

Patrik Lammintaus

# **SUPRAJOHTAVA VIKAVIRRRANRAJOITIN**

Kandidaatintyö

Kandidaatintyö  
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta  
Tarkastaja: Risto Mikkonen  
Joulukuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Patrik Lammintausta: Suprajohtava vikavirranrajoitin  
Tampereen yliopisto  
Sähkötekniikan tutkinto-ohjelma  
Kandidaatintyö  
Joulukuu 2020

Tämän työn tarkoituksena oli selvittää suprajohtavien vikavirranrajoittimien kehityksen nykytilanne. Työssä tarkastellaan suprajohtavan vikavirranrajoittimen toimintaperiaatetta ja soveltuvuutta sähköverkon suojauslaitteena. Työssä perehdytään myös laitteen käytön etuihin ja haasteisiin. Työssä keskitytään suprajohtavaan vikavirranrajoittimeen etenkin ratkaisuna hajautetun tuotannon kasvun aiheuttamiin ongelmiin.

Työssä käytetty aineisto on kerätty pääosin Tampereen yliopiston kirjaston sähköisistä ja painetuista materiaaleista. Eriteltyjen vikavirranrajoitinhankkeiden aineisto on kerätty kussakin tapauksessa kyseessä olevien yritysten verkkosivuilta.

Työssä tutustutaan aluksi sähköverkossa ilmeneviin vikavirtoihin ja käsitellään suprajohtavuutta ilmiönä, jonka jälkeen perehdytään suprajohtavan vikavirranrajoittimen toimintaperiaatteeseen sekä sen etuihin. Suprajohtava vikavirranrajoitin normaalitilassa ei aiheuta jännitteen alenemaa verkossa eikä heikennä verkon kykyä reagoida nopeasti vaihtuvaan tehon kysyntään toisin kuin perinteisissä vianhallintaratkaisuisissa. Vikavirranrajoitintyypeistä eniten huomiota ovat saaneet resistiivinen suprajohtava vikavirranrajoitin sekä induktiivinen suprajohtava vikavirranrajoitin, joten työssä tutustutaan näihin tyypeihin. Suprajohtava vikavirranrajoitin on käytännön testeissä todettu toimivaksi sähköverkon suojauslaitteeksi ja joissakin maissa sitä jo käytetäänkin. Työssä tutustutaan kahteen tällaiseen hankkeeseen, joissa suprajohtava vikavirranrajoitin on otettu käyttöön tavallisesti toimivassa sähköverkossa. Hankkeisiin tutustuminen osoitti, että suprajohtavien vikavirranrajoittimien yleistymisen haasteena on edelleen muun muassa suprajohtomateriaalien korkea hinta, kryogeniikan suuret kustannukset ja kryogeniikan epäluotettavuus.

Työn loppupuolella tehdään suprajohteiden käyttöön vaadittuja kryogeenisiä tarkasteluja vikavirranrajoittimien näkökulmasta sekä pohditaan, miten toimittaisiin vikavirranrajoittimien jäähtymisen vikaantuessa. Työn lopuksi tehty lyhyt taloudellinen tarkastelu suprajohtavan vikavirranrajoittimen kuluista osoitti, että laitteen elinkaaren aikana sen hankintakulut ovat moninkertaisesti suurempi menoerä kuin laitteen käytöstä johtuvat kulut.

Avainsanat: suprajohteet, vikavirranrajoitin, vikavirta, kryogeniikka

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen yliopistossa sähkötekniikan tutkinto-ohjelmaa varten.  
Tarkastajana ja ohjaajana toimi Risto Mikkonen.

Patrik Lammintausta  
Tampereella, 17.12.2020

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. VIKAVIRRAT .....	2
2.1 Vikavirran laskeminen .....	3
2.2 Perinteiset suojalaitteet .....	7
3. SUPRAJOHTAVUUS .....	10
3.1 Suprajohtavuus ilmiönä .....	10
3.2 Kaupalliset suprajohteet .....	15
4. SUPRAJOHTAVAT VIKAVIRRRANRAJOITTIMET .....	17
4.1 Resistiivinen vikavirranrajoitin .....	18
4.2 Induktiivinen vikavirranrajoitin .....	19
5. HANKE-ESITTELY .....	21
6. VIKAVIRRRANRAJOITIN SÄHKÖVERKOSSA .....	23
6.1 Kryogeniikka .....	23
6.2 Vikatapaukset .....	24
6.3 Kustannukset .....	25
7. YHTEENVETO .....	27
LÄHTEET .....	28

# LYHENTEET JA MERKINNÄT

$E_v$	Lähteen vaihejännite
$H$	Magneettikentän voimakkuus
$H_c$	Kriittinen magneettikentän voimakkuus
$I$	Sähkövirta
$I_{lim}$	Rajoitettu oikosulkuvirta
$I_p$	Oikosulkuvirran huippuarvo
$I_s$	Oikosulkuvirran tehollisarvo
$I_v$	Vaihevirta
$j_c$	Kriittinen virrantiheys
$P_n$	Nimellisteho
$T$	Lämpötila
$T_b$	Kiehumispiste
$T_c$	Suprajohteen kriittinen lämpötila
$T_{ce}$	Kriittisen lämpötilan loppulämpötila
$T_{co}$	Kriittisen lämpötilan alkulämpötila
$T_m$	Sulamispiste
$X_v$	Muuntajan vaihereaktanssi

# 1. JOHDANTO

Viime vuosina suurimpia huolenaiheita suurjänniteverkoille ovat olleet kasvava sähköverkkojen kuormitus sekä korkeat sähkönjakelun vaatimukset. Sähkönkulutuksen kasvu on johtanut suurempien tuotanto-, siirto- ja jakelulaitteiden asentamiseen, minkä seurauksena sähköverkon oikosulkuvirrat ovat kasvaneet. Perinteisesti sähköverkon oikosulkuvirtoja on rajoitettu lisäämällä verkkoon keloja, jotka tuovat järjestelmään lisää induktiivista reaktanssia. Tällainen ratkaisu vaikuttaa kuitenkin negatiivisesti verkon turvallisuuteen ja joustavuuteen. Näistä syistä suurjänniteverkot tarvitsevat laitteen, joka voi rajoittaa oikosulkuvirtojen amplitudia ja kestoja heikentämättä verkon turvallisuutta tai joustavuutta, jotta kasvavat odotukset voidaan täyttää. [1, s. 1]

Tässä työssä tarkastellaan suprajohdavia vikavirranrajoittimia teoreettisesti ja etenkin käytännön näkökulmasta. Lisäksi tarkastellaan käytännössä kokeiltujen vikavirranrajoittimien taloudellisuutta ja haasteita. Työn tavoitteena on selvittää nykyhankkeiden tilanne ja niiden merkittävimmät haasteet ja potentiaaliset kehitysalueet.

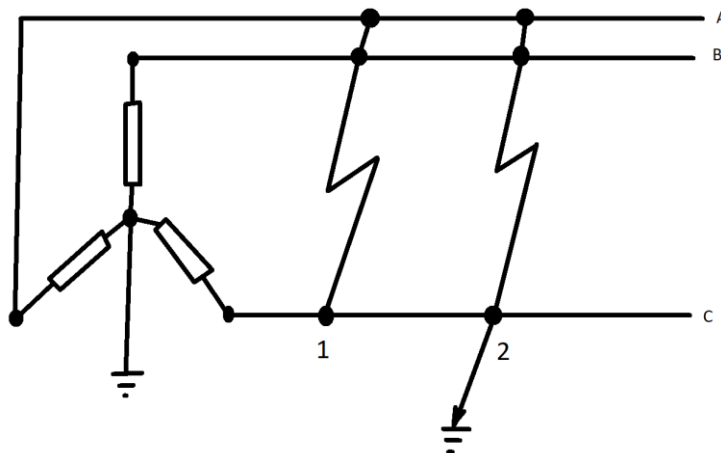
Tämän työn luvussa kaksi perehdytään ensin vian aikana sähköverkossa kulkeviin vikavirtoihin. Luvussa perehdytään myös, miten vikavirtoihin varaudutaan perinteisesti. Luvussa kolme esitellään suprajohdavuuden ilmiö. Korkean lämpötilan suprajohdeet käydään läpi tarkemmin, koska ne ovat työssä relevantteja. Luvussa neljä tarkastellaan suprajohdaviin vikavirranrajoittimien toimintaperiaatetta ja rakennetta. Luvussa viisi esitellään uusimpia hankkeita, jossa hyödynnetään suprajohdavia vikavirranrajoittimia. Luvussa kuusi perehdytään vikavirranrajoittimien suprajohdemateriaalin jäähdytykseen. Samassa luvussa tarkastellaan, miten itse vikavirranrajoittimessa tapahtuviin häiriöihin voidaan varautua. Lopuksi tarkastellaan teknologiaa taloudelliselta kannalta ja verrataan suprajohdavaa vikavirranrajoitinta muihin toimiviin ratkaisuihin.

## 2. VIKAVIRRRAT

Vika sähköverkossa tarkoittaa jännitteiden ja virtojen poikkeamaa nimellisarvoista tai -tuloista. Tavallisimmin vika sähköverkossa johtuu laitteistohäiriöstä, inhimillisestä erehdyksestä tai ympäristöllisistä tekijöistä. Laitteistohäiriöitä ovat muun muassa viat, jotka johtuvat sähköverkon laitteen toimintahäiriöstä, vanhentumisesta tai eristeiden pettämisestä. Inhimillisiä erehdyksiä ovat muun muassa tapaukset, joissa verkkoon on valittu asennettavaksi vääränlainen laite tai sähköverkon huollon yhteydessä ihminen aiheuttaa vikatilanteen. Ympäristöllisistä tekijöistä aiheutuvat viat johtuvat salamaniskuista, kovista sateista ja tuulista, suolan kerrostumisesta johtoihin sekä lumen ja jään kertymisestä johdoille. Viat voivat aiheuttaa laite- ja eristevaurioita, sähkön tuontikatkoja, tehohäviöitä, tulipaloja ja joskus ihmisen, eläimen tai linnun kuoleman.

Normaalitilassa sähköverkon laitteissa ja johdoissa kulkee normaalit jännitteet ja virrat, jolloin sähkönsiirto tapahtuu turvallisesti. Kun vika ilmenee, johdossa kulkee tavallista suurempia virtoja, jotka aiheuttavat laitevaurioita. Laitevaurioiden estämiseksi vikojen havaitseminen ja analysointi on olennaista, jotta voidaan valita sopivat kytkinlaitteet, sähkömekaaniset releet, katkaisijat ja muut suojalaitteet verkon suojaksi.

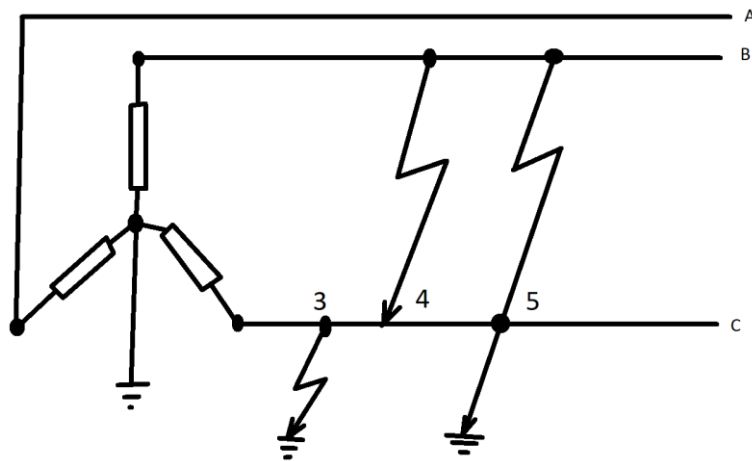
Sähköverkon viat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: symmetriset viat ja epäsymmetriset viat. Kun kaikki johdon kolme vaihetta ovat oikosulussa keskenään, puhutaan symmetrisestä viasta. Vika on symmetrinen myös, jos edellisen lisäksi vaiheet ovat myös kosketuksissa maahan. [2] Edellä mainittuja symmetrisiä vikoja on havainnollistettu kuvassa 1, jossa vaiheet merkitty kirjaimin A, B ja C [3, s. 8].



**Kuva 1.** Symmetriset viat: 1. kolmivaiheinen oikosulku, 2. kolmivaiheinen maaikosulku.

Vain noin 2–5 prosenttia sähköverkon vioista on symmetrisiä. Symmetrisiä vikoja tapahtuu harvoin, mutta ne ovat vakavampia vikoja kuin epäsymmetriset. Symmetriset viat aiheuttavat vakavia laitteistovaurioita.

Epäsymmetriset viat ovat vähemmän vakavia, mutta ne ovat symmetrisiä vikoja yleisempiä. Kyseessä on epäsymmetrinen vika, mikäli virta kulkee vaiheen ja maan välillä tai kahden vaiheen välillä tai kahden vaiheen sekä maan välillä. Yhden vaiheen ja maan välille syntyvä oikosulku eli maasulku on näistä yleisin. [2] Edellä mainittuja epäsymmetrisiä vikoja on havainnollistettu kuvassa 2 [3, s. 8].



**Kuva 2.** Epäsymmetriset viat: 3. yksivaiheinen oikosulku eli maasulku, 4. kaksivaiheinen oikosulku, 5. kaksivaiheinen maa-oikosulku.

Epäsymmetrisiä vikoja kutsutaan myös epätasapainoisiksi vioiksi, koska ne aiheuttavat verkkoon epätasapainoa. Tällä tarkoitetaan, että vaiheiden impedanssit ovat erisuuruisia vian aikana, jolloin vaiheissa kulkee virta epätasaisesti. Epäsymmetristen vikojen analysointi on huomattavasti vaikeampaa kuin symmetristen vikojen. [2]

## 2.1 Vikavirran laskeminen

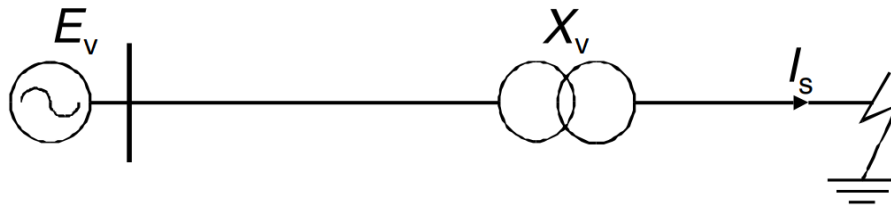
Vika sähköverkossa aiheuttaa johdoille vikavirtoja. Vikavirroilla tarkoitetaan sähköverkossa kulkevia virtoja, joiden suuruudet poikkeavat nimellisarvosta. On tärkeää, että vikavirtojen suuruuksia osataan arvioida ennalta, jotta sähköverkkoon voidaan suunnitella ja valita laitteita siten, että ne kestävät vikavirtoja.

Sähkönjakelussa virtalähteenä on generaattori. Muuntajia käytetään, jotta teho voidaan jakaa vaadituilla jännitteillä. Vika voi ilmetä heti generaattorin jälkeen tai muuntajan jälkeen. Vikavirran suuruus vaihtelee vian sijainnin mukaan. Heti generaattorin jälkeen ilmenevän vian tapauksessa vain lähteen impedanssi rajoittaa vikavirtaa, kun taas muuntajan jälkeen ilmenevän vian tapauksessa muuntajan impedanssi on tärkeä tekijä vikavirran suuruuden kannalta.



Suurimmat vikavirrat joudutaan kohtaamaan kolmivaiheisen oikosulun sattuessa. Sähköverkon laitteet voidaan suunnitella siten, että ne kestävät kolmivaiheisen oikosulun vikavirtoja. Tällöin voidaan olettaa, että laitteet kestävät myös muita vikatapauksia, jolloin vikavirrat ovat korkeintaan yhtä suuria kuin kolmivaiheisen oikosulun tapauksessa. Ominaisoikosulkuteho voidaan laskea yksinkertaisella menetelmällä, kun tehdään tietyt laskemista yksinkertaistavat oletukset, jotka esitetään tässä luvussa myöhemmin. Ominaisoikosulkutehon avulla voidaan edelleen helposti määrittellä likimääräisesti oikosulkuvirta.

Tarkastellaan kuvan 3 kaltaista järjestelmää, jossa  $E_v$  on lähdejännite vaihetta kohti,  $X_v$  on muuntajan reaktanssi vaihetta kohti ja  $I_s$  on oikosulkuvirran tehollisarvo. Oikosulku tapahtuu heti muuntajan jälkeen.



**Kuva 3.** Ominaisoikosulkutehon laskeminen.

Vian tapahtumahetkellä vikavirtaa rajoittaa muuntajan reaktanssi, kun kaapeleiden aiheuttamat impedanssit jätetään huomiotta vikakohtaan saakka. Ohmin lailla voidaan laskea oikosulkuvirran tehollisarvo.

$$I_s = \frac{E_v}{X_v}$$

Nyt

$$\frac{\text{Ominaisoikosulkuteho}}{P_n} = \frac{I_s}{I} = \frac{\left(\frac{E_v}{X_v}\right)}{I}$$

jossa  $P_n$  on muuntajan nimellisteho ja  $I$  on nimellinen täyden kuorman virta.

Lavennetaan yläpuoli sekä alapuoli termillä  $X_v / E_v * 100$

$$\frac{\left(\frac{E_v}{X_v}\right)}{I} \times \frac{X_v \times 100}{E_v \times 100} = \frac{100}{I \frac{X_v}{E_v} \times 100}$$

Mutta

$$\frac{IX_v}{E_v} \times 100 = X \% \text{ reaktanssi vaihetta kohti.}$$

Täten

$$\frac{\text{Ominaisoikosulkuteho}}{P_n} = \frac{I_s}{I} = \frac{100}{X \%}$$

Ominaisoikosulkutehon kaava saadaan nyt seuraavaan muotoon:

$$Ominaisoikosulkuteho = \frac{100 \cdot P_n}{X \%}$$

Yllä olevasta kaavasta voidaan nähdä, että reaktanssin  $X$  arvo määrittää ominaisoikosulkutehon, kun vika ilmenee muuntajan jälkeen. Vaikka kaavan mukaisesti ominaisoikosulkutehoa voisi pienentää kasvattamalla impedanssia, tavallista suuremman impedanssin valitseminen muuntajalle ei olisi taloudellinen ratkaisu. Muuntajan reaktanssin tyyppisiä prosenttiarvoja on koottu taulukkoon 1. [3, s. 15–16]

Taulukko 1. Muuntajan tyyppinen reaktanssin %-arvo eri teholuokissa ja jännitteissä.

<b>Muuntajan ensiöjännite</b>					
<b>Muuntajan reaktanssi % eräissä teholuokissa</b>					
<b><math>P_n</math> (MVA)</b>	<b>&lt; 11 kV</b>	<b>22 kV</b>	<b>33 kV</b>	<b>66 kV</b>	<b>132 kV</b>
<b>0,25</b>	3,5	4,0	4,5	5,0	6,5
<b>0,5</b>	4,0	4,5	5,0	5,5	6,5
<b>1,0</b>	5,0	5,5	5,5	6,0	7,0
<b>2,0</b>	5,5	6,0	6,0	6,5	7,5
<b>3,0</b>	6,5	6,5	6,5	7,0	8,0
<b>5,0</b>	7,5	7,5	7,5	8,0	8,5
<b>10,0</b>	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

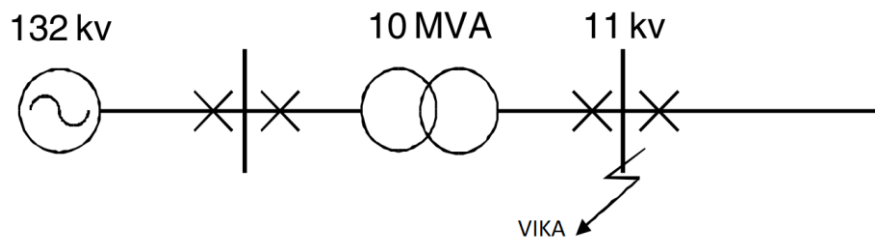
Taulukon 1 arvot ovat ainoastaan esimerkkejä tyyppillisistä arvoista, ja on aina mahdollista suunnitella muuntaja eri impedanssin arvoilla. Ensiö- ja toisiopuolen suojalaitteiden suunnittelun kannalta on kuitenkin hyvä käyttää taulukon 1 mukaisia standardiarvoja.

Järjestelmän impedanssi saadaan, kun jännite jaetaan virralla. Kolmivaiheisessa verkossa, jossa lähdejännite vaihejännitteenä on  $E_v$  ja vaihevirta on  $I_v$ ,

$$Impedanssi\ ohmeina = \frac{E_v}{\sqrt{3} \times I_v}$$

Edellä mainittu muodostaa perustan vikavirran suuruuden määrittämiselle, kun ilmenevä vikavirta johtuu vaiheiden välillä tapahtuvasta oikosulusta tai maasulusta. Tällaisissa tapauksissa vikavirrat määrittyvät järjestelmän sisäisistä impedansseista eikä ulkoisista kuormaimpedansseista.

Yksinkertaisessa verkossa tapahtuvan vian aiheuttama vikavirta voidaan nyt laskea. Tarkastellaan seuraavaa esimerkkiä. Kuvan 4 kytkinlaitteen katkaisukyvykykyys suunnitellaan laskemalla sen kohtaama suurin mahdollinen vikavirta.



**Kuva 4.** Vikavirtaesimerkki 1. Vika tapahtuu välittömästi muuntajan jälkeen.

Lasketaan piirin ominaisoikosulkuteho.

$$\text{Ominaisoikosulkuteho} = \frac{100 P}{X \%} = \frac{100 \times 10}{10} = 100 \text{ MVA}$$

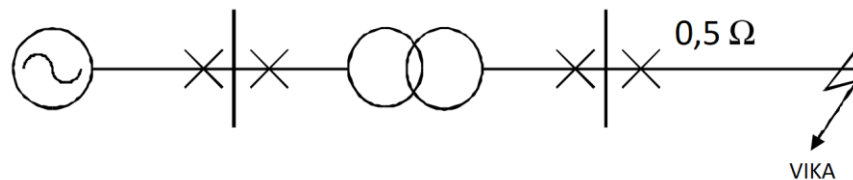
Tällöin

$$\text{Vikavirta} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 11} = 5,248 \text{ kA}$$

Siten

$$\text{Lähdeimpedanssi} = \frac{11}{\sqrt{3} \times 5,248} = 1,21 \Omega$$

Vikavirran suuruus voidaan laskea myös, kun vika tapahtuu muuntajan toisiopuolen johdolla tietyn matkan päässä.



**Kuva 5.** Vikavirtaesimerkki 2. Vika tapahtuu tietyn matkan päässä muuntajasta. Johdosta aiheutuva impedanssi tulee ottaa huomioon.

Mikäli muuntajan ja vikapaikan välinen johto aiheuttaa 0,5 Ω impedanssin,

$$\text{Vikavirta} = \frac{11}{\sqrt{3} \times (1,21 + 0,5)} = 3,714 \text{ kA}$$

Edellä mainituissa laskuissa on yksinkertaistamisen vuoksi tehty seuraavia oletuksia:

- Esimerkissä 1 oletetaan, että vika tapahtuu todella lähellä kytkinlaitetta. Kytkinlaitteen ja vian välissä olevan johdon impedanssi voidaan tällöin jättää huomiotta. [3, s. 15–16]

- Jätetään huomiotta kaikenlaiset kaariesistanssit eli resistanssit, jotka johtuvat eristävän materiaalin kyvystä vastustaa valokaaren syntymistä [4].
- Jätetään huomiotta muuntajan toision ja kytkinlaitteen välissä olevan johdon impedanssi, mikäli muuntaja sijaitsee sähköaseman läheisyydessä. Mikäli muuntaja sijaitsisi jossain muualla kuin sähköaseman läheisyydessä, kyseinen johdon impedanssi voi vähentää mahdollista vikavirtaa niin merkittävästi, että se pitää ottaa huomioon taloudellisesta näkökulmasta.
- Oletetaan, että johdon impedanssin ja muuntajan reaktanssin välinen vaihekulma on nolla, jolloin arvot voidaan yksinkertaisesti laskea yhteen ja kaapelinvalmistajan taulukon arvoja voidaan käyttää.
- Jätetään huomiotta monimutkainen matematiikka, kun lasketaan ja käytetään muuntajan sisäistä impedanssia.
- Jätetään huomiotta lähdeimpedanssin vaikutus (generaattorit).

Nämä oletukset voidaan sallia, kun lasketaan suojauslaitteiden kohtaamia vikavirtoja tai määritetään kytkinlaitteelle sopivat arvot. Ilman edellä mainittuja oletuksia, vikavirtojen laskeminen olisi erittäin monimutkaista, jolloin niiden laskeminen olisi mahdollista vain tietokoneella. Kun on laskettu vikavirtoja edellä mainituin oletuksin, tulosten virhemarginaali on yleensä jäänyt alle 5 prosenttiin. [3, s. 15–16]

## 2.2 Perinteiset suojalaitteet

Inhimillisistä erehdyksistä aiheutuvia vikoja on mahdollista minimoida. Sen sijaan ympäristöllisistä tekijöistä aiheutuvia vikoja on hankalampi vähentää. Näiden vikojen selvittäminen on tärkeä tehtävä, jotta niihin voidaan reagoida mahdollisimman hyvin. Sähköverkon suojaamiseen on perinteisesti käytetty ja käytetään edelleenkin muun muassa sulakkeita, katkaisijoita ja releitä.

Tunnetuin ja yleisin sähköpiiriä suojaava laite on sulake. Sulake sisältää ohuen johtimen, ja sen kummassakin päässä on liittospäät. Sulake sijoitetaan piiriin, jota halutaan suojata vikavirralla. Sulakkeen on tarkoitus kestää nimellisvirran suuruista virtaa palamatta. Mikäli piirin läpi eli myös sulakkeen ohuen johtimen läpi kulkee sulakkeen nimellisarvoa suurempi virta, ohuen johtimen on tarkoitus sulaa poikki. Sulake ei pala heti, kun läpi kulkeva virta ylittää sulakkeen nimellisarvon, mutta mitä suurempi nimellisvirran ylittävä vikavirta, sitä nopeammin sulake palaa. Sulakkeen nimellisvirran voi valita sen mukaan, kuinka suuri läpi kulkevan virran halutaan olevan, jotta johdin sulaa poikki. Palamisen

jälkeen sulakkeet vaativat johtimen vaihdon. Sulakkeet toimivat nopeasti ja voivat katkaista vikavirran kauan ennen kuin vikavirta saavuttaisi huippuarvonsa. [3, s. 35–38]

Tilanteissa, joissa sulakkeet ovat epäsopivia tai riittämättömiä, vikojen havaitsemiseen ja eristämiseen käytetään suojarleiden ja katkaisijoiden yhdistelmiä. Katkaisijan tehtävä sähköverkossa on sallia tai estää tehon virtaus lähteestä kuormaan. Normaalitylanteessa kuormavirrat menevät katkaisijoiden läpi. Vikatilanteessa katkaisijan tulee pystyä avaamaan piiri käskystä, joka annetaan valvontalaitteella kuten releellä. Releen tehtävä on myös huomata, milloin katkaisijan käyttö on tarpeellista. Katkaisijaan menevät johdot pystytään uudelleen sulkemaan piiriksi, kun vika on selvitetty. Katkaisijan odotetaan kestävän vikavirtoja niin, ettei se aukea vahingossa tai vaurioidu. [3, s. 70–71]

Suojareleiden ja katkaisijoiden käyttö vaatii itsenäisen virtalähteen, jonka toiminta ei häiriidy, mikäli valvottavassa verkossa tapahtuu vika. Suojareleiden ja katkaisijoiden onnistunut käyttö riippuu täysin näiden itsenäisten virtalähteiden luotettavuudesta. Tästä syystä on tarpeellista, että virtalähteille tehdään säännöllisiä tarkastuksia ja varmistetaan, että virtalähteet toimivat sähköverkon vikaantuessa. Mikäli releiden ja katkaisijoiden itsenäiset virtalähteet eivät toimi sähköverkon vikaantuessa, releet ja katkaisijat eivät saa aikaiseksi niiden vastuulla olevaa johdon katkaisua. Suojareleiden ja katkaisijoiden virtalähteinä käytetään tyypillisesti lyijyakkuja tai nikkeli-kadmium-akkuja. [3, s. 83]

Sähköverkko on tyypillisesti suunniteltu siten, että verkon laitteisto kestää ilmenevät vikavirrat. Esimerkiksi suojalaitteita mitoittaessa on otettu huomioon se, kuinka suuria vikavirtoja ne joutuvat kohtaamaan. Suojalaitteiden kohtaaman potentiaalisen vikavirran suuruus voi verkossa kuitenkin nousta, mikäli verkkoon asennetaan uusia tuotantolähteitä tai laajennetaan nykyistä tuotantoa alkuperäisen mitoituksen jälkeen. Hajautetun tuotannon määrän kasvu on nykypäivänä merkittävä syy vikavirtojen kasvamiselle. Perinteinen, yli 100 vuotta vanha vikavirtojen rajoituskeino on käyttää virtaa rajoittavia reaktanssikäämejä eli virtaa rajoittavia reaktoreja toisin sanoen sarjareaktoreja. Niiden tehtävä on nostaa verkon induktiivista reaktanssia. Tämä verkon impedanssin nostaminen saa aikaan sen, että oikosulkuilanteessa vikavirran arvo nousee huippuunsa hitaammin, jolloin katkaisija ehtii avaamaan piirin vaurioitumatta. Virtaa rajoittavia reaktanssikäämejä ei kannata kuitenkaan sijoittaa verkkoon kevein perustein, koska verkon normaali-käytössä nämä käämit aiheuttavat jännitteen alenemaa. Käämien sijoittaminen verkkoon rajoittaa myös verkon kykyä reagoida nopeasti vaihtuvaan tehon kysyntään. Erityisesti suurien laitteiden verkkoon kytkeminen ja verkosta irrottaminen aiheuttaa tapahtumahetkellä verkkoon epävakautta. [5]

Verkon suojalaitteiston ensisijainen tehtävä on havaita viat ja korjata ne mahdollisimman nopeasti. Toinen tärkeä tehtävä vikatilanteessa on selvittää mahdollisimman vähällä laitteiden irrotuksella. Releiden ja katkaisijoiden kykyä saavuttaa jälkimmäinen vaatimus kutsutaan selektiivisyydeksi. [3, s. 181] Selektiivisyyden tarkoituksena siis on, että vian ilmetessä mahdollisimman pieni osa sähköjärjestelmää joudutaan irrottamaan sekä välttämään sähköjärjestelmää vahingoittavilta tapahtumilta. Vaikka useat laitteet huomaisivatkin vikatilanteen, tarkoituksena on, että lähimpänä vikapaikkaa sijaitseva suojalaite havaitsee ja myös selvittää vian. Mikäli seuraavaksi lähinnä oleva suojalaite on reagoinut vikatilanteeseen katkaisten piirin, se voidaan jälleen kytkeä, kun vikapaikka on eristetty. [6] Reagointinopeus vikoihin ja selektiivisyys ovat tavoiteltuja suojauksen ominaisuuksia, mutta niiden kehittäminen tuo kuitenkin aina lisää kustannuksia. Näin ollen suojauksen reagointinopeus vikoihin sekä selektiivisyys eivät ole puhtaasti tekninen kysymys vaan myös taloudellinen. [3, s. 181]

### 3. SUPRAJOHTAVUUS

Huhtikuussa 1911 hollantilainen Heike Kamerlingh Onnes sai selville, että elohopean resistiivisyys häviää kokonaan lämpötilan ollessa alle 4,2 K. Onnes nimesi ilmiön suprajohtavuudeksi. Hän sai tämän ilmiön aikaan tutkiessaan nesteheliumilla jäähdytetyn elohopean sähkönjohtavuutta. [7] Onnesin alkuperäisenä tarkoituksena oli selvittää, kuinka alhainen elohopean resistanssi voidaan saavuttaa, mikäli ainetta puhdistetaan epäpuhtauksista ja sen lämpötilaa lasketaan mahdollisimman paljon. [8, s. 1] Löydöksen jälkeen on löydetty monia muitakin suprajohtavia alkuaineita. Myöhemmin eli tammikuussa 1914 saatiin selville, että magneettikentällä on tuhoisa vaikutus suprajohtavuuteen. Lyijylle kriittinen magneettivuon tiheys lämpötilassa 4,25 K oli vain 0,06 Teslaa. [9] Vuonna 1933 fyysikot Meissner ja Ochsenfeld esittivät, kuinka suprajohtava materiaali hylkii ulkoista magneettikenttää. Tämä ilmiö nimettiin Meissnerin ilmiöksi. [10].

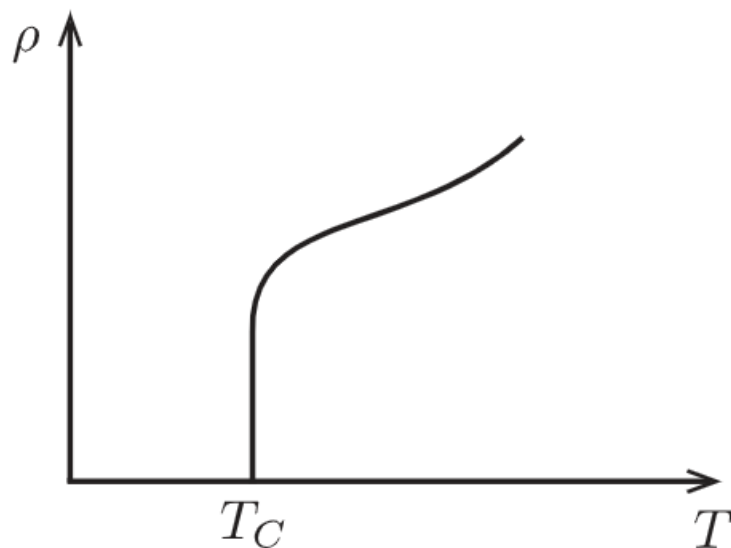
Vaikka suprajohtavuus löydettiin jo vuonna 1911, kului melkein 50 vuotta ennen seuraavia alan merkittäviä edistysaskelia. Vuonna 1957 julkaistiin mikroskooppinen teoria nimeltään BCS-teoria. Lyhenne BCS tulee teorian kehittäjien nimien Bardeen, Cooper ja Schrieffer mukaan. BCS-teoria selittää, kuinka matalan kriittisen lämpötilan suprajohteet toimivat mikrotasolla. [11] Vuonna 1986 Bednorz ja Müller löysivät korkean kriittisen lämpötilan ( $T_c \geq 30$  K) suprajohteet [12]. Korkean lämpötilan suprajohteiden toimintaa selittävää teoriaa ei tällä hetkellä ole. Suprajohteet ovat vielä nykypäivänäkin tärkeä tutkimuskohde. MacManus-Driscollin ja Wimbushin mukaan on kannattavaa tutkia ainakin seuraavia suprajohtavuuden aihealueita: suprajohteen kriittinen virrantiheys ja sen kasvattaminen, suprajohteen kriittinen lämpötila ja sen kasvattaminen sekä suprajohteen kustannukset kaupallisesta näkökulmasta ja näiden kustannusten vähentäminen. [13]

#### 3.1 Suprajohtavuus ilmiönä

Melkein jokaisella aineella on resistiivisyyttä eli aine vastustaa virran kulkua. Eristeillä resistiivisyys on korkea, jolloin elektronit kulkevat aineessa tuottaen paljon lämpöä, mikä johtuu elektronien törmäilystä. Aineilla, jotka luokitellaan hyväksi sähkönjohteiksi esimerkiksi metalleilla, on tyypillisesti alhaisempi resistiivisyyden arvo kuin eristeillä. Esimerkiksi kuparin resistiivisyys on huoneen lämpötilassa  $1,75 \cdot 10^{-6} \Omega\text{cm}$ , kun taas eristävän aineen esimerkiksi kumin resistiivisyys on huoneen lämpötilassa  $4,0 \cdot 10^{13} \Omega\text{cm}$ . Virta ei kuitenkaan liiku johteessakaan häviöittä, vaan elektronit kokevat kitkaa ja aiheutuu lämpöä, mutta vähemmän kuin eristeen tapauksessa. Eräät aineet muuttuvat suprajohtaviksi tietyissä olosuhteissa. Suprajohtavassa tilassa olevan aineen resistiivisyys on 0.

Tällöin elektronit voivat liikkua aineen läpi kitkatta. [8, s. 3–4] Renkaanmuotoisessa suprajohteessa sähkövirta voi täten virrata loputtomasti vaimentumatta. BCS-teorian mukaan suprajohteeseen syntyy elektronipareja, niin kutsuttuja Cooperin pareja, jotka vetävät toisiaan heikosti puoleensa. Pariliitokset syntyvät elektronien sekä kidehilan kvantisoitujen värähtelyjen eli fononien välisen vuorovaikutuksen tuloksena. Pariliitokset edelleen saavat aikaan materiaalin hyvin järjestäytyneen tilan, jossa elektronit pääsevät liikkumaan ilman energian häviämistä. Tämä ilmiö saa aikaan suprajohteille ominaisen resistanssin häviämisen matalissa lämpötiloissa. [14]

Jotta suprajohtava tila voidaan saavuttaa aineelle, sen lämpötilaa täytyy laskea. Kun ainetta jäähdytetään, aineen resistiivisyys laskee vähitellen. Kun jäähdytystä jatketaan ja aine saavuttaa tietyn lämpötilan, aineen resistiivisyys laskee aivan yhtäkkiä arvoon nolla. Lämpötilaa, jossa aineen resistiivisyys laskee nopeasti nolliin, kutsutaan suprajohteen kriittiseksi lämpötilaksi  $T_c$ . [8, s. 5–6] Suprajohteen resistiivisyyden käyttäytymistä kriittisen lämpötilan  $T_c$  läheisyydessä on havainnollistettu kuvassa 6 [15, s. 285].



**Kuva 6.** Suprajohteen kriittisessä lämpötilassa resistiivisyys putoaa arvoon 0.

Jokaisella suprajohtavalla aineella on oma kriittinen lämpötilansa  $T_c$ . Puhtailla alkuaineilla kriittinen lämpötila on aina enintään 10 K. Taulukkoon 2 on koottu alkuaineita ja lämpötilan arvoja, joissa aineet muuttuvat suprajohtaviksi. Taulukkoon on myös merkitty vuosiluku, jolloin aineen suprajohtavuus on havaittu ensimmäisen kerran. [8, s. 7]



Taulukko 2. Eräiden alkuaineiden kriittinen lämpötila ja suprajohtavuuskyvyn havainto-  
ajankohta. [8, s. 7]

<b>Alkuaine</b>	<b>Kriittinen lämpötila <math>T_c</math> (K)</b>	<b>Aineen suprajohtavuus- kyky havaittu</b>
<b>Elohopea</b>	4,15	1911
<b>Tina</b>	3,69	1913
<b>Lyijy</b>	7,26	1913
<b>Tantaali</b>	4,38	1928
<b>Niobium</b>	9,2	1930
<b>Alumiini</b>	1,19	1933
<b>Vanadiini</b>	4,3	1934

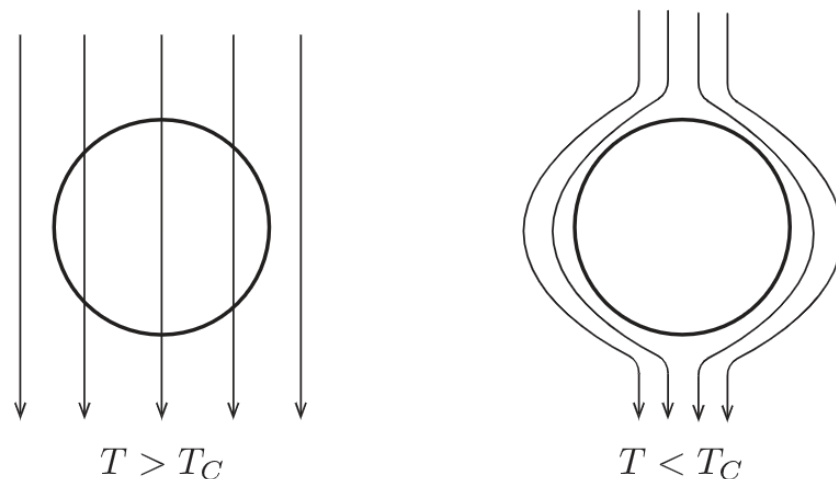
Suprajohtavuuden tutkimus edistyi melko hitaasti alussa ilmiön löytämisen jälkeen. Suprajohtavuuden tutkimisessa täytyy jäähdyttää suprajohtomateriaaleja äärimmäisin alhaisiin lämpötiloihin, mikä on vaativa tehtävä. Jäähdytys tapahtuu käytännössä asettamalla suprajohtomateriaali kryostaattiin eli hyvin eristettyyn astiaan, jossa edelleen materiaali jäähdytetään jäähdytysnesteellä. Jäähdytysnesteinä kryostaatissa käytetään aineita, jotka ovat huoneenlämpötilassa kaasuja, mutta jäähtyessään tarpeeksi muuttuvat nesteeksi. Mainitut aineet voivat edelleen jäähdytettäessä vielä jähmettyä, mutta tämä tilanne ei ole hyödyllinen. Taulukkoon 3 on kerätty viiden aineen kiehumispiste sekä sulamispiste. Aineet ovat tunnettuja kryogeeneja eli nestekaasuja, joiden höyrystymislämpötila on hyvin alhainen. [8, s. 6–9]

Taulukko 3. Eräiden aineiden kiehumis- ja sulamispisteet normaalissa ilmanpaineessa.  
[8, s. 8]

<b>Aine</b>	<b>Kiehumispiste <math>T_b</math> (K)</b>	<b>Sulamispiste <math>T_m</math> (K)</b>
<b>Helium</b>	4,2	-
<b>Vety</b>	20,3	14,0
<b>Neon</b>	27,2	24,5
<b>Typpi</b>	77,4	63,3
<b>Happi</b>	90,2	54,7

Jotta taulukon 3 aineita voi käyttää jäähdytyksessä, on tärkeää, että jäähdytysaine on nesteolomuodossa siinä lämpötilassa, johon suprajohde halutaan jäähdyttää. Vuoteen 1986 asti korkein löydetty suprajohtavuuden kriittinen lämpötila oli hädän tuskin 20 K. Suprajohtavuuden tutkimuksia ei siis voitu suorittaa ilman nestemäistä heliumia. Nykyään heliumin lisäksi jäähdytysaineena käytetään hyvin yleisesti myös typpeä. Molemmat aineet helium ja typpi ovat vaarattomia käyttää.

Meissnerin ilmiö havaittiin ensimmäisen kerran vuonna 1933. Tätä ennen suprajohtavuuden ilmiötä oli pidetty ainoastaan aineen resistiivisyyden katoamisena. Meissnerin ilmiöllä tarkoitetaan ilmiötä, jossa suprajohtava aine ei anna ulkoisen magneettikentän lävistää suprajohtetta. Suprajohteen sisällä magneettikentän voimakkuuden arvo on nolla. Suprajohtavuus ja magnetismi vastustavat toistensa vaikutuksia. [8, s. 6–9] Suprajohteen ja ulkoisen magneettikentän vuorovaikutusta lämpötilan mukaan on havainnollistettu kuvassa 7 [15, s. 285].

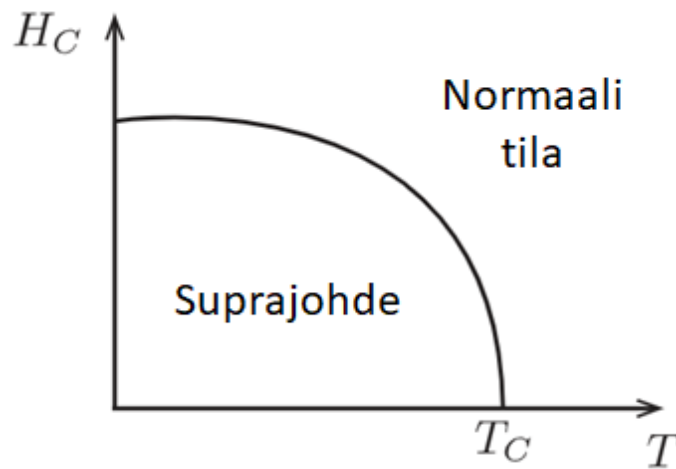


**Kuva 7.** Meissnerin ilmiö. Normaalissa tilassa ( $T > T_C$ ) magneettikenttä lävistää materiaalin. Suprajohtavassa tilassa ( $T < T_C$ ) materiaali sulkee magneettikentän ulkopuolelleen.

Suprajohtava materiaali on täydellinen diamagneetti. Diamagneettiselle materiaalille on ominaista ulkoisen magneettikentän sulkeminen ulkopuolelleen. [15, s. 285] Kun etsitään uusia suprajohteita, täytyy testata aineen resistiivisyyden katoamisen lisäksi myös se, että materiaali sulkee ulkoisen magneettikentän ulkopuolelleen. Aikoinaan esimerkiksi oikosulkutilanne ymmärrettiin usein väärin suprajohtavuudeksi, kun resistanssi yhtäkkiä putosi. Suprajohtavassa aineessa Meissnerin ilmiön osoittaminen tuo tällöin varmistuksen siitä, että kyse on suprajohtavuudesta. [8, s. 9]

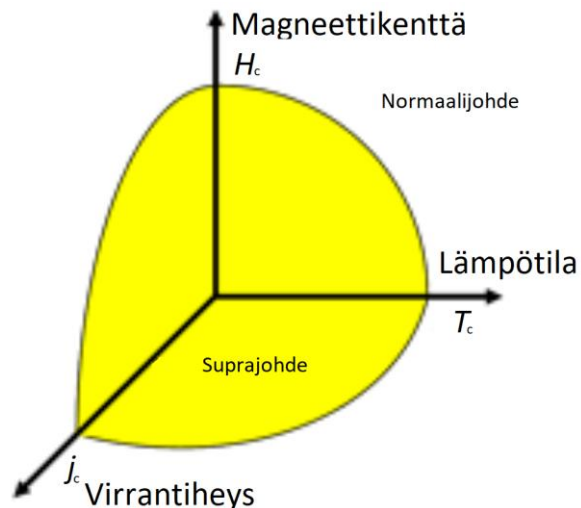
Mikäli suprajohteeseen vaikuttavan magneettikentän voimakkuuden  $H$  suuruus on riittävän suuri ( $H > H_c$ ), se tuhoaa aineen suprajohtavuuden ja palauttaa materiaalin takaisin

normaaliin tilaan. Ulkoisen magneettikentän voimakkuuden vaikutusta suprajohteeseen lämpötilan mukaan on havainnollistettu kuvassa 8. [15, s. 285]



**Kuva 8.** Suprajohtavuuden tuhoava magneettikentän voimakkuus vaihtelee lämpötilan funktiona.

Suprajohtavuuden edellytyksenä on vielä yksi kriittinen parametri. Suprajohteen läpi kulkeva virta ei saa olla liian suuri tai suprajohtavuustila katoaa. Suprajohteella on siis myös kriittinen virrantiheys, jota ei saa ylittää tai aineen suprajohtavuustila katoaa. Kriittistä virrantiheyttä merkitään suurella  $j_c$ . [8, s. 29] Suprajohteen kriittisen lämpötilan, kriittisen ulkoisen magneettikentän voimakkuuden ja kriittisen virrantiheyden riippuvuuksia havainnollistettu kuvassa 9 [16].



**Kuva 9.** Suprajohtava alue

Suprajohteet voidaan jakaa kahteen kategoriaan: I-tyyppin suprajohteet ja II-tyyppin suprajohteet. I-tyyppin suprajohteet toteuttavat edellä kuvassa 7 havainnollistetun Meissnerin ilmiön täydellisesti. Suprajohtavassa tilassa voidaan sanoa materiaalin olevan myös Meissner-tilassa. I-tyyppin suprajohde vastustaa ulkoisen magneettikentän pääsyä sisälle

materiaaliin, kunnes kriittinen magneettikentän voimakkuus  $H_c$  ylittyy ja suprajohtavuus katoaa. II-tyyppin suprajohde on myös täydellinen diamagneetti, kun siihen vaikuttava magneettikentän voimakkuus on riittävän pieni. Kun magneettikentän voimakkuus kasvaa II-tyyppin suprajohde alkaa vähitellen päästää kenttää sisälleen, kuitenkin säilyttäen suprajohtavan tilansa. Tämä täydellisen diamagneettisen suprajohtavan tilan ja normaali-johtavan tilan välimuoto ei ole niin kutsuttu Meissner-tila. II-tyyppin suprajohteet eroavat I-tyyppin suprajohteista myös kriittisten parametrien osalta. II-tyyppin suprajohteella on tyypillisesti paljon suuremmat  $T_c$ ,  $H_c$  ja  $j_c$ :n arvot. [16] II-tyyppin suprajohteet ovat pääosin kemiallisia yhdisteitä ja seoksia. Niobium on ainoa alkuaine, joka luokitellaan II-tyyppin suprajohteeksi. Kaikki loput suprajohtavat alkuaineet luokitellaan I-tyyppin suprajohteiksi. [17, s. 48]

### 3.2 Kaupalliset suprajohteet

NbTi eli niobiumtitaani suprajohde, jonka kriittinen lämpötila on suhteellisen matala, mutta erityisesti sen suuri kriittinen virrantiheys on kaupallisessa mielessä kiinnostava ominaisuus. Nb<sub>3</sub>Sn eli niobiumtina on ominaisuuksiltaan hyvin samankaltainen materiaali kuin niobiumtitaani. Niobiumtinalla on hieman korkeampi kriittinen lämpötila ja kriittinen magneettikentän voimakkuus. Yhdisteiden käyttö vaatii jäähdytysaineeksi heliumin. [17, s. 29] Molempia yhdisteitä käytetään johtimina eri sovelluksissa esimerkiksi magneettisissa kuvantajissa, piikiteiden kasvatuksessa ja erilaisissa magneeteissa [17, s. 6].

MgB<sub>2</sub> eli magnesiumdiboridi on suprajohde, joka tunnetaan erityisesti siitä, että sen kriittinen lämpötila on erityisen korkea yhdisteelle, joka koostuu vain kahdesta eri alkuaineesta. Magnesiumdiboridilla on lisäksi korkea kriittinen virrantiheys ja aineen valmistus on halpaa, joka houkuttelee kaupallisesta näkökulmasta. Magnesiumboridi on ”vanha” materiaali, joka tunnettiin jo 1950-luvulla, mutta sen suprajohtavuuskyky havaittiin vasta vuonna 2001 ensimmäisen kerran. [18]

YBCO eli yttriumbariumkuparioksidin kriittinen virrantiheys on käytetyimpien kaupallisten suprajohteiden joukosta suurin. Yttriumbariumkuparioksidin kriittinen lämpötila on 92 K, joten on mahdollista käyttää nestetyypeä jäähdytyksessä. Tunnetuimmat YBCO-yhdisteet tunnetaan nimellä Y123. Yhdisteiden koostumus on tarkemmin ilmaistuna YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>. Yttriumbariumkuparioksidi on täysin myrkytön yhdiste ja helppo valmistaa. [17, s. 29]

Bi-2212 ja Bi-2223 eli vismuttistrontiumkalsiumkuparioksidi ovat vismuttipohjaisia suprajohteita, joilla molemmilla on merkittävän suuri kriittinen lämpötila. Näitä yhdisteitä käytetään

tetään erityisesti suprajohtavissa muuntajissa ja magneeteissa. Materiaalista valmistetaan erityisesti nauhojen ja johtimien muotoisia komponentteja. [19, s. 598] Taulukkoon 2 on kerätty edellä mainitut suprajohteet ja niiden kriittiset parametrit [17, s. 29].

Taulukko 4. Käytetyimpien kaupallisten suprajohteiden kriittiset parametrit. [17, s. 29]

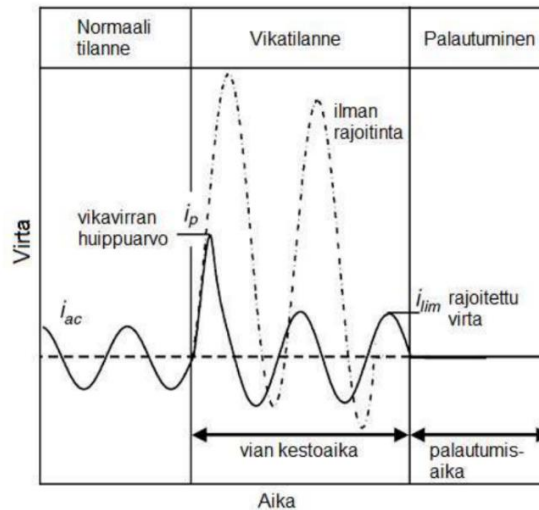
<b>Materiaali</b>	<b><math>T_c</math> (K)</b>	<b><math>H^*</math> (T) (<math>T = 4</math> K)</b>	<b><math>j_c</math> (A/cm<sup>2</sup>)</b>
<b>NbTi</b>	9	12	$3 \times 10^5$ (4 K ja 5 T)
<b>Nb<sub>3</sub>Sn</b>	18	27	$1-2 \times 10^5$ (4 K ja 10 T)
<b>MgB<sub>2</sub></b>	39	15	$\sim 10^6$
<b>YBCO</b>	92	>100	$\sim 10^7$
<b>Bi-2212</b>	95	>100	$\sim 10^5$
<b>Bi-2223</b>	108	>100	$\sim 10^6$

Uusien kaupalliseen tarkoitukseen sopivien suprajohteiden löytäminen avaa mahdollisuuksia uusille suprajohtesovelluksille. Suprajohteiden tutkimuksessa on tavoitteena löytää uusia yhdisteitä, joilla on suuremmat kriittisten parametrien arvot, kuin tähän asti löydetyillä suprajohteilla. Tähän päivään mennessä korkein suprajohteen kriittinen lämpötila on saavutettu metallisella lantaanidekahydridi-yhdisteellä. George Washingtonin yliopistossa vuonna 2018 tehdyssä tutkimuksessa todettiin yhdisteen LaH<sub>10</sub> kriittisen lämpötilan  $T_c$  olevan noin 250 K, kun yhdisteeseen vaikuttava paine oli noin 170 GPa. Yhdisteen käytössä on suuria haasteita, koska lantaanidekahydridin korkea kriittinen lämpötila saavutetaan vain korkeassa paineessa ja tämän lisäksi lantaanidekahydridi yhdisteenä on stabiili vain suuressa paineessa (>150 GPa) eli yli miljoona kertaa ilmakehää suuremmassa paineessa. [20][21]

## 4. SUPRAJOHTAVAT VIKAVIRRRANRAJOITTIMET

Suprajohtava vikavirranrajoitin on ehkäpä tärkein sähköenergiatekniikan sovellus, jossa hyödynnetään suprajohteita. Sovelluksella on lupaava lähitulevaisuuden kaupallinen potentiaali yksivaiheisten ja kolmivaiheisten sähköverkkojen kehityksessä. [17, s. 27] Suprajohtava vikavirranrajoitin on laite, jossa hyödynnetään suprajohteen ominaisuutta vaihtaa nopeasti resistiivisyyttä suprajohtavasta tilasta normaalijohtavaan tilaan, kun kriittinen lämpötila, virrantiheys tai magneettikentän voimakkuus ylitetään. Vikatilanteessa suprajohtavavirta menetetään nopeasti. Kun vika on selvitetty, materiaali palautetaan hitaasti suprajohtavaan tilaan seuraavaa vikatilannetta odottamaan. [22] Suprajohtavien vikavirranrajoittimien tarve on hyvin suuri, koska ne mahdollistaisivat sähköverkon kapasiteetin helpon kasvattamisen ja nykyisten verkon katkaisijoiden vaatimusten täyttö yksinkertaistuisi. Verkon kapasiteetin kasvattamisella tarkoitetaan tuotannon lisäämistä verkkoon. Erityyppisiä suprajohtavia vikavirranrajoittimia on monenlaisia, mutta jokaisen vikavirranrajoittimen päätehtävä on havaita verkossa ilmenevät oikosulut ja nostaa laitteen impedanssia oikosulkutapauksessa. [17, s. 27] Tässä työssä keskitytään resistiiviseen ja induktiiviseen vikavirranrajoittimeen, koska ne ovat tunnetuimpia.

Suprajohtavat vikavirranrajoittimet ovat sopivia esimerkiksi generaattorien ja jakelujärjestelmien suojaamiseen. Ideaalisesti vikavirranrajoittimen kustannukset ovat pienet ja käyttöikä pitkä. Ideaalisesti vikavirranrajoittimen pitäisi pystyä rajoittamaan jo vikavirran ensimmäisen huippuarvon suuruutta. Vikavirranrajoittimen toimiessa normaalitilassa ilman vikatilannetta, impedanssin arvo olisi ideaalitapauksessa nolla ja täten jännitteena lenema laitteen yli olisi myös nolla. Vikatilanteessa vikavirranrajoittimen impedanssin tulisi nousta haluttuun arvoon, jotta se rajoittaisi kulkevan vikavirran suuruuden turvalliseen arvoon. Suprajohtavaa vikavirranrajoitinta voidaan käyttää siis vain tarkoituksena rajoittaa vikavirran suuruutta. Laite ei sovellu katkaisijan korvikkeeksi. [20] Vikavirranrajoittimen vaikutus vikavirtaan on havainnollistettu kuvassa 10. Suurella  $i_p$  on merkitty vikavirran huippuarvo, kun vikavirranrajoitin on kytketty piiriin, jossa tapahtuu vikatilanne. [23, s. 33]

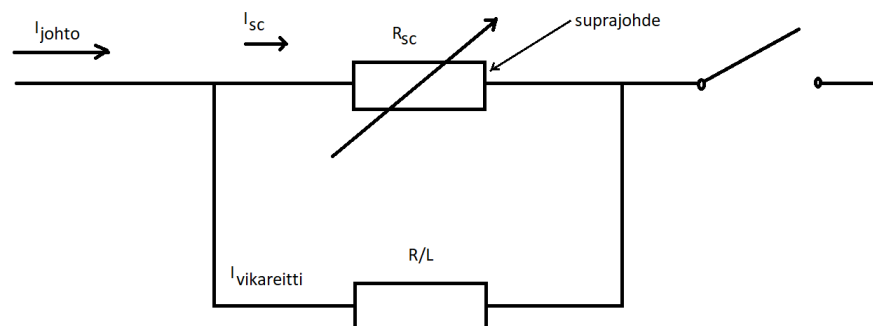


**Kuva 10.** Suprajohtavan vikavirranrajoittimen vaikutus vikavirtaan.

Impedanssi vikavirranrajoittimessa ei kuitenkaan saisi nousta liian nopeasti korkeaan arvoon. Liian nopea impedanssin kasvu vikavirranrajoittimessa saattaisi aiheuttaa turvattoman suuren jännitteen arvon piirissä. Vikavirranrajoittimen tulisi nopeasti ja luotettavasti erottaa hetkittäiset ylivirrat oikeista vikatilanteista. Suprajohtomateriaalin normaalitilasta uudelleen suprajohtotilaan siirtymiseen tarvittava aika tulee minimoida. [22]

#### 4.1 Resistiivinen vikavirranrajoitin

Resistiivinen vikavirranrajoitin kytketään sarjaan suojeltavan johdon kanssa, kuten kuvasta 11 näkyy. Suprajohtavat materiaalit on sijoitettu kryostaattiin. Normaali toimintatilanteessa resistiivisen vikavirranrajoittimen impedanssi on hyvin lähellä nollaa. Tällöin suprajohteen lämpötila on alle kriittisen pisteen  $T_c$  ja läpi kulkevan virran virrantiheys on alle kriittisen pisteen  $j_c$ . Vikatilanteessa suuren virrantiheyden vuoksi suprajohtomateriaalin lämpötila nousee kriittisen pisteen  $T_c$  yli. Tällöin suprajohtomateriaali siirtyy suprajohtavasta tilasta normaalijohtavaan tilaan ja vikatilanteen aiheuttama ylivirta saadaan rajoitettua riittävän alhaiseksi.

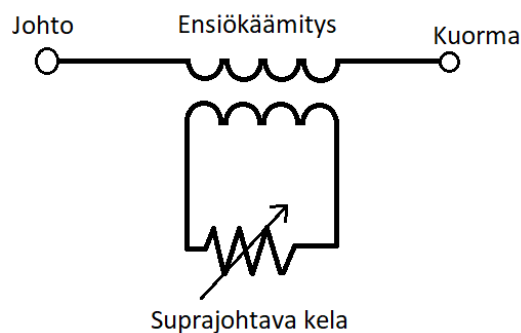


**Kuva 10.** Resistiivinen vikavirranrajoitin.

Suprajohdekomponenttia voidaan suojata termsiltä vaurioilta kytkemällä sen rinnalle joko resistiivinen tai induktiivinen komponentti, jonka tarkoituksena on luoda virralle reitti eteenpäin vikatilanteessa. Tämän komponentin impedanssi on normaalitilanteessa niin suuri, että virta kulkee käytännössä vain suprajohteen läpi. Vikatilanteessa rinnan kytketyn komponentin impedanssi on kuitenkin suhteellisen pieni verrattuna suprajohdemateriaalin normaalitilan impedanssiin, jolloin virta kulkee mieluummin rinnan kytketyn komponentin kautta ja suojelee suprajohdekomponenttia liialliselta lämpenemiseltä. Tämän ansiosta myös suprajohteen palautuminen takaisin suprajohdetilaan onnistuu nopeammin. Resisttiivinen vikavirranrajoitin on hyvin pienikokoinen verrattuna muihin suprajohdettaviin vikavirranrajoittimiin. Resisttiivisellä vikavirranrajoittimella on kuitenkin korkeat kokonaisenergiapäviöt ja suprajohdekomponentin palautuminen vian jälkeen suprajohdetilaan saattaa kestää muutamia minutteja. [22]

## 4.2 Induktiivinen vikavirranrajoitin

Induktiivinen vikavirranrajoitin on rautasydänmuuntaja, jonka ensiöpuolen kela on ei-suprajohdavaa ainetta ja toisiopuolen kela on tehty suljetusta suprajohdekelasta. Ensiöpuolen kela on kytketty sarjaan verkon kanssa kuvan 11 mukaan. Toisiopuolen suprajohdavat aineet on sijoitettu kryostaattiin. [22] Induktiivisen vikavirranrajoittimen toimintaperiaate pohjautuu suprajohdavan materiaalin kykyyn vastustaa läpi kulkevan magneettikentän muutoksia. Ensiöpuolen käämi indusoi virran toisiopuolen suprajohteeseen. Mikäli toisiopuolelle indusoidun virran virrantiheys on pienempi kuin suprajohteen kriittinen virrantiheys  $j_c$ , magneettikenttä ei tunkeudu rautasydämeen. Kun verkossa ei ole vikaa, toisiokäämin resistanssi on nolla ja induktanssi pieni. Kun verkossa ilmenee vika, syntynyt vikavirta saa aikaan suprajohteen siirtymisen normaalijohtavaan tilaan ja magneettikenttä tunkeutuu rautasydämeen. Tällöin vikavirranrajoittimen kokonaisimpedanssi kasvaa. Toisiopuolen suprajohteen siirtyminen ei-suprajohdavaan tilaan näkyy siis ensiöpuolella ja impedanssin nousu rajoittaa vikavirtaa. [23, s. 34]



**Kuva 11.** Induktiivinen vikavirranrajoitin.



Induktiivisen vikavirranrajoittimen merkittävimpiä varjopuolia ovat laitteen suuri massa, joka johtuu pääosin sen rautaytimeistä, sekä laitteen aiheuttama jännitteenalenema normaalitilassa, joka johtuu hajareaktansseista. Tämä hajareaktanssi esiintyy laitteen kahden kelan välissä. [22] Laitteen ensiökäämityksessä käytetään tavallisesti materiaalina kuparia ja toisiokäämityksessä suprajohtavaa yhdistettä Bi-2212 tai Bi-2223. [24]

## 5. HANKE-ESITTELY

Monet yritykset tekevät tutkimusprojekteja suprajohtaviin vikavirranrajoittimiin ja niiden kehittämiseen liittyen. Näissä projekteissa suprajohtava vikavirranrajoitin tyypillisesti sijoitetaan käytettävään piiriin tositarkoituksella. Tässä luvussa esitellään kaksi lähimenneisyyden vikavirranrajoitinprojektia.

Saksassa Stadtwerke-sähkönjakeluyhtiön ja Siemensin yhteistyönä, Stadtwerken sähköverkkoon on asennettu resistiivinen suprajohtava vikavirranrajoitin. [25][26] Laite asennettiin vuoden 2015 lopussa ja käyttöön otettiin heti vuonna 2016 [27]. Suprajohde jäädytetään kryostaatissa -196 Celsius asteeseen suprajohtavuustilan saavuttamiseksi. Stadtwerken verkossa jokaiselle vaiheelle on oma vikavirranrajoitin kryostaatteineen kuten kuvassa 11 näkyy. [26] Laitteen nimellisvirta on 817 ampeeria ja se turvaa sähkönjakeluyhtiön sekä tuotantoyhtiön välisen jakeluyhteyden. Käytössä vikavirranrajoitin kestää jopa 15 megawatin kuormitusta, jonka tuotantoyhtiö syöttää sähköverkkoon. Ilman vikavirranrajoitinta kuormitus nostaisi oikosulkuvirran liian suurelle tasolle. Suprajohtavan vikavirranrajoittimen testauksessa käytettiin varasuunnitelmana virtaa rajoittavaa reaktanssikäämiä, mikäli vikavirranrajoittimessa ilmenisi häiriötä. Virtaa rajoittava reaktanssikäämi sijoitettiin piiriin niin, että vikavirranrajoittimen toimiessa, se ei aiheuttanut muutosta testauksessa. Testivaiheessa oli myös mahdollista tarkoituksella käyttää vikavirranrajoituksessa varasuunnitelmaa eli virtaa rajoittavaa reaktanssikäämiä. Tällöin voitiin verrata suprajohtavan vikavirranrajoittimen ja virtaa rajoittavan reaktanssikäämin suoritustuloksia. [25] Vuonna 2016 käyttöön otetun vikavirranrajoittimen arvioitiin säästävän 36 000 kWh vuosittain [26].



Kuva 12. Stadtwerken sähköverkkoon asennettu vikavirranrajoitinjärjestelmä erillisine kryostaatteineen.

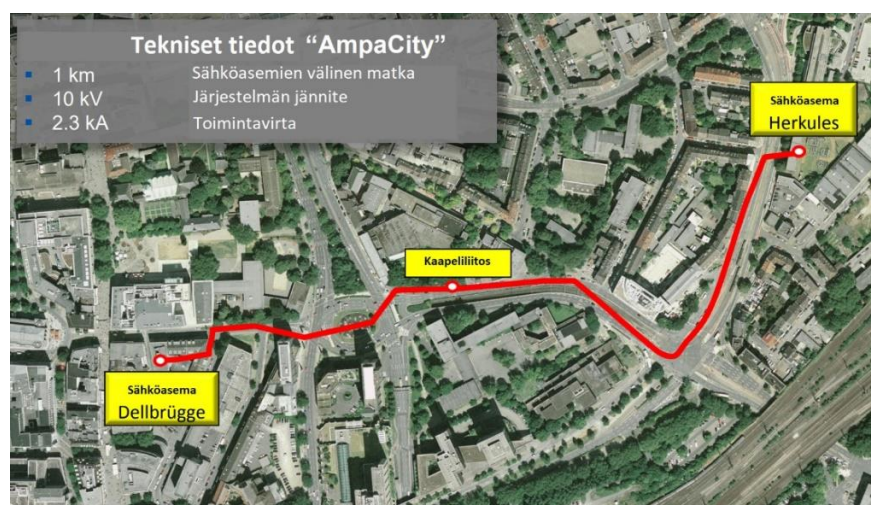
Toinen huomion arvoinen projekti on saksalainen AmpaCity-projekti, joka aloitettiin syksyllä 2011. Projektin tarkoituksena oli kehittää, valmistaa ja rakentaa Essenin kaupungin Saksaan kuvan 13 mukainen 1 km pituinen suprajohtava kaapeli, jonka jännite on 10 kV ja maksimikuormitus 40 MVA. Järjestelmään kuului myös suprajohtava vikavirranrajoitin. AmpaCity-projekti oli uraauurtava, koska siinä asennettiin ensimmäisen kerran kilometrin pituinen suprajohtava kaapeli suprajohtavan vikavirranrajoittimen kanssa oikeaan sähköverkkoon. Lisäksi se oli projektin valmistumisaikana pisin asennettu suprajohtajärjestelmä maailmassa. Projektin kehitysvaihe saatiin päätökseen keväällä 2013. Vuoden 2014 alussa järjestelmä otettiin käyttöön sähköverkossa, ja käyttöä on jatkettu siitä asti.

Suprajohtava kaapeli tarjoaa monia teknisiä mahdollisuuksia. Kaapelin ansiosta voidaan käyttää suurempaa virrantiheyttä, jolloin voidaan välttää korkeita jännitteitä jakelussa. Tällöin sähköasemat vaativat vähemmän tilaa, koska toimitaan pienemmillä jännitteillä. Tämä on tärkeää erityisesti kaupunkialueilla, joissa tilasta on puutetta.

Arvio on, että suprajohtavien johtojen ja vikavirranrajoittimien kehittäminen ja käyttöönoton kynnyksen madaltaminen onnistuvat keskittymällä seuraaviin kehityskohtiin:

- Suprajohtomateriaalien hinnan laskeminen
- Suprajohtavien johtojen valmistuksen optimointi
- Kryogeniikan kustannusten vähentäminen
- Kryogeniikan luotettavuuden kehittäminen

Näillä kehityksen osa-alueilla odotetaan edistysaskelia tulevina vuosina. AmpaCity-projekti oli tärkeä askel kehityksen polulla, jotta suprajohtavuussovellusten hyödyntämistä saadaan laajennettua. [28]



Kuva 13. AmpaCity-projektin tekniset tiedot ja sijainti

## 6. VIKAVIRRRANRAJOITIN SÄHKÖVERKOSSA

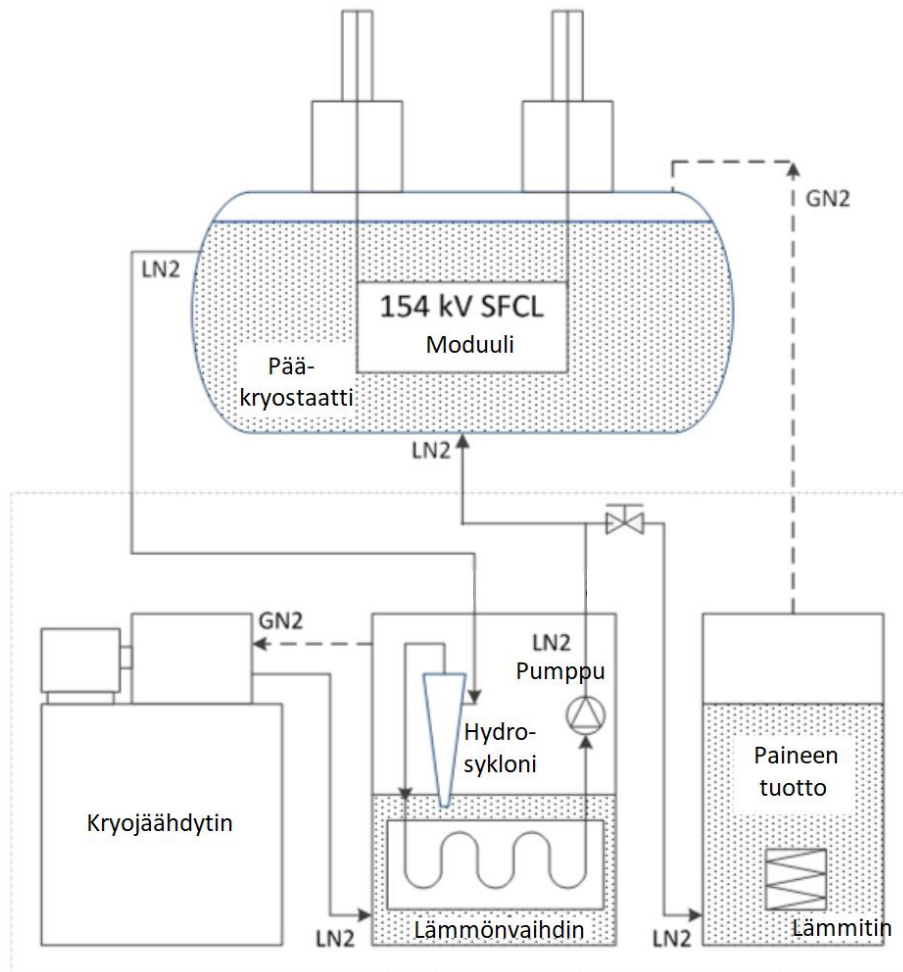
Suprajohtavan vikavirranrajoittimen käyttöönotto vaatii tutustumista käytännön toteutukseen. Suprajohteiden hyödyntäminen vaatii, että suprajohtemateriaalin lämpötila voidaan luotettavasti pitää matala. Suprajohtavien vikavirranrajoittimien käyttöönoton yhteydessä on myös tarpeellista varautua vikatapauksiin, joita mahdollisesti tulee eteen.

### 6.1 Kryogeniikka

Suprajohteiden käyttö vaatii aina jäähdytysaineen käyttöä. Suprajohtavassa vikavirranrajoittimessa suprajohtemateriaali täytyy jäähdyttää alle materiaalin kriittisen lämpötilan. Jäähdytysneste valitaan käytettävän suprajohteen vaatimusten mukaan. Nestetyppi on hyvin yleisesti suprajohteiden kanssa käytetty jäähdytysneste, koska sen käyttölämpötila on riittävän alhainen monelle suprajohteelle, kuten yhdisteille YBCO, Bi-2212 ja Bi-2223. Nestetyppi on lisäksi verrattain halpaa. Suprajohteen jäähdyttäminen tapahtuu upottamalla materiaali jäähdytysnesteeseen, esimerkiksi edellä mainittuun nestetyyppeen. Nestetyypin käyttölämpötila on alle 77 K, joten sitä säilytetään kryostaatissa eli astiassa, joka on hyvin eristetty. Jäähdytysnestettä hyvin eristävä astia edesauttaa sitä, että jäähdytettävän suprajohtekomponentin alhainen lämpötila on helpompi säilyttää.

Kun sähköverkossa ilmenee vika ja vikavirranrajoitin siirtyy vähemmän johtavaan tilaan, syntyy lämpöä. Lämpötilan nousu voi saada pienen määrän nestetypistä höyrystymään, jolloin nestetyyppeen muodostuu kuplia. Kuplien muodostuminen puolestaan heikentää nesteen sähköeristävyyttä ja kuluttaa kryostaattia. Kuplien muodostumista voidaan ehkäistä kohottamalla nestetyypin käyttöpainetta. Jäähdytysnesteen käyttölämpötilan lisäksi käyttöpaineikin on siis merkityksellinen.

Tarkastellaan Koreassa tehtyä tutkimusta, jossa testattiin 154 kV / 2 kA verkkoon kytkettävän suprajohtavan vikavirranrajoittimen jäähdytystä. Tästä saadaan osviittaa, kuinka jäähdytys voidaan toteuttaa. Suprajohtavan vikavirranrajoittimen (SFCL) normaalitoiminnan lämpötila on 71 K ja paine 500 kPa. Vikavirranrajoittimesta ja kryostaatista koostuvan systeemin rakenne on kuvan 14 mukainen.



Kuva 14. 154 kV suprajohtavan vikavirranrajoittimen jäähdytys.

Jäähdytysnesteena järjestelmässä käytetään alijäähdytettyä nestetyyppiä LN<sub>2</sub>. Nestetyypin sulamispiste on NTP-olosuhteissa eli normaaliolosuhteissa 77 K. Normaalipaineessa 71 K -asteinen tyyppi olisi kiinteässä olomuodossa, mutta ulkoisen 500 kPa paineen tuoton ansiosta tyyppi on nestemäistä. Järjestelmässä nestetyyppiä on noin 23 000 kg. Järjestelmällä tehtiin erilaisia jäähdytystestejä ja painetestejä. Järjestelmän testauksessa osoitettiin, että lämpötilan vaihtelut pääkryostaatissa olivat alle 1 K normaalitilanteessa. Projektin osoittama kryostaatin lämpötilan vakaus on kaupallisesta näkökulmasta hyvin kiinnostava ominaisuus. [29]

## 6.2 Vikatapaukset

Suprajohtava vikavirranrajoitin on erinomainen laite, koska se mahdollistaa hajanaisen tuotannon asentamisen ilman nykyisen verkon suojauslaitteiden uusimista. Tavallisesti suprajohtavan vikavirranrajoittimen sijoittamista verkkoon on mietitty vikavirtojen rajoittamisen ja yleisen toimimisen näkökulmasta, mutta tärkeää on myös varautua tilanteeseen

seen, jossa suprajohtavan vikavirranrajoittimen toiminnassa ilmenee häiriö. Häiriötilanteet on siis otettava huomioon, kun laitetta sijoitetaan verkkoon. Verkon tulee olla varautunut tilanteeseen, jossa suprajohtava vikavirranrajoitin ei toimikaan tai sitä huolletaan.

Suprajohtavan vikavirranrajoittimen todennäköisin häiriö on kryogeniikan pettäminen, jolloin suprajohde menettää suprajohtavuustilansa. Suprajohtavan vikavirranrajoittimen huollon ajaksi jakelujärjestelmä voidaan uudelleenkonfiguroida, jotta ilmenevät vikavirrat voidaan kestää. Jakelujärjestelmän uudelleenkonfiguroinnissa ei oteta huomioon vain siihen liittyneitä johtoja, vaan myös jakelujärjestelmään kytketty tuotanto. Jakelujärjestelmän uudelleenkonfiguroinnin avulla verkon suojalaitteiden vaatimukset voidaan täyttää suprajohtavan vikavirranrajoittimen ollessa huollettavana. [30]

### 6.3 Kustannukset

Suprajohtavan vikavirranrajoittimen käyttöönotossa on olennaista tarkastella kustannuksia, jotta voidaan määritellä, onko laitteen asennus taloudellisesti kannattavaa. Kokonaiskustannukset voidaan jakaa valmistus-, ylläpito- ja huoltokustannuksiin. Suprajohdeiden valmistus sekä kryostaattien valmistus ja ylläpito on vielä melko kallista, mutta alan kehitys laskee hintoja vuosi vuodelta. Jäähdytyksen kustannukset riippuvat käyttölämpötilasta. Suprajohteen jäähdytyksen ylläpidon kustannukset ovat kymmenkertaiset sen mukaan, onko käyttölämpötila 77 K vai 4 K. [19, s. 598]

Vuonna 2013 tehty kustannusanalyysi osoitti, että YBCO:n valmistuskustannus on 5–7,5 €/kAm, kun valmistetaan johtoa 5 000 km. Kustannusanalyysin tulos oli erittäin merkittävä, koska jopa melko pienellä tuotantomäärällä kustannukset jäivät alle 8€/kAm. Mikäli johdon tuotantomäärää nostetaan vaikkapa 50 000 kilometriin suprajohdejohtoa, hinta putoaa entisestään. [31]

Vuonna 2015 tehdyssä tutkimuksessa tutkittiin vianhallintateknologioiden taloudellisuutta. Taloudellisuutta tutkittiin tarkastelemalla Etelä-Afrikassa sijaitsevaa sähköverkkoa. Tutkimuksessa selvitettiin, mitkä ovat kustannuserot, mikäli sama ongelma eli liian suuri vikavirran taso ratkaistaan eri lähestymistavoin. Tutkimustulokset on kerätty taulukkoon 5.

Taulukko 5. Vianhallintaratkaisujen kustannukset elinkaaren (25 v) aikana. [32]

	Sarjareaktori	Laitteiston päivitys	SFCL
Hankintakulut	\$ 160 238,58	\$ 650 822,26	\$ 1 742 735,85
Energiakulut/vrk	\$ 15,09	0	\$ 9,58
Energiakulut / 1 v	\$ 5 508,81	0	\$ 3 497,83
Energiakulut / 25 v	\$ 302 238,12	0	\$ 18 104,41
Kustannukset/elinkaari	\$ 462 476,70	\$ 650 822,26	\$ 1 760 840,26

Sarjareaktorin hankintakulut ovat matalimmat, mutta sen energian kulutus on merkittävän suuri. Sarjareaktorin kustannukset elinkaaren (25 vuotta) aikana olivat kuitenkin matalimmat tarkasteltujen vaihtoehtojen joukossa, joten tässä tutkimuksessa se osoittautui taloudellisimmaksi ratkaisuksi. Seuraavaksi edullisin ratkaisu oli laitteiston päivitys. Suprajohtavan vikavirranrajoittimen (SFCL) kustannuksista selvästi suurimpia ovat sen hankintakulut. SFCL:n energiakustannukset koostuvat kryojäähdyttimen aiheuttamista kuluista. Nämä kulut ovat hyvin samansuuruiset verrattuna sarjareaktorin energiakuluihin. Tutkimustuloksista nähdään, että jäähdytyksen kustannustehokkuuden kehittäminen ei voi yksin tehdä suprajohtavasta vikavirranrajoittimesta taloudellisesti kannattavaa ratkaisua. Täytyy tehdä vielä paljon tutkimusta, jotta suprajohtavan vikavirranrajoittimen valmistuskulut saadaan kustannustehokkaiksi. [32]

## 7. YHTEENVETO

Hajautetun tuotannon määrän kasvaessa tarve suprajohtavalle vikavirranrajoittimelle kasvaa. Hajautetun energiantuotannon verkkoon asentamisen suurin varjopuoli on sen vaikutus olemassa olevaan verkkoon. Tämä vaikuttaa erityisesti verkon vikavirtojen suuruuksiin. Sähköverkon laitteet mitoitetaan kestävästi tietyin suuruisia vikavirtoja, joten vikavirtojen kasvaessa merkittävästi verkon laitteita joudutaan uusimaan tai verkkoon joudutaan asentamaan ylimääräistä induktiivista reaktanssia vikavirtojen rajoittamista varten.

Kolmas vaihtoehto ja potentiaalisesti tulevaisuudessa paras vaihtoehto on suprajohtava vikavirranrajoitin. Suprajohtava vikavirranrajoitin on käytännön testeissä todettu toimivaksi ja joissakin maissa sitä jo käytetäänkin. Vikavirranrajoitintyypeistä eniten huomiota ovat saaneet resistiivinen suprajohtava vikavirranrajoitin sekä induktiivinen suprajohtava vikavirranrajoitin.

Suprajohtavia vikavirranrajoittimia on käytännössä asennettu ainakin Saksassa. Vuonna 2016 siellä otettiin käyttöön vikavirranrajoitin, jonka tarkoituksena on turvata sähkönjakelija Stadtwerken ja tuotantoyhtiön välinen jakeluyhteys. Saksassa on otettu käyttöön myös toinen suprajohtava vikavirranrajoitin. Kyseiseen AmpaCity-nimiseen projektiin kuului vikavirranrajoittimen asennuksen lisäksi 1 km pituisen suprajohtavan johdon sijoittaminen kaupunkialueelle. Projekti oli mullistava, koska asennettu suprajohtava johto oli siihen aikaan maailman pisin käyttöön asennettu suprajohtava johto.

Vaikka hankkeita onkin tehty suprajohtavien vikavirranrajoittimien asentamiseksi, alan kehitys ei ole vielä sillä tasolla, että voisi puhua taloudellisista hyödyistä. Suprajohtavan vikavirranrajoittimen valmistuskustannukset ovat erittäin suuret. Suprajohtavan vikavirranrajoittimen ylläpitokulut ovat sen sijaan kustannustehokkaammalla tasolla. Valmistusprosessia on sen vuoksi tärkeä tehostaa, ennen kuin suprajohtava vikavirranrajoitin korvaa muut vianhallintavaihtoehdot.



# LÄHTEET

- [1] Liang, Chen ; Li, Chao ; Zhang, Pingxiang ; Song, Meng ; Ma, Tao ; Zhou, Tao ; Ge, Zhengfu (2018). Winding Technology and Experimental Study on 500 kV Superconductive Fault Current Limiter. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. Luettu: 28.3.2020. Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/document/8290839>
- [2] Types of Faults and Effects in Electrical Power Systems. Luettu: 30.7.2020. Saatavilla: <https://www.elprocus.com/what-are-the-different-types-of-faults-in-electrical-power-systems/>
- [3] Hewitson, L. G., Brown, Mark, Balakrishnan, Ramesh. (2004) Practical Power System Protection.
- [4] Arc Resistance. Luettu: 24.8.2020. Saatavilla: <https://omnexus.special-chem.com/polymer-properties/properties/arc-resistance>
- [5] Dann, W. M. and Rudd, H.H. (1915) The Use of Current-Limiting Reactors. Luettu: 27.8.2020. Saatavilla: <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=nnc1.cu55816380&view=image&seq=5>
- [6] SELECTIVITY STUDIES, IEC 60947-2. Luettu: 27.8.2020. Saatavilla: <https://www.gt-engineering.it/en/Consulting/selectivity-studies>
- [7] Onnes, H. K. (1911) The resistance of pure mercury at helium temperatures. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, 12:120.
- [8] Ginzburg, V. L. and Andryushin, E. A. (2004) Superconductivity. Rev. Ed. New Jersey: World Scientific.
- [9] Onnes, H. K. (1914) Appearance of galvanic resistance in supra conductors when brought into a magnetic field. Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden, No 139f.
- [10] Allister, M. F. (1983) Meissner and Ochsenfeld revisited. Luettu: 1.9.2020. Saatavilla: <https://physics.ucf.edu/~rep/EDII/Meissner&Ochsenfeld1933.pdf>
- [11] Cooper, L. N. (1956). Bound electron pairs in a degenerate fermi gas. Phys. Rev. 104:1189.
- [12] Bednorz, J. G. and Muller, K. A. (1986). Possible high  $t_c$  superconductivity in the ba-la-cu-o system. Z. Phys. B, 64:189.
- [13] Macmanus-Driscoll, J L, and S C Wimbush. (2011). Future Directions for Cuprate Conductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity 21.3, 2495–2500. Web.
- [14] Butterfield, Andrew, and John Szymanski. (2018). superconductivity. A Dictionary of Electronics and Electrical Engineering. Oxford University Press, Oxford

- Reference. Luettu 24.3.2020. Saatavilla: <https://www-oxfordreference-com.lib-proxy.tuni.fi/view/10.1093/acref/9780198725725.001.0001/acref-9780198725725-e-4561>
- [15] Jishi RA. (2013). Feynman Diagram Techniques in Condensed Matter Physics. Cambridge: Cambridge University Press.
- [16] Characteristics of Superconductivity. Luettu: 29.8.2020. Saatavilla: [http://www.okayama-u.ac.jp/user/akimitsu/achievements/study\\_sc\\_chara\\_eng.html](http://www.okayama-u.ac.jp/user/akimitsu/achievements/study_sc_chara_eng.html)
- [17] Parinov, I. A. (2012). Microstructure and Properties of High-Temperature Superconductors. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [18] Review of the superconducting properties of MgB<sub>2</sub>. (2001) Luettu: 22.8.2020. Saatavilla: <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-of-the-superconducting-properties-of-MgB2-Buzea-Riec/eda1c669431462738ef9ba687cde45c03b2666bb>
- [19] Sheahen, T. P. (1994) Introduction to high-temperature superconductivity.
- [20] Lanthanum decahydride. (2018) Luettu: 22.8.2020. Saatavilla: <https://www.acs.org/content/acs/en/molecule-of-the-week/archive//lanthanum-decahydride.html>
- [21] Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures. (2019) Luettu: 22.8.2020. Saatavilla: <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1201-8>
- [22] Rafiq Asghar (2018) Fault Current Limiters Types, Operations and its limitations. Luettu: 30.8.2020. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/326246440\\_Fault\\_Current\\_Limiters\\_Types\\_Operations\\_and\\_its\\_limitations](https://www.researchgate.net/publication/326246440_Fault_Current_Limiters_Types_Operations_and_its_limitations)
- [23] Martikainen Pekka (2010) Suprajohtava vikavirranrajoitin hajautetussa energiantuotannossa. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, Tieto- ja sähkötekniikan tiedekunta, Tampere.
- [24] Behzadirafi, S. ja Salehfar, H. (2010) Using Superconducting Fault Current Limiters to enhance the reliability of power transmission systems. Luettu: 30.8.2020. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/241173688\\_Using\\_Superconducting\\_Fault\\_Current\\_Limiters\\_to\\_enhance\\_the\\_reliability\\_of\\_power\\_transmission\\_systems](https://www.researchgate.net/publication/241173688_Using_Superconducting_Fault_Current_Limiters_to_enhance_the_reliability_of_power_transmission_systems)
- [25] Siemens: Superconducting technology. Luettu: 31.8.2020 Saatavilla: [https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2ae7d97-ce38-4f69-8db5-f706d4e1ff0c/factsheet-supraleiter\\_e.pdf](https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:b2ae7d97-ce38-4f69-8db5-f706d4e1ff0c/factsheet-supraleiter_e.pdf)
- [26] Stadtwerke Augsburg testing superconducting fault current limiter. (2016) Luettu: 31.8.2020. Saatavilla: <http://www.bine.info/nc/en/newsoverview/news/stadtwerke-augsburg-erproben-supraleitenden-strombegrenzer/>
- [27] Martini, L. Superconductivity for the fault current mitigation: the HTS Fault Current Limiter devices. (2016). Luettu: 31.8.2020. Saatavilla: <http://www.die.ing.unibo.it/pers/morandi/didattica/Temporary-ESAS-summer-school-Bologna-2016/Martini.pdf>

- [28] Stemmle, M. ja Schmidt, F. ja Merschel, F. ja Noe, M. (2015) Update on World's First Superconducting Cable and Fault Current Limiter Installation in a German City Center. Luettu: 31.8.2020. Saatavilla: <https://snf.ieeecsc.org/abstracts/stp475-ampacity-project-%E2%80%93-update-world%E2%80%99s-first-superconducting-cable-and-fault-current>
- [29] Young, J. H. ja Heesun, K. (2015) Performance test of the cryogenic cooling system for the superconducting fault current limiter. Luettu: 1.9.2020. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/283758506\\_Cool-down\\_test\\_of\\_cryogenic\\_cooling\\_system\\_for\\_superconducting\\_fault\\_current\\_limiter](https://www.researchgate.net/publication/283758506_Cool-down_test_of_cryogenic_cooling_system_for_superconducting_fault_current_limiter)
- [30] Seongbae, K. ja Hyung-Chul, J. ja Young-Min, W. ja Sung-Kwan, J. (2016) Optimization-Based Reconfiguration Method for Power System Incorporating Superconducting Fault Current Limiter Failure. Luettu: 28.8.2020. Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7442820>
- [31] Matias, V. ja Hammond, R. H. (2012) YBCO superconductor wire based on IBAD-textured templates and RCE of YBCO: Process economics. Luettu: 1.9.2020. Saatavilla: [https://www.researchgate.net/publication/263655737\\_YBCO\\_superconductor\\_wire\\_based\\_on\\_IBAD-textured\\_templates\\_and\\_RCE\\_of\\_YBCO\\_Process\\_economics](https://www.researchgate.net/publication/263655737_YBCO_superconductor_wire_based_on_IBAD-textured_templates_and_RCE_of_YBCO_Process_economics)
- [32] Khan, M. F. ja Jarvis, A. L. L. ja Young, E. A. ja Stephen, R. G. (2015) Comparison of Superconducting Fault Current Limiters against Traditionally Employed Practices in the Management of Fault Levels in the South African National Grid. Luettu: 1.9.2020. Saatavilla: [https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/documents/snf/abstracts/KhanM\\_1L0r3B-06\\_FullText.pdf](https://snf.ieeecsc.org/sites/ieeecsc.org/files/documents/snf/abstracts/KhanM_1L0r3B-06_FullText.pdf)