

Opinnäytetyö (YAMK)

Hajautettu energiantuotanto

2023

Petri Salmi

DC-MIKROVERKON VIKASUOJAUS

Petri Salmi

DC MIKROVERKON VIKASUOJAUS

Energiankulutuksen yhä kasvaessa ja samalla ilmastonmuutoksen pakottaessa vähentämään fossiilisilla polttoaineilla tuotettua energiaa, on tuotantoa kasvatettava ilmastoystävällisillä energialähteillä, missä uusiutuvat tuotantotavat ovat keskiössä osana nykyaikaista energiantuotantoa.

Uusiutuvan energiantuotannon ja tehoelektroniikan kehityttyä tasasähkön käyttö on nostettu esille hyvinkin varteenotettavana vaihtoehtona pienjännitteisessä jakeluverkossa. Vaikka tasasähkönjakelu lisää sähköjakelun luotettavuutta ja verkossa käytettävä tehoelektroniikka mahdollistaa sähköverkon älykkään käytön, on yhtenä haasteena näiden toteutuksille ollut sähköturvallisuuden varmistaminen erilaisissa käyttötilanteissa. Haasteista huolimatta tasasähkämikroverkoille on suuri määrä kannattavia ja myös turvallisia sovelluskohteita, niin julkisissa jakeluverkoissa kuin myös kiinteistöjen sähköistyksissä.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, mitä vaatimuksia liittyy tasasähkämikroverkon vikasuojaukseen ja mitä on huomioitava rakennettaessa määräykset täyttävää ja turvallista tasasähkämikroverkkoa. Lisäksi työssä tarkastellaan erään suunnitellun tasasähkämikroverkon vikasuojauksen toteutusta.

Tässä opinnäytetyössä on tehty soveltavaa tutkimusta, jossa teoriapohjaa on haettu lukemalla soveltuvia tutkimuksia, raportteja, määräyksiä, ohjeita ja suosituksia, joilla voitaisiin taata määräykset täyttävä ja turvallinen vikasuojaus tasasähkämikroverkolle. Työssä käydään ensin läpi tasasähkämikroverkon rakennetta ja laitteita, sitten sähköturvallisuutta, suojausmenetelmiä ja suojalaitteita. Lopuksi tarkastellaan erään suunnitellun tasasähkämikroverkon vikasuojausta.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että tasasähkämikroverkon suojaus poikkeaa vastaavasta vaihtosähköllä toteutetusta ja turvallisuus on oltava aina yksi keskeisimmistä ominaisuuksista. Tasasähköverkolla on omat erityispiirteensä verrattaessa perinteiseen vaihtosähköverkkoon. Esimerkiksi vaihtosähköverkossa, sen taajuuteen perustuvat toiminnot on toteutettava tasasähköverkossa toisin, yleensä jännitteen suuruuteen perustuen. Vaikka poikkeavuuksia on, voidaan silti soveltuvin osin hyödyntää olemassa olevia vaatimuksia ja standardeja myös tasasähköverkossa.

Tasasähkämikroverkossa perusvaatimukset vikasuojaukselle ovat kuten vaihtosähköjärjestelmiin määritetyt vaatimukset. Perusvaatimukset ovat muun muassa vikasuojauksen luotettavuus, nopeus ja selektiivisyys. Vikasuojaukseen erityispiirteitä aiheuttavat verkkoon liitetyt tuotantoyksiköt, koska ne muodostavat perinteisen yhdestä liityntäpisteestä syötettävän verkon haasteellisemmaksi kahden tai useamman teholähteen syöttämäksi järjestelmäksi. Tästä johtuen tasasähkämikroverkon suojaus on monimutkaisempaa ja erilaisia vikasuojauksen kannalta huomioitavia seikkoja on enemmän, kuin perinteisessä vaihtosähköllä toteutetussa jakeluverkossa. Suojauksen keskeiset elementit ovat ylivirtasuojaus, ali- ja ylijännitesuojaus sekä maadoitusrakenne.

ASIASANAT:

Tasasähkönjakelu, DC-mikroverkko, DC-mikroverkon vikasuojaus, hajautettu energiantuotanto.

MASTER'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Distributed energy generation

2023 | 72 pages

Petri Salmi

DC MICROGRID FAULT PROTECTION

As energy consumption continues to grow and climate change is forcing us to reduce energy produced with fossil fuels, production must be stepped up with climate-friendly energy sources in which renewable production methods are at the focus as a part of modern energy production. As a result of the development of renewable energy production and power electronics, direct current (DC) use has emerged as a highly credible alternative in a low-voltage distribution network. Although the distribution of direct current power improves the reliability of the electric supply and the network power electronics enable the smart use of the electrical network, one of the challenges arising in this context is concerned with ensuring electric safety in diverse use situations. Despite the challenges, there are many profitable and safe applications for a DC microgrid both in public distribution networks and in the electric supply of real properties.

The purpose of this study is to examine which requirements are related to the fault protection of a DC microgrid and which issues must be considered in building a safe DC microgrid meeting the technical standards. This study also investigates the implementation of fault protection in a planned DC microgrid.

The present study was carried out using an applicable research method; the theoretical basis involved reading applicable studies, reports, regulations, instructions and recommendations to ensure that the fault protection of the DC microgrid is safe and meets valid technical standards. The structure and devices of the DC microgrid are first presented and this is followed by sections on electric safety, protection measures and safety equipment. Finally, the fault protection of a specifically designed DC microgrid is examined. The results of this study show that the fault protection of a DC microgrid differs from an equivalent solution using alternating current and that safety must always be one of the key features. A direct current system has special characteristics compared to a traditional alternating current system. For example, the functions that are based on frequency in an alternating current system must be implemented in a different way in a direct current system, typically based on voltage. While there are some differences, the existing requirements and standards can also be utilised in a DC system for the applicable parts.

In a DC microgrid, the basic requirements for fault protection are similar to those defined for an AC system. The basic requirements include the reliability, speed and selectivity of the fault protection. The special characteristics of fault protection are related to the production units connected to the system, as they form a system supplied by two or more power sources, which makes for a more challenging system compared to a traditional network supplied with one access point. This makes the protection of a DC microgrid more complicated and results in a higher number of factors to consider related to fault protection compared to a traditional distribution system that utilises alternating current. The key elements of protection are overcurrent protection, low-voltage and overvoltage protection and earthing structure.

KEYWORDS:

Direct current distribution, DC-micronetwork, protection of DC-micronetwork, distributed generation.

LYHENNE JA SYMBOLILUETTELO

AC	Vaihtovirta (Alternating Current)
BESS	Energian varastointijärjestelmä (Akusto) (Battery Energy Storage System)
DC	Tasavirta (Direct Current)
DER	Hajautetut energialähteet (Distributed Energy Sources)
DERMS	Hajautetun energiantuotannon hallintajärjestelmä (Distributed Energy Resources Management System)
DG	Hajautettu tuotanto (Distributed Generation)
DR	Kulutus- ja kysyntäjousto (Demand Response)
ESS	Energian varastointijärjestelmät (Energy Storage Systems)
IFLS	Eristysvian ilmaisulaite (Insulation Fault Location System)
IM	Saarekekäyttö (Island Mode)
IMD	Eristystilan valvontalaite (Insulation Monitoring Device)
IN	Saarekeverkko (Island Network)
MC	Mikroverkon ohjaus (Microgrid Controller)
MEMS	Mikroverkon energianhallintajärjestelmä (Microgrid Energy Management systems)
MG	Mikroverkko (Microgrid)
MGCS	Mikroverkon ohjausjärjestelmä (Microgrid Control System)
MGMS	Mikroverkon hallintajärjestelmä (Microgrid Management System)
PCC	Verkkoon liittymispiste (Point of Common Coupling)
V2G	Ajoneuvosta verkkoon (Vehicle to Grid)

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	7
2 DC MIKROVERKKO	9
2.1 Tasasähkö mikroverkko	9
2.2 Verkon rakenne ja käyttötavat	11
2.3 Mikroverkon komponentit	12
2.3.1 Jakelumuuntaja	12
2.3.2 Suuntaajat	13
2.3.3 Energiavarastot	18
2.3.4 Tasajännitemuunnin	20
2.3.5 Kondensaattorit ja suodattimet	21
2.4 Jännitteenlaatu	22
2.5 Kytkeytyminen verkkoon	23
2.6 Ohjaus ja energianhallinta	23
3 SÄHKÖTURVALLISUUS JA SUOJAUSMENETELMÄT	25
3.1 Sähköturvallisuuslaki ja SFS 6000 standardisarja	25
3.2 Suojausmenetelmät	26
3.2.1 Suojaus sähköiskulta	26
3.2.2 Vikasuojaus	26
3.2.3 Maadoitus	27
3.2.4 Suojajohdin	32
3.2.5 Oikosulku- ja ylivirtasuojaus	33
3.2.6 Selektiivisyys	35
3.2.7 Maasulkusuojaus	36
3.2.8 Yli- ja alijännitesuojaus	38
3.2.9 Suojauksen sokaistuminen	38
3.2.10 Jännitetasot	40
4 SUOJALAITTEET	42
4.1 Ylikuormitussuojaus	43
4.2 Oikosulkusuojaus	44
4.3 Tasasuuntaajat ja suojausjärjestelmä	45
4.4 Sulakkeet	45

4.5 Johdonsuojakatkaisija	46
4.6 Katkaisijat ja suojarieleet	47
4.6.1 Aika- ja virtaselektiivinen suojaus	49
4.6.2 Lukitussuojaus	51
4.6.3 Suuntaselektiivinen suojaus	52
4.6.4 Differentiaalisuojaus	52
5 RESPONSE HANKKEEN VERKON SUOJAUS	53
5.1 Response hanke	53
5.2 Järjestelmän rakenne	53
5.3 Vikasuojauksen pohtiminen ja tarkastelu	55
5.3.1 Jännitetaso	57
5.3.2 Syöttö useista suunnista	57
5.3.3 Asennukset	58
5.3.4 Syötön automaattinen poiskytkentä	59
5.4 Vikatilanteiden tarkastelu	62
5.4.1 Suojauksen sokaistuminen	62
5.4.2 Oikosulku	65
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	67
LÄHTEET	69

1 JOHDANTO

Energiasektorilla voidaan sanoa olevan maailmanlaajuisestikin käynnissä hyvin suuri muutos, niin myös Suomessa. Energian kulutus on kasvussa koko ajan ja samalla ilmastomuutos pakottaa vähentämään fossiililla polttoaineilla tuotettua energiaa ja korvaamaan sitä muilla energialähteillä. Hajautetun energiantuotannon perustan luo ilmastoystävällinen kestävyys ja vähähiilisyys, missä uusiutuvat tuotantotavat ovat keskiössä osana nykyaikaista energiantuotantoa. Perinteinen yksisuuntainen sähköverkko onkin väistämättä muuttumassa älykkäämmäksi mikroverkkojen, uusiutuvan energian tuotannon ja sähköenergian varastointitekniikoiden kehittyessä.

Paikallisten sähköverkkojen ehkä suurin etu on uusiutuvan energiantuotannon ja käytön optimointi. Mikroverkot edistävät kestäväää kehitystä, esimerkiksi aurinkovoiman määrää voidaan lisätä vaarantamatta kuitenkaan jatkuvaa sähkönsaantia.

Kaikki suosituimmat uusiutuvan energianlähteet tuottavat lähes poikkeuksetta tasavirtaa joko suoraan tai muuntimien kautta. Koska näin tuotettu sähköenergia on ajoittaista, on energiaa varastoitava sähköenergiavarastoihin tasasähkönä. Kun lisäksi huomioidaan se, että hyvin suuri osa sähkölaitteista, esimerkiksi tietokoneet, puhelimet ja led-valaisimet toimivat tasasähköllä, voidaan todeta, että koska tuotanto ja suuri osa kulutuksesta on tasasähköä, eikö jakeluverkkokin olisi järkevintä toteuttaa tasasähköverkkona? Uusien teknologioiden avulla paikallinen tasavirtainfrastrukturi voi paremmin integroida uusiutuvia energialähteitä ja varastoida sähköä ja näin voidaan saada aikaiseksi myös huomattavia vähennyksiä päästöihin.

Mikroverkot mahdollistavat hyvin energiayhteisöjen muodostamisen ja tällaisia yhteisöjä voidaan pitää myös yhtenä jakamistalouden muotona. Siinä yhteisön jäsenillä on mahdollisuus jakaa sähköenergian hankinnan ja tuotannon hyötyjä keskenään. Lisäksi energiayhteisöön kuulumisen mahdollistaa myös erilaiset arvoalinnat, koska energiayhteisö antaa mahdollisuuden vaikuttaa oman sähkönkulutuksen ja -tuotannon ympäristövaikutuksiin ja myös tuotantotapaan. Energiayhteisö voi olla paikallinen energiayhteisö, kiinteistön sisäinen tai kiinteistörajat ylittävä, mutta se voi olla myös hajautettu energiayhteisö.

Mikroverkkojen markkinat ovat maailmalla kovassa kasvussa. Suomessa hallituksen asettamana tavoitteena on hiilineutraalius vuonna 2035 (VN 2019) ja siksi sääntelyä ja

myös verotusta aiotaan kehittää siten, että energian pientuotannon hyödyntäminen helpottuu. Hallitus on myös asettanut tavoitteeksi, että Suomessa olisi vuonna 2030 yli 250 000 sähkökäyttöistä autoa ja lisäksi tavoitteena on puolittaa tuontiöljyn käyttäminen sekä lopettaa kokonaan hiilen käyttäminen energiantuotannossa (HE 23/2020). Tämä kasvattaa tarvetta mikroverkoille sekä niihin liitetyille energiavarastoille. Kiistatonta on, että perinteisestä sähkönjakelusta siirrytään koko ajan enemmän kohti vähähiilistä energiantuotantoa ja älykästä sähköverkkoa. (Teknologiateollisuus 2020).

Tässä opinnäytetyössä on tarkoitus tutkia tasasähköisen mikroverkon vikasuojausta. Tasajännitemikroverkolla, jossa on energiavarastoja ja aurinkovoimaloita, on omat haasteensa vikasuojauksessa, esimerkiksi vikavirtojen suunnassa ja suuruudessa. Tässä työssä on tehty soveltavaa tutkimusta, jossa teoriapohjaa on haettu lukemalla aiheesta soveltavia tutkimuksia, raportteja, opinnäytetöitä, kirjallisuutta sekä Suomessa pienjännitesähköasennuksia ohjaavaa standardisarjaa SFS 6000, johon kaikki pienjännitesähköasennukset pohjautuvat. Työssä käydään ensin läpi mikroverkkojen rakennetta ja komponentteja. Seuraavaksi tarkastellaan sähköturvallisuutta sekä suojausmenetelmiä ja lopuksi tarkastellaan suunniteltua tasasähkömikroverkkoa ja sen suojauksen toteutusta ja tutkitaan suojauksen toimivuutta ja selektiivisyysvaatimuksia. Tavoitteena työssä on antaa vastaus kysymykseen: Mitä turvalliselta ja määräykset täyttävältä tasasähkömikroverkon vikasuojaukselta vaaditaan? Lisäksi vastataan minkälaisia eroja siinä on verrattaessa suojausta perinteiseen yhdensuuntaiseen jakeluverkkoon.

2 DC MIKROVERKKO

2.1 Tasasähkö mikroverkko

DC (Direct Current) eli tasasähkö mikroverkolla tarkoitetaan paikallista tasasähkön tuotanto- ja kulutuskeskittymää, joka normaalissa tilanteessa on yhteydessä alueelliseen sähköverkkoon tai muuhun laajempaan sähköverkköjärjestelmään, mutta kykenee toimimaan myös täysin itsenäisesti saarekkeena (Uski ym. 2018, 1). Mikroverkkoa voidaan pitää alustana, johon voidaan integroida erilaisia hajautettuja energialähteitä, energiavaroja ja joustavia kuormia, jotka ovat kytketty pienjakeluverkkoon (Bastidas-Rodríguez ym. 2016, 1). Kuvassa 1 on esitetty varsin pelkistetty kaavio yhdenlaisesta mikroverkosta.

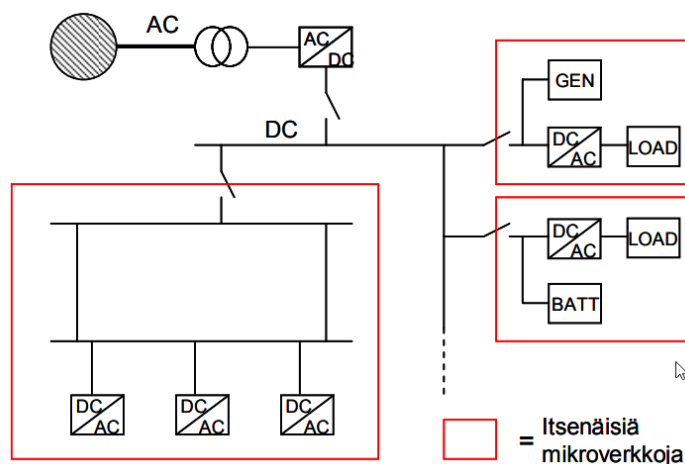
Mikroverkossa paikallisesti sähköä tuottavat ja tuotannon loppukäyttäjät, voivat käydä myös kauppaa keskenään ja keskitetysti myös mikroverkon ulkopuolen kanssa (Lehtomäki 2020, 8). Konseptina mikroverkot ovat viime vuosina levinnyt paljon uusiutuvan energian ja energiavarojen myötä uusiin käyttökohteisiin. Mikroverkot ovat herättäneet suurta kiinnostusta ympäri maailmaa, mukaan lukien Eurooppa.



Kuva 1. Yksinkertaistettu kaavio mikroverkosta

Hajautetun sähköntuotannon (Distributed generation, DG) yleistyttyä, on tullut tarve tarkastella myös kiinteistöjen jakelujännitteen käyttömahdollisuuksia uudelleen. Vaikka valtaosa verkkoinfrastruktuurista muodostuu vaihtosähkön käytöstä, on hyvinkin ajankohtaista tutkia tasasähkön käyttömahdollisuutta verkoissa myös kiinteistö tasalla.

Mikroverkkojen keskeisimpiä perusajatuksia on kasvattaa sähkönlaatua ja lisätä joustavuutta sekä luotettavuutta sähkönjakelussa (Kainulainen 2015, 28). Myös taloudelliset tekijät ja paikallisesti tuotetun energiankäytön maksimointi ovat keskeisimpiä ajatuksia. Mikäli koko alueellinen jakeluverkko voitaisiin muodostaa useista mikroverkoista, voisivat ne energiayhtiöiden jakeluverkossa ilmenevissä vikatilanteissa, toimia edelleen täysin itsenäisinä saarekkeina (Kylkisalo & Alanen 2007, 45). Kuvassa 2 on esitetty mahdollisuutta toimia itsenäisinä mikroverkkoina. Sähköntuotannosta ja -jakelusta vastaa jakeluyhtiön katkosten aikana ainoastaan mikroverkon omat energiantuotantolaitokset ja energiavarastot. Mikroverkko on mahdollista toteuttaa myös vaihtosähköverkkona, mutta silloin hajautetun tuotannon liittäminen siihen vaatisi aina tahdistamista verkon taajuu-teen, mikä tuo omat haasteensa. Tasasähköverkkossa tuotannon liittäminen on helpompaa ja se vaatii vain, että tuotantolaitosten jännitetasojen on oltava samat kuin verkon jännitetaso on. Tämän lisäksi useat mikroverkkojen toimintaan osallistuvat laitteet, esimerkiksi energiavarastot tai aurinkopaneelit, voisivat liittyä suoraan tasasähköverkkoon tietyin edellytyksin. (Kylkisalo & Alanen 2007, 14.)



Kuva 2. DC-verkon mahdollisuus toimia itsenäisinä mikroverkkoina (Kylkisalo & Alanen 2007, 47).

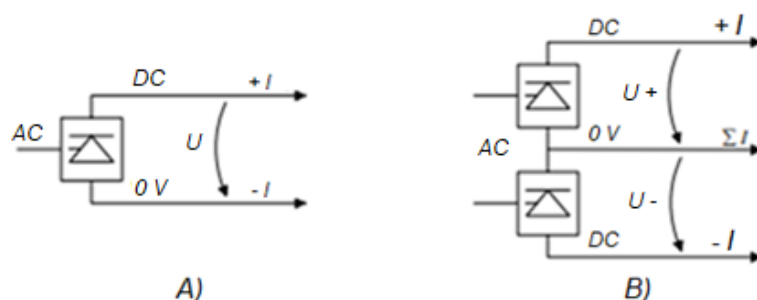
Mikroverkoille tyypillisiä haasteita aiheuttavat esimerkiksi energiantuotannon riippuvuus sääolosuhteista ja tehokas tapa varastoida energiaa sekä myös Suomen laki. Lain haasteet liittyvät pääasiassa mahdollisiin eturistiriitoihin, joita verkossa voi muodostua (Lehtomäki 2020, 19). Lisäksi tasasähkön käyttäminen tuo omat haasteensa verkon suojaukseen, erityisesti vikasuojaukseen.

2.2 Verkon rakenne ja käyttötavat

Mikroverkot ovat kantaverkkoa pienempiä hajautettuja sähköverkoja. Mikroverkot kykenevät toimimaan myös saarekkeina, eli verkkoihin on liitetty kulutuksen lisäksi energiantuotantoa sekä mahdollisesti myös energiavarastoja. Paikallinen hajautettu tuotanto ja kulutus, antavat mahdollisuuden käyttää hyvin tehokkaasti uusiutuvia energialähteitä. (Lehtomäki 2020, 8.)

Mikroverkot voivat liittyä verkkoyhtiön jakeluverkkoon muuntajan tai suuntausaseman kautta tai suoraan ilman jakelumuuntajaa. Suuntaajilla sähköenergia, joka tarvitaan, muutetaan tasasähköksi ja kyseiselle mikroverkolle sopivalle jännitetasolle. Mikroverkosta voidaan myös tarvittaessa suunnata tuotantoa vaihtosähköjakeluverkkoon vaihtosähköksi. Muuntamoiden ja suuntausasemien on siis kyettävä toimimaan kumpaankin suuntaan, eli kaksisuuntaisesti.

Tasasähköverkko on mahdollista toteuttaa kahdella toisistaan poikkeavalla verkkorakenteella, joko unipolaarisena tai bipolaarisena. Unipolaarisessa verkossa on käytettävissä ainoastaan yksi jännitetaso ja bipolaarisessa, joka on periaatteessa kuin kaksi unipolaarisesta järjestelmää, on mahdollista kytkeytyä usealla eri tavalla (Kuva 3). Kytkentä voidaan tehdä negatiivisen ja positiivisen napojen välille keskipistejohtimen kanssa tai ilman sitä. Lisäksi on mahdollista kytkeytyä keskipistejohtimen ja positiivisen tai negatiivisen navan välille. (Kesäniemi 2017, 19.) Mikäli kytkentä tapahtuu keskipisteen ja jommankumman navan välillä, aiheuttaa se epäsymmetriaa ja silloin on myös tärkeää huomioida, että myös keskipistejohtimessa kulkee virtaa (Salonen ym. 2008, 2).



Kuva 3. Unipolaarisen (A) ja bipolaarisen (B) järjestelmän kytkenät (muokattu Kaipia ym. 2007, 2 kuvasta).

Standardin SFS 6000-8-801 (2017) (esikuvastandardeina on IEC 60364 ja HD 60364) liitteen 801C mukaan pienjännitteisessä tasasähköjakelujärjestelmässä on mahdollista käyttää joko kaksijohtimista unipolaarista tai kolmijohtimista bipolaarista verkkorakennetta SFS 6000-1 kohdassa 312.1.2 esitettyjen periaatteiden mukaisesti. Kaksijohtimisen järjestelmän nimellinen käyttöjännite voi olla enintään 1500 V DC napojen välillä ja 900 V DC navan ja maan välillä. Kolmijohtimisen järjestelmän nimellinen käyttöjännite keskipisteen ja navan välillä on enintään ± 750 V DC. (SFS 6000-8-801:2017, 18.)

Saareke sähköverkossa on itsenäiseen toimintaan kykenevä jakeluverkon osa, joka sisältää hajautettuja energiasursseja (Alarinta 2021, 10.) Saarekeverkko eli mikroverkko pienentää sähköjakelun keskeytysten ja keston häiriöitä, koska saareke voi jatkaa toimintaansa saarekkeen sisällä olevien energiavarastojen ja tuotannon avulla. Toimitusvarmuutta ja luotettavuutta voidaan parantaa, kun mikroverkko voidaan irrottaa muusta verkosta esimerkiksi muualla verkossa ilmenevien vikojen tai pitkäkestoisten huoltotoimenpiteiden ajaksi. Perinteisesti saarekkeiden tahaton muodostuminen on pyritty estämään, jotta välttyttäisiin henkilöturvallisuuteen ja laitevaurioihin liittyvistä riskeistä, mutta mikroverkkojen kohdalla saarekekäyttö on yksi käyttötilanne. (Alarinta 2021, 10.) Siksi tarkoituksellisen saarekkeen toimintaan on kiinnitettävä jo suunnitteluvaiheessa erityistä huomiota.

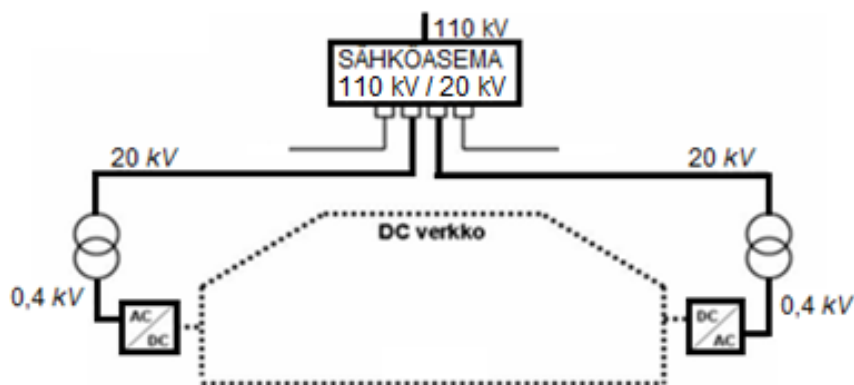
Tehotasapaino on myös hyvin tärkeä mikroverkoissa, se tarkoittaa kulutuksen ja tuotannon välistä tasapainoa. Normaalisissa tilanteissa, jolloin ollaan liityntäpisteen välityksellä kiinni kantaverkossa, ylläpitää DC-verkon tehotasapainoa liityntäpisteen tasasuuntaaja. Saarekekäytössä taas tehotasapainon ylläpidosta vastaavat tuotanto ja energiavarastot. DC-verkossa tehonsäätö perustuu aina jännitteeseen. Saarekekäytössä verkon suojauksien pitää toimia samoin kuin normaaleissakin tilanteissa ja siksi mikroverkon tuotannossa ja energiavarastoissa on oltava tuotantokapasiteettia riittävästi.

2.3 Mikroverkon komponentit

2.3.1 Jakelumuuntaja

Vaikka muuntajat eivät välttämättä ole osa mikroverkkoa, on itsenäistä tasasähköjakeluverkkoa mahdollista syöttää muuntajilla, riippuen millaiselle jännitetasolle mikroverkko kytkeytyy. Tasajänniteverkon redundanttisuuden lisäämiseksi voidaan syöttö rakentaa

kahdella eri muuntajalla verkon eri osista, ei kuitenkaan samaan aikaan. Redundanttiisuuden muodostamiseksi syöttöjen tulee olla kahden eri katkaisijan takana. Tällä ei kuitenkaan poisteta mahdollisuutta, että syötöt sijaitsisivat samalla sähköasemalla. (Kylkissalo & Alanen 2006, 48.) Kuvassa 4 on esitetty esimerkki DC-verkon syöttölinja kahdella eri lähdöllä. Muuntajan valintaan vaikuttaa tasajänniteverkossa käytettävät vaihto- ja tasasuuntaajat sekä tasajänniteverkon toteutustapa (uni- tai bipolaarinen). Kun käytetään esimerkiksi bipolaarista tasajänniteverkkoa jota tasasuunnataan tyristorisillalla, muuntajan edellytetään olevan kolmikääminen. Jos tasajänniteverkko toteutetaan unipolaarisena, muuntajaksi sopii parhaiten kaksikääminen jakelumuuntaja (Hiekka 2012, 27). Kolmikääminen jakelumuuntaja on kalliimpi kuin kaksikääminen muuntaja, mutta kolmikäämisen muuntajan käyttö mahdollistaa myös diodi- ja tyristorisillan käytön tasasuuntauksessa. Tasajänniteverkkoa suunniteltaessa täytyy ottaa huomioon myös mahdollinen energiantuotanto jakeluverkkoon päin. Kolmikäämistä jakelumuuntajaa käytettäessä on mahdollista toteuttaa tasajänniteverkko myös edullisella ja yksinkertaisella diodisillalla, mikäli kaksisuuntaista toimintoa ei tarvita. (Partanen 2010, 74.)



Kuva 4. Verkon syöttö kahdella eri jännitelähdöllä. (Kylkissalo & Alanen 2006, 48)

2.3.2 Suuntaajat

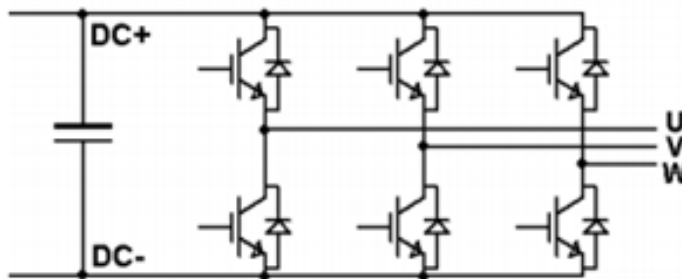
Useasti puhuttaessa suuntaajista, tarkoitetaan niillä laitteita joilla voidaan muuttaa tasajännitettä vaihtojännitteeksi tai päinvastoin (Kylkissalo & Alanen 2006, 48). Suuntaajien tyyppin valintaan vaikuttaa aina se, minkälaisia ominaisuuksia suuntaajilta kyseisessä kohteessa tarvitaan. Mikäli tarve on siirtää energiaa vain yhteen suuntaan, verkosta kuluttajalle, riittää tasa- tai vaihtosuuntaukseen yksinkertaisemmankin tyyppiset suuntaajat

(Kesäniemi 2017, 19). Mikäli verkkoon on liitetty pientuotantoa tai esimerkiksi energia-
varastoja, on suuntaajien pystyttävä siirtämään sähköenergiaa kumpaankin suuntaan
(Partanen 2010, 46).

Tasasuuntaajat ovat nimensä mukaisesti laitteita, joilla tasataan vaihtosähkö tasasäh-
köksi. Tasasuuntaajat käyttävät puolijohteita katkomaan vaihtosähkön vaihejännitteiden
huippuarvoja halutuilla ohjauksilla ja lopputuloksena saadaan halutun suuruista ta-
sajännitettä. Niiden voidaan sanoa olevan DC-verkon peruskomponentteja syötettäessä
tehoa tasasähköverkkoon. Tasasuuntaajat kootaan tehopuolijohteista, joista tärkeimpinä
diodit, tyristoritorit sekä IGBT-tehpuolijohteet (Insulated-Gate Bipolar Transistor) (Hie-
talahti 2013, 177).

DC-mikroverkkojen ja hajautetun energiantuotannon kohdalla keskeisimpiin ominaisuuks-
iin kuuluvat kaksisuuntainen sähköenergiansiirto, koska sähköä voidaan tuottaa myös
verkkoon päin. Siksi tasasuuntaajassa on yleisimmin IGBT-silta. (Partanen 2010, 46.)

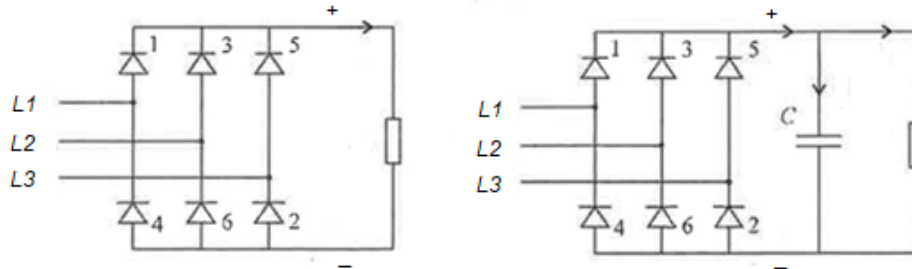
IGBT-sillalla toteutetussa ratkaisussa (ja myös tyristorisillalla) on mahdollista syöttää te-
hoa myös pois päin DC-verkosta, eli ne toimivat kumpaankin suuntaan. Tällöin puhutaan
aktiivikytkimillä toteutetuista suuntaajista (Kuva 5). Lisäksi aktiivisillalla saadaan parempi
säädettyvyys kuin yksinkertaisemmalla diodisiltasuuntaajalla (Hiekka 2012, 18).



Kuva 5. Tyypillinen kaksitasoinen suuntaajasilta. Suuntaaja koostuu kuudesta aktiivikytkimistä (yksi vaihe koostuu kahdesta IGB-transistorista) sekä niiden kanssa vastarinnan kytketyistä diodeista (Kuva: Koskenjoki 2012, 23).

Yksinkertaisimmillaan kolmivaiheinen tasasuuntaus rakentuu kolmesta eri vaiheisiin kytketyistä diodipareista. Kuvassa 6 on esitetty esimerkki kolmivaiheisesta diodisiltakytkennästä. Kytkennässä muodostuu tasajännitekiskosto, jossa positiiviseen kiskoon

kytketty diodit 1, 3 ja 5 ja negatiiviseen kiskoon diodit 4, 6 ja 2. Numerointi perustuu diodien johtamisjärjestykseen.

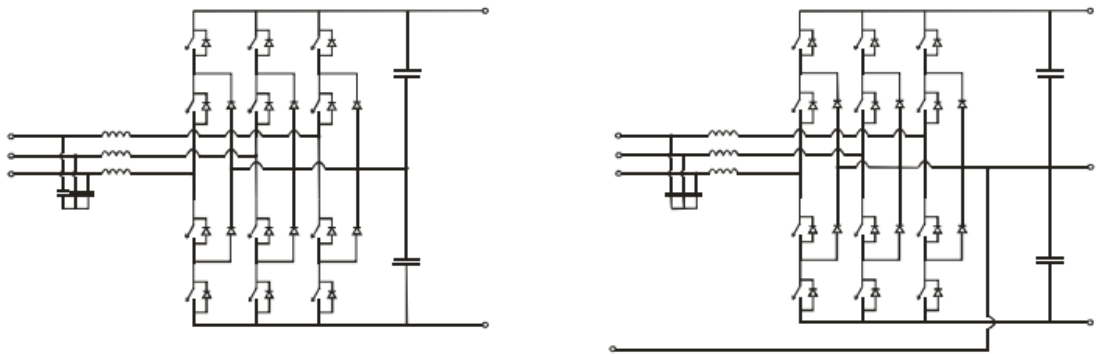


Kuva 6. Kolmivaiheinen siltakytkentä, joka perustuu diodien käyttöön. Oikeanpuoleisessa on lisäksi jännitettä tasoittava kondensaattori (Hietasaari 2013, 184.)

Vaihtosuuntaajilla on myös hyvin merkittävä tehtävä sähköverkossa ja voidaankin hyvin sanoa, että ne ovat välttämättömiä mikroverkon toiminnan kannalta. Vaihtosuuntaaja on yksinkertainen tehoelektronikan muuntaja, tai teoriassa kytkentä, jolla voidaan muuttaa tasajännite vaihtojännitteeksi ja lisäksi halutun taajuiseksi (Nieminen 2018, 2). Vaihtosuuntaajassa, eli invertterissä tehonvirtaus voi olla kaksisuuntainen, eli jännitettä on mahdollista sekä tasa- että vaihtosuunnata. (Tiittanen 2016, 3). Mikäli kyseessä on DC/AC-suuntaaja, tehon virtaussuunta on DC-verkosta AC-verkkoon, tällainen on vaihtoehto mikäli halutaan käyttää hieman edullisempaa ratkaisua, eikä tarve ole kuin vaihtosuunnata (Kylkisalo & Alanen 2006, 48). Haluttaessa DC-verkko mahdollisimman joustavaksi hajautetun energiantuotannon tarpeisiin, tulee eteenkin pääsytössä olla kaksisuuntainen invertteri.

Verkkovaihtosuuntaajan, joka on toteutettu aktiivikytkimillä, avulla tuotetun jännitteen ja virran amplitudi sekä siirrettävän tehon suuruus sekä suunta on täysin ohjattavissa. (Partanen ym. 2010, 47.) Kuvassa 7 on esitetty verkkovaihtosuuntaaja, joka koostuu kolmivaiheisena 12 aktiivikytkimestä, vastarinnan kytketyistä diodeista sekä kuudesta lukitusdiodista. Suuntaaja voi olla kolmijohtimien tai nelijohtiminen. Aktiivisen vaihtosuuntaajan käyttö on hyvin suositeltavaa, koska sillä saadaan ulostulojännite pysymään lähes vakiona, vaikka tulojännite vaihtelisikin kuormitusilanteen mukaan (Hiekka 2012, 23). Jos tasajänniteverkkoon liitetään tarpeeksi paljon hajautettua energiantuotantoa, aktiivisia

suuntaajia käyttämällä voidaan tasajänniteverkkoa käyttää myös omana saarekkeena, jolloin tasajänniteverkko ei ole riippuvainen sähkönjakeluverkosta. (Partanen 2010, 46.)



Kuva 7. Kolmitasoinen, kolmivaiheinen suuntaaja. Vasemmalla ilman nollajohdinta ja oikealla nollajohtimella. Aktiivikytkimillä toteutetun verkkovaihtosuuntaajalla tuotetun jännitteen ja virran amplitudi ja edelleen siirrettävän tehon suuruus ja suunta ovat täysin ohjattavissa. (Partanen ym. 2010, 48.)

Vaihtosuuntaajaa siis tarvitaan, kun halutaan esimerkiksi syöttää tuotettua tasasähköä vaihtosähköverkkoon. Yksinkertaisimmillaan vaihtosuuntaaja koostuu bipolaaritransistoreista, joiden kytkentäasentoa voidaan ohjata jännitteen avulla ja näiden rinnalle kytkeystä diodeista, joita on käytettävä eteenkin, mikäli estosuuntainen jännite on mahdollinen (Koskenjoki 2012, 6).

Vaihtosuuntaajan muodostamiseksi voidaan käyttää myös muitakin puolijohdekomponentteja, esimerkiksi eristehilatransistoreita (metallioksidi-puolijohdekanavatransistori), joista käytetään myös kirjainlyhennettä MOSFET, joka on lyhenne englanninkielisestä nimestä Metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (Tiittanen 2019, 3). Mosfetit omaavat suuren jännitekestoisuuden mutta häviöjännitteet ovat myös suuret ja tämä ominaisuus rajoittaa näiden käyttöä suurempitehoisissa ratkaisuissa (Taulanne 2015, 9).

Suuntaajien yhteydessä bipolaaritransistoreista käytetään usein kirjainlyhennettä IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor), joka on eristetyllä hilalla varustettu bipolaaritransistori. Ne ovat kuin sekoitus bipolaaritransistoria ja MOSFET:iä. Hyvien ominaisuuksien vuoksi sitä käytetään hyvin paljon kytkimenä ja voidaankin sanoa sen yhdistävän bipolaaritransistorin ja MOSFET:n hyvät puolet. IGBT:tä voidaan ohjata hilajännitteellä aivan

kuten MOSFET:iä ja sillä hyvin pieni johtavan tilan vastus kuten BJT:llä (Bipolar Junction Transistor) (Taulanne 2015, 9). Ne kestävät suurta virtaa ollessaan johtavassa tilassa ja myös suurta jännitettä estotilassa.

Vaihtosuuntaajia on olemassa useita erilaisia niin yksi- kuin kolmivaiheisiakin ja niitä tarvitaan monissa sovelluksissa, esimerkiksi teollisuudessa vaihtosähkömoottorien ohjaukseen, induktiolämmitykseen ja aurinkovoimaloiden tuotannon tasasähkön muuttamiseksi vaihtosähköksi vaihtosähköverkkoon (Nieminen 2018, 2). Vaihtosuuntaaja ei kykene itse tuottamaan tehoa, vaan teho saadaan muualta, esimerkiksi tasavirtalähteestä.

Vaikka vaihtosuuntaajan rakenne olisi minkäläinen tahansa, on virtaa rajoitettava oikosulkutilanteissa. Tämä siksi, että oikosulussa virta kasvaa hyvin nopeasti arvoon, jota kytkinkomponentit eivät kestä. Vaihtosuuntaajan kytkinkomponenttien ollessa IGB-transistoreita, on ylivirrankestoisuus hyvin heikko. IGBT:t kestävät tyypillisesti noin 2–3 kertaisen nimellisvirtansa suuruisen hetkelliset ylivirran (Nuutinen ym 2012, 2). Vaihtosuuntaajien syöttämä virta tuleekin aina rajoittaa kytkinkomponenttien keston mukaisesti sellaiseen arvoon, että kytkimet eivät vaurioidu. Huomioitavaa on kuitenkin, että virta on oltava kuitenkin sen suuruinen, että käytettävät suojalaitteet toimivat. Joissakin tapauksissa on kytkimien virrankestoisuutta kasvatettava oikosulkuvirran syöttökyvyn vuoksi. (Partanen ym. 2010, 67.) Nuutinen tutkimusryhmineen (2012, 2) kertovat, että korkea oikosulkuvirta saattaa aiheuttaa haasteita induktiivisille komponenteille, jotka ovat oikosulkupiirissä. Mikäli oikosulkuvirta on moninkertainen verrattuna nimellisvirtaan, voivat suodattimien kuristimet tai erotusmuuntaja ”kyllästyä” ja aiheuttaa hyvinkin korkeita virtapiikkejä muuntajan ensiöpuolelle sekä IGBT-moduuleissa. He antavat kaksi vaihtoehtoa ratkaista ongelma, suunnitella induktiiviset komponentit oikosulkuvirran mukaan tai alentaa virran arvoa, kunnes tyydyttävä suorituskyky on saavutettu. He pitävät oikosulkuvirran rajoittamista parempana ratkaisuna.

Nuutinen ym. (2009) kertoo, että vaihtosuuntaaja voi toimia kolmella tavalla oikosulkutilanteessa:

- 1) Virtaa rajoitetaan haluttuun arvoon niin pitkään, että suojalaitteena oleva virtaan perustuva erotinlaite (sulake, johdonsuoja-automaatti) toimii
- 2) Vaihtosuuntaaja katkaisee jännitteen puolijakson ajaksi, jonka jälkeen ohjattu mekaaninen erotinlaite erottaa vikaantuneen piirin ja suuntaaja käynnistyy uudelleen

- 3) Vaihtosuuntaaja syöttää rajoitettua virtaa hetken, kunnes sammuttaa itsensä ja jää niin sanotusti odottamaan käyttäjän toimenpiteitä (vian korjausta, suuntaajan nollausta)

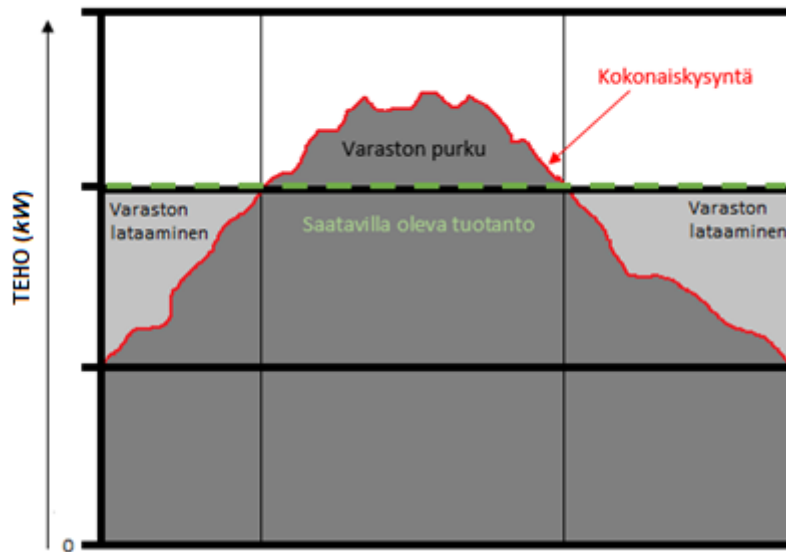
2.3.3 Energiavarastot

Energiavarastot tai energian varastointijärjestelmät (Energy storage systems, ESS ja Battery energy storage system, BESS) ovat hyvin tärkeä osa DC mikroverkkoja ja energian varastointi onkin kehittynyt viime vuosina. Mikroverkkojen kyky toimia tehokkaasti, erityisesti saarekekäytössä, edellyttää kykyä varastoida energiaa (Lehtomäki 2020, 12). Varastoilla voidaan ylituotantoa varastoida ja esimerkiksi vikatilanteissa, niillä on mahdollista turvata sähkön saanti. Energiavarstojen jännitetaso riippuu aina mikroverkon jännitetasosta ja sen on kannattavaa olla sama, jotta vältetään ylimääräisiltä DC-DC muunnoksilta, jotka aiheuttavat aina häviöitä.

Energiavarastoilla voidaan sanoa olevan hyvin tärkeä osansa mikroverkoissa erityisesti saarekekäytössä. Kun saarekkeen toimintaan osallistuu omaa tuotantoa, aurinkovoimaloita tai tuulivoimaloita, on niiden kyky vastata kysynnän muutoksiin rajallinen, johtuen niiden riippuvuudesta sääolosuhteisiin. Tällöin energiavarastot kykenevät tukemaan saarekkeen tehotasapainoa toimimalla niin sanotusti kuormana, eli varastoimalla ylimääräisen tuotannon ja lisäksi tarvittaessa syöttämään varastoitunutta sähköä takaisin verkkoon. (Alarinta 2021, 8.) Kuvassa 8 on esitetty energiavaraston toiminnan periaate.

Energiavarastot mahdollistavat myös kysyntäjouston. Sähkön kulutuksen ja tuotannon määrät eivät ole koskaan vakioita kuten edellä mainittiin ja vaihtelua muodostuu esimerkiksi vuorokaudenajasta, vuodenajoista ja myös tarjonnasta. Kysyntäjousto (Demand response, DR) tarkoittaa yksinkertaisesti toimintaa, jolla vaikutetaan sähkönkulutuksen vaihteluihin eri ajanhetkillä. Kysyntäjoustoa hyödynnetään pääasiassa sähkön kulutus-huippujen vaihteluiden tasaamiseen. (Kainulainen 2015, 29.)

Mikroverkoissa myös kysyntäjoustolla hallitaan tehotasapainoa verkossa. Saarekkeen irrotessa muusta verkosta, sen sisällä on harvoin tehotasapaino, mikäli tuotantokapasiteettia ei ole riittävästi kattamaan sen hetkistä kulutusta. Vaihtosähköverkoissa kysyntäjoustoa hyödynnetään edellä mainitun lisäksi myös taajuuden vaihtelujen tasaamiseen (Alarinta 2021, 9).



Kuva 8. Energiavaran toiminta tuotannon ja kokonaiskulutuksen mukaan. Punaisella viivalla on kokonaiskysyntä, vihreällä katkoviivalla saatavilla oleva tuotanto. Kun kysyntä ylittää saatavana olevan tuotannon, puretaan varastoista tarvittava määrä. Kysynnän taas laskiessa alle tuotannon, ladataan vastaoja.

Suunnitelmissa ja toteutuksissa tulisi tavoitella sellaisia ratkaisuja, jotka mahdollistavat tulevaisuudessa sekä paikallisesti että alueellisesti energian älykkään tuotannon ja käytön. Myös rakennusten energiatehokkuutta koskevan ympäristöministeriön asetuksen 1010/2017 32 §:ssä edellytetään, että suunnittelussa on otettava huomioon mahdollisuuksia sähkön huipputehon tarpeen pienentämiseksi ja sähkötehon ohjattavuuden parantamiseksi. Ympäristöministeriön asetuksessa 718/2020 eräiden rakennuksen teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuksista määrätään, että paikallisen sähköntuotantojärjestelmän suunnittelussa on otettava huomioon rakennuksen sähköjärjestelmän kyky sähkön varastointiin. Tämän lisäksi asetuksen mukaan paikallisessa sähköntuotantojärjestelmässä tai rakennuksen automaatio- ja ohjausjärjestelmässä on oltava tapa, jolla esitetään tieto tuotetun sähköenergian määrästä ja ohjautumisesta omaan kulutukseen, varastoon tai yleiseen sähköverkkoon, taikka jonka pohjalta tieto tästä on määritettävissä. (ST-esimerkit 13, 6.)

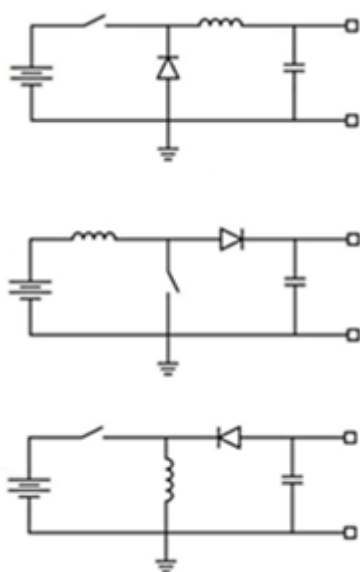
Tämän päivän tekniikkaa energian varastoinnissa edustaa V2G (Vehicle to grid). Tämä tekniikka mahdollistaa nimensä mukaisesti sähköautojen akkujen käyttämisen tasapainottamaan verkon tai kuluttajien sähköntarvetta. Tekniikalla on mahdollista siirtää verkkoon kytkettyjen autojen akuista energiaa kumpaankin suuntaan (Ensto 2016, 2).

V2G-tekniikan avulla autoista tulee siis osa energiajärjestelmää uusiutuvan energiantuotannon ja kiinteiden sähkövarastojen rinnalle. Suomen ensimmäinen kaksisuuntaiseen latausteknologiaan perustuva V2G-latauspiste otettiin käyttöön syyskuussa 2017 Helsingin Suvilahdessa (Sähköala 11/2017, 10).

Akkujen lisäksi mikroverkoissa voidaan käyttää superkondensaattoreita. Ne soveltuvat erityisen hyvin lyhyiden piikkien tasoittamiseen verkossa sovelluksiin, jossa tarvitaan nopeaa energian varastointikykyä lyhyeksi aikaa (Piirto 2011, 14). Superkondensaattorit voidaan sekä ladata että tyhjentää hyvin nopeasti, ne ovat DC -energiavarastoja, joissa energia on varastoitu sähköstaattisella periaatteella. Superkondensaattorit eivät kykene korvaamaan akkuja, mutta voivat tarjota suuren tehon akkujen tarjotessa suuren energian (Eaton 2014, 3).

2.3.4 Tasajännitemuunnin

Tasajännitemuunnin, DC/DC katkoja tai DC-DC konvertteri, toimii nimensä mukaisesti verkossa kahden erisuuruisen tasajänniteportaan välisenä liityntäraja-alueena (Kylkisalo & Alanen 2007). Sen tehtävänä on joko nostaa tai laskea sisään tulevaa jännitettä. Muunnin valitaan aina käyttökohteen mukaan joko jännitettä nostavaksi (Boost converter) tai laskevaksi (Buck converter) (Mäkitalo 2018, 14). Lisäksi on sekä jännitettä nostamaan tai laskemaan kykenevä (Back-Boost converter). Kuvassa 9 on esitetty periaatteelliset kytkennät edellä mainituille. DC mikroverkossa tasajännitemuunninta voidaan käyttää esimerkiksi energiavarastojen purkamisen ja latauksen säätöön (Hiekka 2012, 30). Mikäli DC- jakeluverkko on toteutettu IT-järjestelmänä, on kuluttaja verkko, esimerkiksi asuinrakennuksessa, hyvä toteuttaa TN-järjestelmänä sähköturvallisuuden vuoksi. Tämä onnistuu käyttämällä erottavaa DC/DC muunninta. (Rekola 2015, 39.)



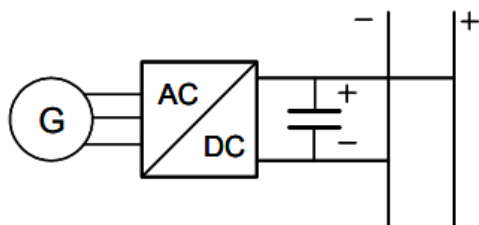
Kuva 9. Ylimpänä Buck converter, keskellä Boost converter ja alimpana Buck-Boost converter.

2.3.5 Kondensaattorit ja suodattimet

DC-verkon suodatinta käytetään suodattamaan sekä vaihto- että tasasähköverkkoon suunnattujen jännitteiden säröilyä. Suodattimella saadaan lisäksi tuotettua suuntaajien tarvitsemaa loistehoa sekä tasoitetaan jännitteiden vaihtelua. AC-puolella sillä saadaan suodatettua harmonisia yliaaltoja, joita suuntaaja syöttää verkkoon päin. DC-jakeluverkossa voidaan käyttää passiivisia sekä aktiivisia suodattimia. Yleisimpinä suodatinkomponentteina on esimerkiksi kondensaattorit. (Hiekka 2012, 28.)

Tasasuuntaajien tasasähköpuolelle voidaan kytkeä kondensaattori. Niiden on kannattavaa olla suuntaajakohtaisia, koska silloin DC-verkossa on aina riittävä määrä kondensaattoreita kytkettynä verkkoon liittyjien määrän muuttuessa. Lisäksi tasasuuntaajien tasajännitepuoli on jänniteohjattu, ja siksi verkon jännitteen tulisi olla melko stabiili. Jokainen jännitteensäätöön osallistuva suuntaajasyöttö mittaa kondensaattorin yli olevaa jännitetasoa, joka on sama kuin DC-kiskon jännite. Kondensaattoreiden tarkoituksena on suodattaa ja stabiloida häiriöitä tasasähköpuolella, mutta niistä saadaan tarvittavaa

oikosulkutehoa myös laukaisemaan suojalaite vikatilanteessa. Kondensaattorit kytetään syötön napojen väliin kuvassa 10 esitetyllä tavalla. (Kylkisalo & Alanen 2006, 51.)



Kuva 10. Suodatuskondensaattori kytketty tasajännitekiskoon (Kylkisalo & Alanen 2006, 51).

2.4 Jännitteenlaatu

Sähköverkkoyhtiöiden tehtävänä on toimittaa riittävän laadukasta sähköä asiakkaille ja tästä syystä myös hajautetusti tuotetun sähkön laadunhallinta on erittäin tärkeää. Pienten tuotantolaitosten tuotanto ei saa heikentää merkittävästi sähkönlaatua liittämiskohdassa. Tuotannon tulee täyttää vähintään sitä koskevien kansallisten ja kansainvälisten standardien laatua koskevat vaatimukset (ST-käsikirja 40 2017, 39).

Paikallisten sähköverkkoyhtiöiden määrittämät kriteerit sallituille häiriötasoille tulee huomioida aina, ja tuotantolaitosten kytkennät verkkoon tulee aina toteuttaa siten, että kytkentöjen vaikutus liittymispisteen jännitteeseen jää mahdollisimman pieneksi. Vaikutukset on mahdollista todentaa esimerkiksi tuotantolaitosten koeajojen yhteyksissä.

Vaihtosuuntaajista ulostulevan jännitteen on siis täytettävä tietyt kriteerit. Näihin kriteereihin kuuluvat esimerkiksi taajuus, jännitetason vaihtelu ja harmoninen särö (THD, Total harmonic distortion) (Hiekka 2012, 23). Näistä annetut kriteerit pohjautuvat pitkälti standardiin SFS-EN50160.

2.5 Kytkeytyminen verkkoon

Hajautetut tuotantolaitokset on varustettava sellaisilla suojalaitteilla, jotka kykenevät kytkemään tuotannon ja tuotantolaitoksen syöttämän saarekkeen, irti yleisestä verkosta mikäli verkkosyöttö katkeaa tai jännite tai taajuus laitteiston tai mikroverkon liitännäkohdassa poikkeaa sähköverkon normaaleista ilmoitetuista arvoista (ST käsikirja 40 2017, 40).

Jännitteen- ja taajuussuojauksen tarkoituksena on varmistaa se, että verkkoon ei syötetä huonolaatuista sähköä. Huonolaatuinen sähkö voi pahimmillaan rikkoa muiden verkkoa käyttävien laitteistoja. Suojauksen toinen päätarkoitus on varmistaa se, ettei syötetä sähköä verkkoon katkosten aikana aiheuttaen pahimmillaan suuria turvallisuusriskejä. Mikroverkko tai tuotantolaitos ei saa koskaan kytkeytyä verkkoon, mikäli jännite tai taajuus eivät ole sallituissa rajoissa. (ST käsikirja 40 2017, 40.)

Jotta täysin katkeamaton sähkönjakelu voidaan turvata, on mikroverkon pystyttävä tarvittaessa automaattisesti eristäytymään saarekkeeksi, ja jos mikroverkkoa ei ole suunniteltu pelkäksi saarekeverkoksi, pitää sen myös pystyä kytkeytymään takaisin suurempaan sähköverkkoon ilman katkoa. Jos saarekeverkko halutaan kytkeä suurempaan verkkoon ilman katkoa, täytyy säätöjärjestelmän kyetä ohjaamaan saarekeverkon taajuus, vaihe ja jännite vastaamaan suuremman verkon vastaavia arvoja. (Piiro 2011, 26.)

2.6 Ohjaus ja energianhallinta

Mikroverkon energianhallintajärjestelmä (MEMS, Microgrid energy management system) on yksi mikroverkon toiminnalle oleellisimpia osia. Sen tehtävä on kerätä tietoa, jota se tarvitsee toimiakseen tehokkaasti ja ohjata sen perusteella esimerkiksi energiaressursseja ja varastointilaitteita tai muita toimintoja (Aghdam & Kalantari 2020, 233). Kerättävä data voi olla myös esimerkiksi sähkön hinta ja tuleva sää. Järjestelmä voi lisäksi pyrkiä ennustamaan kysyntää sekä tuotannon tarjontaa. Hallintajärjestelmä voi ostaa energia-yhtiön verkosta energiaa edulliseen aikaan ja ladata energiavarastoihin ja taas hintojen ollessa korkeimmillaan, aloittaa käyttämään varastoja. Energianhallintajärjestelmiä on useita eri valmistajien toteuttamia, mutta toiminnan kannalta nämä ovat hyvinkin samankaltaisia. Kyseinen järjestelmä vaatii toimiakseen tietotekniikkaan sekä viestintään liittyvää tekniikkaa.

Mikroverkon hallintajärjestelmä (MGMS, Microgrid management system), ohjaa osaltaan mikroverkon toimintaa ja mahdollistaa eri komponenttien ja ohjaimien vuorovaikutuksen. Sen tarkoitus on siis ohjata mikroverkon laitteistojen toimintaa, jotta edellä mainittua energianhallintajärjestelmää voidaan käyttää hallitusti ja turvallisesti.

DC-mikroverkon ohjauksella (MC, Microgrid controller) on hyvin suuri merkitys verkon oikeanlaisessa toiminnassa. Sen pääasiallisena tarkoituksena on ohjata kuormanjakoa sekä laitteiden toimintaa mahdollisissa vikatilanteissa. Se osaa kytkeä kiinni tai tarvittaessa irrottaa mikroverkon muusta verkosta hallitusti ja myös hallita lois- ja pätötehoa. Ohjaustapoja on useita ja erona näille on, että toiset vaativat ehdottoman kommunikation suuntaajien välillä ja toisissa taas kommunikointia verkossa olevien laitteiden välillä ei ole, vaan ohjaus perustuu verkon jännitteen suuruuteen jokaisella hetkellä.

Suuntaajien välisellä tiedonsiirrolla mahdollistetaan suojausjärjestelmän toteuttaminen integroimalla suojausfunktioita osaksi suuntaajien toimintaa. Tiedonsiirtoa voidaan käyttää esimerkiksi maasulkusuojaukseen, joka käyttää tiedonsiirtoa vaihtosuuntaajaan integroidussa suunnatussa maasulkusuojassa. Suuntaajien oma suojaus muodostaa varasuojauksen varsinaisen suojausjärjestelmän virhetilanteissa (Partanen 2010, 83).

Mikroverkot ovat aktiivisia järjestelmiä ja toimivat hyvin kontrolloidusti. Toiminta perustuu eri mittaustietoihin ja toimilaitteisiin. Esimerkiksi jännite-, virta- ja tehomittauksilla voidaan saada paikallisen tilanteen kuvaamiseen tarvittava tieto useista eri kohdista sekä normaalissa- että saareketilanteessa (Kabalcı 2020, 381). Tärkeimpinä toimilaitteina mikroverkoissa ovat suuntaajat, jotka yhdistävät energialähteet, kulutuksen ja varastointilaitteet.

3 SÄHKÖTURVALLISUUS JA SUOJAUSMENETELMÄT

3.1 Sähköturvallisuuslaki ja SFS 6000 standardisarja

Sähköturvallisuutta ohjataan Suomessa sähköturvallisuuslailla. Sähköturvallisuus lain 1135/2016 tarkoituksena on varmistaa sähkölaitteen ja sähkölaitteiston käytön pitäminen aina turvallisena ja estää sähkön käytöstä aiheutuvien sähkömagneettisten häiriöiden haitalliset vaikutukset sekä turvata sähkölaitteen tai -laitteiston sähkövirran tai magneettikentän välityksellä aiheuttamasta vahingosta kärsineen oikeudet. Tämän lisäksi lain tarkoituksena on varmistaa käytettävien sähkölaitteiden vaatimustenmukaisuus. Lain 6§:n mukaan ”sähkölaitteet ja laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on lisäksi huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaan niin, että:

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;
2. niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti”.

Samaisen lain 36§:n mukaan ”kytkettäessä sähkölaitteistot yhteen, tulee varmistaa, ettei toimenpiteestä aiheudu 6§:ssä tarkoitettua vaaraa tai häiriötä. Tämän varmistamiseksi yhteen kytkettävien sähkölaitteistojen haltijoiden on annettava toisilleen riittävät sähkölaitteistonsa rakennetta koskevat tekniset tiedot”. (L 1135/2016.)

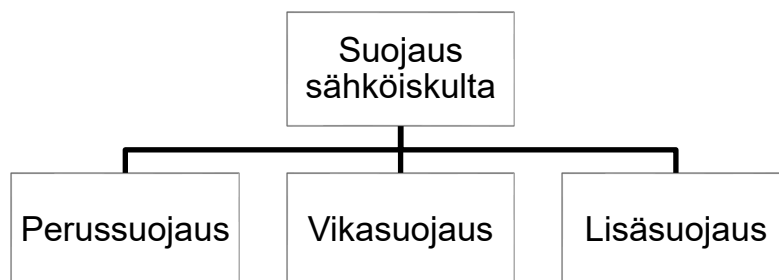
Sähkötekniisten asennusten turvallisuuteen liittyvät määräykset on annettu sähköturvallisuuslaissa ja valtioneuvoston asetuksessa sähkölaitteistoista 1434/2016. Säädöksissä on annettu perusvaatimuksia turvallisuudelle sekä periaatteet, joiden mukaan määräysten vaatimukset täyttyvät noudattamalla standardeja. Sähköturvallisuuslain 1135/2016 33§ ja 84§ mukaisesti, Turvallisuus- ja kemikaalivirasto Tukes julkaisee luettelon S10 standardeista, joita noudattamalla voidaan katsoa sähköturvallisuuslain vaatimusten täyttyvän. SFS 6000 -sarjan standardit ovat keskeisiä sähköturvallisuuslain vaatimusten noudattamisessa. SFS 6000 standardisarja koskee sähköasennuksia, joiden nimellisjännite on vaihtojännitteellä (AC) enintään 1000 V (tehollisarvo) ja tasajännitteellä (DC) enintään 1500 V ja koostuu yhteensä 39 yksittäisestä standardista, joista muodostuu yhtenäinen kokonaisuus (SFS 6000-1:2007, 5).

3.2 Suojausmenetelmät

Standardi SFS 6000-4-41 mukaan sähköasennuksissa on aina käytettävä yhtä tai useampaa suojausmenetelmää. Tämän lisäksi on huomioitava myös ulkoiset olosuhteet. Mikäli asennuksessa, sen osassa tai laitteissa on sovellettu eri suojausmenetelmiä, eivät ne saa vaikuttaa toisiinsa siten, että yhden suojausmenetelmän vika voisi heikentää toisen menetelmän tehoa. (SFS 6000-4-41.)

3.2.1 Suojaus sähköiskulta

Sähköiskulta suojaaminen vaatii perussuojauksen sekä vikasuojauksen. Perussuojauksesta käytettiin aiemmin nimitystä kosketussuojaus ja vikasuojauksesta taas nimitystä kosketusjännitesuojaus. Näiden lisäksi standardisarja SFS 6000:n osa 4–41 edellyttää käytettävän lisäsuojauksia useammassa kohtaa (kuva 11). Tässä opinnäytetyössä keskitytään vain vikasuojaukseen.

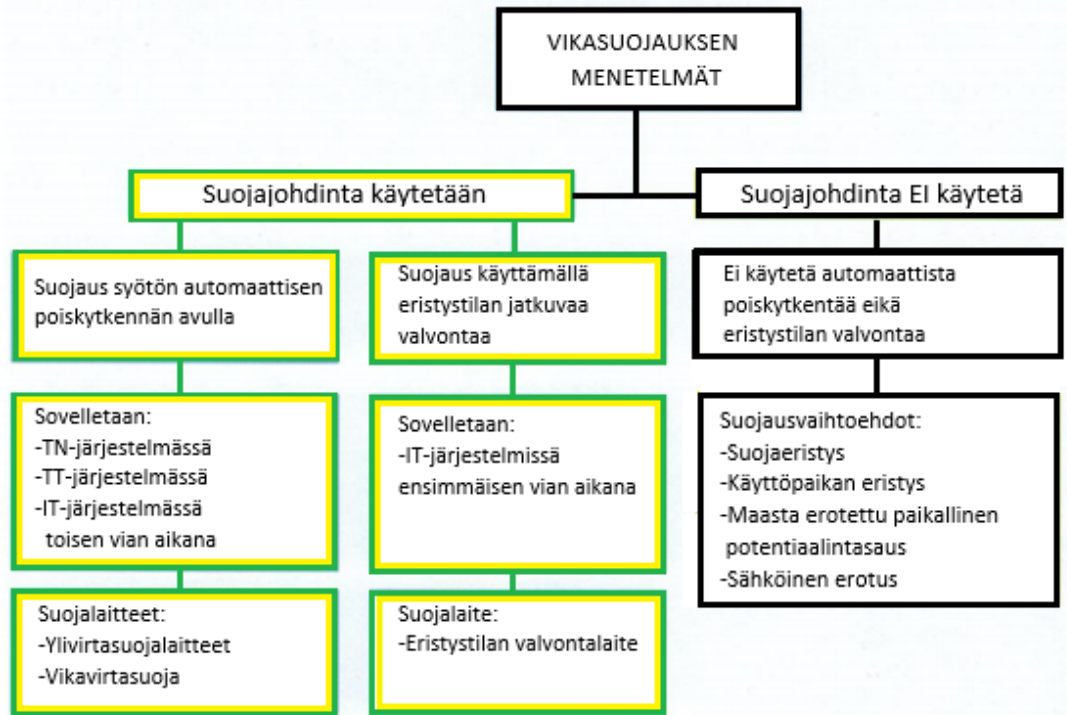


Kuva 11. Perus-, vika- ja lisäsuojaus.

3.2.2 Vikasuojaus

Vikasuojauksella (fault protection) tarkoitetaan suojausta, jonka tarkoituksena on suojata ihmisiä tai kotieläimiä koskettamasta vian vuoksi jännitteiseksi tulleita johtavia osia siten, että siitä aiheutuu vaaraa. Vikasuojauksen menetelmät voidaan luokitella seuraavasti:

Taulukko 1. Vikasuojauksen menetelmät (muokattu D1-2009, 82 taulukosta).

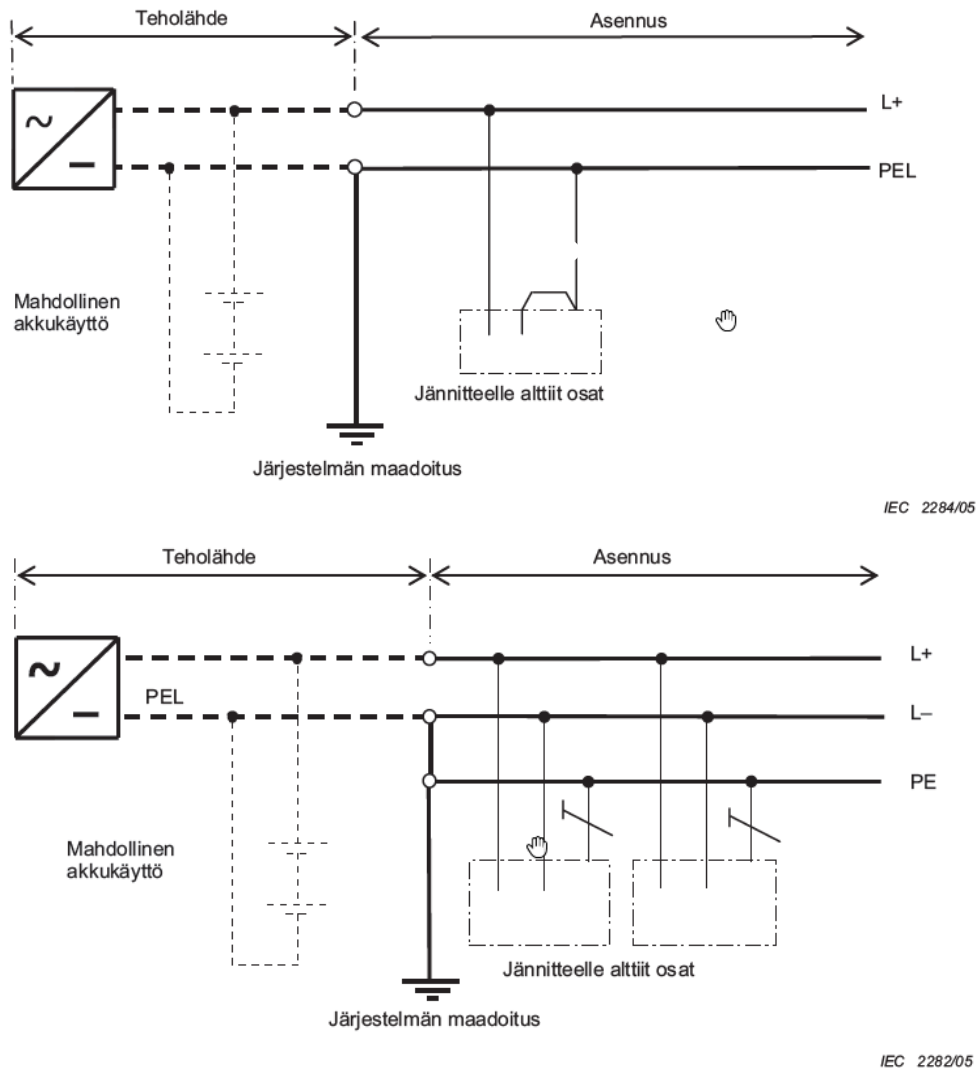


3.2.3 Maadoitus

Maadoittamisella (earthing) on hyvin keskeinen rooli järjestelmien sähköturvallisuuden takaamisessa. Se tarkoittaa virtapiirin jonkin pisteen maadoittamista, eli yhdistämistä maan potentiaaliin. (Hietalahti 2013, 30.) Sen pääasiallinen tehtävä on pienentää vika-tapauksessa ilmenevää kosketusjännitettä, eli toimia vikasuojauksena. Lisäksi maadoituksella muodostuu vikavirrälle luotettava yhteys maahan, jolloin vikatilanteissa vikapiirin virta kasvaa niin suureksi, että suojaava laite saadaan laukeamaan riittävän nopeasti. Mahdollisia maadoitustapoja on standardien mukaan maasta erotettu IT-järjestelmä tai maadoitettuna TT- tai TN-järjestelmä. Näistä TT-järjestelmä ei Suomessa käytetä. TN-järjestelmät on esitetty kuvassa 12.

Erityisesti huonoissa maadoitusolosuhteissa ja käytettäessä suurta DC jännitettä (esim. ± 750 V DC), on maasulkuvioissa maadoitusjännitteiden mahdollista kasvaa liian suuriksi

käyttömaadoitetuissa järjestelmissä (Partanen 2010, 81). Tämän vuoksi esimerkiksi LVDC (Low voltage direct current) järjestelmät rakennetaan usein IT-järjestelminä.



Kuva 12. TN-C (ylempi) ja TN-S (alempi) tasasähköjärjestelmä. Järjestelmissä voi olla PEL tai PE-johtimen lisämaadoituksia (SFS 6000-1:2017, 47).

TN-järjestelmä tarkoittaa, että yksi piste on maadoitettu ja kaikki laitteiston jännitteelle alttiit osat on yhdistetty maadoituspisteeseen suojamaadoitusjohtimella tai PEN-johtimella. Suomessa on käytössä lähes poikkeuksetta TN-S- tai TN-C-järjestelmiä rakennusten sähköasennuksissa. Standardin SFS 6000-8-801 mukaan jakeluverkoissa voidaan käyttää TN-C järjestelmää, mikäli PEN-johtimen poikkipinta on vähintään 10mm²

kuparia tai 16 mm² alumiinia (SFS 6000-8-801:2017, 6). TN-S-järjestelmän käyttö on pakollista lääkintätiloissa sekä palo- ja räjähdysalttiissa tiloissa.

TN-järjestelmä jaetaan kolmeen eri tyyppiin riippuen nolla- ja suojajohtimen järjestyksen perusteella:

- TN-S-järjestelmässä on erillinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin koko järjestelmässä.
- TN-C-järjestelmässä on yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin koko järjestelmässä.
- TN-C-S-järjestelmässä on yhdistetty nolla- ja suojamaadoitusjohdin osassa järjestelmää.

Käytetyt kirjaimet on määritetty standardin IEC 60364 mukaan:

Ensimmäinen kirjain:

T = Yksi piste on kytketty suoraan maahan (Terra)

I = Kaikki jännitteiset osat on eristetty maasta, taikka yksi piste on yhdistetty maahan impedanssin kautta (Isolated)

Toinen kirjain:

T = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty galvaanisesti suoraan maahan riippumatta maadoitustavasta

N = Jännitteelle alttiit osat on yhdistetty järjestelmän maadoitettuun pisteeseen (Neutral)

Lisäkirjaimet:

S = Erilliset nolla- ja suojamaadoitusjohtimet (Separated)

C = Yhteinen nolla- ja suojamaadoitusjohdin (Combined)

Pienjännitteisen tasasähköjärjestelmän maadoitustapana käytetään Standardin SFS 6000 mukaan IT-järjestelmää (Isolated from Terra, maasta erotettu). IT-järjestelmän käyttäminen DC-verkon osalla suositeltavampaa riippumatta siitä, onko AC-verkko toteutettu TN- vai IT-järjestelmänä (Partanen 2010, 81). Muita maadoitustapoja on mahdollista käyttää, jos se jakelujärjestelmän turvallisuudesta tai erityisolosuhteista johtuen,

on tarkoituksenmukaisempaa. (SFS 6000-8-801:2017, 19.) DC-verkon maadoittamisen toteutus on myös sidoksissa käytössä olevien suuntaajalaitteiden ominaisuuksiin.

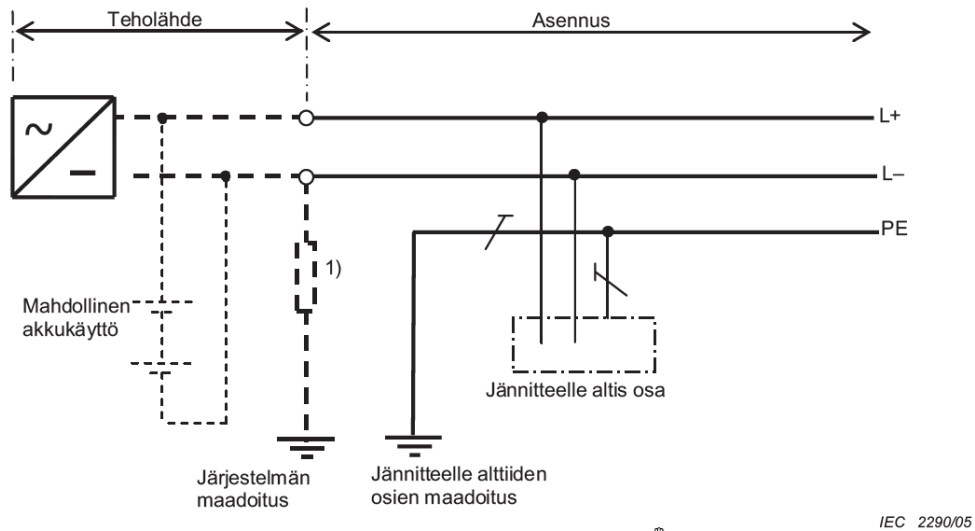
IT-järjestelmässä voidaan käyttää standardin SFS 6000-4-41 (2017, 13) mukaan seuraavia valvonta- ja suojalaitteita:

- eristystilan valvontalaitteita (IMD, Insulation monitoring devices)
- vikavirranvalvontalaitteita
- eristysvian ilmaisulaitteita (IFLS, Insulation fault location system)
- ylivirtasuojia
- vikavirtasuojia

Mikäli IT-järjestelmässä syöttöä ei kytketä pois ensimmäisen vian sattuessa, on ensimmäinen vika SFS 6000-4-41 (2017) sivun 13 mukaan ilmaista joko:

- käyttämällä eristystilan valvontalaitteita (IMD), joka voidaan yhdistää eristysvian ilmaisujärjestelmään (IFLS), tai
- käyttämällä vikavirranvalvontaa edellyttäen, että vikavirta on riittävän suuri, jotta se voidaan havaita

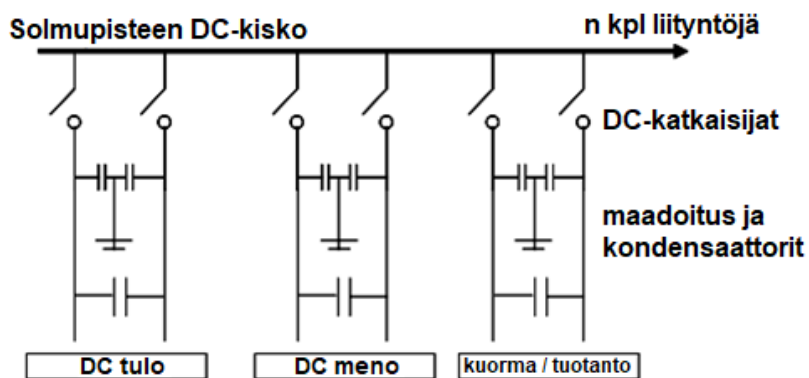
IT-järjestelmässä jännitteiset osat ovat erotettuja maasta tai yhdistetty maahan riittävän suuren impedanssin kautta (kuva 13), jolloin nollajännitteen heilahtelun aiheuttamat virrat voidaan vaimentaa hyvin tehokkaasti (Kylkisalo & Alanen 2007, 38). Standardin SFS 6000-4-41 (2017) kohdan 411.6.1 mukaan: *”Kytkeä on mahdollista tehdä joko nollapisteessä, keskipisteessä tai keinotekoisessa nollapisteessä. Keinotekoinen nollapiste voi olla kytketty suoraan maahan, mikäli kokonaisnollaimpedanssi on riittävän suuri. Mikäli tähtipistettä ei ole lainkaan, on mahdollista kytkeä äärijohdin suuren impedanssin kautta maahan”.*



Kuva 13. IT-järjestelmä, jossa suojamaadoitusjohdin on erotettu koko asennusmatkan L-äärijohtimesta (SFS 6000-1:2017, 47). Huomiona, asennuksissa voi olla lisäksi PE-johdinten lisämaadoituksia.

- 1) järjestelmä voidaan kytkeä maahan riittävän suuren impedanssin kautta.

DC-verkon solmupisteet tulisi myös maadoittaa ja yksi toteutustapa on maadoittaa ne kapasitanssin kautta. Solmupisteissä tulisi silloin käyttää kahta kondensaattoria (Kuva 14) ja niiden mitoitus tapahtuu käytettävän kaapelin ominaisuuksien perusteella. Tämä siksi, että DC-verkon keskipisteessä on kaikkein vakain potentiaali ja kaikki järjestelmän solmupisteet käyttävät sitä referenssipisteenä jännitteelle. (Kylkisalo & Alanen 2007, 38.)



Kuva 14. Solmupiste on muodostettu erillisellä DC-kiskolla. Kuvassa näkyvät suojauskondensaattoreiden käyttö maadoituksessa sekä katkaisijoiden sijoittelu (Kylkisalo & Alanen 2007, 39).

3.2.4 Suojajohdin

Järjestelmässä jokaisen suojajohtimen poikkipinnan on täytettävä standardin SFS 6000-4-41 kohdan 411.3.2 ehdot koskien automaattista poiskytkentää. Johtimien on kestävä suojalaitteen toiminta-aikana esiintyvät vikavirran aiheuttamat termiset ja myös mekaaniset rasitukset. Taulukossa 3 on pienjännitesähköasennuksia koskevan standardin edellyttämät minimipoikkipinta-alat, mikäli niitä ei ole standardin mukaisesti laskettu. Lisäksi on huomioitava, että suojajohtimille tarkoitettujen liittimien tulee aina olla tarkoitukseen sopivat. (SFS 6000-5-54:2017, 10.)

Taulukko 3. Suojajohtimien minimipoikkipinta-alat, mikäli niitä ei ole laskettu standardin SFS 6000-5-54 kohdan 543.1.2 mukaisesti. (SFS 6000-5-54, taulukko 54.2, 11.)

Äärijohtimen poikkipinta S mm ² kuparia	Vastaavan suojajohtimen minimipoikkipinta mm ² kuparia	
	Suojajohdin on samaa materiaalia kuin äärijohtin	Suojajohdin on eri materiaalia kuin äärijohtin
$S \leq 16$	S	$\frac{k_1}{k_2} \times S$
$16 < S \leq 35$	16^a	$\frac{k_1}{k_2} \times 16$
$S > 35$	$\frac{S}{2}^a$	$\frac{k_1}{k_2} \times \frac{S}{2}$

jossa
 k_1 on äärijohtimen materiaalista ja eristyksestä riippuva kertoimen k arvo, joka on esitetty taulukossa A.54.1 tai SFS 6000-4-43 taulukoissa
 k_2 on kertoimen k arvo, joka on esitetty taulukoissa A.54.2 - A.54.6.
^a PEN-johtimen poikkipinnan pienentäminen on sallittu vain noudattamalla nollajohtimen mitoituksen sääntöjä (ks. SFS 6000-5-52).

Standardin mukaan suojajohtimen poikkipinta ei saa olla pienempi kuin arvo, jonka IEC 60949 antaa tai laskemalla seuraavalla kaavalla, mikäli on mahdollista käyttää enintään 5 s poiskytkentäaikaa:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} \quad (1)$$

jossa:

S = Suojajohtimen poikkipinta (mm^2).

I = Suojalaitteen kautta kulkeva prospektiivisen vikavirran tehollisarvo (A), kun tapahtuu hyvin pieni-impedanssinen vika.

t = Suojalaitteen toiminta-aika (s).

k = kerroin, jonka arvo on riippuvainen suojajohtimen materiaalista, eristyksestä ja muusta rakenteesta sekä johtimelle sallituista alku- ja loppulämpötiloista.

Mikäli kaavalla saadaan poikkipinnalle arvo, jota ei ole käytettävän johtimen tyyppikohtaisessa standardissa, on valittava seuraava suurempi poikkipintainen standardijohdin. Lisäksi erillinen suojajohdin, joka ei ole kaapelivaipan sisällä tai äärijohtimen kanssa samassa asennusputkessa, on aina oltava poikkipinnaltaan vähintään:

- 2,5 mm^2 kuparia tai 16 mm^2 alumiinia, mikäli suojajohdin on mekaanisesti suojattu.
- 4 mm^2 kuparia tai 16 mm^2 alumiinia, jos ei ole mekaanista suojausta.

Huomiona, että teräksisen suojajohtimen käyttöä ei ole kielletty. Suojajohdin, joka ei ole kaapelia, katsotaan standardin mukaan olevan mekaanisesti suojattu, jos se on asennettu putkeen tai johtokanavaan tai suojattu vastaavalla tavalla. (SFS 6000-5-54:2017,12.)

3.2.5 Oikosulku- ja ylivirtasuojaus

Kaikki virtapiirit on aina varustettava ylikuormitussuojilla niin, että ylikuormitusvirta katkaistaan ennen kuin lämpötila nousee eristysten, jatkosten, liitosten tai johtimien kanalta liian suureksi. Johtimien osalta ylikuormitussuojauksen on täytettävä SFS 6000-4-43 (2017, 8) mukaan ehdon:

$$I_B \leq I_n \leq I_z \tag{2}$$

$$I_2 \leq 1,45 \times I_z \tag{3}$$

Joissa, I_B on piirin mitoitusvirta, I_z on johtimien jatkuva kuormitettavuus, I_n on suojalaitteen mitoitusvirta ja I_2 on virta, joka varmistaa suojalaitteen toimimisen suojalaitteelle määritellyssä tavanomaisessa toiminta-ajassa.

Oikosulkusuojauksen tehtävänä on tunnistaa vikatilanteet piirissä, nimensä mukaisesti oikosulut. Tällainen vika tapahtuu, mikäli kahden tai useamman eri jännitteisen piirin osat kytkeytyvät toisiinsa hyvin pienen resistanssin tai impedanssin kautta. Tämän kaltainen tilanne voi syntyä, mikäli esimerkiksi johtimen eriste on heikentynyt taikka piirissä syntyy ylijännite. Lisäksi virheelliset kytkennät, kytkentätoimenpiteet tai piirin mekaaniset vauriot saattavat aiheuttaa oikosulkuja. (Hietalahti 2013, 234.)

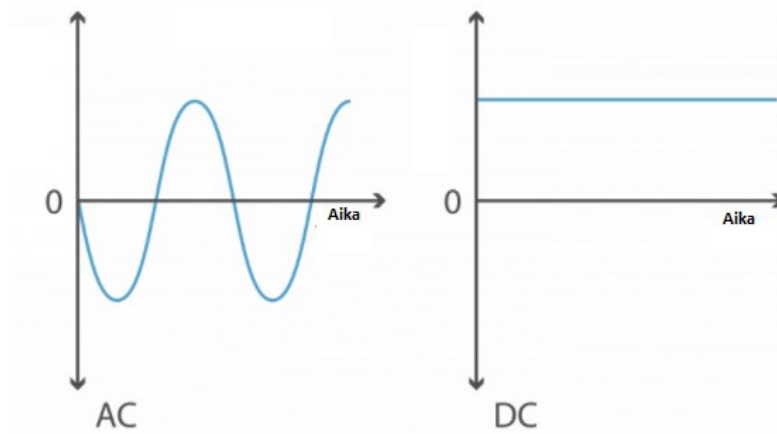
DC-verkossa erona AC-verkkoon on oikosulkuvirtojen luonne, DC-verkossa on yleensä aina kondensaattoreita tasoittamassa jännitettä ja silloin oikosulkuilanteissa on mahdollista esiintyä hyvinkin korkeita virtatransientteja, kun kondensaattorit purkautuvat (Kesäniemi 2017, 21). Lisäksi paikallisen tuotannon vaikutukset oikosulkuvirran suuruuteen ja suuntaan on tunnistettava. Oikosulku- ja ylivirtasuojaus on silti mahdollista toteuttaa myös DC-verkoissa kaupallisilla suojalaitteilla kuten katkaisijoilla ja sulakkeilla. Kumpaa-kin on saatavana DC-verkkoon soveltuvina (Kesäniemi 2017, 23). Suuntaajien yhteyteen on myös mahdollista integroida suojaustoimintoja.

Oikosulkuvirran laskeminen DC-verkossa on haastavaa. Hajautetun tuotannon vaikutus oikosulkuvirtaan ei aina ole kovin yksinkertaista. Erityisesti, mikäli DC-verkossa on paljon verkkoon liitettyä tuotantoa tasasuuntaajien kautta. Suojauksessa on ehdottomasti huomioitava tuotannon ja energiavarastojen vaikutukset kaksisuuntaiseen tehonsiirtoon ja mahdollisuudesta useasta suunnasta syötettävään oikosulkuvirtaan. Käytännössä kaapelointi on suojattava kummastakin päistä, jotta oikosulkuvirta saadaan katkaistua kaikista suunnista. Varmatoiminen suojaus saattaa tarvita myös tiedonsiirron suojalaitteiden välille, jotta suojaus toimii oikein kaikissa tilanteissa (Kesäniemi 2017, 28). Oikosulkuvirran suuruuteen vaikuttaa pääasiassa suuntaajien sekä AC-verkon ekvivalenttinen impedanssi. Tämän lisäksi sen suuruuteen vaikuttaa käytettyjen kaapelien impedanssi. (Kylkisalo & Alanen 2007, 61.) Laskennassa on aina huomioitava tilanne, jossa ollaan vain oman tuotannon tai akkujen varassa.

Kuten julkisessa pienjänniteverkossa, oikosulkuvirtojen poiskytkentäajaksi suositellaan standardin SFS 6000 mukaan pisimmillään 5 s (pääjohdot ja piirit). Oikosulkuviat erotetaan aina nopealla poiskytkennällä (Partanen ym. 2010, 49).

Koska tasajännitteellä ei ole kuten sinimuotoisella vaihtojännitteellä, luontaista nollakoh-
taa, joilla se sammuu itsestään, vaikeuttaa se jännitteen katkaisemista esimerkiksi vika-
tapauksissa. Kuvassa 15 havainnollistetaan ero, esimerkiksi 50 Hz taajuudella vaih-
tosähkössä, on joka jaksolla on kaksi nollakohtaa. Avausvälin on oltava riittävä, jotta

ilmassa kulkeva elektronivirta, eli valokaari, saadaan sammutettua (Kylkisalo & Alanen 2007, 53).



Kuva 15. Vaihto- ja tasavirran ero (Muokattu Katko 2021 kuvasta).

3.2.6 Selektiivisyys

Selektiivisyys, jolla tarkoitetaan vian rajoittamista mahdollisimman pienelle alueelle verkossa. Toisin sanoen ainoastaan lähinnä vikapaikkaa oleva suojaus toimii ja erottaa vikapaikan ja mahdollisimman pienen osan verkosta jännitteettömäksi (ABB TTT 7.4.3, 20). Tarkasteltaessa selektiivisyyttä verkkokäyttötilanteessa, ei järjestelmän toiminnasta saada riittävästi tietoa. Verkkokäyttötilanteessa sähköiset arvot ovat lähtökohtaisesti aina paremmat kuin ne ovat akkukäyttötilanteessa. Tämän vuoksi verkon selektiivisyyttä tulee tarkastella aina akkukäyttötilanteessa, jolloin verkon selektiivisyydestä kyetään tekemään oikeita johtopäätöksiä. Oikosulkuvirta, joka aiheuttaa automaattisen poiskytkennän määrätysajassa, suuruus on todennäköisesti pienempi akkukäyttötilanteessa kuin verkkokäyttötilanteessa. Selektiivisyyden tarkastelu on siis hyvin tärkeä toimenpide.

Oikosulkuvirrat ovat yksi tärkeimmistä tiedoista, joita tarvitaan, kun tarkastellaan selektiivisyyttä. Oikosulkuvirrat, joita verkossa esiintyy vikatilanteissa, vaikuttavat suoraan valittujen suojiin tyyppiin ja siten myös koko suojauksen selektiivisyyteen (Mäntylä 2018, 4). Myös määritettäessä verkon johtimien poikkipinta-aloja, on se tehtävä oikosulku- ja maasulkuvirtojen todennäköisesti aiheuttamien rasitusten mukaisesti.

3.2.7 Maasulkusuojaus

Maasulku tarkoittaa käyttömaadoittamattoman virtajohtimen ja maan tai maahan johtavassa yhteydessä olevan osan väliseksi eristysviaksi (ABB TTT 8.1, 1.)

Mikäli verkko on käyttömaadoitettu, on maasulku yksivaiheisen oikosulun kaltainen ja vikavirran suuruus on mahdollista laskea. Laskemisen edellytyksenä kuitenkin on, että tunnetaan verkon impedanssit, kuten AC-verkon oikosulkuvirtojen laskennassa. Oikosulkusuojaajat toimivat verkossa tällöin myös maasulussa, mikäli vikaresistanssi maasulun kohdassa ei ole liian suuri (ABB TTT 8.1, 1). Käyttömaadoitetussa TN-järjestelmässä standardi SFS 6000-4-41 (2017, 9) edellyttää ensimmäisen vian poiskytkentäajaksi 0,4 s ($DC\ 230\ V < U_0 \leq 400\ V$).

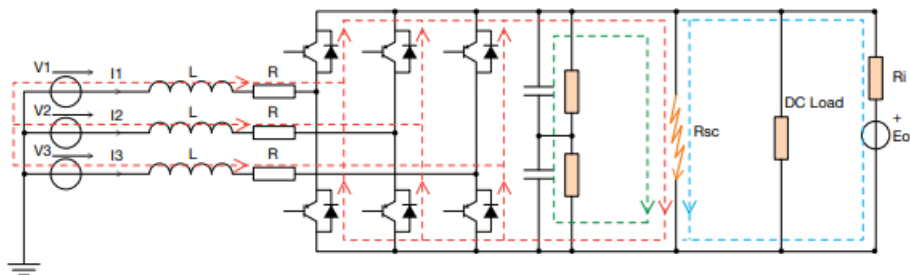
Maasulkusuojaus toteutetaan yleensä DC-verkossa eristystason valvonnalla. Tämä soveltuu erityisen hyvin IT-järjestelmänä toteutettuihin järjestelmien maasulkusuojaamiseen, vaikka standardointi antaa muitakin mahdollisuuksia tietyin rajoituksin. Esimerkiksi Lappeenrannan yliopistossa on laboratorioprototyypin avulla testattu (Salonen ym. 2009), että DC-verkon eristystason valvonnan olevan hyvin toimiva menetelmä maasulkusuojaukseen DC-verkoissa (Partanen ym. 2010, 84). Maasulkusuojauksen toteutus on kuitenkin aina riippuvainen käytettävästä maadoitusjärjestelmästä.

Mikäli DC-jakeluverkossa tai sen osassa käytetään IT-järjestelmää, on mahdollista siis jatkaa järjestelmän käyttöä ensimmäisen maasulkuvian ilmetessä. Edellytyksenä on kuitenkin, että SFS 6000-4-41 kohdan 411.6 ehdot täyttyvät ja lisäksi viasta tulee hälytystieto jakeluverkon haltijalle. (SFS 6000-8-801, liite 801C.411.6, 19.) Tämä siksi, ettei viikatilanne muodosta oikosulkuja. Toinen samanaikainen vika aiheuttaa oikosulun, jonka poistamisessa on noudatettava maadoitetun järjestelmän poiskytkentäaikoja ja siksi sallittu poiskytkentäaika on myös 0,4 s (Partanen ym. 2010, 68). Huomioitavaa on lisäksi, että IT-järjestelmässäkin tulee jännitteelle alttiit osat suojamaadoittaa kuten TN-järjestelmässäkin ja yhdistää liittyvän TN-järjestelmän maadoituksiin (SFS 6000-4-41:2017, 12).

SFS 6000-8-801 (2017) liitteen 801 C mukaan verkon käyttämistä maasulkutilanteessa on mahdollista jatkaa, yleensä enintään 2 h ajan, mikäli maasulku ei aiheuta ihmisille tai omaisuudelle välitöntä vaaraa tai merkittävää häiriötä muille verkon laitteille. Verkon käyttöä on mahdollista jatkaa pidempään, jos vian sijainti on paikannettu ja on varmistettu siitä, ettei se aiheuta vaaraa.

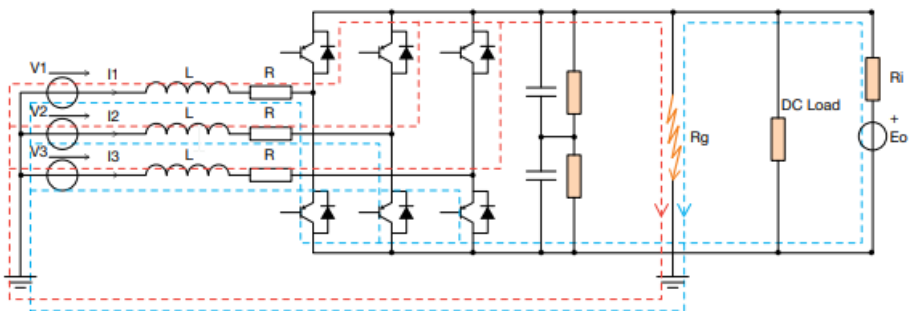
Suunniteltaessa DC-mikroverkkoa, on tärkeää selvittää, kykeneekö suuntaaja rajoittamaan maa- tai oikosulkuvian aiheuttamaa virtaa mikroverkossa. Nykyaikaisilla suuntaajilla tulee olla ominaisuudet AC- ja DC-puolien ylijännitesuojaukseen, ylikuormitukseen sekä DC-puolen oikosulkusuojaukseen eikä siten ulkopuolisia suojakomponentteja välttämättä tarvita.

Kuvassa 20 on esitetty tilanne, jossa DC-puolella ilmenee vika. Verkosta tuleva vikavirta pääsee vapaasti kulkemaan diodien kautta ilman, että IGBT:t kykenevät rajoittamaan sitä.



Kuva 20. DC-oikosulkuvirran komponentit (ABB Fault protection of LVDC microgrids).

Kuvassa 21 esitetään tilanne, jossa DC-puolella tapahtuu maavuoto verkossa, jossa on muuntajan neutraali puoli maadoitettu ja DC-puolella positiivinen napa. Maavian tapahtuessa, ei muunnin välttämättä kykene rajoittamaan verkosta tulevaa vikavirtaa, vaikka IGBT:t kyettäisiinkin kytkemään johtamattomaan tilaan.



Kuva 21. Maasulun virtareitti mikroverkossa, jossa on maadoitettu DC-puolella plusnapa ja AC-puolella muuntajan neutraalipiste (ABB Fault protection of LVDC microgrids, 4).

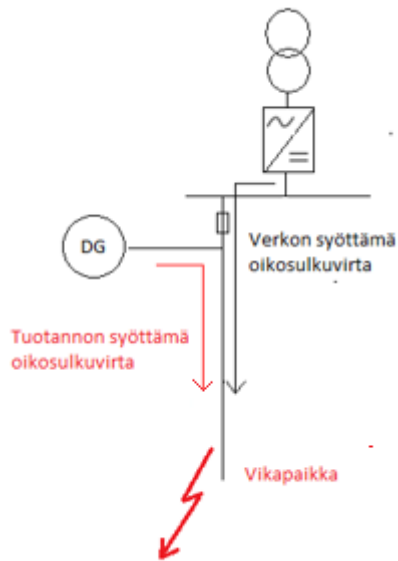
Mahdollisten vikatilanteiden sekä suojalaitteiden perusteellinen tutkiminen suunnittelu- vaiheessa on hyvin tärkeää, jotta voidaan taata verkon ja sen käyttäjien turvallisuus. Yhtenä ratkaisuna yllä oleviin haasteisiin voidaan pitää AC-puolelle asennettavia katkaisijoita.

3.2.8 Yli- ja alijännitesuojaus

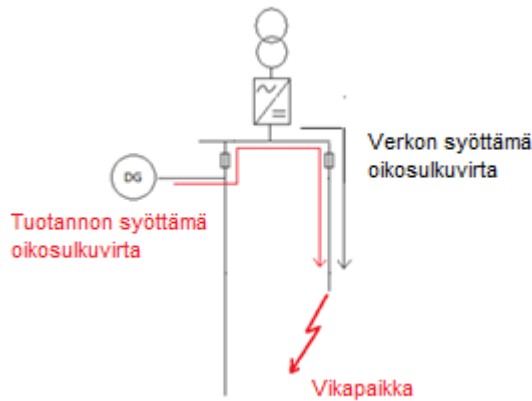
Koska mikroverkko on tarkoitettu toimimaan yleisen jakeluverkon rinnalla, on huolehdittava siitä, ettei se aiheuta häiriöitä jakeluverkkoon eikä muihin sähköasennuksiin. Ali- ja ylijännitteelle on sekä yleiset, että maakohtaiset rajat ja laukaisuaikavaatimukset standardissa SFS-EN 50438. Yleinen vaatimus on, että laukaisua ei sallita, kun liitoskohdan jännite on vähintään 85 % ja enintään 110 % nimellisestä. 230 V järjestelmässä tämä tarkoittaa jännitealuetta 195– 253 V. Yleisenä vaatimuksena alijännitekatkaisulle on jännitteen laskiessa alle 85 %:n laukaisu 1,5 s aikana. Ylijännitteelle on kaksi laukaisuporasta. Jännitteen 10 min keskiarvon ollessa yli 110 % laukaisun on tapahduttava 3 s aikana ja hetkellisellä yli 115 % jännitteellä 0,2 s aikana. Maakohtaiset vaatimukset vaihtelevat laajasti kuten myös saarekekäytönestossa. Suomessa vaatimuksena on laukaisu 0,2 s aikana, kun jännite on alle 85 % tai yli 110 % nimellisestä. (SFS-EN 50438; Fingrid, 2013)

3.2.9 Suojauksen sokaistuminen

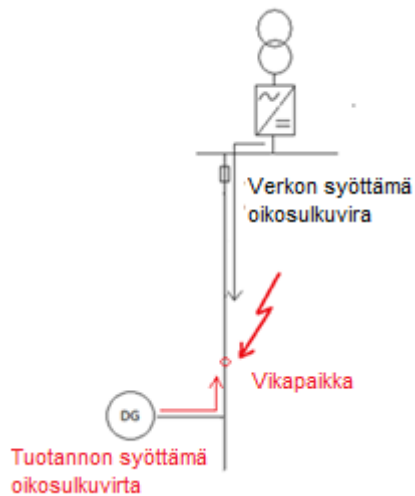
Suojauksen sokaistuminen on ilmiö, jossa verkossa oleva tuotantolaitos syöttää vikavirtaa myös siten, että se pienentää sulakkeiden havaitsemaa vikavirtaa. Tämä voi johtaa vaaratilanteisiin. Todennäköisimpiä kohteita tällaisille ongelmille on verkot, joissa tuotanto ja vika ovat hyvin lähellä toisiaan tai sitten kohteet, joissa tuotanto syöttää runko-kaapelointia sivusta (kuva 17). Sokaistuminen on todennäköisempää mitä pidemmällä verkossa ollaan ja mitä suurempaa on tuotantolaitoksen kyky syöttää sitä (kuva 18). (Lehto 2009, 49). Kuvassa 19 on esitetty tilanne, jossa tuotantolaitos jää verkkosyötön ja vikapaikan väliin. Pääsääntöisesti yksi tuotantolaitos ei vielä useinkaan aiheuta suojauksen sokaistumista, mutta ongelma varmasti nousee esille, mikäli hajautettua tuotantoa on paljon kulutukseen nähden (Lehto 2009, 50). Huomionarvoista on myös, että hajautettu tuotanto saattaa hidastaa syöttävän verkon suojauksen toimintaa (Lehto 2009, 48).



Kuva 17. Tuotantolaitos syöttää vikavirtaa sivusta ja pienentää siten lähdön alussa olevan sulakesuojauksen läpi menevää vikavirtaa (Muokattu Lehto 2009, 49 kuvasta).



Kuva 18. Toisessa lähdössä tapahtuu vika ja tuotantolaitos syöttää suurta osaa vikavirrasta verrattuna suuntaajaan. Tällöin voi vikavirta polttaa ensin laitoksen lähdössä olevan sulakkeen, mikäli se on pienempi, kuin vikapisteen sisältävän lähdön sulake (Muokattu Lehto 2009, 49 kuvasta). Kyseisestä tilanteesta käytetään nimitystä virhelaukaisu.



Kuva 19. Verkonpuolella oleva sulake voi jäädä palamatta, mikäli tuotantolaitos syöttää suuren osan vikavirrasta (Muokattu Mäki 2007, 26 kuvasta).

Oikosulkuvirrat verkossa ovat perinteisesti kulkeutuneet korkeammalta jännitetasolta matalammalle. Mikroverkoissa tilanne saattaa olla erilainen, koska hajautettu tuotanto voi muuttaa oikosulkuvirtojen suuruuksia ja myös niiden suuntaa. Oikosulkuvirtojen uudenlainen käyttäytyminen saattaa huonontaa verkon suojauksen toimivuutta ja siksi on hyvin tärkeää selvittää, miten suojaus toimii verkon vikatilanteissa, mikäli verkkoon on liittynyt hajautettua tuotantoa. (Lehto 2009, 48.)

3.2.10 Jännitetasot

Maadoitustapa tasasähköjärjestelmissä voi olla maadoitettu tai maasta erotettu, samoin kuin vaihtosähköjärjestelmissäkin. Valittu maadoitustapa vaikuttaa käytettävään maksimijännitteeseen taulukon 2 mukaisesti:

Taulukko 2. Jännitealueet tasajännitteellä (Kylkisalo & Alanen 2007, 37.)

Jännitealueet	Maadoitetut järjestelmät		Eristetyt järjestelmät ja järjestelmät, joita ei ole tehollisesti maadoitettu x)
	Navasta maahan	Napojen välillä	Napojen välillä
I	$U \leq 120$	$U \leq 120$	$U \leq 120$
II	$120 < U \leq 900$	$120 < U \leq 1500$	$120 < U \leq 1500$

U = asennuksen nimellisjännite (V)

x) jos käytetään keskijohdinta, navan ja nollan väiltä syötetty sähkölaite on valittava niin, että sen eristys vastaa napojen välistä jännitettä.

Standardin SFS 6000-8-801:2017 liitteen 801C mukaan, joka käsittelee tasasähköjärjestelmien käyttöä jakeluverkoissa, kerrotaan seuraavasti: ”*Pienjännitteisen tasasähkönjakeluverkon maadoitustapana käytetään IT-järjestelmää. Muita maadoitustapoja voidaan käyttää, jos se jakelujärjestelmän turvallisuudesta tai erityisolosuhteista johtuen on tarkoituksenmukaisempaa. Pienjännitteiseen tasasähkönjakeluverkkoon liitettävien sähköliittymien sähköasennuksen syöttämiseen käytetään TN-järjestelmää, ellei sähköliittymän haltijan kanssa ole erikseen muuta sovittu*”. (SFS 6000-8-801:2017, 19.)

Sähköliittymien sähköasennukset liitetään tasasähkönjakeluverkkoon galvaanisesti erottavilla suuntaajalaitteistoilla, ellei sähköliittymän haltijan kanssa ole erikseen muuta sovittu. Suuntaajalaitteistojen ja niiden asennuksen on täytettävä SFS-EN 62477-1 vaatimukset. Galvaanisen erotuksen riittävyys takaa esimerkiksi SFS-EN 61558-1 ja 61558-2–1 vaatimukset täyttävä erotus. (SFS 6000-8-801:2017, 18.)

Nimellisjännitteen suuruus vaikuttaa myös aina kaapelointiin ja suunnitteluvaiheessa onkin kiinnitettävä huomiota kaapelien jännitekestoisuuteen. Tasasähköosan kaapelointi on valittava ja asennettava siten, että maasulkujen ja oikosulkujen riskit ovat mahdollisimman pienet. Tämä toteutetaan esimerkiksi käyttämällä metallivaipattomia yksijohtimisia kaapeleita tai eristettyjä johtimia asennettuina erikseen eristeaineisiin asennusputkiin tai johtokanaviin. Aurinkovoimaloissa kaapeleita ei saa asentaa suoraan kattopintaan. (SFS 6000-7-712:2017, 16.) Esimerkiksi Ferroampin tasavirtaverkon kaapeloinnin tulee olla joko kaksoiseristettyä tai vahvistettua (Ferroamp 2020, 8).

4 SUOJALAITTEET

Sähköverkoissa tulee turvallisuuden sekä toimivuuden vuoksi huolehtia aina siitä, että suojaus on riittävä ja oikeanlainen. Sähköverkoissa voi ilmaantua vikoja useista erisyistä, joiden seurauksena sähkönjakelu häiriintyy tai pahimmillaan estyy kokonaan. Yleisimpänä vikana voidaan pitää ylivirtaa, joka usein tarkoittaa oikosulkua, verkon ylikuormittumista tai maasulkua. (Kainulainen 2015, 39.) Sähköverkko on aina suunniteltava niin, ettei siitä vikatilanteissa pääse aiheutumaan hengenvaaraa eikä omaisuusvahinkoja. Huomionarvoista on myös, että vikaantunut sähköverkko voi jatkaessaan toimintaa, aiheuttaa jopa tulipaloja.

Vikatilanteiden varalle on kehitetty erilaisia suojalaitteita erilaisiin tarkoituksiin. Yleensä keskuksista lähtevät syöttökaapelit suojataan alkupäästä ylivirtasuojilla, esimerkiksi sulakkeilla tai johdonsuojakatkaisijoilla. Ylivirtasuojauksella on jaettu kahteen osaan, ylikuormitussuojaukseen ja oikosulkusuojaukseen. Ylikuormitussuojauksen tai ylivirtasuojauksen tehtävä on huolehtia, ettei normaalitilanteessa kaapelit pääse lämpenemään liikaa. Oikosulkusuojauksella taas käytetään vikojen seurauksina syntyvien oikosulkuvirtojen katkaisuun. Oikosulkusuojauksen on toimittava mahdollisimman nopeasti ja sillä on oltava tarpeellinen virran katkaisukyky. (Kainulainen 2015, 39.) Tämä korostuu erityisesti tasasähkön katkaisussa. Hyvin usein sama suojalaite toimii ylikuormitus- sekä oikosulkusuojana, jolloin suojalaitteen mitoituksessa on huomioitava standardin SFS 6000-41-43 luvun 435 vaatimukset.

Tasajänniteverkon suojaaminen edellyttää aina maasulkuvikojen, oikosulkujen, yli- ja alijännitetilanteiden sekä ylikuorman hyvää hallintaa. Tasasähkönjakeluverkon vika- ja oikosulkusuojaukseen käytetään SFS-EN 60947-2 mukaisia tasasähkökatkaisijoita tai tasasähkösulakkeita. Ylikuormitussuojauksella voidaan siis toteuttaa samoilla suojalaitteilla oikosulkusuojauksen kanssa tai perustuen suuntaajalaitteistojen sisäiseen ylikuormitussuojaukseen. (SFS 6000-8-801:2017, 19.)

Kuten sivulla 33 todettiin, oikosulku- ja ylivirtasuojauksella on mahdollista toteuttaa myös DC-verkoissa kaupallisilla suojalaitteilla kuten katkaisijoilla ja sulakkeilla, kunhan ne ovat SFS-EN60947-2 mukaisia tasasähköverkkoon soveltuvia. Lisäksi on huomioitava suojalaitteiden sekä tehoelektroniikan yhteensopivuus (Partanen ym. 2010, 83). Mikäli ylikuormitussuojauksella toteutetaan perustuen suuntaajien omaan ylikuormitussuojaukseen, on standardin SFS 6000-8-801 liitteen 801C mukaan suuntaajalaitteisto valittava siten, että

se kykenee syöttämään riittävän suurta oikosulkuvirtaa ja niin pitkän ajan, jotta voidaan olla varmoja suojalaitteiden luotettavasta toiminnasta vikatilanteissa. (SFS 6000-8-801, liite 801C, 19.) Oikosulkuvirran syöttökyky on riippuvainen kyseisen sähköliittymän asennuksen vika- ja oikosulkusuojauksen toteutustavasta. Mikäli toteutustapa ei tiedetä, suosittelee standardin liite 801C suuntaajalta vähintään 180 A oikosulkuvirran syöttökykyä. (SFS 6000-8-801, liite801C, 19.)

Tasavirta pysyy siis vakioarvona, kun taas vaihtovirran arvo vaihtuu negatiivisen ja positiivisen huippuarvon välissä (Hiekka 2012, 11). Tämä vaikeuttaa virran katkaisua esimerkiksi vikatapauksissa. Katkaisu on toimenpide, jossa kuormalaite kytketään irti sähkönjakelusta. Virrallisten koskettimien avautuessa syntyy yleensä valokaari ja syntyneen valokaaren pitää sammua riittävän nopeasti, koska valokaari aiheuttaa koskettimien kulumista aineen siirtymisen ja höyrystymisen tai palamisen muodossa. Koskettimien tulee siis avautua siten, että edellytyksen valokaaren palamiselle ovat olemassa mahdollisimman vähän aikaa. (Hietalahti 2013, 218.) Siksi suojalaitteissa on eroja, eikä kaikki vaihtosähkölle tarkoitetut suojalaitteet sovellu tasasähköverkkoon. Tasasähköverkoissa esimerkiksi käytettäessä katkaisijoita saattaa olla, että on käytettävä useampia avausvälejä, jolloin tasajännitteen katkaisemisesta syntyvä valokaari voi jäähtyä ja sammua (Hiekka 2012, 12).

4.1 Ylikuormitussuojaus

Ylikuormitussuojan tarkoitus on huolehtia, ettei normaalitilanteessa johtimen virta lämmitä sitä liikaa. Se siis estää liian suuren kuorman kytkemisen johdon syöttämään ryhmään. Mahdollista on käyttää johdonsuojakatkaisijaa, katkaisijaa tai sulakkeita, kunhan varmistutaan ensin, että kyseinen suojalaite soveltuu tasasähkökäyttöön. Myös suuntaajalaitteistolla on mahdollista toteuttaa ylikuormitussuojaus, eikä silloin erillistä ylikuormitussuojaa tarvita. Valittaessa suojalaitetta on aina varmistuttava sen soveltuvuudesta kyseiseen järjestelmään, esimerkiksi soveltuvuudesta DC-piiriin.

Käytettäessä erillisiä ylikuormitussuojia, on ne sijoitettava sellaiseen kohtaan, jossa muutos esimerkiksi johtimen poikkipinnassa, johdinlajissa, asennustavassa tai muussa rakenteessa pienentää johtimen kuormitettavuutta. (SFS 6000-4-47, 132.) Standardi SFS 6000 sallii joissakin tapauksissa ylikuormitussuojan poisjättämisen. Tällaisia on esimerkiksi johto, joka ei todennäköisesti ylikuormitu, se on oikosulkusuojattu standardin SFS 6000-4-47 kohdan 434 vaatimusten mukaisesti, sitä ei ole haaroitettu eikä siinä ole

pistorasioita. Myös jakeluverkot, jotka koostuvat maahan asennetuista kaapeleista tai palonkestävästi asennetuista ilmajohdoista. Näissä on kuitenkin varmistuttava, ettei maanpinnan yläpuolella olevat päät aiheuta vaaraa (SFS 6000-4-47, 132).

4.2 Oikosulkusuojaus

Standardin mukaan ”*Jokainen virtapiiri on varustettava oikosulkusuojualla, joka katkaisee piirin oikosulkuvirran ennen kuin se aiheuttaa vaaraa, joka johtuu johtimen ja liitosten lämpötilasta ja mekaanisesta vaikutuksista*” (SFS 6000-4-43, 99). Oikosulkusuojuukselle on olemassa kaksi vaatimusta:

- 1) Oikosulkusuojan on aina pystyttävä katkaisemaan suurin piirissä esiintyvä oikosulku virta
- 2) Poiskytkennän on tapahduttava ennen kuin kyseisen suojalaitteen suojaamat piirit vaurioituvat. Nämä vaatimukset yleensä täyttyvät, kun virtapiirit suunnitellaan standardin SFS6000 kohdan 434.3.2 mitoituskaavan mukaisesti:

$$t = (k \cdot S / I)^2 \quad (4)$$

jossa, t = oikosulun sallittu kesto-aika (s), S = johtimen poikkipinta (mm²), I = oikosulkuvirran suuruus (A) ja k = johdinvakio, eli kerroin joka ottaa huomioon resistiivisyyden, lämpötilakertoimen ja lämmönvarauskyvyn kaapelissa.

Yllä olevaa kaavaa voidaan käyttää enintään 5 s kestävässä oikosuluissa. Mikäli oikosulku kestää tätä pidempään, on käytettävä suojuuksen toimivuuden tarkastamiseksi suojalaitteen toimintakäyrän ja johtimen lämpenemiskäyrän vertailua. Johtimien termien rasitus oikosulun aikana ei saa ylittää suojalaitteen läpipäästämää energiaa. Käytännössä tämä voidaan varmistaa käyttämällä valmistajien antamia käyrästäjä ja taulukoita. (D1 2017, 134.)

Standardi SFS 6000 antaa mahdollisuuden jättää erilliset oikosulkusuojuat pois joissakin tapauksissa. Tällaisia on esimerkiksi johtimet, jotka liittyvät tasasuuntaajia tai akkuja niihin liittyviin oikosulkusuojuihin (SFS 6000-4-47, 134).

4.3 Tasasuuntaajat ja suojausjärjestelmä

Jakeluverkon suojaus asettaa reunaehdoja myös tasasuuntaajien rakenteelle. Pääsääntöisesti suuntaajissa on aina oltava suojaukset niiden sisäisten vikojen varalle, ylikuormitukselle ja ylijännitteelle (AC ja DC puolille). Suuntaajien on myös kyettävä käsittelemään verkon oikosulkuvirtoja ja kyettävä syöttämään muiden suojalaitteiden, kuten katkaisijoiden ja sulakkeiden vaatimat vikavirrat. Suuntaajien voidaan näin ollen sanoa olevan osa verkon suojausjärjestelmää (Partanen ym. 2010, 49). DC mikroverkossa tarvittavaa oikosulkuvirtaa sulakkeiden laukaisuun on mahdollista saada usealta lähteeltä tai esimerkiksi kondensaattoreista, mikäli tasasuuntaaja ei sitä yksinään kykene riittävästi tarjoamaan (Ferroamp 2020, 11). Johtopäätöksenä voidaan pitää, että DC-verkon ryhmäsulakkeet eivät saa olla suurempia kuin ne, jotka voidaan järjestelmästä saatavalla oikosulkuvirralla laukaista.

4.4 Sulakkeet

Sulakesuojaus ja sen merkitys Suomessa on pienentynyt, mutta sillä on edelleen vahva asema. Sulakkeissa olevilla kirjaimilla kuvataan niiden katkaisualueita ja käyttöluokkia (Kuva 20). Ensimmäinen kirjain kertoo kyseisen sulakkeen katkaisualueen ja sitä kuvataan kirjaimilla *g* tai *a*. Toinen kirjain osoittaa käyttöluokan ja se määrittää tarkasti sulakkeen virta-aikaominaisuudet:

1. kirjain	Toiminta
<i>g</i>	Koko alueen kattava katkaisukyky, sekä oikosulku- että ylikuormitussuojaksi soveltuva
<i>a</i>	Osa-alueen kattava katkaisukyky, vain oikosulkusuojaksi soveltuva
2. kirjain	
<i>G</i>	Johdon suojaukseen tarkoitettu sulake
<i>M</i>	Moottorin suojaukseen tarkoitettu sulake
<i>Tr</i>	Muuntajan suojaamiseen tarkoitettu sulake
<i>U</i>	Sähkösiirtoverkon suojaamiseen tarkoitettu sulake
<i>R</i>	Puolijohdesuojaus
<i>D ja N</i>	<i>D</i> = aikahidastettu ja <i>N</i> = aikahidastamaton sulake

Kuva 20. Sulakkeiden katkaisualue ja käyttöluokka.

Suurimpana erona sulakkeiden ja katkaisijoiden välillä voidaan pitää sitä, että sulakkeiden suurin toimintarajavirta (I_2) ei ole yhtä lähellä nimellisvirtaa kuin katkaisijoilla (katkaisijoilla $1,2-1,45 \times I_n$ ja sulakkeilla $1,6-2,1 \times I_n$) eli sulake vaatii aina johtimelta enemmän kuormitettavuutta toimiakseen kuin katkaisija. Katkaisijat ovat lisäksi täysin kauko-ohjattavissa, ne voidaan kytkeä uudelleen vian jälkeen, hälytysten saanti on helpompaa, ne saavat aikaan kaikki napaisen katkaisun ja niillä on paremmat lisävarustelumahdollisuudet kuin sulakkeilla. (ST 53.24, 7.)

4.5 Johdonsuojakatkaisija

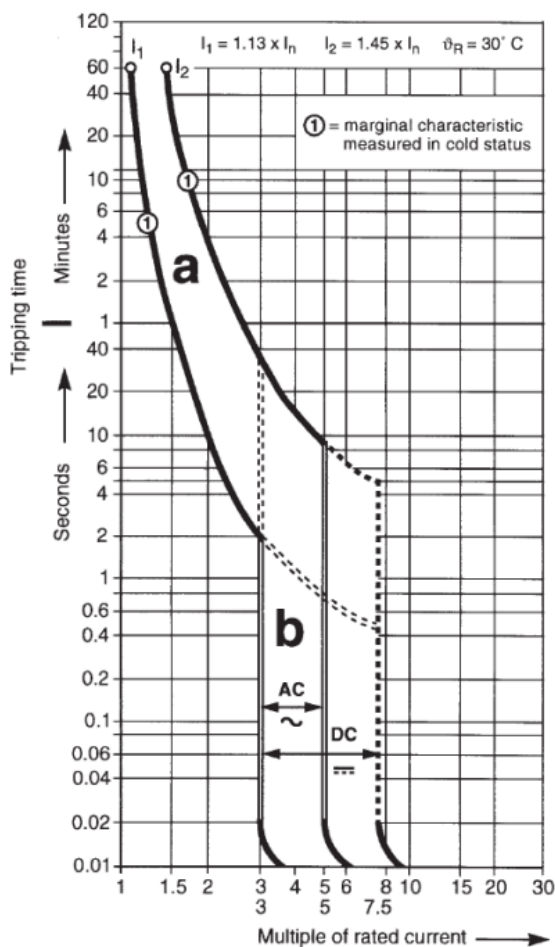
Johdonsuojakatkaisijat (MCBs, Miniature circuit breakers) ovat hyvin virtaa rajoittavia ja niissä on kaksi erilaista laukaisumekanismia. Hidastettu terminen laukaisu, joka toimii ylikuormitussuojana ja toisena mekanismina on magneettinen pikalaukaisu, joka toimii oikosulkusuojana.

Oikosulkusuojauksessa voidaan käyttää johdonsuojakytkimen magneettista laukaisua myös DC verkoissa. SFS 6000-4-41 mukaan vikatilanteissa poiskytkennän on tapahduttava ryhmäjohtotasolla 0,4 s ja pääpiireillä 5 s aikana (SFS 6000-4-41:2017, 9). Valmistajan laukaisukäyristä (Kuva 21) on luettavissa vaadittavat arvot (Nimellisvirran monin kerta) jolla laukeaminen tapahtuu riittävän nopeasti.

Erityisen tärkeää on huomioida, onko johdonsuojakatkaisija soveltuva käytettävälle verkkojännitteelle sekä minkälainen sen katkaisukyky on, onko se riittävä vikatilanteessa ilmenevälle oikosulkuvirralla. Tavallisilla johdonsuoja-automaateilla tasajännitteellä 1-napaisen suurin sallittu jännite on 60 V ja 2-napaisella 125 V. Suuremmilla tasajännitteillä voidaan käyttää varsinaisia tasajännitekatkaisijoita (ST 53.45, 3).

Tämän päivän vaatimusten mukaisesti esimerkiksi ABB on tuonut markkinoille suurtehojohdonsuojakatkaisijoita 125 A nimellisvirtaan asti ja jopa 50 kA:n katkaisukyvyille. Valikoimassa on 6–125 A nimellisvirroille ja jopa 1200 V DC verkkojännitteelle tuotteita (ABB S500, 6).

Järjestelmän jännite sekä myös verkkotyyppi määrittävät kuinka monta napaa tarvitaan, jotta saavutetaan riittävä katkaisukyky ja valokaaren käsittelykyky. Katkaisevien napojen sijoittelu riippuu aina siitä, onko järjestelmä maadoitettu vai maasta erotettu, ja mikäli se on maadoitettu, onko yksi navoista vai keskipiste maadoitettu (Hager 2021, 696).



Kuva 21. Erään ABB:n B-tyyppin johdonsuojakatkaisijan virta-aikakäyrä. Valittaessa komponenttia, on erityistä huomiota kiinnitettävä riittävälle oikosulkuvirran katkaisukyvyllle (ABB 2020).

4.6 Katkaisijat ja suojareleet

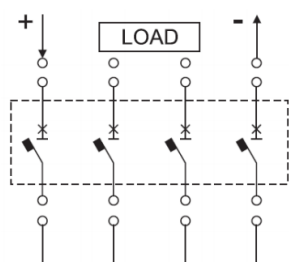
Sulakkeeton suojaus, eli katkaisijoilla toteutettu suojaus on kehittynyt viime vuosina nopeasti valikoiman lisääntyessä ja tarjotessa yhä parempia ominaisuuksia. (ST 53.24, 5.) Katkaisijoiden etuna verrattuna sulakkeisiin, on moninapainen katkaisu. Esimerkiksi syöttävän verkon (AC) puolella, saattaa riittävän katkaisukyvyyn omaava katkaisija olla varmin tapa katkaista vikatilanteessa ilmenevä oikosulkuvirta.

Tyypilliset katkaisijat ovat ilma-, tyhjiö- ja kaasukatkaisijoita. Rakenne voi olla avoin tai suljettu. Katkaisijoiden ylikuormitusreleen tyytit voivat olla välitön, aikahidastettu tai

käänteisaikahidastettu. Ilmakatkaisija (ACB, Air circuit breaker) toimii tyypillisesti jännitealueella 690–1000 V ja se on yleisimmin käytössä suurien keskusten pääkatkaisijana. Kompaktikatkaisijan (MCCB, Moulded case circuit breaker) rakenne on suljettu ja suoja-kuori on eristävää materiaalia. Tyypillisemmin nämä suojaavat kaapeleita, kiskostoja ja moottoreita ylikuormitukselta ja oikosulkuvirroilta.

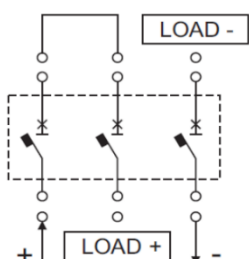
DC-kojeistoissa katkaisijoiksi soveltuvia laitteita ovat ilma- ja kompaktikatkaisijat, joiden katkaisukyky on riittävä DC-verkossa esiintyville oikosulkuvirroille (Kylkisalo & Alanen 2007, 54). Katkaisijoiden laukaisu toteutuu katkaisijan yhteydessä olevan suojareleen avustuksella ja nykyaikaiset katkaisijat ovatkin varustettuja elektronisilla suojareleillä, joissa on hyvin laajat ja monipuoliset asettelualueet. Asetteluilla voidaan säätää laukaisuvirtoja ja -aikoja ja lisäksi yleisiin ominaisuuksiin sisältyvät muun muassa mittaukset, väylätoiminnot sekä hälytystoiminnot. Nämä antavat mahdollisuuden esimerkiksi katkaisijoiden etäkäyttöön ja etävalvontaan. Oikeilla asetteluilla mahdolliset oikosulkuvirrat ja itse viat, eivät vahingoita kyseisen katkaisijan takana olevia komponentteja. Mikäli katkaisukykyä on tarve kasvattaa, voidaan käyttää moninapaisia katkaisijoita niin, että kytketään niitä useampi napa sarjaan. Katkaisijoiden napalukuihin vaikuttavat verkon syöttöjännitteen suuruus sekä myös käytetty maadoitustapa. Suojalaitteessa on aina oikosulkuvirran katkaisukyky oltava yhtä suuri tai suurempi kuin sen sijaintipaikassa odotettavissa oleva oikosulkuvirta. (SFS 6000-5-53:2017, 22.)

Katkaisijoissa kolmenapaista kytkentää voidaan käyttää, riippuen kuitenkin maadoitustavasta, enintään 750 V DC syöttöjännitteellä. Mikäli syöttöjännitteenä on 1000 V DC, on ainoa vaihtoehto neljänapainen kytkentä. Tässä kytkennässä (kuva 22) plus- sekä miinusnavat kytketään sarjaan kahteen ilmakatkaisijan napaan. (Hiekka 2012, 20.)



Kuva 22. Ilmakatkaisijan 4-napainen sarjaan kytkentä (ABB Sace Emax DC 2011, 93).

Kolme napainen katkaisija on myös mahdollinen ja sillä voidaan säästää esimerkiksi tiilassa ja häviöissä hieman. Kuitenkin 4-napaisella katkaisijalla saadaan varmempi katkaisukyky, mikä on erityisesti pääkatkaisijassa hyödyllisempi ratkaisu (Hiekka 2012, 22). Kuvassa 23 on esitetty kolmenapaisen katkaisijan kytkentä.



Kuva 23. 3-napainen kytkentä (ABB Sace Emax DC 2011, 89).

Samassa sähkönjakelujärjestelmässä voidaan käyttää sekä sulakkeita että katkaisijoita ja tämä onkin hyvin tavanomaista. Useasti onkin yksinkertaisempaa ja jopa edullisempaa toteuttaa suojaus siten, että ryhmäkeskus tasalla käytetään sulakkeita ja johdonsuojakatkaisijoita ja taas pääjakelun suojaamisessa käytetään katkaisijoita. Katkaisijat ovat tällöin varustettuja suojareleillä. (Mäntylä 2018, 17.)

Käytettäessä relesuojausta saadaan suojaus toimimaan nopeasti. Nopeudella saadaan vikatilanteiden mahdollisesti aiheuttamat vahingot pienemmiksi ja termiset rasitukset lievemmiksi. Relesuojaus mahdollistaa nopeamman vikasuojauksen, varsinkin jos järjestelmässä esiintyvät oikosulkuvirrat jäävät pieniksi (Mäntylä 2018, 17).

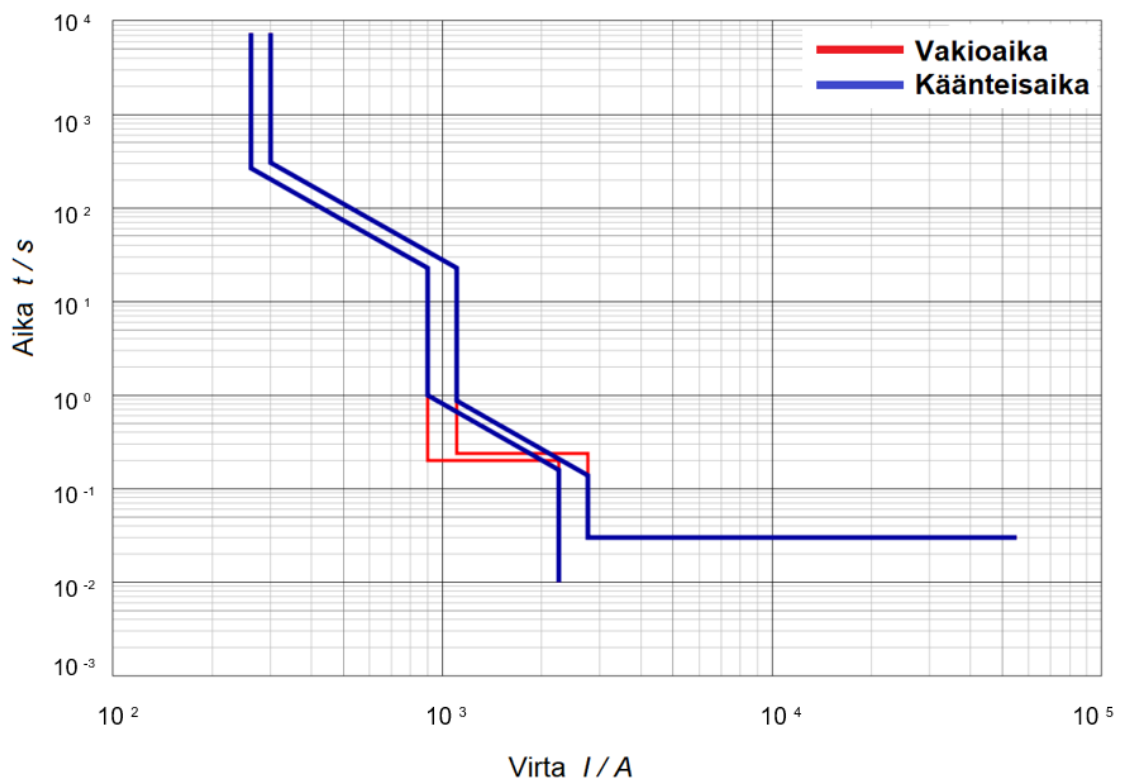
Selektiivisyys suojausjärjestelmässä voidaan toteuttaa useilla erilaisilla tavoilla. Esimerkkinä aika- ja virtaselektiivinen suojaus, lukitussuojaus, suunnattu suojaus ja differentiaalisojaus.

4.6.1 Aika- ja virtaselektiivinen suojaus

Mikäli halutaan mahdollisimman yksinkertainen suojaus, onnistuu se aikaselektiivisellä suojauksella. Silloin suojan toiminta-aikoja porrastetaan siten, että vikapaikkaa lähinnä sijaitseva katkaisija toimii ensimmäisenä. Tämänlainen malli toimii parhaiten säteittäisverkossa. Mikäli suojaus toteutetaan pelkällä virtaselektiivisellä suojauksella, on asetteluarvot määriteltävä suojausalueilla esiintyvien vikavirtojen mukaan. Tällöin oletuksena

on, että suurimmat vikavirrat löytyvät verkon syöttöä lähimpänä olevista suojalaitteista. (Mäntylä 2018, 17.) Usein paras suojaus saavutetaan käyttämällä aika- ja virtaselektiivistä suojausta, koska silloin voidaan varmistaa suojien toiminta myös silloin, kun vikavirtojen suuruus vaihtelee vikapaikkojen sijaintien mukaan mutta saattaa kuitenkin näkyä suuruudelta samanlaisena useille samassa suojausketjussa oleville suojalaitteille.

Katkaisijoiden suojaroleissa voidaan määrittää aika-asettelu, riippuen kuitenkin releen mallista ja tyypistä, joko vakio- tai käänteistoimintaiseksi. Tämä on mahdollista tehdä erikseen niin ylikuormitusportaassa kuin oikosulkuportaassakin. Vakioaikaisessa suojauksessa aika-asettelu on vakio, ja silloin suojaus toimii yhtä nopeasti suurellakin vikavirtojen suuruuden vaihtelulla. Käänteisaikasuojauksessa taas vikavirran suureneminen saa suojauksen toimimaan nopeammin kuin pienemmällä vikavirralla. Kuvassa 24 havainnollistetaan vakioaikaisen ja käänteisaikaisen suojauksen ero selektiivisyyskäyrässä oikosulkuportaassa. Kuvasta voidaan nähdä vakioaikaisen (punainen viiva) asettelun ja käänteisaikaisen asettelun (sininen viiva) ero. Katkaisijat ovat aseteltu täysin samantyyppisesti, mutta käyrän aikaselektiivisyyden toiminnassa on eroa.



Kuva 24. Vakio- ja käänteisaikaisen asettelun ero. (Muokattu Mäntylä 2018, 18 kuvasta.)

Huomioitavaa on kuitenkin, käytetään sitten käänteisaika tai vakioaikaista suojausta, tulee aina varmistaa suojalaitteiden välisten porrasaikojen riittävyys. Porrassajalla kuvataan sitä aikaa kahden suojalaitteen toimimisen välillä, joka vaaditaan suojausten selektiivisen toiminnan takaamiseksi. Tarkoituksena on siis varmistaa, että vian sattuessa lähinnä vikapaikkaa oleva suojalaite ehtii havahtumaan sekä toimimaan ensin ja vasta sitten vaihtoehtoinen suojalaite, mikäli ensimmäinen suojalaite epäonnistuu toiminnassaan. (Mäntylä 2018,20.)

Suojareleiden oikeiden asetteluarvojen määrittäminen on varminta tehdä aina valmistajien tarjoamilla laskentaohjelmilla. Asettelut on pyrittävä tekemään siten, etteivät selektiivisyyskäyrästä risteä keskenään. Näin on mahdollista saavuttaa selektiivinen suojaus. Lisäksi määritettäessä asetteluarvoja, on erilaisten suojalaitteyhdistelmien yhteensopi vuus aina tarkastettava ja siinä valmistajien tarjoamat selektiivisyystaulukot ovat hyödyksi.

Mikroverkoissa haasteita asetteluihin tuo lisäksi paikallinen sähköntuotanto, energiavarastot, vaihtelevat syöttösuunnat ja erilaiset syöttötilanteet.

4.6.2 Lukitussuojaus

Lukitussuojauksessa perusajatuksena on lukita suojalaitteiden suojaukset toisiinsa, jolloin selektiivisyys voidaan saavuttaa toteutettujen lukitusten perusteella. Tätä tapaa voidaan käyttää esimerkiksi silloin, kun asetteluarvojen määrittely selektiivisyyden toteuttamiseksi ei ole mahdollista toiminta-aikojen puolesta. Lukitussuojausta käytetään silloin, kun on tarkoitus saada suojauksen toiminta nopeaksi, vaikka usein suojausportaisiin asetetaankin viivettä suojauksen luotettavan toiminnan varmistamiseksi. (ABB TTT2000-7, 32.) Toimintaviiveellä varmistetaan lisäksi, että suojalaitteet toimivat oikeassa järjestyksessä. Lukitussuojausta käytetään usein kohteissa, joissa on suuret nimellisvirrat ja suuret oikosulkuvirrat. Lukitussuojausta suunniteltaessa tulee huomioida mahdollinen takasyöttö, esimerkiksi mikroverkoissa. Tällöin on suojalaitteen takaa tulevan vikavirran mahdollinen vaikutus otettava huomioon määritettäessä releen asetteluja.

4.6.3 Suuntaselektiivinen suojaus

Suuntaselektiivistä suojausta on tarpeen käyttää, kun kyseessä on rengas- tai silmukka-verkko. Näin varmistetaan se, että suojaus toimii oikein sen perusteella, onko vikapaikka kyseisen suojalaitteen etu- vai takapuolella. Toiminta-aikaa on mahdollista säätää vikapaikan sijainnin mukaisesti. Suojaus voidaan siis säätää toimimaan vain vikavirran kulkiessa tiettyyn suuntaan, jolloin esimerkiksi sen edessä olevat viat eivät aiheuta kyseisen suojan laukeamista. Tällainen tilanne on mahdollinen erityisesti verkoissa, joissa on hajautettua tuotantoa ja virtojen suunnat voivat vaihdella käyttötilanteiden mukaisesti. (Mäntylä 2018, 26.)

4.6.4 Differentiaalisuojaus

Differentiaalisuojaus on hyödynnettävissä hyvin monissa käyttökohteissa ja sillä voidaankin suojata käytännössä lähes kaikki sähköjakelujärjestelmän osat. Osia ovat esimerkiksi muuntajat, koneet, johtimet ja kiskostot. Suojauksena differentiaalisuojaus on hyvinkin tarkka ja nopea, jo muutaman prosentin suuruiset vikavirrat, verrattaessa nimellisvirtaan, on mahdollista havaita. (ABB TTT2000-7, 33.) Toiminta perustuu pienimpedanssi- tai suurimpedanssiperiaatteeseen, vaikkakin käytännössä suoja vertaa tulevien ja lähtevien virtojen eroavaisuutta (Nuotio 2018, 37). Mikäli poikkeavuus ylittää suojan asetellut arvot, toimii suojalaite ja katkaisee vian pois. Virtoja mitataan kuitenkin vain suojattavan kohteen osalta, suojaus ei siis kykene havaitsemaan ulkopuolella mahdollisesti esiintyviä vikoja. Siksi suojaus on absoluuttisesti selektiivinen. (ABB TTT, 33.) Suojausalue muodostuu virranmittauspaikkojen välisestä alueesta.

5 RESPONSE HANKKEEN VERKON SUOJAUS

5.1 Response hanke

Turussa on toteutumassa hyvin suuri EU-hanke, jonka tarkoituksena on kehittää älykkeitä ja hiilineutraaleja energiantuotannon ja talotekniikan ratkaisuja. Pääpilottikohde on Turun ylioppilaskylässä ja Turun toimijoiden osuus on noin 6,6 miljoonaa euroa hankkeen kokonaisrahoituksen ollessa Horisontti 2020 -ohjelmasta noin 20 miljoonaa euroa. Hankeaika on 1.10.2020 - 30.9.2025.

Energiapositiivisella korttelilla tarkoitetaan aluetta, joka kykenee itse tuottamaan vuositasolla enemmän energiaa kuin itse kuluttaa. Ylioppilaskylän alueen tavoite on tuottaa tulevaisuudessa noin 120–130 % alueen energiantarpeesta ilmastoystävällisesti.

RESPONSE (Integrated Solutions for Positive Energy Resilient Cities) on horisontti 2020-tutkimus ja innovaatio-ohjelman rahoittama niin kutsuttu Lighthouse-hanke, joka on EU-kontekstissa erittäin kilpailtu ja arvostettu. Lighthouse kaupunkina Turku on yhdessä Ranskan Dijonin kanssa ja hankkeessa on lisäksi mukana viisi muuta kaupunkia, joiden tarkoituksena on kopioida pilottikaupunkeihin tehtyjä ratkaisuja. Kyseinen hanke vie Turun kaupungin mukaan sellaisten kaupunkien verkostoon, jossa ovat mukana aiempien Lighthouse hankkeiden kaupunkeja. (Turku European Office 2020.)

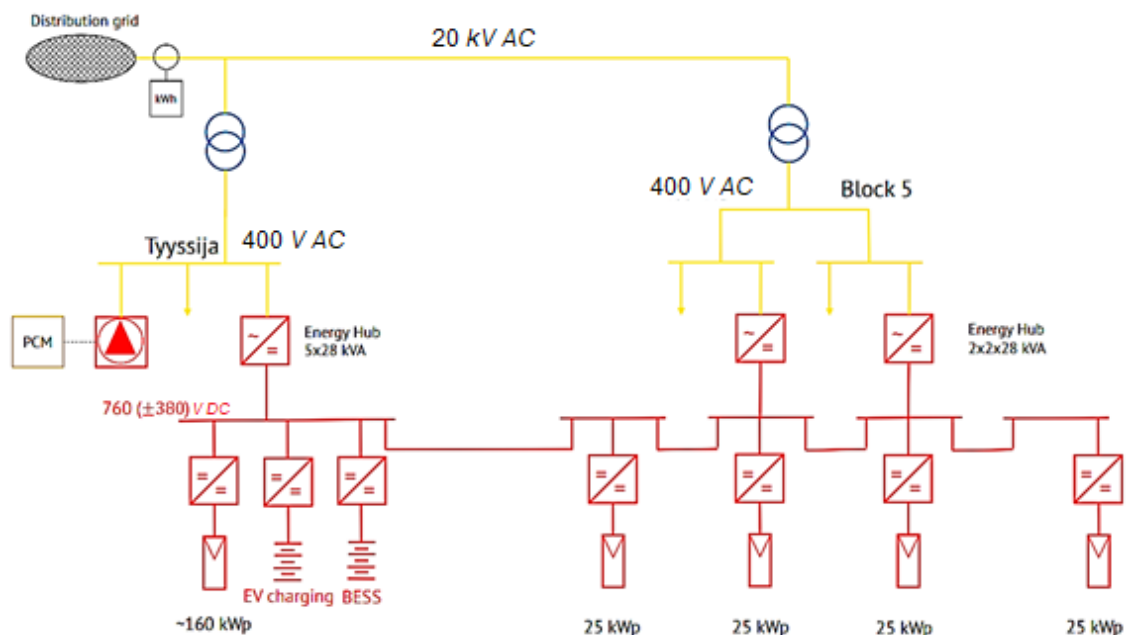
Turun alueen hanketta johtaa Turun kaupunki ja mukana on lisäksi useita kumppaneita. Nämä ovat esimerkiksi kaupunkiin sidoksissa olevia yrityksiä, tutkimuslaitoksia ja korkeakouluja, kuten Turun ammattikorkeakoulu. Turun ammattikorkeakoulu tuo hankkeeseen osaamistaan monen muun asian lisäksi tasasähkömikroverkkoihin liittyvissä ratkaisuissa.

5.2 Järjestelmän rakenne

Kohteen verkko on tarkoitus toteuttaa Ferroampin valmistamalla tekniikalla. Ferroamp on Ruotsalainen 2010 perustettu yritys, joka on ollut vahvasti mukana kehittämässä DC-verkkojen teknisiä ratkaisuja. Kyseinen verkko on niin sanottu hybridiverkko, joka on siis vaihto- ja tasasähköverkkojen yhdistelmä. Kuvassa 25 on esitetty karkea periaatekuva kohteeseen suunnitellusta jakeluverkosta. DC-verkon ydin on Ferroampin Energy Hub,

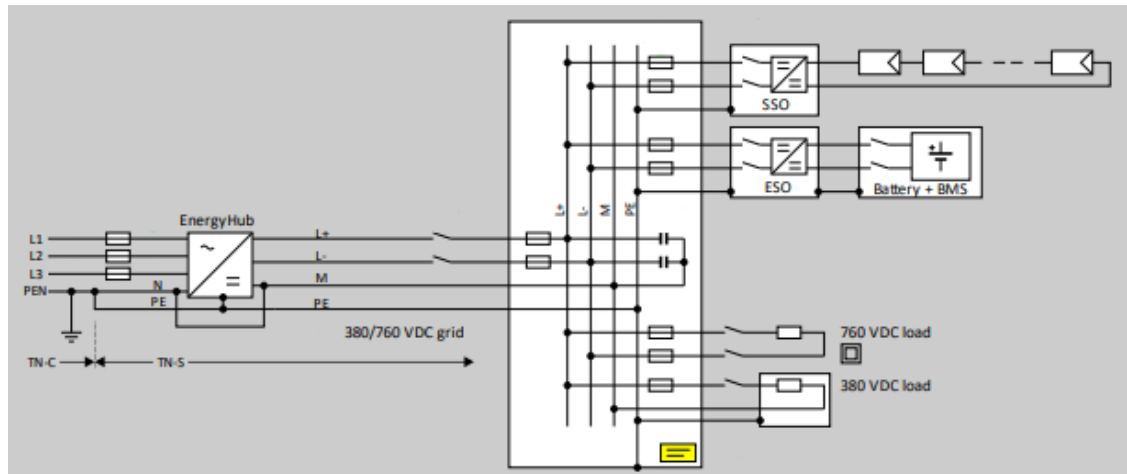
joka on kaksisuuntainen kolmivaiheinen invertteri. Se muodostaa niin sanotun älykkyyden järjestelmässä ja sellainen on tarkoitus sijoittaa jokaiseen rakennukseen. Järjestelmään sisältyy lisäksi aurinkopaneelit ja -paneeliketjujen optimoijat (SSO, Solar string optimizer), jotka ovat DC-DC muuntimia, joissa on sisäinen paneeliketjun valvonta ja säädin (MPPT, Maximum power point tracking). Optimoijat säätelevät paneeliketjun tulojännitettä alueella 120-720V DC ja tarjoaa 760V DC lähtöjännitteen. Järjestelmään on lisäksi tarkoitus liittää akkuvarasto, joka liittyy järjestelmään energiavaraston optimoijan kautta (ESO, Energy storage optimizer). Kuvassa 26 on esitetty SSO:n ja ESO:n sijainnit verkossa.

PowerShare -asennuksessa yhdistetyt rakennukset on varustettu kaksisuuntaisilla inverttereillä (Energy Hub), jotka syöttävät energiaa kulutukseen rakennuksen vaihtovirtaverkkoon. Kaikissa Energy Hub-malleissa on suojaus saarekekäyttöä vastaan ja näin varmistetaan, että mikroverkon liittymispisteestä yleiseen jakeluverkkoon (Point of common coupling, PCC), ei pureta energiaa ulkoisen sähkökatkon sattuessa.



Kuva 25. Järjestelmä tulee koostumaan AC- ja DC-verkot yhdistävästä Energy Hubeista. Lisäksi järjestelmässä on aurinkopaneeliketjut DC-verkkoon yhdistäviä optimoijia (Solar string optimizerit, SSO) jotka ovat yksisuuntaisia. BESS on liitetty järjestelmään Energy storage optimizerilla (ESO).

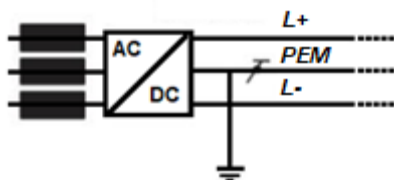
Järjestelmä on rakenteensa vuoksi hyvin poikkeuksellinen Suomessa. Vaikka järjestelmää syötetään kahdesta eri muuntajasta, on se verkkoyhtiön näkökulmasta vain yhden keskijänniteliittymän takana. Lisäksi järjestelmän DC-osa muodostaa periaatteessa rengasmaisen rakenteen.



Kuva 26. Kuvassa näkyy suunnitellun järjestelmän turvallisuusominaisuuksia ja laitteiden sijoittelu verkossa. (Ferroamp 2020.)

5.3 Vikasuojauksen pohtiminen ja tarkastelu

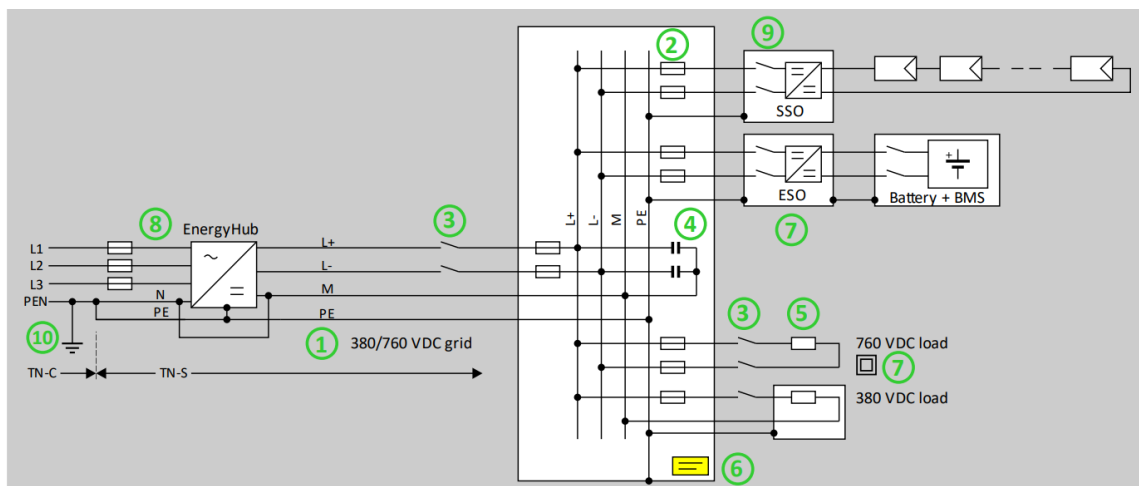
Kyseisen hankkeen suunnitellussa DC-verkossa tulee olemaan käytössä samoja suojausperiaatteita, joita on tavallisessa vaihtosähköverkossakin, jossa on TN-S järjestelmän mukainen maadoitus. Verkko on tarkoitus rakentaa keskijänniteaadoitettuna TN-verkkona, jossa laitevalmistajan mukaan ainoastaan kiinteästi asennetut laitteet ovat sallittuja ja kaikissa sähkölaitteissa on oltava kaksoiseristys ja/tai suojamaadoitus.



Kuva 27. Maadoitettu TN-järjestelmä bipolaarisessa järjestelmässä.

Maadoitetussa TN-järjestelmässä (Kuva 27) ei esiinny nollapisteen siirtymistä, sillä yksi piste on suojamaadoitettu. Järjestelmän sähköä johtavat osat voidaan kytkeä kyseiseen pisteeseen suojamaadoitusjohtimilla mikäli ei käytetä kaksoiseristystä. Riittävä oikosulkuvirta, vikapaikan havainnointi ja suojauksen nopea reagointi ovat tämän järjestelmän suojauksen kannalta keskeisiä vaatimuksia.

Kuvassa 28 on esitetty Ferroampin DC-verkoissa käytetyt erilaiset turvallisuuskonseptit.



Kuva 28. Yleiskatsaus Ferroampin tasavirtaverkon turvallisuusominaisuuksiin. (Kuva Ferroamp 2020, 8)

Kuvassa:

1. Keskipistemaadoitettu TN-C-S verkko
2. Jokainen laite kytketään ryhmäsulakkeiden kautta
3. Katkaisijat ja sulakkeet on oltava DC-käyttöön hyväksytyjä
4. Kondensaattorit tarjoavat tarvittaessa oikosulkutehoa
5. Laitteet on oltava kiinteästi kytkettyjä
6. Järjestelmässä on oltava selkeästi merkitty riskit ja myös käyttöohjeet
7. DC/DC muunnin. Jokainen laite on kaksoiseristetty ja/tai suojamaadoitettu
8. Saarekekäyttöä varten invertteri suojausominaisuuksilla, joka estää energian pääsyn AC-verkkoon sen ollessa jännitteetön.
9. SSO:n on oltava eristyksen valvontaan ja vuotovirran havaitsemiseen kykenevä ja kyettävä irrottamaan paneelit vian sattuessa
10. PEN johtimessa vaaditaan paikallinen maadoitus. Lisäksi N- ja M-johtimet ovat silloitettava EnergyHubin ulkopuolella, jotta DC-verkko pysyy maadoitettuna myös saarekekäytössä. Mikäli energiaa syötetään kiinteistön AC-verkkoon, tarvitaan myös AC-puolella ATS (Automatic Transfer Switch), joka katkaisee ulkoiset sähköverkot

5.3.1 Jännitetaso

Tasajänniteverkon jännitetaso on nimellisesti 760 V normaalin säätövälin ollessa noin 720–800 V. SFS 6000-8-801 (2017, 18) mukaan, kuten aiemmin on kerrottu, kolmijoh- timisen tasasähköjärjestelmän nimellinen käyttöjännite saa olla keskipisteen ja navan välillä enintään ± 750 V. Jännite on siis jännitteisen johtimen ja maan välillä nimellisesti 380 V, mikä on hieman korkeampi kuin tavallisen 230 V vaihtosähköverkon huippuarvo (325 V).

Vaihtojännitteen tehollisarvo vastaa jännitettä, joka saadaan kuormalle vastaavan suu- ruisena tasajännitteenä. Siniaaltoisen vaihtojännitteen tehollisarvo saadaan laskettua yhtälöllä:

$$U_{rms} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

jossa U_{rms} on vaihtojännitteen tehollisarvo ja \hat{U} on jännitteen huippuarvo.

Kun normaalissa vaihtosähköverkossa puhutaan 230 V jännitteestä, on se keskimääräi- nen tehollinen vaihejännite (eli jännite vaiheen ja maan välillä) ja koska jännite on sini- muotoista, vaihtelee sen hetkellisarvo ääriarvojen -230 V ja +230 V välillä. Yllä annettua kaavaa soveltaen, saadaan vaihtojännitteen huippuarvo \hat{U} laskettua:

$$\hat{U} = U_{rms} \times \sqrt{2} \quad (6)$$

sijoitetaan arvot:

$$\hat{U} = 230 \text{ V AC} \times \sqrt{2} = 325 \text{ V AC}$$

5.3.2 Syöttö useista suunnista

Tasavirtaverkossa on useita eri jännitelähteitä, mikä mahdollistaa verkon pisteiden syöt- tämisen useista suunnista. Jokaisen kiinteistön osassa tulee siis olla näkyvät ja selkeät

merkinnät, joissa kerrotaan, että rakennukseen tulee useita syöttöjä. Merkinnöissä on myös kerrottava, miten ja missä DC-verkko tulee irrottaa (Ferroamp 2020, 9).

Useasta suunnasta syötettävää verkkoa on suunnitteluvaiheessa tarkasteltava hyvin huolellisesti, jotta sen turvallisuudesta voidaan varmistua. Vikatilanteissa voi olla mahdollista myös oikosulkuvirran syöttö useista suunnista, mikä ei ole kovinkaan yksiselitteistä. Jotta voidaan olla varmoja suojalaitteiden oikeanlaisesta ja luotettavasta toiminnasta, saattaa olla tarpeellista käyttää suojalaitteiden yhteydessä suuntareileitä, joiden avulla ilmaistaan tehon virtaussuunta.

Pienjänniteasennuksia koskeva standardi antaa mahdollisuuden käyttöönototarkastuksessa varmistaa oikosulkuvirran suuruuden joko laskemalla tai tarvittaessa tekemään keinotekoisen oikosulun haluttuun paikkaan ja mittaamalla oikosulkuvirran suuruus. Suuntaajalaitteistojen syöttämässä jakelujärjestelmässä oikosulkuvirran syöttökyvyn varmistaminen ei onnistu silmukkaimpedanssimenetelmällä, sillä suuntaajien impedanssi muuttuu niiden toimintapisteestä riippuen jatkuvasti. (SFS 6000 8-801:2017, 20.)

Hajautettu tuotanto voi aiheuttaa myös rinnakkaisen lähdön tarpeettoman erottamisen. Tämä voi tapahtua tilanteessa, jossa johtolähdölle on kytketty tuotantolaitos ja siitä nähdessä rinnakkaisella johtolähdöllä tapahtuu vika. Tällöin tuotanto syöttää vikavirtaa suuntaajalle päin, mikä saattaa aiheuttaa sen lähdön suojalaitteen toiminnan, mihin tuotanto on kytketty, mikäli suojaava laite ei tunnista vikavirran suuntaa. Tämä ei tietenkään aiheuta turvallisuusriskiä mutta on häiriöksi. Tällainen ongelma voidaan välttää yksinkertaisesti käyttämällä suuntarelettä, joka tunnistaa vikavirran suunnan. (Alarinta 202, 37).

5.3.3 Asennukset

Kaikki DC-verkon asennukset on suunniteltava kiinteästi asennetuiksi laitteiksi järjestelmän toimittajan ohjeistuksen mukaisesti. Esillä olevat johtavat osat on joko maadoitettava ja/tai erotettava kaksois-/vahvistetulla eristyksellä. Tasavirtaverkon kaapeloinnin tulee olla joko kaksoiseristettyä tai vahvistettua. Tapauksissa, joissa joudutaan käyttämään liittimiä, ne on suunniteltava siten, että niitä ei voida irrottaa ilman työkaluja. Niitä ei myöskään saa irrottaa käytön aikana. (Ferroamp 2020, 10.)

Johtimet tulee myös olla tunnistettavissa ja merkitä hyvin. Merkinnät tehdään taulukon 4 mukaisesti. SFS 6000 antaa mahdollisuuden käyttää asennuksissa normaaleja jakeluverkkokaapeleita. Mikäli tasasähköjärjestelmän käyttö on selkeästi merkitty, kaapelin

johtimia voidaan käyttää siten, että ruskealla tunnusvärillä varustettua johdinta käytetään johtimena L-, ja harmaalla tunnusvärillä varustettua johdinta johtimena L+.

Bipolaarisissa järjestelmissä keskipistejohtimena M käytetään mustalla tunnusvärillä varustettua johdinta.

Käytettäessä AMKA-riippukierrekaapelia, esimerkiksi rakennusten välillä, suositellaan SFS 6000 mukaan käytettäväksi kaksiharjanteista johdinta käytettäväksi L- johtimena ja neljällä harjanteella varustettua johdinta L+ johtimena. Kolmella harjanteella varustettua johdinta suositellaan käytettäväksi bipolaarisessa järjestelmässä keskipistejohtimena M. Ulkoasennuksissa tosin ei johtimia tarvitse lisä merkitä, jos koko järjestelmä on merkitty selkeästi tasasähköjärjestelmäksi. Keltavihreäraitaista johdinta saa käyttää ainoastaan suojavaadoitusjohtimena tai PEM-johtimena. (SFS 6000-8-801:2017, liite 801C, 20.)

Taulukko 4. Johdinten tunnistaminen.

AC kaapeli	DC Bipolaarinen
Ruskea (L1)	Negatiivinen napa (L-)
Musta (L2)	Keskinapa (M)
Harmaa (L3)	Positiivinen napa (L+)
Sininen (N)	Keskinapa (M)
Kelta-vihreä (PE)	Suojajohdin (PE)
Konsentrinen johdin	Suojajohdin (PE)
AC (AMKA)	
Kaksi harjannetta (L1)	Negatiivinen napa (L-)
Kolme harjannetta (L2)	Keskinapa (M)
Neljä harjannetta (L3)	Positiivinen napa (L+)
Kannatinköysi	Suojajohdin (PE)

Tasasähköpiirit ja laitteet on aina erotettava vaihtosähköpiireistä selkeästi. Myös varoituskilvet, esimerkiksi suuntaajissa, aurinkovoimaloissa ja varoitus kondensaattorien varauksesta, on aina asennettava (Kaipia 2018, 8).

5.3.4 Syötön automaattinen poiskytkentä

Vikasuojauksella toteutetaan peruseristyksen vikaantuessa suojaus vaaralliselta kosketusjännitteeltä. (SFS 6000-1:2017, 8). Vikasuojausvaatimuksessa syötön automaattinen

poiskytkentä edellyttää suojamaadoitusta tai suojaavaa potentiaalintasausta (SFS 6000-4-41:2017, 7). Kaksoiseristuksen ja vahvennetun eristyksen avulla mahdollistetaan perussuojauksen toteuttaminen peruseristyksellä ja vikasuojauksen toteuttaminen lisäeristyksellä (SFS 6000-4-41:2017, 15.) Ferroampin verkossa kaikissa sähkölaitteissa on oltava kaksoiseristys ja/tai suojamaadoitus.

Esimerkiksi kaapeloinnin eristysvian sattuessa, on käytettävä asianmukaista sulaketta, jotta viat sammuvat standardissa määritellyssä ajassa (IEC 60364-4-41 ; SFS 6000-4-41:2017, 9). Taulukosta 5 on luettavissa, että tasavirtaverkoissa, joissa on TN-maadoitus ja jännitetaso alueella 230– 400 V, on poiskytkennän tapahduttava 0,4 s aikana piireissä, joiden nimellisvirta on enintään 32 A. Piireissä, joissa on korkeampi nimellisvirta, viat on sammutettava 5 s aikana.

Taulukko 5. Suurimmat sallitut poiskytkentäajat (SFS 6000-4-41, 9).

Järjestelmä	50 V < $U_0 \leq 120$ V s		120 V < $U_0 \leq 230$ V s		230 V < $U_0 \leq 400$ V s		$U_0 > 400$ V s	
	AC	DC	AC	DC	AC	DC	AC	DC
TN	0,8	^a	0,4	1	0,2	0,4	0,1	0,1
TT	0,3	^a	0,2	0,4	0,07	0,2	0,04	0,1

Jos TT-järjestelmässä poiskytkentä saadaan aikaan ylivirtasuojilla ja suojaava potentiaalintasausta on kytketty kaikkiin asennuksen muihin johtaviin osiin, voidaan käyttää TN-järjestelmän poiskytkentäaikoja.

U_0 on nimellinen tasa- ja vaihtojännite äärijohtimesta maahan.

HUOM. Jos poiskytkentä toteutetaan vikavirtasuojan avulla, katso kohdan 411.4.4 huomautus, kohdan 411.5.3 huomautus 4 ja kohdan 411.6.4 b) huomautus 4.

^a Poiskytkentää voidaan tarvita muusta syystä kuin sähköiskulta suojaamiseen.

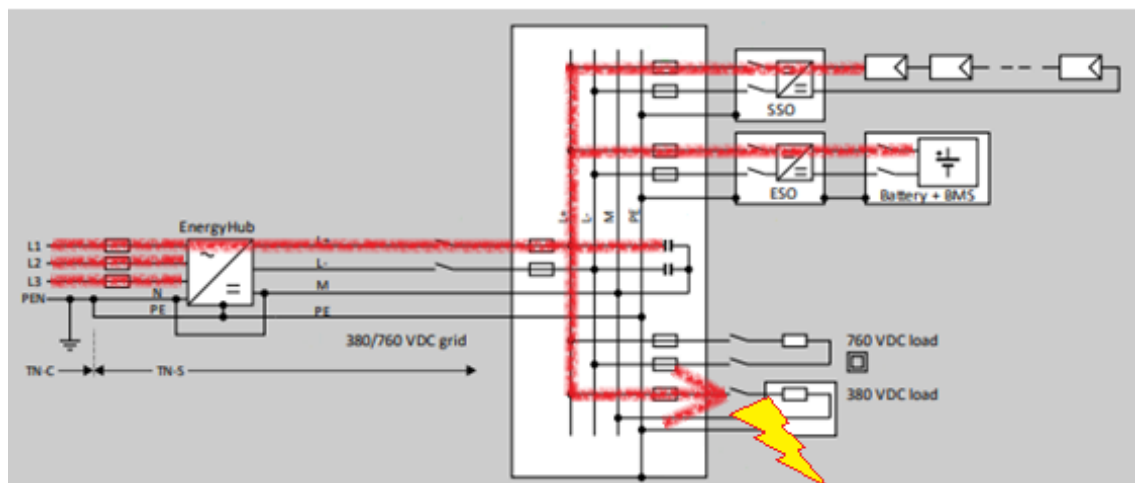
TN-järjestelmänä toteutetussa jakeluverkossa on SFS 60008-801 liitteen 801C mukaan automaattisen poiskytkennän on tapahduttava yllä olevien vaatimusten mukaisesti, huomioiden kuitenkin tasasähkön erityispiirteet. Mikäli vaarallisen kosketusjännitteen aiheuttamaa oikosulkua ei saada kytkettyä pois vaaditussa ajassa, on jakeluverkko rakennettava siten, ettei vian aikainen jännite maahan nähden ole suurempi kuin 120 V DC. (SFS 6000-8-801:2017, liite 801C, 19.)

Ferroampin tasasähköverkoissa nopea poiskytkentä toteutetaan kaupallisilla suojalaitteilla, kuten sulakkeilla ja johdonsuojakatkaisijoilla. Jotta suojalaitteet toimisivat vaaditun toiminta-ajan mukaisesti, edellytetään esimerkiksi oikeilla toiminta-ajoilla reagoivia sulakkeita ja jännitelähde, josta on saatavissa tarvittava teho ja energia käytettävän

sulakkeen tai johdonsuoja-automaatin laukaisemiseksi ja silmukkaimpedanssi, joka tarjoaa riittävän oikosulkuvirran (Ferroamp 2021, 11).

Tasasähkömikroverkossa riittävä teho suojalaitteiden laukaisuun vikatilanteissa, esimerkiksi eristysvioissa, on haasteellisinta silloin kun toimitaan saarekkeena. Tällöin voi olla mahdollista, että riittävä oikosulkuteho puuttuu. Viimeisimmän saamani tiedon mukaan, saarekekäyttö ei tule olemaan järjestelmän ominaisuus. Ferroampin tasasähköverkoissa tarvittavaa oikosulkutehoa on mahdollista syöttää useista lähteistä kuvan 28 mukaisesti (Ferroamp 2021, 11).

Oikosulkutilanteessa oikosulkuvirtaa saadaan siis tarvittaessa useista lähteistä riippuen niiden sisäisestä jännitteestä ja impedanssista. Tasavirtaverkon sisäisillä kapasitanssilla (kondensaattoreilla), tulisi olla niin pieni impedanssi, että ne voivat syöttää suuremman osan oikosulkuvirrasta, jotta selektiivisyys voidaan säilyttää. Muussa tapauksessa esimerkiksi AC-puolella oleva sulake ja/tai EnergyHubin sulake voi laueta yhdessä lähimpänä vikaa olevan tasavirtasulakkeen kanssa.



Kuva 28. Oikosulkuvirran syöttö on mahdollista useista suunnista (Muokattu Ferroamp 2021, 11 kuvasta).

Ferroampin verkossa oikosulkuvirtaa voidaan saada verkon sisäisestä kapasitanssista eli kiskoon kytketyistä kondensaattoreista, ulkoisesta sähköverkosta suuntaajan kautta, akustosta tai aurinkopaneeleista. Aurinkopaneeleista saatava virta on kuitenkin rajoitettu paneelien todelliseen oikosulkuvirtaan (Ferroamp 2021, 11). Vikasuojauksen toiminnan ja selektiivisyyden varmistamiseksi, tasasähköverkon ryhmäsulakkeet eivät saa koskaan

olla suurempia kuin ne, jotka voidaan laukaista järjestelmän kondensaattoripankista tulevalla oikosulkuvirralla.

Taulukossa 6 on teoreettisesti lasketut kapasitanssit selektiivisyyden ylläpitämiseksi ulkoisia sulakkeita varten sähköverkossa tai kytketyssä akkupankissa.

Kun selektiivisyyttä vaaditaan, nämä arvot tulee varmistaa todellisilla oikosulkutesteillä varsinaisessa laitoksessa. (Ferroamp 2021,12.)

Taulukko 6. Ferroampin suosittelemat kapasitanssit sulakkeiden toiminnan selektiivisyyden varmistamiseksi (Ferroamp 2021, 12).

Sulake	Suositteltu kapasitanssi (380 V DC)
1 A 10 x 38mm gPV 1000 V DC	1 mF
2 A 10 x 38mm gPV 1000 V DC	1 mF
10 A 10 x 38mm gPV 1000 V DC	2,5 mF
20 A 10 x 38mm gPV 1000 V DC	50 mF
40 A Johdonsuoja-automaatti B-Tyyppi 1000 V	150 mF

5.4 Vikatilanteiden tarkastelu

Tasasähköjärjestelmän suojaus verrattuna vaihtosähköjärjestelmään, on monimutkaisempi. Tämä tuo kuitenkin myös etuja, esimerkiksi vikapaikan määrittäminen ja kosketusjännitteen paikallinen hallinta helpottuu. Suuntaajien suojauskonseptien avulla voidaan lisäksi vähentää muiden suojalaitteiden tarvetta.

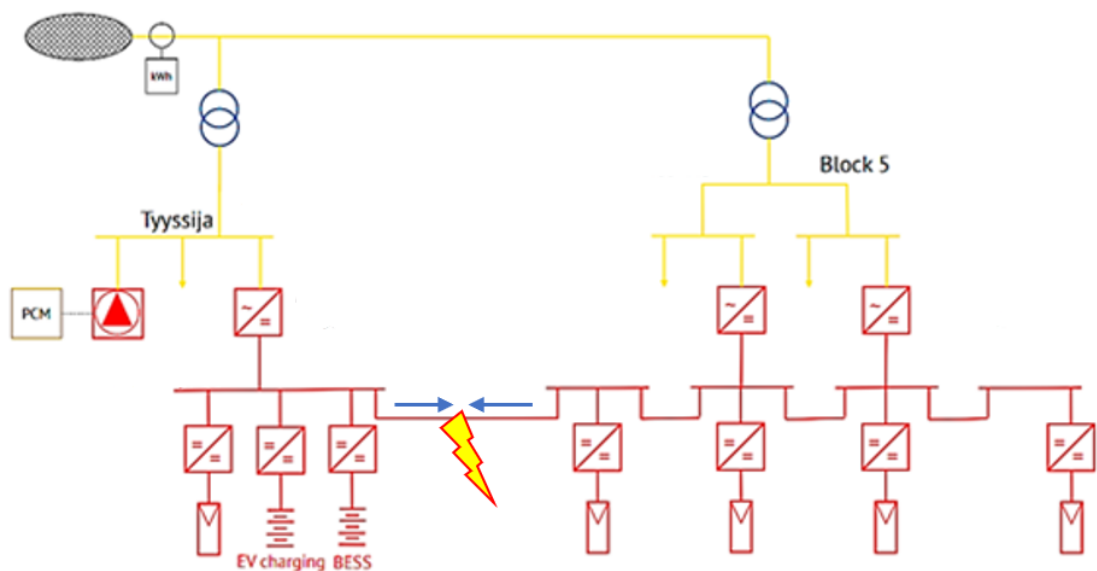
5.4.1 Suojauksen sokaistuminen

Suojauksen sokaistuminen on huomioitava erityisen hyvin. Ilmiö on tapauskohtainen koska suuntaajalta tulevan syötön varokkeen näkemän vikavirran pienentyminen on aina riippuvainen esimerkiksi lähdön kaapelipituudesta, tyypistä ja vikapaikasta. Ongelma edellyttää tilannetta, jossa samalle johtolähdölle on kytketty esimerkiksi tuotantolaitos. Kuvassa 29 on esitetty esimerkki tilanteesta, jossa vikapaikka sijaitsee Aitiopaikan ja kortteli 5:n yhdistävällä osuudella. Vikavirtaa on tapauksessa teoriassa mahdollista virrata kummastakin suunnasta. Pahimmassa tapauksessa suuntaajalaitteiden lähdöistä saatava vikavirta ei ole riittävän suuri ja seurauksena sulakkeen sulamisaika pitenee tai

se ei sula lainkaan. Sokaistumista kuvattiin tarkemmin kappaleessa 3.2.8. Jotta voitaisiin varmistua riittävästä oikosulkuvirrasta, on kiskostoon kytketty kondensaattorit, joista tarvittava teho sulakkeen tai johdonsuoja-automaatin laukaisuun saadaan.

Sokaistumisilmiötä on aina tarkasteltava suunnitteluvaiheessa laskennalla ja virran jakautumisella. Ilmiön voimakkuuden ja näin myös muiden vikavirransyöttöön osallistuvien tekijöiden vaikutuksessa ratkaisevaa on vikaimpedanssien välinen suhde syötön ja muiden haarojen välillä (Savolainen, M. 2019, 80). Suojauksen sokaistumisen estämisen kannalta on tärkeää, että tarkasteltavan lähdön impedanssien tulee aina olla pienempiä yhteenlaskettuna kuin muiden haarojen impedanssien. Hyvä keino välttää sokaistumisen riski, on kaapeloida jokainen lähtö ja tulo erikseen, kuten kyseisessä verkossa on tarkoitus tehdä.

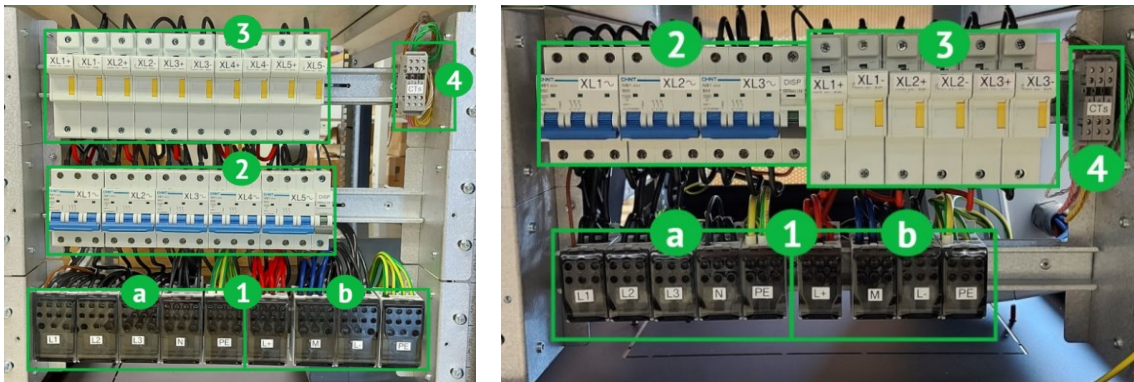
Ilmiön aiheuttamia ongelmia on myös, että se voi vaikeuttaa vikapaikan määrittämistä. Ongelma korostuu sellaisissa tilanteissa, joissa samassa verkon osassa on kytkettynä useita pieniä tuotantolaitoksia, eikä kyetä varmistumaan siitä, ovatko kaikki voimalaitokset irtaantuneita verkosta vian seurauksena.



Kuva 29. Suojauksen sokaistumisen mahdollisuus mikroverkossa. Kyseinen verkko muodostaa rengasmaisen rakenteen. Yhdistävä kaapeli on voitava katkaista kummastakin päästä, koska yhdyskaapelin viottuessa voi vikavirtaa teoriassa virrata kummastakin suunnasta.

Kyseisen mikroverkon EnergyHubit ovat kytkettyjä toisiinsa ja jokainen lähtö sekä tulo on kaapeloitu erikseen EnergyHubin kytkentäkoteloon, kuten yhdistävä kaapelointikin. Tyyssijan ja Block 5:n yhdistävän kaapeloinnin impedanssien tulee aina olla pienempiä yhteenlaskettuna, kuin muiden haarojen impedanssien. Impedanssi (Z) tarkoittaa vaihtovirtavastusta ja sen yksikkö on ohmi, jota merkitään tunnuksella Ω . Tämä voidaan toteuttaa käyttämällä esimerkiksi riittävän laajapinta-alaista kaapelia. Näin voidaan vian sattuessa yhdistävään osuuteen, saada riittävä oikosulkuteho kondensaattoreista laukaistamaan kyseisen lähdön suojalaite. Kuvassa 30 on esitetty EnergyHubin kytkentäkotelot ja kuvassa 31 kytkentä.

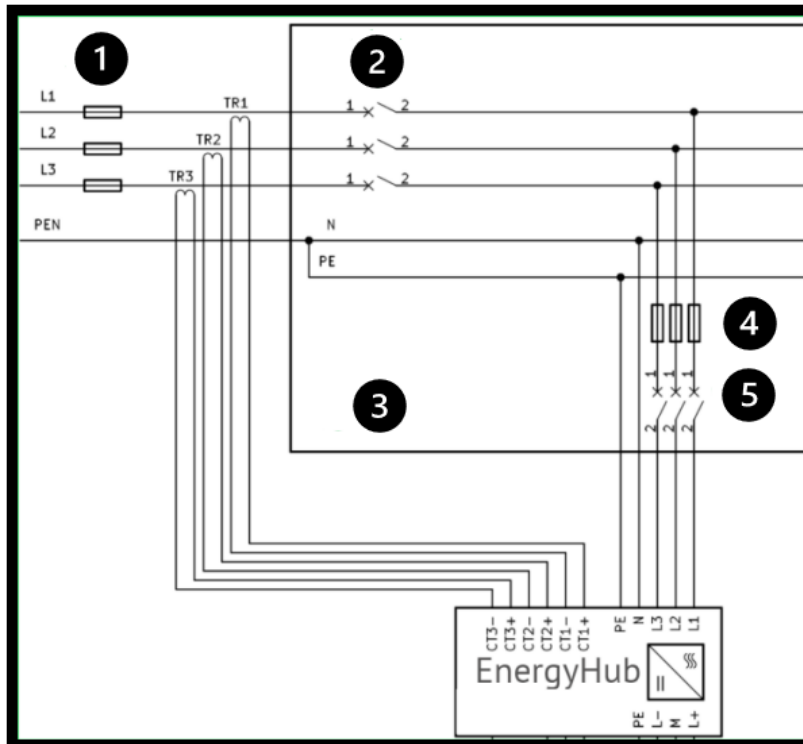
Ferroampin verkon ohjauksella (Grid controller) on tärkeä tehtävä oikeanlaisessa toiminnassa, myös yhdistävän kaapeloinnin osalta. Se ohjaa verkon kuormanjakoa sekä laitteiden toimintaa mahdollisissa vikatilanteissa. Se osaa kytkeä kiinni tai tarvittaessa irrottaa mikroverkon muusta verkosta hallitusti.



Kuva 30. Kytkentä kotelo. Vasemmalla 42 yksikön ja oikealla 24 yksikön. (Kuva Ferroamp 2020).

Kuvassa:

1. Liittimet lähteille ja tuleville kaapeleille.
 - a. AC Liittimet $L1, L2, L3, N, PE$ (Max 120 mm^2)
 - b. DC Liittimet $L+, M, L-, PE$ (Max 120 mm^2)
2. AC Johdonsuoja-automaatit
3. DC Sulakkeet
4. Virtamuuntimen liitäntä (CT, Current Transformer)



Kuva 31. EnergyHubin kytkentä. 1) Pääsulakkeet, 2) Pääkytkin, 3) Kytkentäkotelo, 4) EnergyHubin sulakkeet ja 5) EnergyHubin katkaisija.

Ferroampin DC-laitteet kommunikoivat keskenään PLC:n (Power Line Communication) kautta. Tällä tavoin voidaan toimittaa mittaustietoa Energy Hubille ja kytkettyjä yksiköitä voidaan ohjata. Tiedonsiirto tapahtuu kapeakaistaisena signaalina tasavirtakaapeleissa, joten mikäli sulake laukeaa tai kytkin avataan, katkeaa myös yhteys. Kyseinen signaali on kytketty L+ ja L- kaapeleiden välille. (Ferroamp 2020.)

5.4.2 Oikosulku

Vaikka tässä järjestelmässä on saarekekäytön esto, voisi verkko teoriassa toimia normaalisti verkkoon kytketyn lisäksi myös yleisestä jakeluverkosta erotettuna. Itsenäisenä saarekkeena toimiminen aiheuttaisi kuitenkin haasteita oikosulkusuojauksen toteutukselle, koska käyttötilanteet saattavat olla hyvinkin erilaisia. Saarekkeen sisältäessä aurinkovoimaloita, vikavirtojen suuruudet saattavat olla vaihtelevia johtuen sääolosuhteista. (Alarinta 2021, 38.) Normaalisti verkkoon kytkettynä hajautettu tuotanto lisää vikavirtalähteitä verkossa ja nostaa siten vikavirtatasoa, mutta toimittaessa saarekkeena,

olisi riittävästä oikosulkuvirrasta varmistuttava, jotta suojaukset toimivat luotettavasti vaadituissa ajoissa.

Suojaus siis riippuu hyvin usein riittävästä vikavirran syöttökyvystä. (Karppanen 2012, 64). Response:n verkossa oikosulkuvirtaa suojalaitteiden laukaisuun voidaan saada tasajännitekiskostoon kytketyistä kondensaattoreista, ulkoisesta sähköverkosta suuntaajan kautta, akustosta tai aurinkopaneeleista. (Ferroamp 2021, 11). Suojalaitteina on tarkoituksena käyttää sulakkeita ja johdonsuoja-automaatteja, jotka ovat dc-käyttöön soveltuvia.

Järjestelmän oikosulkusuojaukseen voidaan soveltaa pienjännitessstandardissa annettuja ohjeita, jotka ovat mainittu aiemmin tässä opinnäytetyössä. Oikosulkusuojauksen tehtävänä on siis katkaista järjestelmässä esiintyvä oikosulkuvirta mahdollisimman nopeasti, enintään standardin määäämissä ajoissa.

Lisäksi vikasuojaukseen kuuluu suojamaadoitus, jonka tehtävänä on pienentää vikatilanteissa kosketusjännitettä. Lisäksi suojamaadoitus muodostaa luotettavan yhteyden maahan, jolloin vikatilanteissa vikapiirin virta kasvaa niin suureksi, että suojaava laite saadaan laukeamaan riittävän nopeasti.

Ylikuormitussuojauksesta huolehtii Energy Hubin omat suojaustoiminnot, mutta se on myös mahdollista hoitaa samalla suojalaitteella kuin oikosulkusuojauskin.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda selkeä kuva tasasähkömikroverkoista, sen komponenteista ja huomioitavista asioista vikasuojauksessa. Tasasähköllä toteutetun mikroverkon suojaus poikkeaa vastaavasta vaihtosähköllä toteutetusta ja turvallisuus on oltava yksi keskeisimmistä ominaisuuksista. Tässä työssä esitettyjen aiheiden taustatiedot on selvitetty tutustumalla alan oppimateriaaleihin, tehtyihin tutkimuksiin, tuote esitteisiin, lakeihin, asetuksiin, määräyksiin ja standardeihin sekä diplomitöihin. Tuloksena saatiin tiivis katsaus tasasähkömikroverkkojen rakenteeseen, komponentteihin ja määräyksiin sekä erityisesti vikasuojauksessa huomioitaviin asioihin.

Uusiutuvan energian käyttöä pyritään lisäämään nykyisestä energia- ja ilmastostrategian ja hallitusohjelman mukaisesti. Tavoitteena on, että vuonna 2030 uusiutuvan energian osuus loppukulutuksesta olisi vähintään 51 %. Siksi hajautettu energiantuotanto ja energiavarastot ovat varmasti välttämättömyyksiä tulevaisuuden sähköjärjestelmissä sähköntuotannon suuren uusiutuvien energialähteiden osuuksien vuoksi. Lisäksi jakeluverkkojen toimintavarmuutta voidaan kehittää hajauttamalla verkkoon uusiutuvien energialähteiden tuotantoa ja energiavarastoja. Tasasähköjakelu parantaa hajautetun tuotannon liitettävyyttä ja parantaa sähkön laatua loppukäyttäjillä sekä kasvattaa energiatehokkuutta. Laitteistojen hintojen laskiessa, on odotettavissa mikroverkkojen määrän kasvavan.

Tasasähköverkolla on omat erityispiirteensä verrattaessa perinteiseen vaihtosähköverkkoon. Esimerkiksi vaihtosähköverkossa sen taajuuteen perustuvat toiminnot on toteutettava tasasähköverkossa toisin, yleensä jännitteen suuruuteen perustuen. Vaikka poikkeavuuksia on, voidaan silti soveltuvin osin hyödyntää olemassa olevia vaatimuksia ja standardeja myös tasasähköverkossa.

Tasasähkömikroverkon suunnittelussa on huomioitava tuotannon ja energiavarastojen vaikutukset kaksisuuntaiseen tehonsiirtoon ja myös se, että vikapaikkaankin on mahdollista syöttää vikavirtaa kummastakin verkon suunnasta. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaapelit on suojattava molemmista päistä, jotta vikatilanteissa oikosulkuvirta saadaan katkaistua jokaisesta suunnasta. Varmatoiminen suojaus vaatii tiedonsiirtoa suojalaitteiden välille. Mikäli mikroverkon yksi käyttötila on saarekekäyttö, on myös teho- ja tasapainosta pystyttävä huolehtimaan. Saatavilla oleva oikosulkuvirta määrittää suojalaitteiden tyypit ja edelleen riittävän ja määräykset täyttävän nopean poiskytkennän.

Oikosulkuvirran suuruus voi saarekekäyttötilanteessa olla huomattavastikin pienempi kuin normaalissa tilanteessa. Tämä voi aiheuttaa haasteita määräyksien mukaisten poiskytkentäaikojen toteutumiselle.

Tasasähköjärjestelmässä myös oikosulkuvirtojen luonne eroaa vaihtosähköjärjestelmästä merkittävästi. Oikosulun ilmetessä aluksi kulkee suuri transienttivirta, kun järjestelmän kapasitanssit purkautuvat. Aktiivikytkimillä toteutetun suuntaajan tapauksessa yleensä suuntaajan oma ylikuormitussuojaus lopettaa aktiivikytkimien käytön, ja silloin suuntaaja toimii diodisiltana. Alkutransientin jälkeen oikosulkuvirta laskee verkon impedanssista, syöttävästä verkosta, energiavarastoista ja verkkoon kytketystä tuotannosta riippuvalle tasolle.

Suojauksen keskeiset elementit ovat ylivirtasuojaus, ali- ja ylijännitesuojaus sekä maadoitusrakenne. Tasasähkömikroverkon perusvaatimukset vikasuojaukselle ovat kuten muihinkin sähköjärjestelmiin määritetyt vaatimukset. Perusvaatimuksia ovat muun muassa suojauksen luotettavuus, nopeus ja selektiivisyys. Suojauksen erityispiirteitä aiheuttavat verkkoon liitetyt tuotantoyksiköt, koska ne muuttavat yhden teholähteen syöttämän verkon monimutkaisemmaksi kahden tai useammankin teholähteen syöttämäksi järjestelmäksi. Tästä johtuen tasasähkömikroverkon suojaus on monimutkaisempaa ja erilaisia suojauksen kannalta huomioitavia seikkoja on enemmän, kuin perinteisessä vaihtosähköllä toteutetussa jakeluverkossa.

Suunnitteluvaiheessa verkon simuloiminen on hyvin tärkeässä roolissa, tässä työssä simulaatiota ei tehty. Suojauslaskenta ja simulaatio olisivat antaneet hyvin paljon syvyyttä tälle opinnäytetyölle ja yksi opinnäytetyön aihe olisi voinutkin olla kyseisen verkon suojauksen laskenta ja simulointi. Suojauslaskennassa voitaisiin jo suunnitteluvaiheessa pystyä valitsemaan tarpeelliset ominaisuudet sisältävät suojalaitteet järjestelmään.

LÄHTEET

ABB. Pienjännitekojeet. Johdonsuojakatkaisijat S200, S280UC, S290, S220. Viitattu 7.9.2021. https://library.e.abb.com/public/26b7051f45e4e9ccc125707300247ed9/s200_1fi05_01.pdf

ABB. Technical catalogue. Heavy Duty Circuit Breakers S500. Viitattu 3.9.2021. <https://library.e.abb.com/public/337ac4f8f6359954c1256ea00027a32a/10139.pdf>

ABB. Technical catalogue. Sace Emax DC Low voltage air circuit-breakers for direct current applications. 2011. Viitattu 24.8.2021. <https://library.e.abb.com/public/676fe10fedcd484280466863ab50a791/1SDC200012D0202.pdf>

ABB. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 10. painos. Ykkös-Offset Oy. Vaasa 2000. Viitattu 2.9.2021. ISBN 951-99366-0-2.

Alaranta Ilkka. Suojauksen toimivuus keskijänniteverkon tilapäisessä saarekkeessa. Diplomityö 2021. Tampereen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tuni-202101141319>

D1-2017. Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Sähköinfo Oy. ISBN 9789522312372. Viitattu 3.1.2022.

Eaton. Superkondensaattorit lyhyiden varakäyntiaikojen ratkaisuna. Verkkojulkaisu 2014. Viitattu 3.1.2022. https://ssty.fi/sahkojaos/download/sairaaloiden_sahkotekniikan_ajankohtaispaiva_3.10.2017_helsingissa/Superkondensaattori.pdf

Ensto. V2G and V2H. The smart future of vehicle-to-grid and vehicle-to-home. 2016. Viitattu 17.11.2021. https://www.ensto.com/globalassets/brochures/brochures/ev-charging/ensto_ev_v2g_article.pdf

Ferroamp. 2020. DC Grid Whitepaper. Viitattu 14.6.2022. https://ferroamp.com/wp-content/uploads/2021/06/DC20grids_Whitepaper_eng_A01_200325.pdf

Ferroamp. 2020. EnergyHub XL. XL Cabinet Manual. Viitattu 14.6.2022. https://ferroamp.com/wp-content/uploads/2021/06/EnergyHub20XL20Cabinet_Manual_Swe-En_B01.pdf

HE23/2020 vp. Hallituksen esitys eduskunnalle laeiksi sähköajoneuvojen latauspisteistä ja latauspistevalmiuksista rakennuksissa sekä rakennusten automaatio- ja ohjauksjärjestelmistä ja maankäyttö- ja rakennuslain 126 §:n muuttamisesta. <https://www.edilex.fi/he/fi/20200023.pdf>

Fingrid. Fingrid lehti. 22.1.2018. Viitattu 20.9.2021. Luettavissa: <https://www.fingridlehti.fi/kesstavasti-sahkoautolla/>

Hiekka Toni. Pienjännitteinen sähköjakelukojeisto tasajännitekuormille. Diplomityö 2012. Vaasan yliopisto. <https://osuva.uwasa.fi/handle/10024/560>

Hietalahti Lauri. Sähkövoimatekniikan perusteet. AMK-Kustannus Oy Tammertekniikka 2013. 1. painos. ISBN 978-952-5491-77-7.

IEC 60947-2. 2019. Amendment 1 - Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers.

IEC 62477-1. 2012. Safety requirements for power electronic converter systems and equipment - Part 1: General.

IEC 61558-1. 2019. Safety of transformers, reactors, power supply units and combinations thereof - Part 1: General requirements and tests.

J. D. Bastidas-Rodríguez, C. A. Ramos-Paja, "Types of inverters and topologies for microgrid applications" *UIS Ingenierías*, vol. 16 no. 1, pp. 7-14, Enero-Junio 2017.

<http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/5637/6699>

Kabalchi, E. (2020). Hierarchical Control in Microgrid. Teoksessa N. M. Tabatabaei, E. Kabalci & N. Bizon (toim.) *Microgrid Architectures, Control and Protection Methods* (s. 381-401). Springer, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

Kaipia T., Salonen P., Lassila J. & Partanen J. (2007) *CIREN 19th International Conference on Electricity Distribution*. Paper 0464. Application of low voltage dc-distribution system – A techno economical study. www.cired.net/publications/cired2007/pdfs/CIREN2007_0464_paper.pdf

Kesäniemi Esa. Reunaehdot pientuotantolaitosten ja akkuenergiavarastojen liittämiseksi pienjännitteiseen tasasähköjakeluverkkoon. Diplomityö 2017. Tampereen teknillinen yliopisto.

<https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2017112050791>

Koskenjoki Kari. Verkkovaihtosuuntaajan suuntaajasillan optimointi. Diplomityö 2012. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201210041304>

Kylkisalo, T. & Alanen, R. (2007). Tasajännite taajaman sähköjakelussa ja mikroverkoissa. VTT Working papers 78. ISBN 978-951-38-6629-7. Viitattu 17.5.2021.

<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2007/W78.pdf>

Lehto Ina. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähköjakeluverkkoon. Diplomityö 1.10.2009. Teknillinen korkeakoulu. Viitattu 10.9.2021. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201203071347>

Lehtomäki Aleks. Saarekekäyttöön kykenevän mikroverkon haasteet suomessa. Kandidaatintyö 8.12. 2020. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto.

<https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2020120899915>

Mäki Kari. Novel Methods for Assessing the Protection Impacts of Distributed Generation in Distribution Network Planning. Väitöskirja 2007. Tampereen teknillinen yliopisto.

<https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-2011122814970>

Mäntylä Miro. Kriittisen laitoksen sähköjakelujärjestelmän suojauksen selektiivisyys. Diplomityö 2018. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201811212695>

Nieminen Antti. DC/AC Invertterien analyysi ja testaus. Kandidaatin työ 2018. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201806121968>

Nuotio Meeri. Suurjännitteisen tasasähköyhteyden elektrodipiirin valvonta. Diplomityö 2018.

Tampereen teknillinen yliopisto. Viitattu 9.7.2022. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:ty-201808142108>

P. Nuutinen, P. Salonen, P. Peltoniemi, P. Silventoinen and J. Partanen, "LVDC customer-end inverter operation in short circuit" *2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications*, 2009, pp. 1-10. Print ISBN:978-1-4244-4432-8.

Nuutinen, P., Peltoniemi, P. & Silventoinen, P. (2013). Short-Circuit Protection in a Converter-Fed Low-Voltage Distribution Network. in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 28(4), 1587-1597. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2012.2213845>

Jarmo Partanen, Juha Pyrhönen, Pertti Silventoinen, Markku Niemelä, Jukka Lassila, Tero Kaipia, Pasi Salonen, Pasi Peltoniemi, Pasi Nuutinen, Andrey Lana, Juha Haakana, Antti Pino-maa, Henri Makkonen, Vesa Voutilainen, Pertti Paajanen.

Pertti Järventausta, Heikki Tuusa, Teuvo Suntio, Kari Kannus, Kari Lahti, Ari Nikander, Antti Mäkinen, Jarmo Alahuhtala, Timo Sunttila, Lari Nousiainen, Jenni Rekola, Tuomo Vornanen.. Tehoelektronikka sähköjakelussa – Pienjännitteinen tasasähköjakelu. Lappeenrannan teknillinen yliopisto ja Tampereen teknillinen yliopisto. ISBN 978-952-214-981-7.

Piirto Tuukka. Hajautetun tuotannon ja saarekeverkon tehotasapainon ylläpitäminen akustolla. Diplomityö 2011. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201202241036>

Rekola Jenni. Factors Affecting Efficiency of LVDC Distribution Network – Power Electronics Perspective. Väitöskirja 2015. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-15-3622-9>

Salonen Janne, Kaipia Tero, Nuutinen Pasi, Peltoniemi Pasi ja Partanen Jarmo. (2008). An LVDC Distribution System Concept. NORPIE 9.-11.6.2008. <https://urn.fi/urn:nbn:fi:tkk-011603>

Salonen Pasi, Nuutinen Pasi, Peltoniemi Pasi, Partanen Jarmo. (2009). LVDC distribution system protection — Solutions, implementation and measurements. 2009 13th European Conference on Power Electronics and Applications. pp. 1 -10. Print ISBN:978-1-4244-4432-8
http://www.cired.net/publications/cired2009/pdfs/CIRED2009_0891_Paper.pdf

Sarvaranta Anni. 2010. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Aalto-Yliopisto, selvitystyö. Viitattu 10.6.2021. https://energia.fi/files/665/Alykkaat_sahkoverkot_Suomessa_ja_Euroopassa.pdf

Savolainen Matias. Aurinkovoimaloiden vaikutukset pienjänniteverkkoon – Case Järvi-Suomen Energia. 2019. Diplomityö. Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT. <https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2019061019878>

SFS 6000-1 (2017). Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät.

SFS 6000-4-41 (2017). Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta.

SFS 6000-4-43 (2017). Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus.

SFS 6000-8-801 (2017). Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-801: Täydentävät vaatimukset. Jakeluverkot. Sisältää korjauksen 2019.

SFS 6000-7-712 (2017). Piensähköasennukset. Osa 7-712: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Aurinkosähköjärjestelmät.

ST-esimerkit 13. Näkökulmia kulutusjouoston toteuttamiseen. Sähkötieto ry. 2021. ISBN 978-952-231-363-8 (verkko pdf). Luettavissa (vaatii kirjautumisen) <https://severi.sahkoinfo.fi/>

ST 53.45. Sulakkeeton suojaus. Laadittu 15.9.2015. ST-kortisto. Sähköinfo Severi. (Vaatii kirjautumisen). Viitattu 11.1.2022. <https://severi.sahkoinfo.fi/>

ST 53.24. Ohjeita kiinteistöjen enintään 1000V johtojen mitoituksesta ja suojauksesta. Julkaistu 23.11.2017. ST-kortisto. Sähköinfo Severi. (vaatii kirjautumisen). Viitattu 13.1.2022. <https://severi.sahkoinfo.fi/>

Sähköala lehti 11/2017. Sähköinfo Severi. Viitattu 13.9.2021. Luettavissa (vaatii kirjautumisen) <https://severi.sahkoinfo.fi/Magazine/Open/6722>

L1135/2016. Sähköturvallisuuslaki. <https://www.finlex.fi/fi/laki/akup/2016/20161135#Lidp446871360>

Tiittanen Leo. 2019. Vaihtosuuntaajan toiminta verkkoon kytkettynä sekä mikroverkossa. Kandidaatintyö, Tampereen yliopisto. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tyy-201905211654>

Turku European Office. Turun ja Varsinais-Suomen Eurooppatoimisto. 2020. Verkkojulkaisu. Viitattu 11.5.2022. https://www.turkueuoffice.fi/uutinen/2020-11-30_response-hankkeessa-kehitaan-energiapositiivisia-asuinalueita-ja-kestavaa

Turvatekniikan keskus TUKES. Luettelo S10-2019. Sähkölaitteistojen turvallisuutta ja sähkötyöturvallisuutta koskevat standardit. Päivitetty 23.1.2019. Viitattu 1.6.2021. [Luettelo+S10-2019+Sähkölaitteistojen+turvallisuutta+ja+sähkötyöturvallisuutta+koskevat+standardit.pdf](https://www.tukes.fi/luettelo+S10-2019+Sahkolaitteistojen+turvallisuutta+ja+sahkotyoturvallisuutta+koskevat+standardit.pdf) (tukes.fi)

Uski, S. Aalto, P. Forssen, K. Holttinen, H. Kojo, M. Repo, S. Rosqvist, T. Sarsama, J. Talus, K. EL-TRAN analyysi 3/2018 (2018). Mikroverkoilla säävarmuutta haja-asutusalueiden sähkönjake- luun. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-0680-9>

A1010/2017. Asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. 20.12.2017. Viitattu 3.1.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20171010>

A718/2020. Asetus eräiden rakennusten teknisten järjestelmien energiatehokkuuden vaatimuk- sista. 27.10.2020. Viitattu 3.1.2022. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2020/20200718>

Valtioneuvosto. 2019. Hallitusohjelma. Viitattu 3.12.2021. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-808-3>