.

MQE, eli pienin quench-energia, on HTS-magneeteilla melko suuri. Esimerkiksi Schwartzin teettämässä tutkimuksessa Bi-2212:en MQE oli suuruusluokaltaan 0.78–1.61 J [12]. Pienin quench-energia on tärkeä tuntee, jotta magneetin quenchamiselta voidaan välttyä. Tämä korostuu erityisesti LTS-materiaaleilla, sillä niiden MQE on huomattavasti pienempi, luokkaa 0.0001–0.01 J. [18]. Edellä mainitut MQE-arvot ovat hyvin tapauskohtaisia, mutta niiden tarkoituksena tässä on kuvata suuruuseroja.

Vastaavasti NZPV, eli normaalialueen etenemisnopeus on HTS-materiaaleilla muutama suuruusluokan pienempi kuin LTS-materiaaleilla. Normaalialueen etenemisnopeus on HTS-materiaaleilla tyypillisesti luokkaa 1–10 cm/s ja LTS-materiaaleilla 10–40 m/s [19]. Suojauksen kannalta pieni NZPV-arvo tarkoittaa sitä, että normaalialue etenee hitaasti, joten se on myös vaikea havaita. Tällöin johde saattaa ehtiä tuhoutumaan ennen kuin vikasignaali ehtii aktivoimaan suojausjärjestelmän. [12] NZPV-arvon suuruus riippuu voimakkaasti materiaalin lämpökapasiteetista, joka vastaavasti riippuu voimakkaasti toimintalämpötilasta.

Quench-suojauksen tavoitteena on estää johtimen tuhoutuminen. Quench-suojauksessa on kolme pääkohtaa: 1) häiriön havaitseminen, 2) häiriön arviointi ja väärin positiivisten tulosten estäminen ja 3) suojatoimenpiteet, jotka estävät magneetin tuhoutumisen, mikäli se quenchaa. [12]

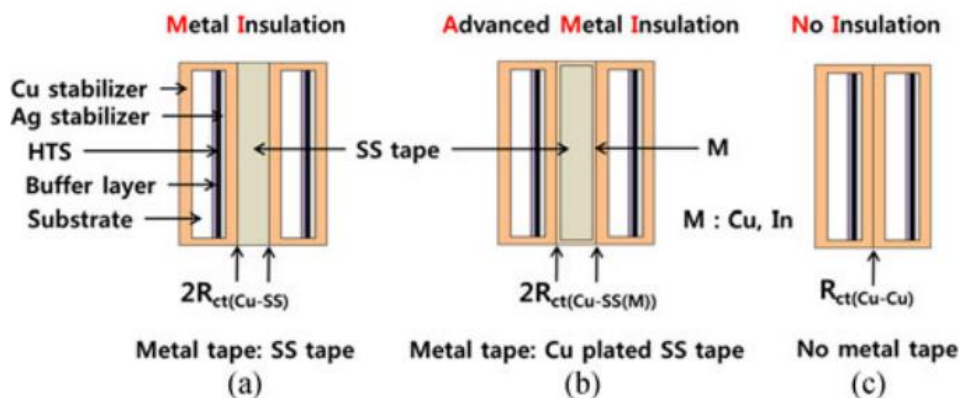
4. KORKEAN LÄMPÖTILAN ERISTÄMÄTTÖMÄT SUPRAJOHDEMAGNEETIT

Perinteisesti eristettyjen HTS-magneettien yksi merkittävimmistä haasteista on niissä hitaasti etenevä normaalialue, joka tekee quenchin havaitsemisesta hankalaa. Eristämättömät suprajohdemagneetit kehitettiin, jotta perinteisesti eristettyjen HTS-magneettien haasteille löydettäisiin ratkaisuja. Tässä luvussa esitellään korkean lämpötilan eristämättömien suprajohdemagneettien toimintaperiaatetta, sekä teknologian tuomia hyötyjä ja haasteita.

4.1 Toimintaperiaate

Eristettyjen HTS-magneettien yksi merkittävimmistä haasteista on hitaasti etenevä normaalialue, joka hankaloittaa syntyvän hotspot-alueen havaitsemista. Hotspot-alueella tarkoitetaan siis sitä aluetta, jossa magneetin lämpötila nousee korkeimmaksi quenchin aikana. Normaalialueen eteneminen aiheuttaa jännitteenousun, joka tapahtuu liian hitaasti, jotta quenchin aiheuttamilta vahingoilta voitaisiin välttyä, sillä johtimen lämpötila nousee kuitenkin samalla nopeasti. Tämän ongelman ratkaisemiseksi Hahn ehdotti eristämättömiä magneetteja vuonna 2011. [17]

Eristämättömien korkean lämpötilan magneettien käämityksessä ei ole nimensä mukaisesti lainkaan eristystä käämikerrosten välillä. Eristyksen puuttuminen tarkoittaa sitä, että virta pääsee siirtymään tarvittaessa kerrosten välillä johtimesta toiseen. Normaalikäytössä tavoitteena on, että jokaisessa johtimessa kulkisi sama virta, ja tämän takia magneetin virtaa ei voida nostaa kovin nopeasti. NI-magneetin (No-Insulation) rakenne löytyy kuvasta 7, josta nähdään, että kahden käämikerroksen välissä ei ole eristystä.



Kuva 7. HTS-magneetti, jossa käämikerrosten välissä on (a) metallinen eristys ja (c) ei eristystä lainkaan. [20]

4.2 Hyödyt

Eristämättömät HTS-magneetit on rakennettu niin, että ne eivät välittömästi ylikuumene, vaikka johdin quenchaisi. Käämityksessä kulkeva virta pääsee siirtymään viereiseen kierrokseen, mikäli kyseinen kierros quenchaa. Eristyksen puuttuminen mahdollistaa virran jakautumisen kerrosten välillä, jolloin virta saadaan tarvittaessa kulkeutumaan pois vialliselta vyöhykkeeltä, joka on vaarassa quenchata. [17]

Muita NI-teknologian tuomia etuja voivat olla muun muassa mekaanisesti vankempi käämitys, joka vähentää käämiin kohdistuvaa jännitystä magneettisen kuormituksen alla, sekä virrantiheyden kokonaisvaltainen paraneminen. Virrantiheyden kokonaisvaltainen paraneminen on mahdollista erityisesti YBCO/REBCO-johtimilla, sillä niiden paksuus on lähes sama kuin perinteisillä eristeillä. [21]

Eristämättömät REBCO-magneetit ovat potentiaalinen ratkaisu moneen tulevaisuuden teollisuuden sovellukseen, kuten tokamak-reaktoreihin, MRI-laitteisiin ja muihin korkean magneettikentän sovelluksiin. Esimerkiksi vuonna 2019 saavutettiin testauskäytössä jopa 45.5 T:n magneettivuon tiheys. [17]

4.3 Haasteet

Eristämättömien HTS-magneettien haasteena on niiden vaatima hidas latautumisaika. Magneetteja ladattaessa tavoitteena on, että jokaisessa johtimessa kulkisi sama virta, joten lataus täytyy suorittaa tarpeeksi hitaasti. Liian nopealla latauksella ei välttämättä saavuteta tilaa, jossa jokaisen käämikerroksen välillä vallitsisi sama virta. Virran muutoksen ollessa nopea, on mahdollista, että impedanssien arvot vaihtelevat käämikerrosten välillä, jolloin virta magneetissa jakautuu epätasaisesti.

NI-magneetin impedanssi koostuu kolmesta komponentista, jotka ovat L_{coil} , R_c ja R_θ . L_{coil} on HTS-magneetin induktanssi, R_c säteen suuntainen resistanssi, johon kuuluu kosketus-, eristys- ja substraattiresistanssi, ja R_θ atsimuutillinen resistanssi. Atsimuutilla tarkoitetaan virran suuntaa, joka kulkee myötäpäivään. NI-magneettien latausnopeuteen voidaan vaikuttaa erityisesti R_c :n arvoa muuttamalla, ja lataamisnopeuden lyhentämiseksi onkin ehdotettu osittain eristettyjen/metallilla eristettyjen magneettien kehittämistä. Metallilla eristettyjen magneettien toimintaperiaate tulisi perustumaan resistiivisten ominaisuuksia kasvattamiseen, eli R_c :n arvoa nostettaisiin. Resistanssin kasvattaminen tulisi suorittaa kuitenkin niin, ettei magneetti menetä kykyä suojata omaa toimintaansa quenchin aikana. [17]

5. KORKEAN LÄMPÖTILAN OSITTAIN ERISTETYT SUPRAJOHDEMAGNEETIT

Luvussa esitellään korkean lämpötilan osittain eristettyjen suprajohtemagneettien toimintaperiaatetta, sekä kuvataan teknologian tuomia hyötyjä ja haasteita. Osittain eristettyjen suprajohtemagneettien toimintaperiaate on hyvin samanlainen kuin eristämättömillä suprajohtemagneeteilla, mutta niiden kosketusresistanssin arvoa on nostettu, jotta magneettien lataus-purkausviivettä on saatu lyhennettyä.

5.1 Toimintaperiaate

MI-teknologian (Metal-as-Insulation) avulla saadaan lyhennettyä eristämättömien suprajohtemagneettien pitkää lataus-purkausviivettä kasvattamalla käämikerrosten välissä olevaa kosketusresistanssin arvoa säilyttämällä NI-teknologian avulla saavutetut hyödyt. [22] MI-magneetin rakenne on nähtävissä luvun 4.1 kuvasta 7. Tällä hetkellä MI-teknologiaa voidaan hyödyntää sovelluksissa, jotka vaativat erittäin korkeita magneettikenttiä [23].

5.2 Hyödyt

Yksi MI-teknologian hyödyistä ovat termisesti stabiilit käämitykset, jotka kestävät quenchin suurella virralla ilman paikallisia lämpöaurioita [23, 24]. MI-teknologian tutkimus korostaa metalliteipin pinnan hapettumisen merkitystä saavutetuissa korkeissa kosketusresistanssin R_{ct} :n arvoissa ja niiden vaihteluissa [25]. Metalliteippiin syntyvä hapetuskerros on heikko ja ohut, mutta erittäin resistiivinen. Tämä hapetuskerros nostaa käämikerrosten välissä olevaa kosketusresistanssia. Muita tekijöitä, jotka vaikuttavat R_{ct} :n arvoon ovat muun muassa materiaalin pinnan laatu, kuten karheus, pinnan paksuuden vaihtelu ja hapettuminen, sekä materiaalin kovuus. Kosketusresistanssin arvoon vaikuttaa siis useampi ulkoinen tekijä, ja tämä tekee sen analysoinnista ja matemaattisesta mallintamisesta haastavaa. [23] Kuitenkin MI-teknologiassa NI-teknologiaan verrattuna tällä kosketusresistanssin R_{ct} :n suhteellisella vaihtelulla saattaa olla ainoastaan vähäinen vaikutus magneetin käyttäytymiseen, ja tämä tekee magneettisuunnittelusta helpompaa. [23, 25]

5.3 Haasteet

MI-tekniikan suurimpana haasteena voidaan pitää R_{ct} :n optimoimista. Useimmissa tapauksissa hapetuskerros luodaan varastoinnin ja kelan valmistuksen aikana, joka johtaa ennalta arvaamattomiin kosketusresistanssin arvoihin, jotka vaihtelevat merkittävästi magneetin käyttöä aikana. Kosketusresistanssin arvo on keskeinen parametri MI-tekniikassa, ja tulee sovittaa käytössä olevan magneetin vaatimuksiin [23].

Kosketusresistanssin arvon optimointi vaatii erityisten työkalujen ja teknologioiden kehittämistä, ja ratkaisuna voisi olla esimerkiksi jonkinlaisen numeerisen työkalupakin kehittäminen. Tällaisen työkalupakin avulla voitaisiin mallintaa kokonaisen magneetin toimintaa kohtuullisella laskenta-ajalla. Vaikka numeerinen mallintaminen olisikin haastavaa, se voisi olla ratkaisu systemaattiseen kosketusresistanssin arvon optimointiin. Toinen vaihtoehto voisi olla käytännöllinen tapa, jossa mitattaisiin ja säädettäisiin kerrosten välissä olevaa resistanssia, ja rajoitettaisiin sen vaihtelua. [23]

6. QUENCHIN ANALYSOINTI- JA HAVAITSEMIS- MENETELMÄT JA SUOJAUSRATKAISUT

Korkean lämpötilan suprajohdemagneetit saattavat quenchata esimerkiksi ylikuumenemisen tai ylivirran takia. Magneetti ylikuumenee esimerkiksi silloin, kun jäähdytys on riittämätöntä. Ylivirta taas voi syntyä, mikäli virrantiheys pääsee nousemaan ylikriittiseksi. Johtimen epähomogeenisuus tai rasituksen aiheuttama hajoaminen saattavat aiheuttaa virrantiheyden ylikriittisyyttä. Lisäksi myös vuohypyty, rikkinäinen johdin tai AC-häviöt saattavat aiheuttaa magneetin quenchauttamista. [19] Tässä luvussa käsitellään quenchin analysointi- ja havaitsemismenetelmiä sekä suojausratkaisuja.

6.1 Analysointimenetelmät

Quenchin kehittymistä analysoidaan erilaisten numeeristen laskentaohjelmistojen avulla. Ihanteellinen koodi yhdistää magneettisen analyysin, sähköisen analyysin ja lämpöanalyysin yhteen. Yksi ohjelmakoodi sisältää kuitenkin vain harvoin kaikki analysoidavat aihepiirit, sillä ohjelma muuttuisi liian raskaaksi hidasten laskennallista aikaa. Tämän takia ilmiöt ovat yleensä jaettu omiksi koodeikseen. Ohjelmakoodien aihepiirejä ovat esimerkiksi fysikaaliset ilmiöt, käämin geometria, magneettikenttä ja induktanssi, sekä sähköpiirin rakenne.

6.1.1 Lämpötilan nousun mallintaminen

Fysikaalisia ilmiöitä tutkittaessa mallintamisen yksinkertaisin ja ensimmäinen taso on käyttää adiabaattista mallia, jota voidaan hyödyntää LTS-magneettien kanssa. Adiabaattisella mallilla tarkoitetaan prosessia, jossa lämpöä ei siirretä järjestelmään tai siitä ulos, ja sisäisen energian muutos tapahtuu vain työn avulla. Tässä adiabaattinen malli soveltaa yhtälöä, jolla voidaan mallintaa Joulelämmön tasapainottumista ja magneetin lämpötilan nousua resistiivisen lämpenemisen vuoksi. Ensimmäisen tason malli ei ota huomioon lämmön etenemistä käämissä. Koska ominaislämmön ja resistiivisyyden arvoilla on melko monimutkainen riippuvuus lämmön nousun kanssa, tämä yhtälö vaatii numeerista integrointia. Toinen approksimaation taso ottaa huomioon lämmön etenemisen käämissä. Kolmas taso ottaa huomioon lämmönvaihdon käämin ja esimerkiksi heliumupotteen välillä. Adiabaattista mallintamista voidaan suorittaa esimerkiksi QuenchPro-ohjelman avulla, mutta näitä malleja on myös suhteellisen helppo tehdä itse. Itsetehdyillä malleilla saadaankin paras joustavuus laskennassa ja nopeampi laskenta-aika. [26]

6.1.2 Käämin geometria

Käämien geometrian mallintaminen kolmiulotteisena kokonaisuutena voi johtaa kohtuuttoman pitkiin laskenta-aikoihin. Magneettikentän voimakkuus vaihtelee laajasti käämin eri osissa, ja tämä johtaa suuriin eroihin materiaalien ominaisuuksien arvoissa matalissa lämpötiloissa. Myös kriittinen lämpötila vaihtelee riippuen kentän voimakkuudesta ja suunnasta. Yksinkertaisin tapa mallintaa käämin geometriaa on ajatella käämi yhtenä kokonaisuutena, jonka materiaaliomaisuudet ovat homogeeniset. Käämin geometriaa voidaan mallintaa myös kerroksittain, jossa jokaisella kerroksella on oma magneettikentän voimakkuuden arvo. Edellisiä malleja monimutkaisempi versio on mallintaminen johdintasolla, jossa käämin jokaisella johtimella on oma magneettikentän voimakkuutensa. Tämä malli edellyttää johtimien transponointia, eli tällöin yhden johtimen jokaisessa kohdassa vallitsee sama magneettikentän voimakkuus.

Suurien magneettien kanssa on tärkeää ottaa huomioon käämin lähellä olevan raudan vaikutus saturaatioon. Saturaation seurauksena johtimien induktanssi tulee virrasta riippuvaiseksi heikentäen johtimissa kulkevaa virtaa. [26]

6.1.3 Numeeriset menetelmät

FEM on yleinen numeerinen menetelmä osittaisten differentiaaliyhtälöiden ratkaisemiseksi kahdessa tai kolmessa dimensiossa. Ongelman ratkaisemiseksi FEM jakaa suuren geometrian pienempiin yksinkertaisempiin osiin, joita kutsutaan äärellisiksi elementeiksi (finite elements). [27] Esimerkiksi Cast3M ja ANSYS ovat FEM-menetelmään perustuvia ohjelmistoja. Cast3M:ää käytetään esimerkiksi Scalayn yliopistossa pyörrevirtojen laskennassa. ANSYS on vastaavasti hyvin tunnettu FEM-ohjelmisto, joka on saatavilla kaupallisesti. [26]

Usein on tehokkainta yhdistää erilaisia menetelmiä. Esimerkiksi aivojen skannaukseen käytettävän eristetyn MRI-magneetin quench-analyysissä [28, 29] yhdistettiin FEM- ja adiabaattista mallinnusta. Quenchin alkuvaihe vaati FEM-mallinnusta, joka perustui lämpökytkettyyn H-formulointiin, jonka avulla voitiin simuloida virran jakautumista ja lämpötilan nousua. Kun virran jakautuminen suprajohteen ja kuparin välillä oli päättynyt, ja kaikki virta oli siirtynyt kupariin, lämpötilan nousun arvioinnissa voitiin käyttää analyyttistä adiabaattista menetelmää. Tällaisen analyysin avulla pystyttiin mitoittamaan ulkoinen suojausvastus niin, että maksimilämpötila quenchin aikana ei ylittänyt 200 K:iä.

6.2 Eristämättömien HTS-magneettien mallintaminen

Quenchin etenemistä ja siihen vaikuttavia tekijöitä mallinnettiin tutkimuksessa, jossa simuloitiin NI REBCO -magneetin käyttäytymistä korkeassa, yli 20 teslan magneettikentässä. Tähän käytettiin kolmea eri tarkkuustason simulointimenetelmää. Menetelmät on nimetty seuraavasti: yksinkertainen menetelmä, keskinkertainen menetelmä ja monimutkainen menetelmä. Menetelmien avulla voidaan ratkaista käämien lämpökäyttäytyminen, mekaaninen käyttäytyminen ja sähkömagneettinen käyttäytyminen quenchin aikana. Keskinkertaisessa menetelmässä käämit on jaettu moderate-10 ja moderate-20 malleihin, joka tarkoittaa sitä, että yksittäinen käämi on jaettu joko kymmeneen tai kahteenkymmeneen osaan. Jäähdytysolosuhteet ovat adiabaattiset 4.2 K:issä. [30]

Yksinkertaisessa menetelmässä yksi käämi ajatellaan kokonaisuutena, ja huomioonotettavia parametreja ovat säteensuuntainen kierrosten välissä oleva kosketusresistanssi, atsimuutillinen induktanssi sekä REBCO-teipin resistanssi. Yksinkertaisessa mallissa prosessin ajatellaan olevan adiabaattinen, ja että koko käämi quenchaa yhdellä kertaa. Tässä lähestymistavassa ei voida ottaa huomioon käämin sisäistä lämpötilajakaumaa, vaan koko käämi lämpenee yhtenäisesti. Yhtälö, joka tulee ratkaistavaksi, on tällöin (2) mukainen.

$$L \frac{dI_\theta}{dt} + \frac{R_{sc}R_{mt}}{R_{sc}+R_{mt}} I_\theta = R_{ct}(I_{op} - I_\theta) \quad (2)$$

Yhtälössä L on käämin induktanssi, I_θ atsimuutillinen virta, R_{sc} REBCO-kerroksen resistanssi, R_{mt} matriisiresistanssi, R_{ct} kosketusresistanssi ja I_{op} käyttövirta. Yhtälöä varten tulee ratkaista vielä erikseen kosketusresistanssi. Koska lämmönjohtavuutta ei oteta huomioon, lämpösimulaatio lasketaan yhtälön (3) avulla, jossa ρ on massatiheys, c ominaislämpö, T lämpötila ja Q lämpeneminen tilavuutta kohden. Lämpötila on yhteneväinen jokaisessa käämissä. Mallissa jäähdytysprosessiakaan ei oteta huomioon, joten prosessi on adiabaattinen.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = Q \quad (3)$$

Magneettikentän aiheuttama rasiutus voidaan ratkaista yhtälöllä (4). Oletuksena on, että käämin sisällä oleva magneettikenttä muuttuu lineaarisesti säteen funktiona.

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_\theta + r J_\theta B_z(r) = 0 \quad (4)$$

Yhtälössä (4) r on säteittäinen asento, σ_r säteittäinen rasiutus, σ_θ sylinterirasitus, J_θ atsimuutillinen virta ja B_z z-suuntainen magneettivuon tiheys. Magneettikentän aiheuttama jännitys voidaan vastaavasti ratkaista yhtälöä (5) hyödyntäen.

$$\begin{aligned}
\epsilon_r &= \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{\theta r} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{zr} \frac{\sigma_z}{E_z} \\
\epsilon_\theta &= \frac{\sigma_\theta}{E_\theta} - \nu_{r\theta} \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{z\theta} \frac{\sigma_z}{E_z} \\
\epsilon_z &= \frac{\sigma_z}{E_z} - \nu_{rz} \frac{\sigma_r}{E_r} - \nu_{\theta z} \frac{\sigma_\theta}{E_\theta}
\end{aligned} \tag{5}$$

E_r , E_θ ja E_z ovat Youngin moduuli, eli niin sanottu kimmokerroin, joka kuvaa kiinteän aineen jäykkyyttä r , θ ja z suunnissa ja $\nu_{12} \equiv -\epsilon_2/\epsilon_1$, eli Poissonin suhde, joka on materiaalin ominaisuuksia kuvaava suure, joka kuvaa sitä, minkä verran materiaalista tehty kappale sitä puristettaessa levenee tai venyttäessä kapenee poikittaisessa suunnassa. [30]

Keskinkertaisessa mallissa yksi käämi jaetaan säteittäisesti pienempiin osiin, jolloin yksi osa koostuu yhdestä muutamaa kymmeneen käämikierrökseen. Tällöin ratkaistavaksi yhtälöksi saadaan yhtälö (6).

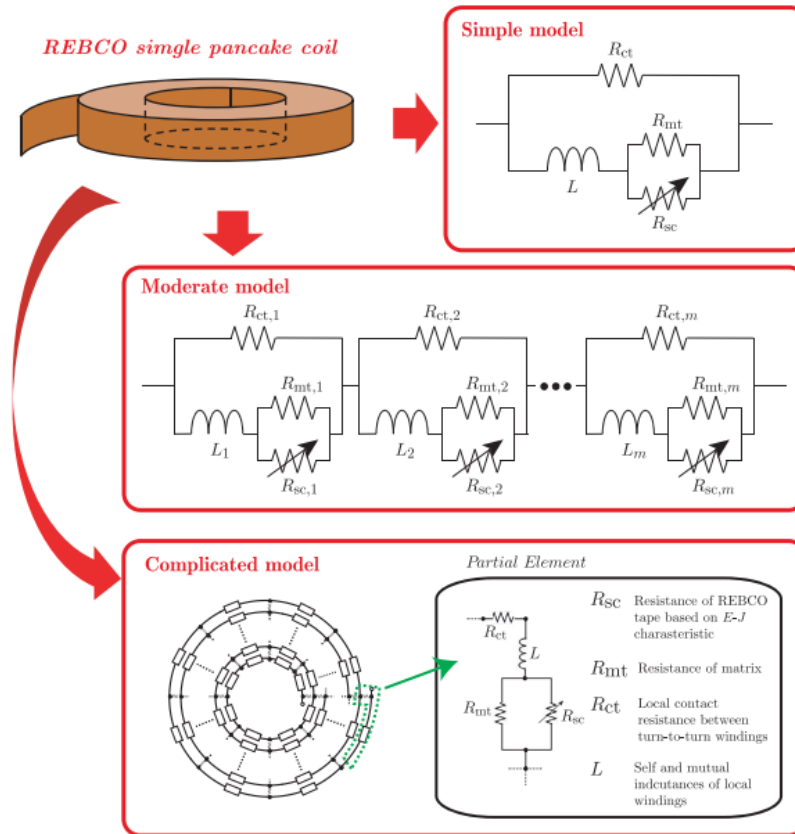
$$\sum_{j=1}^m L_{i,j} \frac{di_{\theta,j}}{dt} + \frac{R_{sc,i} R_{mt,i}}{R_{sc,i} + R_{mt,i}} I_{\theta,i} = R_{ct,i} (I_{op} - I_{\theta,i}) \tag{6}$$

Yhtälössä m kuvastaa osien määrää ja siitä nähdään, että yksittäinen osa on jaettu i - ja j suuntiin. Yhtälöä varten tulee ratkaista kosketusresistanssi erikseen. Lämpöyhtälö voidaan ratkaista erikseen yhtälöllä (7), joka on adiabaattinen. λ on lämmönjohtavuus.

$$2\pi w \rho c \int \frac{\partial T}{\partial t} r dr = 2\pi w \lambda \int \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} r dr + Q \tag{7}$$

Yhtälöt (4) ja (7) ratkaistaan FEM-menetelmää hyödyntäen. Lämpötila, rasitus ja jännitys muuttuvat lineaarisesti jokaisessa elementissä.

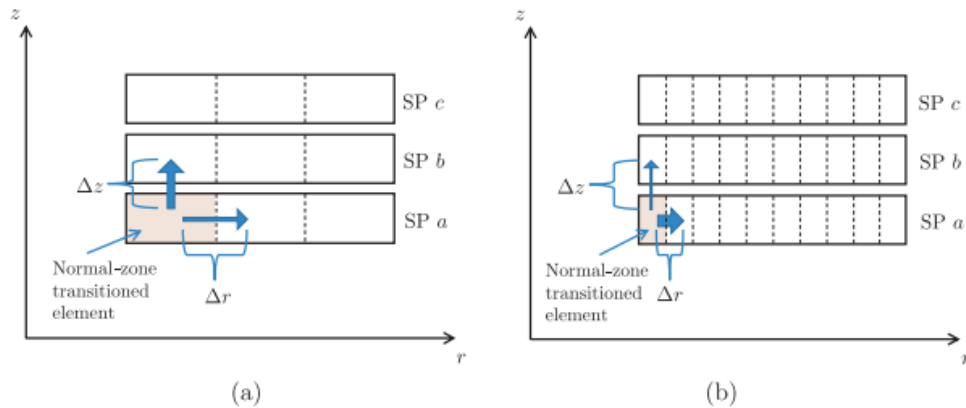
Monimutkaisessa mallissa yksi käämi jaetaan lisäksi moneen atsimuutilliseen elementtiin. Jokainen elementti koostuu paikallisesta induktanssista ja REBCO-teipin resistanssista, ja elementit ovat säteittäisesti yhdistetty kosketusresistanssilla. Tarkemmat kaavat monimutkaista mallia varten löytyvät alkuperäisestä tutkimuksesta. [30]



Kuva 8. NI REBCO -magneetin simulointimallit (yksinkertainen, keskinkertainen ja monimutkainen). [30]

Yllä olevien yhtälöiden avulla mallinnettiin atsimuutillista virtaa, lämpötilaa ja mekaanista rasitusta ja jännitystä. Yksinkertaisella ja moderate-10 malleilla saadut tulokset osoittavat, että quench etenee SP#10:stä (käämin kymmenes elementti) SP#1:een (käämin ensimmäinen elementti) nopeasti. Tämä johtuu siitä, että indusoitunut virta kasvaa samalla, kun quench etenee käämissä. Vastaavasti monimutkaisella ja moderate-20 malleilla quenchin etenemisnopeus on erittäin hidas, sillä indusoitunut virta ei kasva quenchin edetessä. [30]

Moderate-10 mallissa lämpötila nousee nopeasti käämin quenchatessa. Monimutkaisessa ja moderate-20 malleissa lämpötila nousee hitaasti quenchin aikana. Mallien väliset quenchin etenemisnopeuksien erot johtuvat siitä, että käämi on jaettu eri kokosiin osiin. Quenchin etenemisnopeus riippuu indusoituneen virran etenemisnopeudesta, sillä se etenee käämissä huomattavasti nopeammin kuin lämpötilan diffuusio. Kun käämi on jaettu ainoastaan muutamaan osaan, normaalitilaan joutunut elementti on lähempänä viereisen käämin elementtejä verrattuna samassa käämissä oleviin viereisiin elementteihin. Tilannetta on havainnollistettu kuvan 9 avulla.



Kuva 9. Quenchin etenemissuunta riippuu elementin koosta. Indusoitunut virta etenee kohti elementtiä, jolla on vahva magneettinen kytkentä. [30]

Kuvasta nähdään, että kun $\Delta z < \Delta r$ indusoitunut virta etenee nopeammin pystysuunnassa. Vastaavasti, kun $\Delta z > \Delta r$ indusoitunut virta etenee nopeammin säteen suuntaisesti. Virta indusoituu sisimpiin ja uloimpiin kierroksiin induktanssijakauman vuoksi, ja tällöin virta diffundoituu kohti kelan keskimmäisiä kierroksia. Indusoitunut virta tekee sylinterirasituksesta voimakkaamman ja lämpötila nousee säteittäisen virran takia. [30]

Tiedetään, että suuri virta voimakkaassa magneettikentässä heikentää käämin kriittistä virtaa. Tämä johtuu siitä, että REBCO-kerros kuoriutuu Hastelloy-substraatista. Yleisesti, REBCO-kerroksen kuorinnan kynnyks on 0.4–0.5 % jännityksessä. Kun jännitys ylittää kynnyksarvon, käämin kriittinen virta laskee välittömästi ja quenchin eteneminen kiihtyy. Korkean magneettikentän sovelluksissa käyttövirran suuruus määräytyy jännityksen mukaan. Käyttövirta määräytyy yhtälöiden (8) ja (9) mukaan.

$$\epsilon_{\theta}^{limit} = \epsilon_{\theta}(I^{limit}), \quad (8)$$

$$I_{op} = \frac{1}{2} I^{limit} \quad (9)$$

Quenchin etenemisnopeuden simulointitulokseen vaikuttavat siis käämien elementtien välinen etäisyys toisistaan sekä mekaanisesta rasituksesta johtuva kriittisen virran aleneminen. Jotta quenchin simuloinnin tarkkuutta voidaan parantaa, tulevaisuudessa on tärkeä selvittää mekanismi mekaanisesta rasituksesta ja jännityksestä johtuvan kriittisen virran alenemisen taustalla, sekä valita sopiva diskretointitaso kyseessä olevan magneetin simulointiin. Tavoite on diskretoida magneetti riittävästi pieniin osiin, jotta saatava simulointitulokseksi on tarpeeksi tarkka. Laskenta-aika kuitenkin kasvaa nopeasti, kun magneetti on jaettu useisiin osiin. Magneettisuunnittelijan on valittava käytännöllinen

tapa tuottaa tulokset riittävällä tarkkuudella sekä lisäksi pystyttävä arvioimaan tuloksen virherajoja. [30]

6.3 Suojusratkaisut

HTS-magneettien suojaus vaatii aktiivisen havainnointijärjestelmän, joka mahdollistaa magneettien luotettavan suojauksen ja suojausjärjestelmän päällekytkemisen. Passiivinen suojausjärjestelmä ei vaatisi yllä esiteltyjä ominaisuuksia, mutta se ei ole riittäviä, mikäli magneettiin varastoitunut energia on tarpeeksi suuri. Tässä alaluvussa esitellään muutama tapa, jolla voidaan parantaa magneettien suojausta.

Yksinkertaisimmillaan magneetin suojausta voidaan parantaa lisäämällä piiriin ulkoinen suojausvastus. Ulkoinen suojausvastus voidaan kytkeä sarjaan tai rinnan magneettiin kanssa, jolloin osa magneetissa olevasta energiasta voidaan purkaa kryostaatin ulkopuolelle. Energian purkamisen tehokkuus saadaan yhtälöstä (10), jossa R_Q on magneetin quench-ajan osan resistanssi ja R_{dump} suojausvastuksen resistanssi. Tyypillisesti 50–60 % magneetin energiasta saadaan siirrettyä kryostaatin ulkopuolelle. [19]

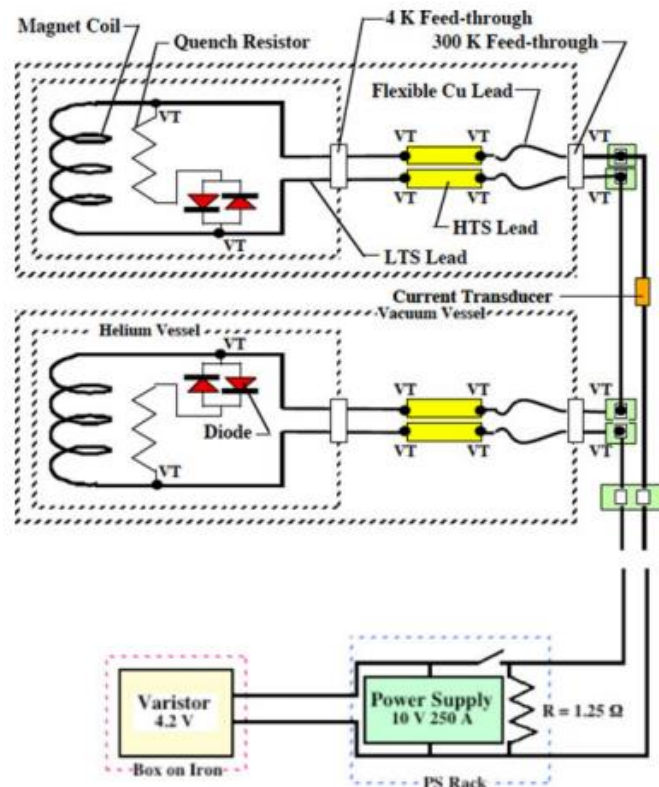
$$\frac{R_Q(t)}{R_{dump}} \quad (10)$$

Magneettien suojausta voidaan parantaa lisäämällä johtimeen kuparia, joka pienentää virrantiheyden arvoa. Virrantiheyden pieneminen hidastaa Joulelämmön generoitumista. Mikäli virrantiheyttä pienennetään, se kasvattaa niin sanottua α -arvoa, joka vastaavasti pienentää quench-aikavakiota. α -arvo suhteuttaa johtimen poikkipinta-alalla matriisimetallin osuuden koko poikkipinta-alaan. Quench-aikavakio on aika, johon mennessä magneetikenttä on vaimentunut $1/e$ -osaan alkuperäisestä. Tällä tarkoitetaan siis sitä, kuinka nopeasti magneetin virta ja varastoitunut energia saadaan purettua. Kuparin lisääminen johtimeen toisaalta hankaloittaa quenchin havaitsemista, sillä se hidastaa sen etenemistä. Lisäksi virrantiheyden pienentäminen johtaa tilavuudeltaan suurempiin magneetteihin. [31]

Yksi vaihtoehto on jakaa kela osiin, ja käyttää useita kryostaatin sisäisiä suojausvastuksia. Tällöin myös magneetissa oleva energia saadaan jaettua pienempiin osiin. Tällä tavalla voidaan vähentää kelan käämikierrosten välissä olevaa jännitettä. Kelan jokaisessa osassa on siis peräkkäisiä diodeja ja vastus kuvan 8 mukaisesti. Diodit estävät virran kulkeutumisen vastukseen, kun magneettia ladataan tai puretaan. Diodin myötäjännite vaihtelee niiden lämpötilan mukaan, ja on tämän suojausmenetelmän perusta. [31]

Eräs vaihtoehto quench-suojaukseen on käyttää kuumentimia tai quench-back-suojausmenetelmää. [31] Quench-back tarkoittaa suojausmenetelmää, jossa varsinaisen piirin

lisäksi on sekundäärinen piiri, joka on matalavastuksinen. Toisiopiiriä lämmitetään ensiöpiiristä indusoituneen virran avulla normaalialueen edetessä johtimessa. [32] Passiivinen quench-back on kuitenkin todennäköisesti liian hidas suojaamaan HTS-magneetteja. [31] Menetelmä, joka voisi toimia, on asettaa kuvan 8 vastukset käämin sisään, jotta magneetti quenchaisi nopeammin. Piiri on rakennettu niin, että vastukset on kytketty termisesti kelaan. Quench-suojauksen aktivoituessa kylmät diodit aktivoituvat, ja päästävät magneetissa kulkevan virran vastusten läpi. Käämit ovat kytketty irti virtalähteestä ja toisistaan, mutta ne ovat induktiivisesti yhteydessä quenchin aikana. Magneettikentän energiaa käytetään lämmittämään käämejä, jotta ne quenchaisivat nopeammin. Myös ulkoista lämmitintä voidaan käyttää, jotta magneetti saadaan quenchamaan nopeammin. Edellä esitelty teknologia toimii LTS-magneeteille, mutta sitä voidaan soveltaa myös HTS-magneeteissa. [31]



Kuva 10. Virtalähde ja quench-suojaukseen käytetty piiri. Piiriä on käytetty suojaamaan MSU:n (Michigan State University) syklotroni kaasusulkumagneettia. [31]

6.4 Havaitsemismenetelmät

Tällä hetkellä havaitsemismenetelmät perustuvat yleensä jännitteen mittaukseen, mutta menetelmänä se ei välttämättä ole tarpeeksi nopea HTS-magneeteille. Quenchin havaitsemiseen on kehitetty useita jännitteettömiä menetelmiä, ja nämä menetelmät voidaan jakaa magneettisiin, optisiin, akustisiin, kapasitiivisiin ja RF-pohjaisiin teknologioihin. [33]

Magneettinen teknologia perustuu hetkellisesti vaihtelevan magneettikentän voimakkuuden havainnointiin. Quenchin aikana hotspot ei jakaudu tasaisesti johtimen poikkipinta-alalle, sillä se saattaa olla vioittunut tai magneettikentän voimakkuus saattaa olla suurempi kuin muualla johtimessa. Kun johtimeen syntyy resistiivinen alue, virta jakautuu siinä uudelleen. Tämä virran jakautuminen on epäsymmetristä, jonka takia myös magneettikenttä jakautuu siinä epätasaisesti, ja voidaan näin ollen havaita magneettisten sensoreiden avulla. Magneettisia menetelmiä ovat quench-antennit ja Hall-anturiryhmät. Quench-antennit eivät toimi perinteisesti eristettyjen HTS-johtimien kanssa, sillä normaali-alue etenee niissä liian hitaasti. Hitaasti etenevä normaali-alue tarkoittaa alhaisempaa ajan suhteen tapahtuvaa magneettikentän voimakkuuden muutosta, jolloin antennit lähettävät heikompia signaaleja. Hall-sensoreita vastaavasti voidaan käyttää HTS-johtimien kanssa. [33]

Optiset teknologiat perustuvat kuitujen optisten ominaisuuksien muutosten havainnointiin. Optiset muutokset johtuvat joko paikallisesta lämpölaajenemisesta tai lämmön aikaansaamasta rasiuksesta. Hienovaraisten Bragg-kuituritiöiden on huomattu toimivan hyvin kryogeenisissä lämpötiloissa, sillä ne havaitsevat hyvin lämmön vaihteluita ja lämmöstä aiheutuvaa rasiusta. Kuiduilla on saatu aikaan 1 K:in lämpöherkkyys 20 K:ssä. FGB-sensoreita (fiber Bragg grating) on asennettu tutkimuskäytössä onnistuneesti kiihdytinmagneetteihin ja tulevaisuudessa niille voi olla käyttöä myös fuusiomagneettikaapeleissa. Tässäkin teknologiassa haasteena on HTS-magneettien hidas normaali-alueen etenemisnopeus. Muita kuituihin perustuvia teknologioita ovat Rayleigh-sironta, Raman-sironta, Brillouin sironta sekä erikoiskuidut. [33]

Akustista säteilyä syntyy, kun suprajohdettavassa magneetissa esiintyy mekaanista häiriötä. Magneetissa syntyvää akustista säteilyä voidaan kuunnella passiivisesti, ja kerätyistä datasta voidaan analysoida saapumisviiveitä, taajuussisältöä ja amplitudia. Teknologiaa on hyödynnetty matalan lämpötilan suprajohdemagneeteilla, mutta sen soveltaminen HTS-puolella voi olla haastavaa, sillä mekaanisten häiriöiden ei olla todettu aiheuttavan HTS-magneettien quenchamista. Kehitteillä on kuitenkin aktiivisia akustisia teknologioita, joita voitaisiin soveltaa HTS-puolella. [33]

Kapasitanssin muutosta voidaan tutkia upottamalla HTS-käämi nesteheliumiin tai nestetyyppen. Kapasitanssin arvoa valvotaan kahden HTS-käämin rakenneosan välillä, jotka on erotettu toisistaan eristekerroksella, joka on upotettu osittain tai kokonaan kryogeeniseen nesteeseen. Paikallisesti syntyvä lämpö hotspot-kohdassa haihduttaa kryogeenistä nestettä, ja tällöin mitataan tätä haihtumaa vastaava kapasitanssin arvon muutos. Nesteheliumkokeissa jopa 0.3 J lämpöhäviö on ollut helppo havaita, ja lähestyttäessä lämpöpoikkeamaa kapasitanssin vaihtelusta tulee erittäin hyvä ilmaisin lämpöhäviölle. Teknologian avulla voidaan havaita lämmön vaihtelua tasolla, joita on erittäin vaikea saavuttaa perinteisillä jännitteellisillä tai jännitteettömällä tekniikoilla. [33]

RF-pohjaiset teknologiat perustuvat radiotaajuiseen säteilyyn. Teknologiaa voidaan hyödyntää, mikäli quenchin aikana syntyy suuri määrä mekaanista tai matalataajuisista sähkömagneettista kohinaa. TFDR-teknologiaa (Time-Frequency Domain Reflectometry) on sovellettu menestyksekkäästi HTS-kaapeleissa, jossa sitä on hyödynnetty tutkittaessa hotspotin syntymistä impedanssin arvoja seuraamalla. [33]

7. YHTEENVETO

Suprajohdemagneettien avulla voidaan vähentää sähkönsiirrossa syntyvien häviöiden määrää suprajohtavuuden ominaisuuksien vuoksi. Tämän ansiosta esimerkiksi tehonsiirtokapasiteettia voidaan kasvattaa huomattavasti. Suprajohteet voidaan jakaa matalan lämpötilan suprajohteisiin ja korkean lämpötilan suprajohteisiin. Tulevaisuudessa erityisesti korkean lämpötilan suprajohdemagneeteilla on suuri potentiaali sähköenergiatekniikan sovelluksissa, sillä niiden avulla voidaan tuottaa voimakkaampia magneetikenttiä, ja ne ovat käytössä termisesti stabiilimpia. HTS-magneettien merkittävimmät haasteet ovat hidas quenchin etenemisnopeus ja hidas resistiivinen transiatio. Näitä HTS-magneettien haasteita on lähdetty ratkomaan kehittämällä eristämättömät ja osittain eristetyt suprajohdemagneetit.

Hitaasti etenevä normaalialue hankaloittaa syntyvän hotspot-alueen havaitsemista eristetyissä suprajohdemagneeteissa. Normaalialueen eteneminen saa aikaan hitaasti tapahtuvan jännitteennousun, samalla kun johtimen lämpötila kuitenkin nousee nopeasti. Normaalialue etenee siis liian hitaasti, jotta quenchin aiheuttamilta mahdollisilta vahingoilta voitaisiin välttyä. Eristämättömillä suprajohdemagneeteilla on pyritty ratkaisemaan tämä ongelma. Eristämättömät HTS-magneetit on rakennettu niin, että ne eivät välittömästi ylikuumene, vaikka johdin quenchaasi. Käämityksessä kulkeva virta pääsee siirtymään viereiseen kerrokseen, mikäli kyseinen kerros quenchaa. Eristyksen puuttuminen siis mahdollistaa virran jakautumisen kerrosten välillä, jolloin virta saadaan tarvittaessa kulkeutumaan pois viialiselta vyöhykkeeltä, joka on vaarassa quenchata

Eristämättömien HTS-magneettien haasteena on kuitenkin niiden hidas latautumisaika, joka johtuu siitä, että magneetissa tulee kulkea sama virta jokaisessa kerroksessa. Latautumisaikaa voidaan lyhentää lisäämällä käämikerrosten välissä olevaa kosketusresistanssia, johon osittain eristetyt suprajohdemagneetit on kehitetty. Osittain eristettyjen magneettien luotettavan toiminnan kannalta tärkeintä on optimoida kosketusresistanssin arvo, jonka suuruus voidaan määrittää erilaisten numeeristen laskentamenetelmien avulla.

Jotta korkean lämpötilan suprajohdemagneetit saadaan tulevaisuudessa laajaan käyttöön, on tärkeää ymmärtää, mitä niissä tapahtuu quenchin aikana. Quenchin analysoimiseksi on kehitetty useita laskennallisia ohjelmistoja, joiden avulla voidaan löytää magneetille tärkeitä raja-arvoja. Quenchin matemaattinen mallintaminen on monimutkainen

prosessi ja se vaatii paljon laskentatehoa ja ymmärrystä suprajohdemagneettien toiminnasta. Esimerkiksi FEM on yleinen numeerinen menetelmä, jota käytetään suprajohtavien magneettien mallintamisessa. FEM-menetelmä perustuu osittaisdifferentiaaliyhtälöiden ratkaisuun, jossa ohjelma jakaa suuren järjestelmän pienempiin ja yksinkertaisempiin osiin. Kun magneetin quench-käyttäytymistä on mallinnettu jollakin ohjelmalla, voidaan mallinnuksesta saatujen tulosten avulla rakentaa halutunlainen magneetti. Luotettavan toiminnan kannalta on tärkeää rakentaa piiri, jolla voidaan suojata magneetin toiminta, mikäli se quenchaa. Suojauksessa oleellisinta on, että magneetti saadaan quenchaamaan mahdollisimman nopeasti, jotta johdin ei pääse tuhoutumaan. HTS-magneettien suojaus vaatii aktiivisen havainnointijärjestelmän, sillä passiivinen suojausjärjestelmä on toiminnaltaan liian hidas, mikäli magneettiin on varastoitunut suuri määrä energiaa.

Quenchin syntymistä tai jo syntyneen quenchin etenemistä voidaan nopeuttaa erilaisten havaitsemismenetelmien avulla, joita on olemassa lukuisia, ja uusiakin on kehitteillä. Havaitsemismenetelmät voidaan jakaa jännitteettömiin ja jännitteellisiin menetelmiin, joista jännitteettömät sopivat HTS-magneeteille paremmin. Jännitteettömät menetelmät voidaan jakaa magneettisiin, optisiin, akustisiin, kapasitiivisiin ja RF-pohjaisiin tekniikoihin, joista esimerkiksi RF-tekniikkaa ja kapasitanssin arvoon perustuvaa menetelmää on hyödynnetty HTS-magneeteissa onnistuneesti.

LÄHTEET

- [1] C.P. Poole, Superconductivity. 2nd ed. Amsterdam, Elsevier/Academic Press, pp. 23–56, 2007.
- [2] C. Rey, Superconductors in the Power Grid: Materials and Applications. Vol. number 65. Cambridge: Elsevier Science, pp. 13-68, 2015.
- [3] H.G. Kaper & H.Nordborg, The frozen-field approximation and the Ginzburg-Landau equations of superconductivity, Journal of Engineering Mathematics, 39, pp. 221–240, 2001.
- [4] 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 transactions on applied superconductivity, 25 (3), pp. 1–6, 2015.
- [5] M. Haubner, P. Krkotić, C. Serafim, V. Petit, V. Baglin, S. Calatroni, et al., Electron Beam Characterization of REBCO-Coated Conductors at Cryogenic Conditions. Applied sciences, 13 (5), 2765–, 2023.
- [6] C. Yao & Y. Ma, Superconducting materials: Challenges and opportunities for large-scale applications, arXiv.org, 24 (6), pp. 102541–102541, 2021.
- [7] H. Kumakura, Development and Prospects for the Future of Superconducting Wires, Japanese Journal of Applied Physics, 51 (1R), pp. 10003–, 2012.
- [8] SuperPower Inc, Our Technology, Furukawa Group, <https://www.superpower-inc.com/Technology.aspx>. Viitattu 12.6.2023.
- [9] R.M. Scanlan, A.P. Malozemoff, D.C. Larbalestier, Superconducting materials for large scale applications, Proceedings of the IEEE, 92 (10), 1639–54, 2004.
- [10] H. Al-Khalidi, A. Hadbah, A. Kalam, Performance analysis of HTS cables with variable load demand, In: 2011 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, IEEE. pp. 1–8, 2011.
- [11] X.Y. Xiao, Y. Liu, J.X. Jin, C.S. Li, F.W. Xu, HTS Applied to Power System: Benefits and Potential Analysis for Energy Conservation and Emission Reduction, IEEE transactions on applied superconductivity, 26 (7), pp. 1–9, 2016.
- [12] J. Schwartz, Quench in high temperature superconductor magnets, arXiv.org, 2014.
- [13] L.F. Goodrich, A.N. Srivastava, M. Yuyama, H. Wada, n-value and second derivative of the superconductor voltage-current characteristic, IEEE transactions on applied superconductivity, 3 (1), pp.1265–8, 1993.
- [14] L.F Goodrich & T.C. Stauffer, Hysteresis in transport critical-current measurements of oxide superconductors, IEEE transactions on applied superconductivity, 11 (1), pp. 3234–7, 2001.
- [15] A.K. Ghosh, V– I transition and n-value of multifilamentary LTS and HTS wires and cables, Physica C, Superconductivity, 401 (1) pp. 15–21, 2004.

- [16] R. Mikkonen, Suprajohtavuus, Opintomoniste, Tampereen Yliopisto, 2022, https://moodle.tuni.fi/pluginfile.php/2918171/mod_resource/content/1/Supramoniste.pdf. Viitattu 28.5.2023.
- [17] J. Ma, Flux Pumping for No-Insulation High Temperature Superconducting REBCO Magnets, 2020, <https://www.repository.cam.ac.uk/handle/1810/311471>. Viitattu 31.5.2023.
- [18] K. Seo & M. Morita, Guidelines for LTS magnet design based on transient stability, Cryogenics, vol. 46 (5), pp. 354-361, 2006.
- [19] M. Marchevsky, Quench detection and protection for HTS accelerator magnets, Lawrence Berkley National Laboratory, CERN, https://indico.cern.ch/event/396905/contributions/1837518/attachments/1152844/1655698/MM_WAMHTS3.pdf. Viitattu 5.6.2023.
- [20] M.H. Sohn, Sim K, B. Eom, H.S. Ha, H.Y. Kim, K. Seong, Controllability of the Contact Resistance of 2G HTS Coil With Metal Insulation. IEEE transactions on applied superconductivity, 28 (3), 1–5, 2018.
- [21] S. Hahn, D. K. Park, J. Voccio, J. Bascunan and Y. Iwasa, No-Insulation (NI) HTS Inserts for > 1 GHz LTS/HTS NMR Magnets, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 22 (3), pp. 4302405-4302405, 2012.
- [22] J. -B. Song, X. Chaud, F. Debray, S. Krämer, P. Fazilleau and T. Lécresse, Metal-as-Insulation HTS Insert for Very-High-Field Magnet: A Test Report After Repair, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 32 (6), pp. 1-6, 2022.
- [23] Thibault Lécresse et al., Metal-as-insulation HTS coils, Superconductor Science and Technology, 35, 074004, 2022.
- [24] et al., Stability and Quench Behaviors of Conduction-Cooled 2G HTS Coil Cowound With SS Tape, in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26 (4), pp. 1-4, 2016.
- [25] Jun Lu et al., Contact resistance between two REBCO tapes: the effects of cyclic loading and surface coating, Superconductor Science and Technology, 31, 085006, 2018.
- [26] H. Felice & E Todesco, Quench protection analysis in accelerator magnets, a review of the tools, arXiv.org, 2014.
- [27] COMSOL, Finite Element Method (FEM), 2016, <https://www.comsol.com/multiphysics/finite-element-method>. Viitattu 19.6.2023.
- [28] B. Shen, X. Chen, H. Liu, Z. Ni, Y. Shi, L. Guo, et al., Quench Protection Modeling of an HTS Magnet for MRI System, IEEE transactions on applied superconductivity, 31 (8), 1–5, 2021.
- [29] K.R. Bhattarai, K. Kim, K. Kim, K. Radcliff, X. Hu, C. Im, et al, Understanding quench in no-insulation (NI) REBCO magnets through experiments and simulations, Superconductor science & technology, 33 (3), 35002–, 2020.

- [30] S. Noguchi, Electromagnetic, Thermal, and Mechanical Quench Simulation of NI REBCO Pancake Coils for High Magnetic Field Generation, IEEE transactions on applied superconductivity, 29 (5), 1–7, 2019.
- [31] M.A. Green, Quench Protection Solutions for Magnets Fabricated With Insulated HTS Tape Conductors, IEEE transactions on applied superconductivity, 28 (3), pp.1–5, 2018.
- [32] Green M.A., Quench back in thin superconducting solenoid magnets, Cryogenics, vol. 24 (1), pp. 3-10, 1984.
- [33] Marchevsky M, Quench Detection and Protection for High-Temperature Superconductor Accelerator Magnets, Instruments, 5 (3), 27–, 2021.