



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Janne Kärppä

# Oikosulkusuojauksen toteutus hakkuri- teholähteessä

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

18.8.2021

|   |   |
|---|---|
| Tekijä<br>Otsikko   | Janne Kärppä<br>Oikosulkusuojauksen toteutus hakkuriteholähteessä |
| Sivumäärä<br>Aika   | 21 sivua + 1 liite<br>18.8.2021                                   |
| Tutkinto  | insinööri (AMK)   |
| Tutkinto-ohjelma  | sähkö- ja automaatiotekniikka                                     |
| Ammatillinen pääaine  | sähkövoimatekniikka   |
| Ohjaajat  | lehtori Eero Kupila<br>päänsinööri Jukka J. Mattila               |
| <p>Opinnäytetyö tehtiin ABB Oy:lle. Työssä tutkittiin piirikorttisulakkeita, joita käytetään eräissä ABB:n taajuusmuuttajien teholähteissä tulopuolen suojauksena ylikuormalta. Työssä perehdyttiin myös hakkuriteholähteen toimintaperiaatteeseen, sekä muihin ylikuormituksen suojausmenetelmiin teholähteissä.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa testausjärjestelmä, jolla voidaan vertailla piirikorttisulakkeiden toimintaa. Tarkoituksena oli verrata kilpailevien sulaketoimittajien vaihtoehtoisia sulakkeita nykyisiin käytössä oleviin sulakkeisiin. Sulakkeille ei ollut työn alkaessa määritetty hyväksyntäkriteereitä, joten ensin oli tutkittava nykyisten käytössä olevien sulakkeiden toimintaa toteutetussa testausjärjestelmässä. Tämän perusteella määritettiin kriteerit, jotka vaihtoehtoisten sulakkeiden tulisi täyttää.</p> <p>Sulakkeet eivät täyttäneet asetettuja kriteereitä, joten kilpailevien sulakevalmistajien vaihtoehtoisia sulakkeita ei voitu hyväksyä käyttöön tämän työn perusteella. Toisaalta testausjärjestelmä ei vastannut realistista käyttöympäristöä sulakkeille. Tämän vuoksi sulakkeille tullaan tekemään jatkossa lisää testejä, jotta pystytään määrittämään voisiko sulakkeita käyttää ABB:n taajuusmuuttajien teholähteissä tulevaisuudessa.</p> |   |
| Avainsanat  | hakkuriteholähde, sulake, ylikuormitussuoja                       |

|  |   |
|--|---|
| Author<br>Title  | Janne Kärppä<br>Short Circuit Protection for Switch-Mode Power Supply |
| Number of Pages<br>Date  | 21 pages + 1 appendix<br>18 August 2021                               |
| Degree   | Bachelor of Engineering   |
| Degree Programme   | Electrical and Automation Engineering                                 |
| Professional Major   | Electrical Power Engineering  |
| Instructors  | Eero Kupila, Senior Lecturer<br>Jukka J. Mattila, Principal Engineer  |
| <p>This thesis work was done for ABB Oy. Its purpose was to research circuit board fuses used in some ABB drive power supplies to protect the input side from overload. The thesis work also introduces the operating principle of the switch-mode power supply, as well as other overload protection methods in power supplies.</p> <p>The main goal of this thesis work was to design and implement a testing system that can be used to compare the operation of circuit board fuses. The purpose was to compare alternative fuses from competing fuse suppliers with existing fuses in use. At the beginning of the work, no approval criteria had been defined for the fuses, so it was first necessary to examine the operation of the existing fuses in the implemented test system. Based on this, the criteria that alternative fuses should meet were determined.</p> <p>The fuses did not meet the set criteria, so this work shows that alternative fuses from competing fuse manufacturers could not be accepted for use. On the other hand, the test system did not correspond to a realistic operating environment for fuses. Therefore, further tests will be performed on the fuses in the future to determine whether the fuses could be used in ABB drive power supplies in the future.</p> |   |
| Keywords   | Switch-Mode Power Supply, Fuse, Overload Protection                   |

# Sisällys

## Lyhenteet

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto                                | 1  |
| 2     | Hakkuriteholähteen toimintaperiaate     | 2  |
| 2.1   | Hakkuriteholähteen topologiat           | 3  |
| 2.1.1 | Jännitettä laskeva katkoja (Buck)       | 4  |
| 2.1.2 | Jännitettä nostava katkoja (Boost)      | 5  |
| 2.1.3 | Laskeva ja nostava katkoja (Buck-Boost) | 6  |
| 2.1.4 | Flyback-muuttaja                        | 6  |
| 2.1.5 | Forward-muuttaja                        | 7  |
| 3     | Ylikuormitussuoja                       | 8  |
| 3.1   | Tehorajoitus                            | 8  |
| 3.2   | Lähtövirran vakiovirtarajoitus          | 10 |
| 3.3   | Sulakesuojaus                           | 10 |
| 3.4   | Taipuva virtaraja                       | 10 |
| 4     | Sulakkeiden vertailu                    | 11 |
| 4.1   | Sulakkeet                               | 11 |
| 4.2   | Testausjärjestelmä                      | 11 |
| 4.3   | Muuttajat                               | 13 |
| 4.4   | Tulokset                                | 14 |
| 5     | Yhteenveto                              | 19 |
|       | Lähteet                                 | 21 |
|       | Liitteet                                |    |
|       | Liite 1. Sulaketaulukko                 |    |

## Lyhenteet

ABB        Asea Brown Boveri.

AC        *Alternating Current.* Vaihtovirta.

DC        *Direct Current.* Tasavirta.

## 1 Johdanto

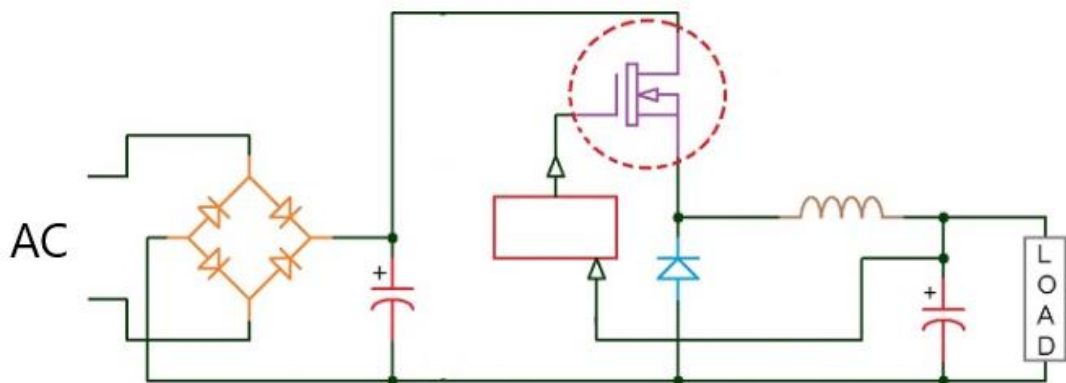
Hakkuriteholähde on hyvin yleisesti käytetty jännitemuunninperiaate, joka perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Hakkuriteholähteitä käytetään muun muassa tietokoneiden virtalähteissä, puhelinten latureissa, sekä autojen sähköjärjestelmissä. Verrattuna tavalliseen lineaariseen teholähteeseen hakkuriteholähteen etuja ovat korkea hyötysuhde, matala hukateho, sekä pieni koko ja paino.

Hakkuriteholähteessä on yleensä suojaus ylikuormitusta varten. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan piirikorttisulakkeita, joita käytetään eräissä ABB:n (Asea Brown Boveri) taajuusmuuttajien teholähteissä. Lopuksi työssä perehdytään myös muihin ylikuormituksen suojausmenetelmiin teholähteissä.

Opinnäytetyön tavoitteena on suunnitella ja toteuttaa testausjärjestelmä, jolla voidaan vertailla piirikorttisulakkeiden toimintaa. Tarkoituksena on verrata kilpailevien sulaketoimittajien vaihtoehtoisia sulakkeita nykyisiin käytössä oleviin sulakkeisiin. Sulakkeille ei ollut työn alkaessa määritetty hyväksyntäkriteereitä, joten ensin on tutkittava nykyisten käytössä olevien sulakkeiden toimintaa toteutetussa testausjärjestelmässä. Tämän perusteella pyritään määrittämään kriteerit, jotka vaihtoehtoisten sulakkeiden tulisi täyttää.

## 2 Hakkuriteholähteen toimintaperiaate

Hakkuriteholähteessä tasajännitteen muuttamiseen käytetään dc-dc-muuttajaa, joka toimii katkoja- tai resonanssiperiaatteella. Katkojakäytössä tehopuolijohdekomponentteja käytetään on/off-kytkiminä. Jos syöttävänä jännitelähteenä on vaihtojännitelähde, tarvitaan ensin diodisilta, joka tasasuuntaa yksi- tai kolmivaiheisen verkkojännitteen ohjaimattomaksi tasajännitteeksi. Se muutetaan kytkimellä suurtaajuiseksi pulssinleveysmoduloiduksi vaihtojännitteeksi. Usein tarvittava galvaaninen erotus toteutetaan suurtaajuusmuuntajalla. Muuntajan koko pienenee taajuuden kasvaessa ja siten hakkuriteholähteissä käytettävät suurtaajuusmuuntajat ovat huomattavasti pienempiä kuin 50/60 Hz:n verkkomuuntajat. Suurtaajuusmuuntajan toisiojännite tasasuunnataan ja suodatetaan riittävästi ja lopputuloksena on lähtöjännite. Lähtöjännitteen säätämiseksi se mitataan ja ohjearvosta saatavan erosuureen avulla säädetään ensiöpuolella toimivan kytkimen suhteellista johtoaikaa. Kuvassa 1 on kaaviokuva tyypillisestä hakkuriteholähteestä. [1; 2.]



Kuva 1. Kaaviokuva tyypillisestä AC (Alternating Current) -> DC (Direct Current) hakkuriteholähteestä [1].

Verrattuna tavalliseen lineaariseen teholähteeseen hakkuriteholähteen etuja ovat korkea hyötysuhde, matala hukateho, sekä pieni koko ja paino. Tehopuolijohdekomponentteja käytetään kytkiminä on/off-periaatteella, jolloin niiden yli jää suhteellisen pieni jännitehäviö johtotilassa. Näin saavutetaan suuri hyötysuhde ja samalla komponentilla voidaan käsitellä suurempaa tehoa kuin lineaarisessa teholähteessä. Vaikka kytkemistaajuuden

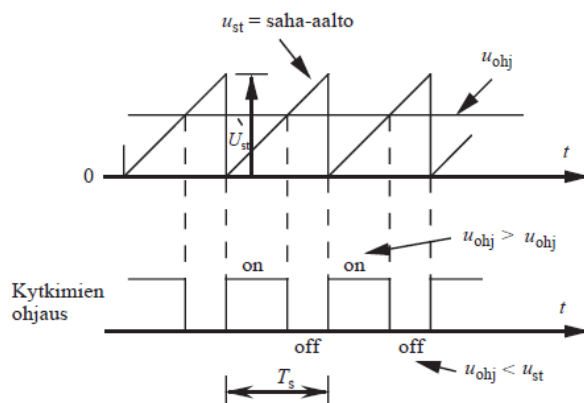
nosto lisääkin syttymis- ja sammumishäviöitä komponenteissa, niin suurtaajuusmuunta-  
jan muiden passiivisten komponenttien (L, C) koko pienenee, jolloin teholähteen koko ja  
paino pienenevät. [1; 2.]

Haittoja ovat hakkuriteholähteen monimutkaisempi rakenne verrattuna lineaariseen te-  
holähteeseen, sekä ei-toivotut sähkömagneettiset häiriöt. Huolellisella suunnittelulla ja  
esimerkiksi resonanssimuuttajia käyttämällä häiriöiden syntyä voidaan vähentää ja toi-  
saalta sen siirtymistä ympäristöön voidaan vähentää suojauksella. [1; 2.]

## 2.1 Hakkuriteholähteen topologiat

Hakkuriteholähteet voidaan luokitella piiritopologiansa perusteella kahteen tyyppiin: gal-  
vaanisesti erotetut muuttajat, sekä erottamattomat katkojat. Erottamattomien katkojien  
yleisimmät tyypit ovat jännitettä laskeva katkoja (Buck), jännitettä nostava katkoja  
(Boost), sekä jännitettä laskeva ja nostava katkoja (Buck-Boost). Erotettujen muuttajien  
yleisimmät tyypit ovat Flyback-muuttaja sekä Forward-muuttaja.

Katkojissa lähtöjännite säädetään ohjearvon suuruiseksi yhden tai useamman kytkimen  
on/off-säädöllä. Kytkimen tai kytkimien johtoajan säätöön käytetään pulssinleveysmodu-  
laatiota (kuva 2). Saha-aalto määrää vakiona pysyvän katkontataajuuden. Taajuuteen  
vaikuttaa oleellisesti käytettävän tehopuolijohdekomponentin tyyppi, joka puolestaan  
riippuu tehoalueesta eli tarvittavasta jännitteestä ja virrasta. [2.]



Kuva 2. Pulssinleveysmodulaation periaatekuva. [2.]



Suhteellinen johtoaika  $D$  on keskeinen parametri hakkuriteholähteen toimintaa analysoitaessa. Lähtöjännitteen keskiarvo sekä syöttävästä jännitelähteestä otettu virta riippuvat ohjauksuhteesta. Oleellista on tuntee se, toimiiko katkoja jatkuvalla vai aukottuvalla virta-alueella. Tähän vaikuttaa eritoten lähtövirran keskiarvo. Jatkuvalla alueella topologiassa olevan induktanssin virta on hetkellisarvoisesti aina suurempi kuin nolla. Aukottuvalla alueella virta sen sijaan on osan kytkentäjakson ajasta nolla. Aukottuvalla alueella lähtöjännitteen keskiarvo ei riipu enää yksin ohjauksuhteesta ja tulojännitteestä vaan myös lähtövirrasta. Säätyjärjestelmä onkin suunniteltava niin, että kytkentä toimii molemmilla alueilla. [2.]

### 2.1.1 Jännitettä laskeva katkoja (Buck)

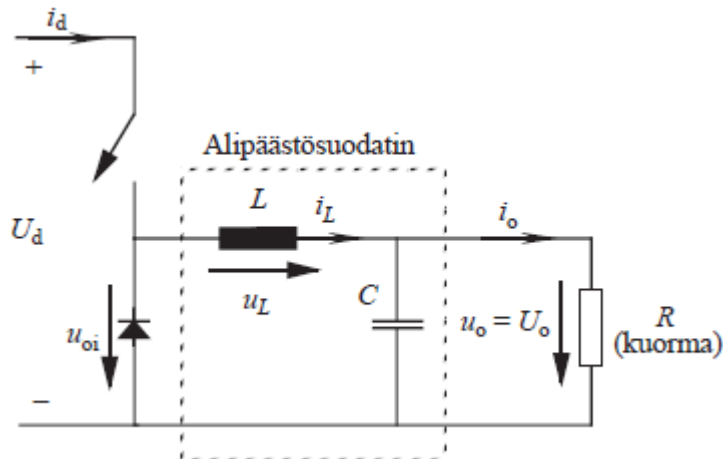
Yksinkertaisessa katkojassa lähtöjännitteen  $U_0$  keskiarvo saadaan

$$U_0 = \frac{1}{T_s} \int_0^{t_{on}} u_o(t) dt = \frac{t_{on}}{T_s} U_d = D U_d \quad (1)$$

yhtälön 1 avulla, jossa  $U_d$  on lähtöjännite ja  $D$  on ohjauksuhde. Lähtöjännitteen keskiarvo riippuu lineaarisesti ohjauksuhteesta  $D$  ja myös ohjauksjännitteestä. [2.]

Vaikka kuorma olisi puhtaasti resistiivinenkin, niin siihen sisältyy aina vähän hajainduktanssia, jonka ansiosta virta pyrkii pysymään jatkuvana. Tästä aiheutuisi ylijännite kytkintä sammuttaessa. Kytkentään tarvitaan nolladiodi, jonka kautta induktiivinen virta pääsee kulkemaan, kun kytkin ei johda. [2.]

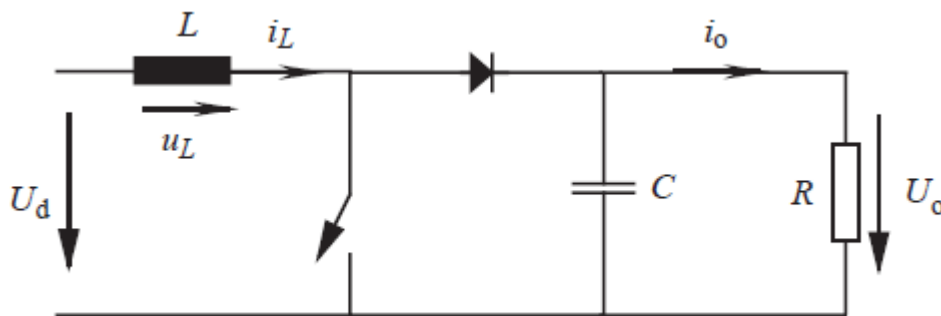
Lähtöjännitteen hetkellisarvo vaihtelee rajoissa 0 ja  $U_d$ , vaikka tavoitteena on tuottaa mahdollisimman tasainen lähtöjännite. Tämän vuoksi tarvitaan alipäästösuodatin (L, C), joka suodattaa jännitteen. Kuvassa 3 nähdään jännitettä laskevan katkojan kaavio-kuva, jossa on alipäästösuodatin. [2.]



Kuva 3. Jännitettä laskeva katkoja (Buck).

### 2.1.2 Jännitettä nostava katkoja (Boost)

Nostavan katkojan (kuva 4) syöttö on virtalähde, jossa suuri induktanssi toimii energia-  
varastona. Induktanssin  $L$  virta pysyy sitä paremmin vakiona, mitä suurempi induktanssi  
on tai mitä suurempaa kytkemistaajuutta käytetään. Lähtö on jännitelähde, jonka suuri  
kondensaattori muodostaa ja yleisessä tarkastelussa voidaankin lähtöjännite olettaa täy-  
sin tasoittuneeksi. Lähtöjännitteen on oltava suurempi kuin syöttöjännite, koska muussa  
tapauksessa kuvaan 4 piirretty diodi johtaa. [2.]



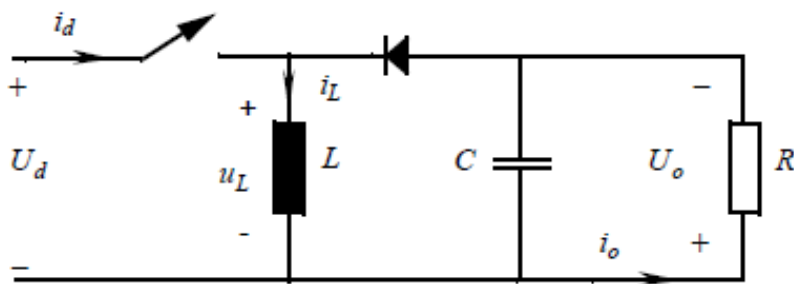
Kuva 4. Jännitettä nostavassa katkojassa syöttöpuolella oleva induktanssi muodostaa virtaläh-  
teen.

Kytkimen johtaessa induktanssin yli vaikuttaa koko syöttöjännite  $U_d$  ja lähtöä syötetään  
pelkästään kondensaattorista. Kun kytkin avataan, induktanssin virralle on kulkutie eikä

virta muuttu äkillisesti, vaikka lähtöjännite onkin suurempi kuin syöttöjännite. Induktanssin yli vaikuttaa negatiivinen jännite. [2.]

### 2.1.3 Laskeva ja nostava katkoja (Buck-Boost)

Kuvassa 5 nähdään jännitettä laskevan ja nostavan katkojan kaaviokuva, joka saadaan jännitettä laskevan katkojan ja jännitettä nostavan katkojan sarjankytkentänä.

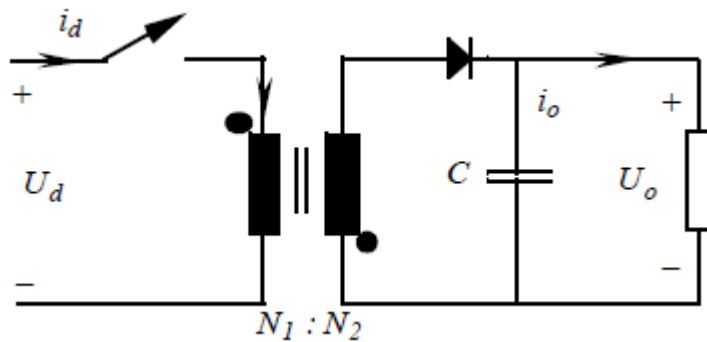


Kuva 5. Jännitettä laskeva ja nostava katkoja.

### 2.1.4 Flyback-muuttaja

Flyback-muuttaja (kuva 6) on erittäin yleisesti käytetty topologia pienitehoisissa sovel-luksissa. Galvaanisesti erotettu Flyback-hakkuri saadaan, kun jännitettä nostavan ja las-kevan katkojan induktanssi varustetaan toisiokäämityksellä. Kytkimen johtaessa muun-tajan ensiövirta kasvaa. Toisiossa pyrkii kulkemaan pisteestä ulospäin virta, joka kumo-aisi ensiövirran magnetoivan vaikutuksen. Toisiovirta ei kuitenkaan pääse kulkemaan diodin estosuunnan vuoksi. [2.]

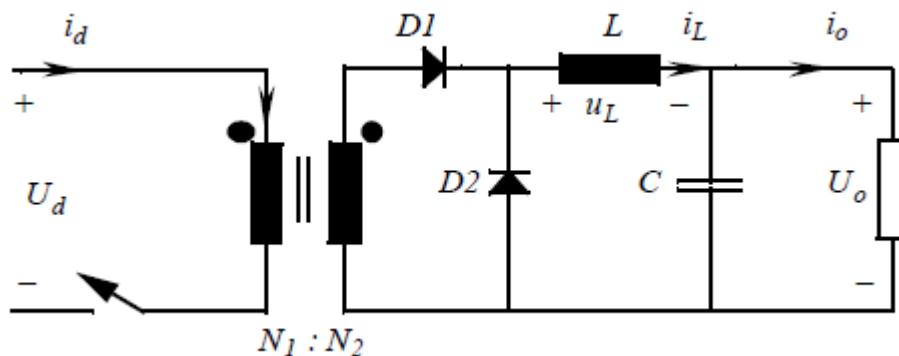
Kytkimen johtaessa magneettipiiriin varastoitunut energia kasvaa. Kun kytkin sammute-taan muuntajan toisioon indusoituu jännite, joka pyrkii pitämään vuon vakiona. Tämän seurauksena on toisiovirta pisteestä sisään, joka purkaa magneettipiiriin varattua ener-giaa lähtösuodattimeen. Usein käytetään kytkentää, jossa lähtöjännitteen polariteetti on käännetty samansuuntaiseksi tulojännitteen kanssa. [2.]



Kuva 6. Flyback-muuttaja.

### 2.1.5 Forward-muuttaja

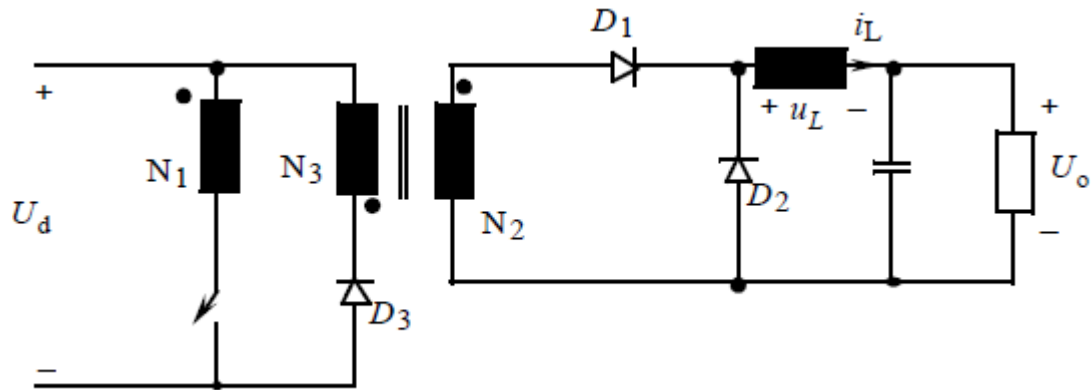
Ideaalinen Forward-muuttaja (kuva 7) saadaan, kun jännitettä laskevaan katkojaan lisätään muuntaja, jonka ensiö on sarjassa kytkimen kanssa. Jotta muuntajan toisio ei oikosulkisi lähtöjännitettä on kytkentään lisättävä diodi D1. Kun kytkin johtaa, ensiövirta kasvaa ja toisioon indusoituu jännite, joka pyrkii kumoamaan vuon muutoksen. Muuntajan käämintäsuunnan takia diodi D2 saa estojännitteen ja D1 johtaa. Induktanssin L yli vaikuttaa jännite ja sen virta kasvaa. Kun kytkin sammutetaan, kulkee kuristimen virta diodin D2 kautta. [2.]



Kuva 7. Ideaalinen Forward-muuttaja.

Käytännössä Forward-muuttajan muuntajan magnetoimisvirta on otettava huomioon. Ensiössä olevan kytkimen johtaessa muuntajan magnetoimisinduktanssin yli vaikuttaa jännite, jonka takia magneettipiiriin varastoituu energiaa. Kun kytkin avataan, virta on

nolla sekä muuntajan ensiössä että toisiossa. Tämän vuoksi tarvitaankin kolmas demagnetointikäämiä ensiöön, jonka kautta muuntajaan varastoitunut energia purkautuu syöttöjännitteeseen. Kuvassa 8 nähdään kaaviokuva käytännön Forward-muuttajasta, jossa on kolmas demagnetointikäämiö lisättyä ensiöön. [2.]



Kuva 8. Käytännön Forward-muuttaja.

### 3 Ylikuormitussuoja

Teholähteissä on normaalisti suojaus ylikuormia vastaan. Suojaus voidaan toteuttaa monella tavalla, mutta kaikkien tarkoitus on suojata teholähdettä ylikuorman kestosta ja suuruudesta riippumatta, jopa jatkuvaa oikosulkua vastaan. Parhaassa tapauksessa myös teholähteen kuorma tulee suojatuksi samalla. Täydellinen suojaus on suhteellisen kallista. Sen vuoksi pienitehoisissa ja vähemmän kriittisissä sovelluksissa suojaus on vain osittainen. Suojaus ylikuormia vastaan voidaan tehdä periaatteessa neljällä eri tavalla: tehorajoitus, lähtövirran rajoitus vakioksi, sulakesuojaus ja taipuva virtaraja.

#### 3.1 Tehorajoitus

Tehorajoitusta käytetään useimmiten ensiötehon rajoituksena. Sitä käytetään varsinkin flyback-muuttajassa ja yksilähtöisissä teholähteissä. Se suojaa pääasiassa oikosulkuja vastaan. Suojaus on toteutettu elektronisesti ja teholähde joko pysähtyy tai käynnistyy uudelleen vian poistuttua. Tehorajoitus voidaan toteuttaa seuraavaksi käsiteltävillä tavoilla. [3.]

## Ensiön ylikuorman rajoitus

Ensiötehoa mitataan jatkuvasti ja ylikuormitustilanteessa syöttötehoa rajoitetaan. Lähtövirran käyttäytymistä tehorajoituksessa ei ole yleensä määritetty. Yksinkertaisuutensa ja halpuutensa vuoksi ensiötehon rajoitusta käytetään usein ja varsinkin monilähtöisissä teholähteissä. Näissä voi esiintyä tilanne, jossa yksi lähtö kuormittuu liikaa muiden kädessä vajaakuormilla. Jos summateho on maksimitehoa pienempi, suojaus ei toimi ja yhden lähdön ylikuormitus jatkuu johtaen yllämpenemään ja mahdolliseen vikaan. Ensiö-tehon rajoitus suojaakin lähinnä lähdön oikosululta. [3.]

## Viivästetty suojaus

Viivästetty suojaus sallii lyhytaikaisen ylikuorman, jonka jälkeen teholähde sammutetaan. Hakkuriteholähteet kestävät helposti tällaisen ylikuormituksen, jossa pysyvän tilan rajat saattavat ylittyä. Pitkäaikainen ylikuorma merkitsee lähes aina vikaa, joka on syytä selvittää ennen kuin jännitteet kytketään päälle uudestaan. [3.]

## Pulssikohtainen rajoitus

Pulssikohtaisessa rajoituksessa mitataan ensiössä olevan kytkimen virta reaaliajassa. Virran oloarvon ylittäessä asetetun rajan pulssi keskeytetään, toisin sanoen kytkin sammutetaan. Aukottuvalla alueella toimivalle flybackille tämä on myös tehoraja. Nopea rajoitus suojaa tehokytkimen hyvin epänormaaleissa muutostilanteissa. [3.]

## Vakiotehorajoitus

Syöttötehon rajoitus ei aina suojaa toision komponentteja. Kuormatehon ylittäessä raja-arvon, kuormavastus pienenee ja lähtöjännite pienenee. Jos syöttöteho on rajoitettu, lähtövirta kasvaa suureksi ja aiheuttaa suuret häviöt teholähteessä. Vakiotehorajoituksen rinnalla tarvitaan esim. lähtövirran rajoitus. [3.]

### 3.2 Lähtövirran vakiovirtarajoitus

Teholähde ja sen kuorma voidaan suojata tehokkaasti rajoittamalla sen lähtövirta vakioiksi. Kuormavastuksen pienentyessä lähtövirta kasvaa jännitteen pysyessä vakiona. Vastuksen edelleen pienetessä virta rajoitetaan ja jännite pienenee. Monilähtöisessä teholähteessä virtarajoitus on tehtävä jokaiselle lähdölle erikseen. Jos kaikki lähdöt ovat maksimikuormassa on varmistettava esim. ensiötehon valvonnalla, että teholähteen kokonaisteho ei ylitä. [3.]

### 3.3 Sulakesuojaus

Sulakesuojaus on mekaaninen tai sähkömekaaninen ja toimittuaan se vaatii käyttäjältä suojan vaihdon. Sulakesuojaus tehdään kaiken varalta, jos teholähteen sähköisesti toteutetut suojaukset eivät ehdi toimimaan. Sulakkeita käytettäessä on muistettava niiden mitoitus, I<sub>2t</sub>-arvo, jonka seurauksen ylivirta voi olla lyhyen aikaa suurikin. Sulakkeilla voidaan suojata helposti esimerkiksi suurivirtaisesta jännitelähteestä otettu muutaman milliampeerin lähtö jotakin elektroniikkapiiriä varten. [3.]

### 3.4 Taipuva virtaraja

Foldback-rajoitetussa teholähteessä ylikuormitustilanteessa myös virtaraja pienenee (taipuu). Taipuva virtaraja on edullinen lineaarisissa teholähteissä. Jos lineaarisen teholähteen vikatilanteessa ja lähtöjännitteen pienentyessä lähtövirtaa ei rajoitettaisi, jäisi transistorin yli normaalia suurempi jännite, joka aiheuttaisi suuren tehohäviön. Taipuvassa virtarajassa lähtöjännitettä pienennetään, jolloin myös tehoasteen häviö pienenee.

Taipuva virtaraja toimii hyvin, jos teholähteen kuorma on lineaarinen. Jos kuorma on epälineaarinen sen jännite-virtaominaiskäyrä ei ole suora. Jännitteen pyrkiessä kasvamaan teholähde ei pysty antamaan tarvittavaa virtaa. Tämän takia hakkuriteholähteessä ei ole suositeltavaa käyttää taipuvaa virtarajaa. Se on lähinnä jääne lineaarisista teholähteistä, joissa se on suositeltava. [3.]

## 4 Sulakkeiden vertailu

### 4.1 Sulakkeet

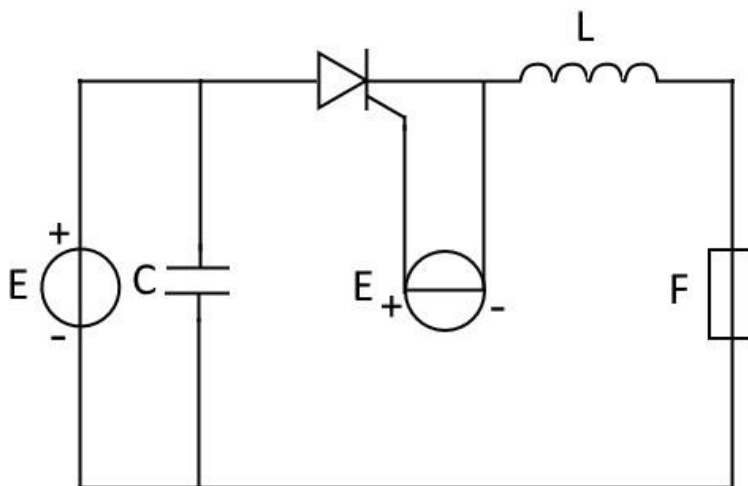
Työssä tutkittiin viiden eri valmistajan sulakkeita. Nykyisiä käytössä olevia sulakkeita oli kolmelta eri valmistajalta, joita kutsutaan työssä nimillä valmistaja A, valmistaja B, sekä valmistaja C. Vaihtoehtoisia sulakkeita oli kahdelta eri valmistajalta, joita kutsutaan työssä nimillä valmistaja D ja valmistaja E. Testattavat sulakkeet olivat nimellisvirraltaan 1 ampeeri ja 2,5 ampeeria.

Sulakkeiden valmistajien nettisivuilta haettiin jokaisen testissä käytettävän sulakkeen oikosulkuvirran katkaisukyky käyttökuunnossa, eli suurin oikosulkuvirta, jonka sulake pystyy katkaisemaan ilman, että sulakkeen kuori vaurioituu, räjähtää, tai syttyy palamaan. Suurimmalle osalle sulakkeista löytyi kuitenkin oikosulkuvirran katkaisukyky vain vaihtovirralla. Vaihtovirta on helpompi katkaista tasavirtaan verrattuna, koska virta käy välillä nollassa, jolloin valokaari sammuu. Tasavirralla valokaari saattaa jäädä palamaan pitkäksikin aikaa, jolloin sulake saattaa räjähtää tai syttyä palamaan.

### 4.2 Testausjärjestelmä

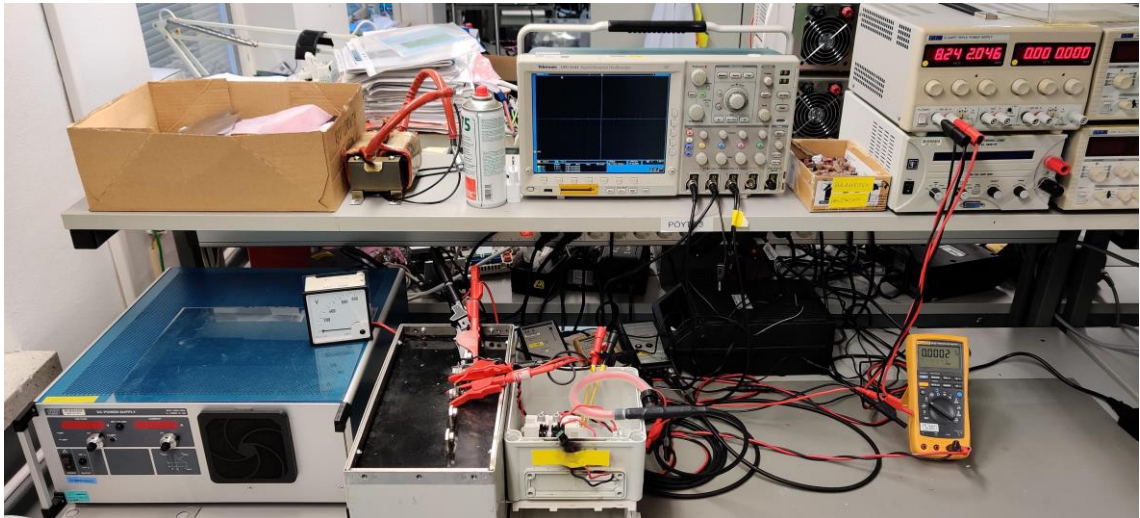
Työ aloitettiin suunnittelemalla ja toteuttamalla testausjärjestelmä, jolla voitaisiin vertailla nykyisten sulakkeiden toimintaa vaihtoehtoisin sulakkeisiin. Testausjärjestelmä toteutettiin ABB:n laboratoriotiloissa, jossa kaikki mittaukset myös suoritettiin. Testausjärjestelmästä piirrettiin kaaviokuva, joka näkyy kuvassa 9. Testausjärjestelmä oli lopulta hyvin yksinkertainen. Se sisälsi kaksi tasajännitelähdettä, kondensaattoripariston, tyristorin ja liittimen sulakkeelle. Oskilloskoopilla mitattiin jännitettä kondensaattoripariston navoista, sekä liittimelle kulkevaa virtaa. Myöhemmin kytkentään lisättiin myös lisäinduktanssia rajoittamaan virtaa.





Kuva 9. Kaaviokuva suunnitellusta testausjärjestelmästä.

Tasajännitelähteellä varattiin kondensaattoriparisto haluttuun tasajännitteeseen ja testattava sulake ruuvattiin liittimeen. Piirin kytkimenä toimi ABB:n taajuusmuuttajissa käytettävä tyristori. Tyristorille tuli ohjausjännite erillisestä jännitelähteestä. Kun tyristorille kytkettiin ohjausjännite, purkautui kondensaattoripariston varaus kuormana toimivalle sulakkeelle. Oskilloskooppi oli säädetty liipaisemaan tyristorin ohjausjännitteeseen. Mitäustuloksena saatiin kondensaattoripatterille varattu tasajännite, sekä sulakkeelle kulkeva oikosulkuvirta. Kuvassa 10 näkyy testausjärjestelmä toteutettuna ABB:n laboratoriotilassa.



Kuva 10. Kuva testausjärjestelmästä.

### 4.3 Muuttajat

Työssä tutkittiin sulakkeiden kykyä katkaista erisuuruisia oikosulkuvirtoja. Työssä päädyttiin muuttamaan kahta suuretta, joilla pystyttiin vaikuttamaan virran suuruuteen. Nämä suureet olivat jännite ja induktanssi. Jännitettä nostettiin 50 voltilla kerrallaan, alkaen 50 voltista ja päätyen 450 volttiin, joka oli ilmoitettu nimelliseksi tasajännitteeksi osalle sulakkeista. Kaikista jännitetasoista otettiin talteen mittaustulos oskilloskoopista. Kaikki sulakkeet testattiin aluksi ilman lisättyä induktanssia.

Työssä haluttiin myös tutkia induktanssin vaikutusta sulakkeiden kestävyteen sekä oikosulkuvirran suuruuteen. Kytkeäkseen lisättiin kuristin, jonka induktanssi oli 218 mikrohenryä. Kaikki sulakkeet testattiin tämän jälkeen uudestaan ja mittaustulokset otettiin talteen. Lopuksi kuristimen tilalle vaihdettiin vielä tietyn ABB:n taajuusmuuttajan tehölähteessä käytettävän muuntajan ensiö, jonka induktanssi oli 587 mikrohenryä, ja mittaukset toistettiin.

#### 4.4 Tulokset

Mittaukset aloitettiin käytössä olevien sulakevalmistajien sulakkeilla, jotta nähtäisiin niiden kyky katkaista oikosulkuvirtoja toteutetussa testausjärjestelmässä. Ensimmäiset mittaukset tehtiin 1 ampeerin sulakkeilla ja ilman kytkentään lisättyä induktanssia. Käytössä olevista 1 ampeerin sulakkeista yhdelle sulakkeelle löytyi valmistajan ilmoittama oikosulkuvirran katkaisukyky 450 voltin tasajännitteellä. Tämä sulake olikin ainoa, joka kesti kaikki jännitetasot räjähtämättä. Muille sulakkeille oli ilmoitettu oikosulkuvirran katkaisukyky vain 250 voltin vaihtojännitteellä.

Vaihtoehtoiset sulakkeet päätettiin myös testata tässä vaiheessa vertailun vuoksi. Näille sulakkeille oli ilmoitettu oikosulkuvirran katkaisukyky ainoastaan 250 voltin vaihtojännitteellä, joten oletuksena oli, että myös nämä sulakkeet räjähtäisivät testissä. Oletus osui oikeaa ja sulakkeet eivät kestäneet.

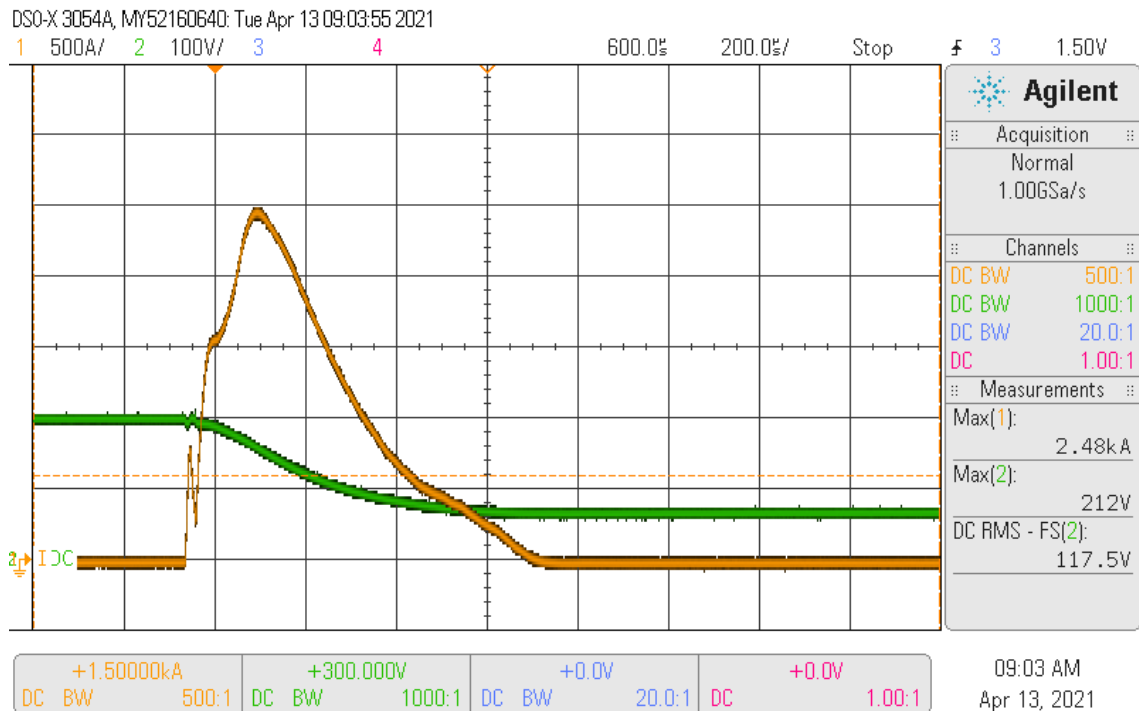
Tuloksista koostettiin taulukko, jossa oli vaakasarakkeella jännite ja pystysarakkeella sulakkeen valmistaja sekä sulakkeen nimellisvirta. Jokaisen testatun jännitteen alle merkattiin värillä, miten sulakkeen kävi. Vihreä väri tarkoitti, että sulakkeen kuori säilyi ehjänä oikosulkuvirrasta. Keltainen väri tarkoitti, että sulakkeesta tuli savua tai tulta kuoren sisästä ulkopuolelle, mutta kuori ei räjähtänyt sirpaleiksi. Punainen väri taas tarkoitti sitä, että sulakkeen kuori räjähti testissä sirpaleiksi. Jotta sulakkeen voisi hyväksyä käyttöön taajuusmuuttajan teholähteessä, tulisi sen pystyä katkaisemaan oikosulkuvirta savuttamatta ja sulakkeen kuoren tulisi säilyä ehjänä. Taulukossa 1 nähdään testatut 1 ampeerin sulakkeet.

Taulukko 1. Testatut 1 ampeerin sulakkeet.

| Ei lisättyä induktanssia | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valmistaja A, 1A         | Green | Green  | Red    |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja B, 1A         | Green | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  | Green  |
| Valmistaja C, 1A         | Green | Red    |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja D, 1A         | Green | Green  | Yellow | Red    |        |        |        |        |        |
| Valmistaja E, 1A         | Green | Yellow | Red    |        |        |        |        |        |        |

Kaikista jännitetasoista otettiin myös oikosulkuvirta oskilloskoopilla talteen. Oikosulkuvirta otettiin sekä kuvaajana, että Excel-tilukkona. Excel-tilukosta voidaan laskea

sulakkeelle I2t-arvo. Kuvassa 11 näkyy valmistaja D:n valmistaman 1 ampeerin sulakkeen oikosulkuvirta ja jännite räjähdys hetkellä.



Kuva 11. Valmistaja D:n 1 A:n sulakkeen oikosulkuvirran ja jännitteen kuvaaja räjähdys hetkellä.

Myös 2,5 ampeerin sulakkeet päätettiin testata tekemättä muutoksia testausjärjestelmään. Tällä kertaa käytössä olevia sulakkeita oli kahdelta samalta valmistajalta, kuin ensimmäisessä testissä. Näille sulakkeille molemmille oli ilmoitettu oikosulkuvirran katkaisukyky 450 voltin tasajännitteellä. Nämä sulakkeet kestivät kaikki jännitetasot. Vaihtoehtoisia sulakkeita oli myös samoilta valmistajilta kuin 1 ampeerin sulakkeissa. Näille oli annettu oikosulkuvirran katkaisukyky vain vaihtojännitteellä, joten oletus oli, että nämäkään eivät kestäisi korkeita oikosulkuvirtoja tasajännitteellä. Oletus osui jälleen keran oikeaan ja sulakkeet räjähtivät testeissä. Taulukossa 2 nähdään testatut 2,5 ampeerin sulakkeet.

Taulukko 2. Testatut 2,5 ampeerin sulakkeet.

| Ei lisättyä induktanssia | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC |
|--------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valmistaja A, 2,5A       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja B, 2,5A       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja D, 2,5A       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja E, 2,5A       |       |        |        |        |        |        |        |        |        |

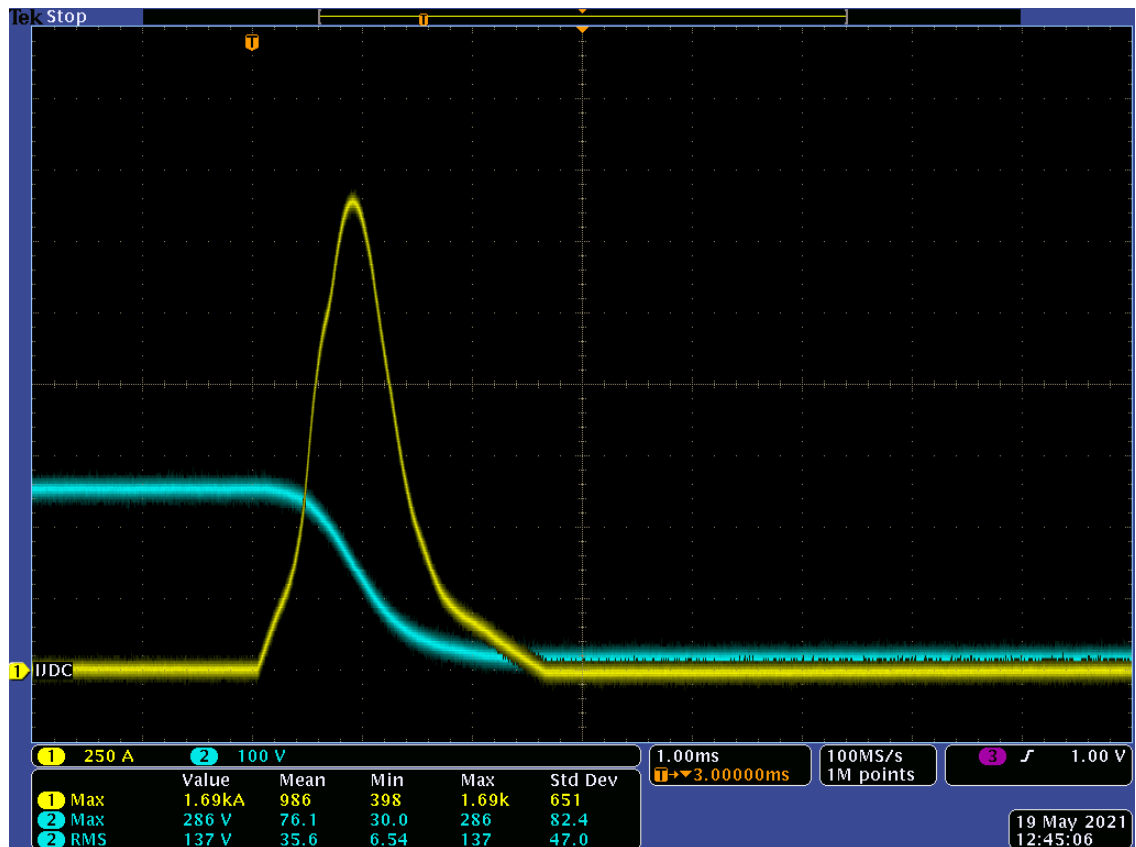
Tulokset olivat ei toivottuja, koska kaikki jo käytössä olevat sulakkeet eivät läpäisseet testiä. Testausjärjestelmä ei kuitenkaan ollut realistinen, jos sitä verrataan sulakkeiden normaaliin käyttöympäristöön. Kondensaattoripatteri oli kapasitanssiltaan huomattavasti normaalioloja suurempi ja kytkennässä ei ollut induktanssia rajoittamassa virtaa. Tämän vuoksi kytkentään päätettiin lisätä induktanssia virtaa rajoittamaan.

Kytkentään lisättiin kuristin, jonka nimellisinduktanssi oli 218 mikrohenryä ja mittaukset toistettiin kaikilla samoilla sulakkeilla. Virtaa saatiin rajoitettua, mutta sulakkeiden kestoissa ei ollut suuri muutoksia. Osalla räjähtävistä sulakkeista päästiin yksi tai kaksi jännitetasoa pidemmälle. Taulukossa 3 nähdään testatut 1 ampeerin sulakkeet kuristimen lisäyksen jälkeen.

Taulukko 3. Testatut 1 ampeerin sulakkeet kuristimen lisäyksen jälkeen.

| Kuristin 218 uH  | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valmistaja A, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja B, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja C, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja D, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja E, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |

Kuvasta 12 nähdään valmistaja D:n 1 ampeerin sulakkeen oikosulkuvirta räjähdysketkellä. Virtaa kulkee noin 0,8 kiloampeeria vähemmän, kuin ilman lisättyä induktanssia tehdyssä mittauksessa (kuva 11). Jännitteessä päästiin yhden tason verran pidemmälle, eli noin 250 volttiin. Toisaalta oikosulkuvirran kesto on pidempi kuristimen kanssa. Kuvassa 11 yhden vaakaruudun skaala on 200 mikrosekuntia, joten virtapiikin kestoksi tulee noin 800 mikrosekuntia eli 0,8 millisekuntia. Kuvassa 12 yhden vaakaruudun skaala on 1 millisekunti, joten virtapiikin kestoksi tulee noin 2,5 millisekuntia.



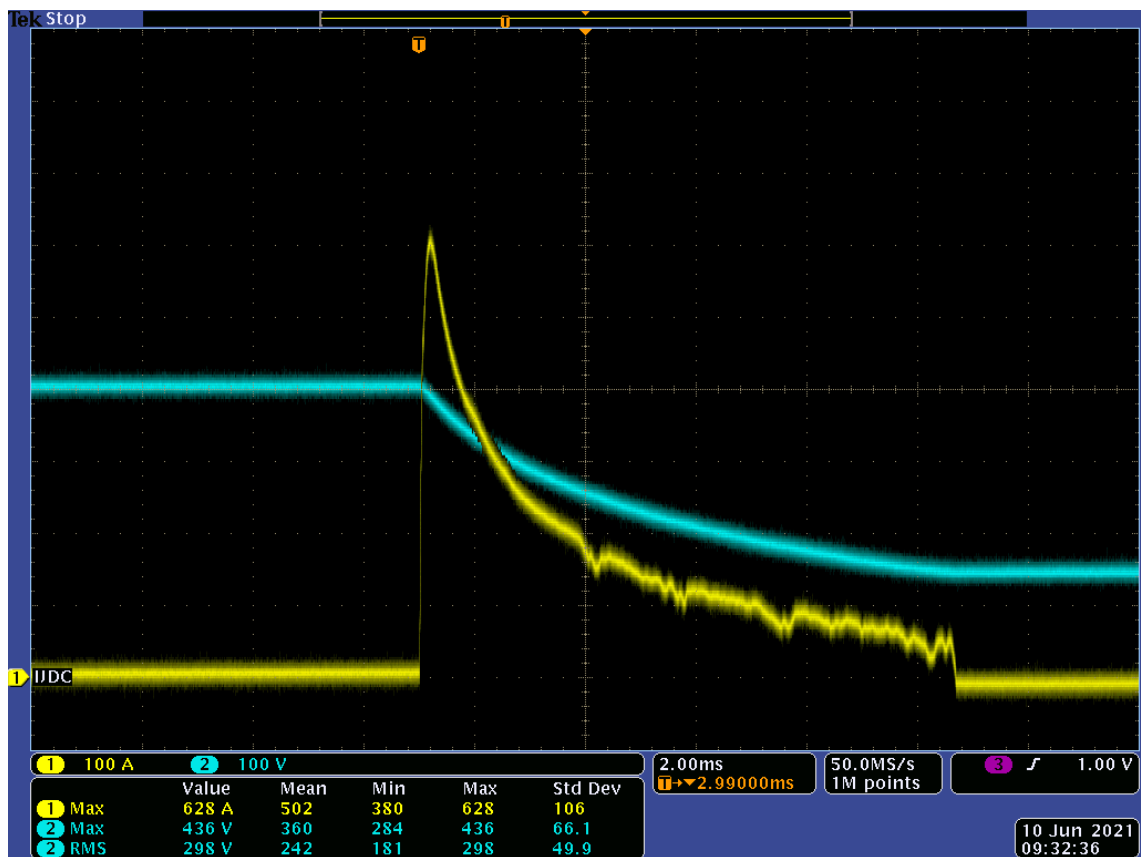
Kuva 12. Valmistaja D:n 1 A:n sulakkeen oikosulkuvirran ja jännitteen kuvaaja räjähdyshetkellä. Kytkentään on lisätty kuristin.

Koska kuristimella ei päästy vielä haluttuihin tuloksiin, päätettiin induktanssin määrää vielä kasvattaa. Kytkentään päädyttiin lisäämään muuntaja, jota oli käytössä ABB:n tietyn teholuokan taajuusmuuttajan teholähteessä. Muuntajan ensiön induktanssi oli 587 mikrohenryä. Jälleen mittaukset toistettiin kaikilla samoilla sulakkeilla. Sulakkeilla päästiin taas muutaman jännitetason pidemmälle, mutta edelleen samat sulakkeet räjähtivät. Oikosulkuvirta oli jälleen matalampi, mutta pitempi kestoinen. Taulukossa 4 nähdään testatut 1 ampeerin sulakkeet muuntajan lisäyksen jälkeen.

Taulukko 4. Testatut 1 ampeerin sulakkeet muuntajan lisäyksen jälkeen.

| Muuntaja 587 uH  | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC |
|------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Valmistaja A, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja B, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja C, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja D, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |
| Valmistaja E, 1A |       |        |        |        |        |        |        |        |        |

Kuvasta 13 nähdään jälleen valmistaja D:n 1 ampeerin sulakkeen oikosulkuvirta räjähdysketkellä. Virtaa kulkee noin kiloampeerin verran vähemmän, kuin kuristimen kanssa (kuva 12) ja melkein 2 kiloampeeria vähemmän kuin ilman lisättyä induktanssia (kuva 11). Jännitteessä päästiin 400 volttiin asti ennen räjähdystä. Oikosulkuvirran kesto kasvoi noin 10 millisekuntiin.



Kuva 13. Valmistaja D:n 1 A:n sulakkeen oikosulkuvirran ja jännitteen kuvaaja räjähdysketkellä. Kytkentään on lisätty muuntaja.

Mittaukset päätettiin tähän tämän testausjärjestelmän osalta. Sulakkeilla ei päästy toivottuun lopputulokseen, joten kilpailevien sulakevalmistajien vaihtoehtoisia sulakkeita ei voitu hyväksyä käyttöön tämän työn perusteella. Toisaalta myöskään kaikki jo käyttöön hyväksytyt sulakkeet eivät menestyneet testeissä toivotulla tavalla. Tämän vuoksi sulakkeille tullaan tekemään jatkossa lisää testejä mahdollisesti sulakkeille normaalimmassa käyttöympäristössä, kuten ABB:n taajuusmuuttajien tehölähdekorteissa, joissa sulakkeita on käytetty.

## 5 Yhteenveto

Työn tavoitteena oli selvittää ABB:lle, voiko ABB:n taajuusmuuttajien tehölähdekorttien suojauksena käytettäviä piirikorttisulakkeita korvata kahden kilpailevan valmistajan vaihtoehtoisilla sulakkeilla. Työssä suunniteltiin ja toteutettiin testausjärjestelmä, jossa voitaisiin vertailla sulakkeiden toimintaa. Sulakkeille ei ollut työn alkaessa määritetty hyväksyntäkriteereitä, joten ensin oli tutkittava nykyisten käytössä olevien sulakkeiden toimintaa toteutetussa testausjärjestelmässä. Tämän perusteella määritettiin kriteerit, jotka vaihtoehtoisten sulakkeiden tulisi täyttää.

Sulakkeita testattaessa läpäisykriteeriksi muodostui sulakkeiden kyky katkaista oikosulkuvirta käyttökunnossa. Jotta sulakkeen voisi hyväksyä käyttöön taajuusmuuttajan tehölähteessä, tulisi sen pystyä katkaisemaan oikosulkuvirta savuttamatta ja sulakkeen kuoren tulisi säilyä ehjänä. Pian kuitenkin huomattiin, että myöskään kaikki jo käyttöön hyväksytyt sulakkeet eivät täyttäneet tätä kriteeriä tässä testausjärjestelmässä.

Testausjärjestelmä ei kuitenkaan ollut realistinen, jos sitä verrataan sulakkeiden normaaliin käyttöympäristöön. Kondensaattoripatteri oli kapasitanssiltaan huomattavasti normaalioloja suurempi ja kytkennässä ei ollut induktanssia rajoittamassa virtaa. Tämän vuoksi kytkentään päätettiin lisätä induktanssia virtaa rajoittamaan. Tämä ei kuitenkaan muuttanut lopputulosta.

Sulakkeilla ei päästy toivottuun lopputulokseen, joten kilpailevien sulakevalmistajien vaihtoehtoisia sulakkeita ei voitu hyväksyä käyttöön tämän työn perusteella. Sulakkeille tullaan tekemään jatkossa lisää testejä mahdollisesti sulakkeille normaalimmassa



käyttöympäristössä, kuten ABB:n taajuusmuuttajien teholähdekorteissa, joissa sulakkeita on käytetty.

## Lähteet

- 1 Switch Mode Power Supply. Verkkoaineisto. Electronics Hub. <https://www.electronicshub.org/switch-mode-power-supply-smps/>. Luettu 21.10.2020.
- 2 Pressman, Abraham I; Billings, Keith; Morey, Taylor. 2009. Switching Power Supply Design, Third Edition. The McGraw-Hill Companies.
- 3 Billings, Keith; Morey, Taylor. 2011. Switchmode Power Supply Handbook, Third Edition. The McGraw-Hill Companies.

## Sulaketaulukko

Kaikista testatuista sulakkeista koostettiin taulukko. Vaakasarakkeella on jännite ja pys-tysarakkeella sulakkeen valmistaja sekä sulakkeen nimellisvirta. Jokaisen testatun jän-nitteen alle merkattiin värillä, miten sulakkeen kävi.

| Ei lisättyä induktanssia        | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC | Oikosulkuvirran katkaisukyky          |                           |
|---------------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------------|---------------------------|
| Valmistaja A, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          |                           |
| Valmistaja B, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 50A @ 250VAC / 300A to 5900A @ 450VDC | Kuori rikki               |
| Valmistaja C, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          | Mustunut mutta ehjä kuori |
| Valmistaja D, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 100A @ 250VAC                         | Kuori ehjä                |
| Valmistaja E, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          |                           |
| <b>Kuristin 218 uH</b>          | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC | Oikosulkuvirran katkaisukyky          |                           |
| Valmistaja A, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          |                           |
| Valmistaja B, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 50A @ 250VAC / 300A to 5900A @ 450VDC | Kuori rikki               |
| Valmistaja C, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          | Mustunut mutta ehjä kuori |
| Valmistaja D, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 100A @ 250VAC                         | Kuori ehjä                |
| Valmistaja E, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          |                           |
| <b>Muuntaja 587 uH</b>          | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC | Oikosulkuvirran katkaisukyky          |                           |
| Valmistaja A, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          |                           |
| Valmistaja B, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 50A @ 250VAC / 300A to 5900A @ 450VDC | Kuori rikki               |
| Valmistaja C, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          | Mustunut mutta ehjä kuori |
| Valmistaja D, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 100A @ 250VAC                         | Kuori ehjä                |
| Valmistaja E, 1A                |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          |                           |
| <b>Ei lisättyä induktanssia</b> | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC | Oikosulkuvirran katkaisukyky          |                           |
| Valmistaja A, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 200A @ 250VAC / 300A to 10kA @ 450VDC |                           |
| Valmistaja B, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 50A @ 250VAC / 300A to 5900A @ 450VDC | Kuori rikki               |
| Valmistaja D, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 100A @ 250VAC                         | Mustunut mutta ehjä kuori |
| Valmistaja E, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          | Kuori ehjä                |
| <b>Kuristin 218 uH</b>          | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC | Oikosulkuvirran katkaisukyky          |                           |
| Valmistaja A, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 200A @ 250VAC / 300A to 10kA @ 450VDC |                           |
| Valmistaja B, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 50A @ 250VAC / 300A to 5900A @ 450VDC | Kuori rikki               |
| Valmistaja D, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 100A @ 250VAC                         | Mustunut mutta ehjä kuori |
| Valmistaja E, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          | Kuori ehjä                |
| <b>Muuntaja 587 uH</b>          | 50VDC | 100VDC | 150VDC | 200VDC | 250VDC | 300VDC | 350VDC | 400VDC | 450VDC | Oikosulkuvirran katkaisukyky          |                           |
| Valmistaja A, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 200A @ 250VAC / 300A to 10kA @ 450VDC |                           |
| Valmistaja B, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 50A @ 250VAC / 300A to 5900A @ 450VDC | Kuori rikki               |
| Valmistaja D, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 100A @ 250VAC                         | Mustunut mutta ehjä kuori |
| Valmistaja E, 2,5A              |       |        |        |        |        |        |        |        |        | 35A @ 250VAC                          | Kuori ehjä                |