



MIKROVERKON SUOJAUS - YLEISET PERIAATTEET JA TOTEUTUS OPE- TUSYMPÄRISTÖSSÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Marko Kukkola

Tarkastajat: Professori Samuli Honkapuro

Tutkijatohtori Janne Karppanen

Ohjaaja: Tekniikan lisensiaatti Heikki Kurki

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Marko Kukkola

Mikroverkon suojaus – Yleiset periaatteet ja toteutus opetusympäristössä

Sähkötekniikan diplomityö

121 sivua, 38 kuvaa, 15 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastajat: Prof. Samuli Honkapuro

TkT Janne Karppanen

Ohjaaja: TkL Heikki Kurki

Avainsanat: Mikroverkko, energiasaareke, energian hallinta, suojaus

Uusiutuvan energiatuotannon ja sähköenergian varastointiteknologioiden kehittyessä on mikroverkoille luotu toteuttamisympäristöjä yhä enemmän. Mikroverkkojen lisääntyessä on verkon turvallisuuden ja luotettavuuden täyttämiseksi pystyttävä toteuttamaan suojausjärjestelmä, joka täyttää viranomaisen sekä käyttäjän vaatimukset. Tässä työssä selvitetään mikroverkon suojauksen yleisperiaatteet sekä esimerkkiverkon mukainen kiinteistön mikroverkon suojausratkaisu. Työn teoriaosuudessa kirjallisuuden avulla luodaan yleiskäsitys mikroverkoista, toimintatavoista, kohteista sekä suojauksesta. Case-tutkimuksena tehdään mikroverkon suojauksen tarkastelu opetusympäristöön sijoittuvasta älysähköverkosta.

Tutkimuksessa keskityttiin mikroverkkojen suojaukseen tapauksessa, jossa mikroverkkoratkaisu toteutetaan aiemmin rakennettuun älysähköverkkoon. Tutkimuksen avulla havaittiin mikroverkkojen suojauksen ongelmalliset kohteet ja suojauksen toiminnan tarpeellisuus. Turvallisuuslainsäädäntö asettaa keskeiset tavoitteet suojauksen toteutukselle ja suojauksen asetteluarvoille. Asetteluarvojen selvittämisen ja valmistajien ilmoittamien suojaustarpeiden avulla toteutettiin laskelmat, joiden perusteella tehtiin tulosraportointi. Tulosraportin avulla voitiin analysoida suojauksen tasoa verrattuna vaadittuihin turvallisuuslähtökohtiin ja esittää suojaustoimenpiteisiin muutoksia.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Marko Kukkola

Microgrid protection – General principles and implementation of educational environment

Master's Thesis 2022

121 pages, 38 figures, 15 tables and 4 appendices

Examiners: Prof. Samuli Honkapuro

D.Sc. Janne Karppanen

Supervisor: Lic.Sc. Heikki Kurki

Keywords: Microgrid, Island Network, Energy Management, Protection

More and more test and using environments have been implemented for microgrids due to the development of renewable energy production and electricity storage technologies. As the number of microgrids increases, they must fulfill protection and reliability requirements of the authority and the expectations of the users. The general principles of microgrid protection have been presented in the thesis, and the real estate microgrid protection solution has been reviewed. In the theoretical part of the thesis, the general overview of microgrids, operating methods, objects, and protection have been introduced. The research of microgrid protection has been done by case study.

The thesis is focused on the microgrids protection in the case where the microgrid solution is implemented in a previously built smart grid. The research identified problematic targets for the microgrid protections and the need for protection functions. Legislation of electrical safety sets main goals for the implementation of protection and for its setting values. Determining of the setting values were made by the calculations and the results were reported in tables. The results of the report enabled to analyze of the level of protection compared to the protection requirements and finally to propose changes to the protection measures.

KIITOKSET

Ensiksi haluan esittää nöyrimmät kiitokseni omalle perheelleni, vaimolleni Tanjalle sekä lapsilleni, joiden on pitänyt joustaa työn ohessa tehtävien opintojeni takia. Suuret kiitokset ansaitsevat myös erinomaisesta ja asiantuntevasta työn ohjauksesta vastanneet tarkastajat Professori Samuli Honkapuro ja Tutkijatohtori Janne Karppanen. Oulun ammattikorkeakoulun Tekniikan lisensiaatti Heikki Kurki on ollut suurena apuna tämän työn ohjauksessa, kieliasun ja käsitteiden tarkastuksessa, joten kiitokset kuuluvat myös hänelle. Diplomi-insinööriopintojen aloittaminen syksyllä 2017 jatkuen kesään 2022, on ollut työntäyteinen ja välillä aika raskaalta tuntuva opintotaival, mutta nyt kesän alussa näyttää tämäkin taival toistaiseksi päättyvän onnellisten tähtien alle.

Kempeleessä 10.6.2022

Marko Kukkola

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

T	lämpötila	[°C, K]
U	jännite	[V]
S	näennäisteho	[VA]
P	pätöteho	[W]
Q	loisteho	[VAr]

Kreikkalaiset

φ	vaihekulma	[°]
-----------	------------	-----

Lyhenteet

AC	Vaihtovirta (Alternating Current)
AMI	Älykäs mittarointiympäristö (Advanced Metering Infrastructure)
AMR	Automaattinen mittarinluenta (Automatic Meter Reading)
CAES	Paineilmaenergiavarasto (Compressed Air Energy Storage)
CAN	Asiakasalueverkko (Customer Area Networks)
CHP	Yhdistetty lämmön ja sähkön tuotanto (Combined Heat and Power)
DC	Tasavirta (Direct Current)
DEP	Hajautettu energian tuotanto (Decentralized Energy Production)
DER	Hajautetut energialähteet (Distributed Energy Resources)
DERMS	Hajautetun energiatuotannon hallintajärjestelmä (Distributed Energy Resources Management System)

DG	Hajautettu tuotanto (Distributed Generation)
DoD	Purkaussyvyys (Depth of Discharge)
DOE	Yhdysvaltain energiaministeriö (Department of Energy)
DR	Kulutus- tai kysyntäjousto (Demand Response)
EC	Energiayhteisö (Energy Community)
EEMS	Sähköenergian hallintajärjestelmä (Electric Energy Management System)
EMS	Energian hallintajärjestelmä (Energy Management System)
FLL	Taajuuslukittu silmukka (Frequency Locked Loop)
HAN	Kotiverkko (Home Area Networks)
IM	Saarekekäyttö (Island Mode, Islanded Mode)
IN	Saarekeverkko (Island Network)
MEMS	Mikroverkon energianhallitajärjestelmä (Microgrid Energy Management systems)
MG	Mikroverkko (Microgrid)
MGCC	Mikroverkon keskitetty ohjaus (Microgrid Centralized Control)
MGCS	Mikroverkon ohjausjärjestelmä (Microgrid Control System)
MGMS	Mikroverkon hallintajärjestelmä (Microgrid Management System)
MIC	Valvonta, tiedonvaihto ja ohjaus (Monitoring, Information exchange and Control)
MV	Keskijännite (Medium Voltage)
NAN	Lähialueverkko (Neighborhood Area Networks)
NDZs	Tunnistamaton alue/vyöhyke (Non-Detection Zones)
LAN	Lähiverkko (Local Area Networks)
LC	Paikallisohjaus (Local Control)

LV	Pienjännite (Low Voltage)
PCC	Verkkoonliittymispiste (Point of Common Coupling)
PHS	Pumppuvoimalaperusteinen energiavarasto (Pumped Hydro Storage)
PME	Schneider Electricin energian valvonta -ohjelmisto (Power Monitoring Expert)
RES	Uusiutuva energianlähde (Renewable Energy Source)
SG	Älysähköverkko, älykäs sähköverkko (Smart Grid)
SMES	Suprajohtava energiavarasto (Superconducting Magnetic Energy Storage)
SoC	Lataustila (State of Charge)
SSEP	Pienimuotoinen energiantuotanto (Small-Scale Electricity Production)
VPP	Virtuaalinen voimalaitos (Virtual Power Plant)
WAN	Laaja alueverkko (Wide Area Networks)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

(Kiitokset)

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	10
1.1	Tavoitteet ja rajaus	12
1.2	Rakenne.....	13
2	Yleistä mikroverkoista.....	15
2.1	Käsitteitä	16
2.2	Mikroverkko eli Microgrid	19
2.2.1	Etuja ja haasteita	21
2.2.2	Pääkomponentit	23
2.2.3	Liitynnät.....	25
2.3	Kiinteistön energian tuotantolaitteet	26
2.4	Kiinteistön energian kulutuslaitteet.....	29
3	Mikroverkkojen tekniikka	33
3.1	Perusominaisuudet	34
3.1.1	Tasavirtarakenne	34
3.1.2	Vaihtovirtarakenne.....	36
3.1.3	Hybridirakenne AC-DC.....	37
3.1.4	Mikroverkon hallinta ja ohjaustekniikka	39
3.1.5	Mikroverkon kommunikaatio ja kommunikaatiostandardit	43
3.1.6	Mittaus	46
3.2	Mikroverkon toimintatilat ja energianhallinta	47
3.2.1	Saarekekäyttö.....	47
3.2.2	Kulutusjousto	50
3.2.3	Energian varastointi	52
3.3	Mikroverkko sähkömarkkinoilla.....	56
4	Mikroverkon suojaus	61

4.1	Mikroverkon sähkönlaatu.....	63
4.1.1	Jännite	65
4.1.2	Taajuus.....	66
4.1.3	Stabiilisuus.....	67
4.2	Perussuojaus ja vikasuojaus	68
4.3	Ylivirtasuojaus	69
4.3.1	Ylikuormitussuojaus	71
4.3.2	Oikosulkusuojaus.....	72
4.4	Maadoitus.....	76
4.5	Ylijännitesuojaus.....	77
4.6	Tietoliikenneyhteydet.....	79
5	CASE – Oamk:n hybridilaboratorion mikroverkko	82
5.1	Case -verkko.....	84
5.2	Case -verkon laitteet.....	87
5.3	Case -verkon suojauslaskelmat	90
5.4	Case -verkon suojausten arviointi	98
6	Johtopäätökset	103
	Lähteet	105

Liitteet

Liite 1. Kaksi- ja kolmevaiheiset oikosulkuvirtalaskelmat (11 sivua).

Liite 2. Yksivaiheisten oikosulkuvirtojen laskelmat (22 sivua).

Liite 3: Pääkeskuksen PK2 pistorasian oikosulkuvirtalaskelmat (3 sivua).

Liite 4. Suojaukseen liittyviä ominaistietoja (3 sivua).

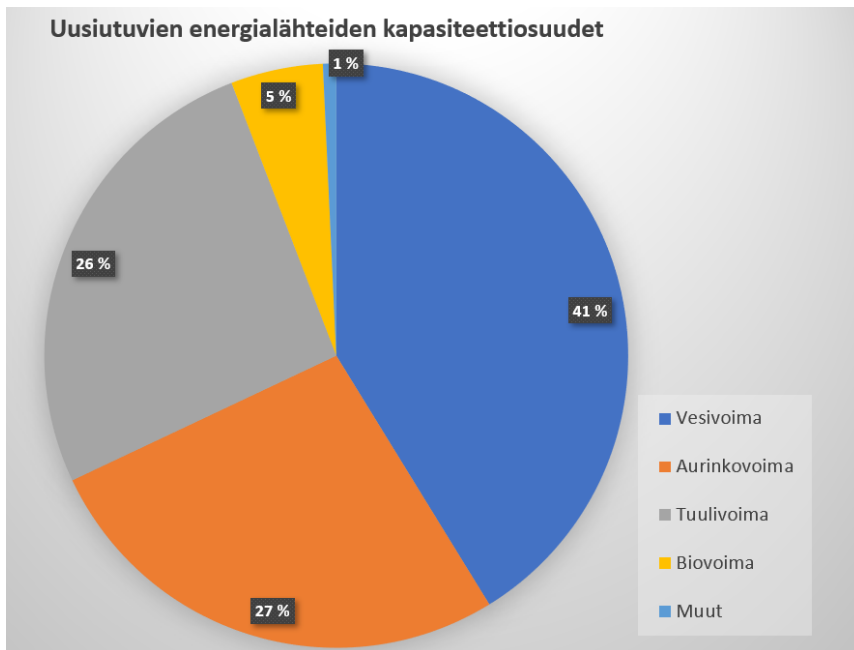
1 Johdanto

EU:n (European Union) tavoitteleman ja Suomen valtion ilmasto- ja energiastrategian tavoitteiden saavuttamiseksi osaamispohjaa vahvistetaan energiatehokkaiden ratkaisuvaihtoehtojen avulla. TKI- ja koulutustarpeet mahdollistavat erilaisten teknologisten ratkaisuvaihtoehtojen tutkimisen johtaen toteuttamiskelpoisiin ratkaisuihin ja niiden ratkaisujen jatkok kehittämiseen. (Koljonen & Honkatukia & Maanvilja & Ruuskanen & Similä & Soimakallio, 2021, s. 71-72). Euroopassa tulevaisuuden energiajärjestelmä ei saisi olla pelkästään keskitetyn ratkaisun mukainen vaan sen pitäisi sisältää hajautettua tuotantoa ja kulutusta sisältäviä verkostorakenteita (Ribbe, L. & Katting, T, 2020). Energiasaarekkeet ovat yksi toteutusmuoto, jonka avulla pyritään löytämään ratkaisuja sekä ilmastollisiin, että energiatehokkuuden aiheuttamiin haasteisiin. Lisäksi energiasaarekkeiden avulla tehtävät kulutus- ja kysyntäjoustopien toimenpiteet auttavat osaltaan tasapainottamaan muun muassa sähköverkon taajuutta.

Mikroverkko on laaja ja monitahoinen käsite sisältäen erilaisia toteutusvaihtoehtoja, joita ei kaikkia tämän työn tutkimukselliseen sisältöön voida sisällyttää. Alussa luodaan yleinen katsaus mikroverkkoihin ja teknisiin toteutuksiin, sitten esitetään mikroverkon suojausratkaisut tarkasteltavissa tapauksissa. Oulun Ammattikorkeakoulu Oy:n (myöhemmin Oamk) hybridilaboratoriotiloihin on rakennettu tekniikan insinöörikoulutukselle sähkö- ja lämpöverkko, jota tässä diplomityössä hyödynnetään tutkimusympäristönä.

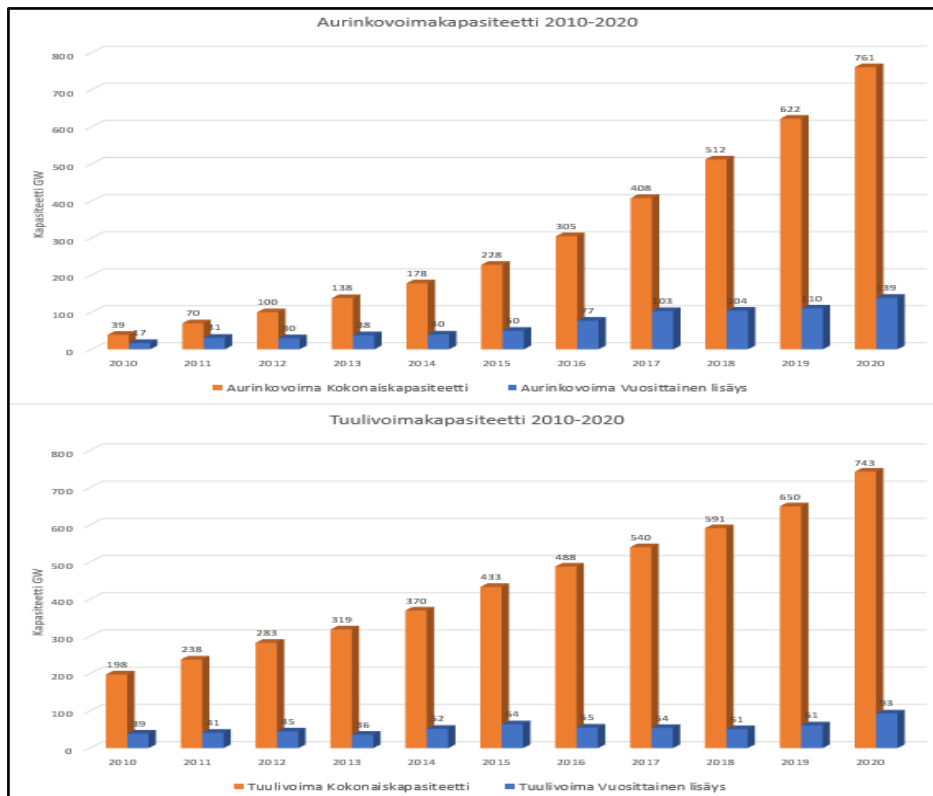
Mikroverkkojen avulla hyödynnetään hajautetun energiantuotannon käyttöä siten, että verkko vastaa pienimuotoista jakeluverkkoratkaisua. Energian toimituksen luotettavuuden ja turvallisuuden varmistamiseksi suojausratkaisut pitää valita ja toteuttaa niin, että ne täyttävät niiltä vaadittavat turvallisuus- ja luotettavuustasot.

Uusiutuvan energian kapasiteettia pyritään kasvattamaan poliittisten päätösten ohjaamana sekä markkinaehtoisesti. Kolme suurinta uusiutuvan energian tuotantolähdettä koko maapallon mittakaavassa ovat kuvan 1 mukaisesti vesi-, aurinko- ja tuulivoima. Vesivoiman avulla tuotetaan Suomessakin 40 %:a uusiutuvaa sähköenergiaa (Energiamaaailma 2022a).



Kuva 1. Uusiutuvien energialähteiden kapasiteettiosuudet (REN21 2022a, s. 40).

Perinteisen sähköverkköjärjestelmän tasapaino on toteutettu pyöriviin massoihin varastoituneen liike-energian avulla ja vesivoima on merkittävässä asemassa (Energieollisuus 2022c) tuottamalla muutokseen hitautta eli inertiaa (Fingrid 2022b). Verkkoon kytketyssä aurinko- ja tuulivoimateknologiassa ei tätä inertiaa tuottavaa pyörivää massaa ole, jolloin tasapainotilanne on muutoksien ilmaantuessa tehtävä nopeiden tehoreservien avulla (Fingrid 2022b). Kuvasta 2 havaitaan, että aurinko- ja tuulivoiman kapasiteetit ovat olleet erittäin voimakkaasti kasvavia.



Kuva 2. Aurinko- ja tuulivoimakapasiteetin kasvu vuosina 2010-2020 (REN21 2022a, s. 118, 146).

Aurinkovoiman kapasiteetin kasvu on ollut 10 vuoden aikana vuoteen 2020 tarkasteltuna huima 1849 %:a 39 GW:sta noin 760 GW:iin. Tuulivoiman kasvu on hieman maltillisempaa 275 %:a 198 GW:sta 743 GW:iin samalla tarkasteluajanjaksolla. Uusiutuvien energialähteiden avulla tuotettavan energian kustannukset ovat laskeneet kapasiteetin lisäyksen myötä merkittävästi viime vuosina, vuodesta 2010 aurinkosähkön investointikustannukset ovat laskeneet 85 % ja tuulivoimakustannukset 56 % vuoteen 2020 mennessä (REN21 2022a, s. 30).

1.1 Tavoitteet ja rajaus

Työn tavoitteena on luoda pääperiaatteet mikroverkon suojauksesta ja ohjeistus suojauksen suunnittelulle Oamk:n esimerkkiverkossa. Tarkastelussa otetaan huomioon mikroverkon erilaiset verkkoratkaisut, suojauslaitteet sekä käyttötilanteet ja kuinka erilaiset käyttötilanteet vaikuttavat verkon suojauksen toteuttamiseen. Työ keskittyy pääosin pienjännitejakoalueverkon (alle 1 kV) mukaiseen mikroverkkototeutukseen, mutta tutkittavassa esimerkissä keski-jänniteverkko on mikroverkkoon kytkeytyvä järjestelmä rakenne, joka huomioidaan niiltä

osin kuin keskijänniteverkko vaikuttaa tarkasteltavaan mikroverkkoon. Rajaus suojaustekniikan osalta tehdään pääsääntöisesti vaihtovirtaverkkorakenteen luokituksen mukaisen mikroverkkoon, koska suomalainen kiinteistön sähköjakelu sekä yleinen sähköjakeluverkko perustuvat kolmevaihejärjestelmän mukaiseen ratkaisuun.

Tutkimustyö suoritetaan case-tutkimuksen sekä kirjallisuustutkimuksen avulla. Oamkin älysähköverkko toimii esimerkkinä case-tutkimuksessa, jonka perusteella voidaan mikroverkon suojauksen rakenne ja periaatteet kuvata. Työ rajoittuu sähkötekniisten ratkaisuvaihtoehtojen mukaisiin periaatteisiin sekä suojausratkaisuihin.

Tutkimuskysymykset:

- Miten mikroverkkojen suojaus toteutetaan?
 - Kuinka mikroverkon suojaus toteutetaan kiinteistössä?
 - Mistä elementeistä suojaus rakentuu?
 - Mitä asioita on huomioitava mikroverkon suojauksen suunnittelussa?
 - Mitkä ominaisuudet ja olosuhteet vaikuttavat mikroverkon suojausratkaisuihin?
 - Miten suojaustarkastelun toteutuminen arvioidaan?
 - Miten suojaus toteutetaan esimerkkiverkossa?

1.2 Rakenne

Tämä diplomityö rakentuu seitsemästä luvusta alkaen johdannosta. Luvussa 2 on esitetty mikroverkkojen yleisiä toteutusratkaisuita, yleisimpiä mikroverkkoihin liittyviä käsitteitä, etuja ja haasteita sekä pääkomponentteja.

Luvun 3 sisältö rakentuu mikroverkoissa käytetystä tekniikasta, teknisistä ratkaisuvaihtoehdoista, käyttökohteista sekä hallinnasta. Tässä luvussa käsitellään myös verkon toimintatavat ja niiden käyttöä ja ohjausta.

Luvussa 4 esitetään mikroverkkojen suojausperiaatteet ja luodaan perusta mikroverkkojen suojausten suunnitteluun. Luvussa käsitellään mikroverkon sähkönlaadullisia tekijöitä sekä suojausten perustoteutuksia.

Luvussa 5 esitetään Oamkin hybridilaboratoriossa oleva älysähköverkko ja sen sisältämät laitteet, laitteistot ja käyttötavat. Tämän luvun sisältöä peilataan kirjallisuuskatsauksen perusteella havaittuun teoriaan ja nostetaan esille keskeisiä kehittämiskohteita.

Luku 6 sisältää esimerkkiverkon suojausten toteuttamiseen ja arviointiin liittyvän tarkastelun. Tarkastelun perusteella tehdään suojausten kehittämiseksi ohjeistus, joiden avulla verkon luotettavuutta ja turvallisuutta voidaan parantaa.

Luvussa 7 kootaan yhteen mikroverkkojen suunnittelussa sekä suojauksessa erityisesti huomioitavia asioita. Lisäksi nostetaan esiin tulevaisuuden kehityskohteet ja -näkökulmat sekä lisätutkimusaiheita mikroverkkoihin ja suojauksiin liittyen.

2 Yleistä mikroverkoista

Sähköenergian jakelu on perinteisesti toteutettu keskitettynä ratkaisuna, jossa on suosittu suuria voimalaitoskokoja sekä erilaisia energiantuotantomuotoja suurienkin etäisyyksien päässä asiakkaista. Sähköenergian saaminen varastoon on ollut haasteellista, Vuonna 1995 toteutetun sähkömarkkinalain (Sähkömarkkinalaki 386/1995) suuren muutoksen myötä erotettiin toisistaan verkkotoiminnot, sähkönmyynti- ja sähköntuotantotoiminnot. Tämä osaltaan on edistänyt pientuotannon kasvua, kun sähköntuotantoa ovat pystyneet toteuttamaan muun muassa erilaiset yhteisöt (Elovaara, J. & Haarla, L., 2011 s. 28-29, 39-48).

Nykyisen sähkömarkkinalain (Sähkömarkkinalaki 588/2013) tullessa voimaan, eivät muutokset vaikuttaneet sähköenergian tuotantoratkaisuihin. Hajautetun tuotannon lisääntyminen on ollut alkusysäys mikroverkoille, kun on haluttu toteuttaa paikallista tuotantoa ja kulutusta hyödyntäviä itsenäisesti toimivia saarekeverkkoja. Alkujaan ”*microgrid*”-käsitteen on kirjoitettu lähteneen USA:sta, luotettavuuden parantamisen seurauksena. EU:ssa on mikroverkkojen kehitystyön katsottu alkaneen vuosituhatien alkupuolella erilaisten tutkimusprojektien myötä ja lähtökohta on näissä ollut energiatehokkuus ja ympäristövaikutusten avulla saavutettava pienempi kustannusrakenne. (Kumpulainen & Laaksonen & Komulainen & Martikainen & Lehtonen & Heine & Silvast & Imris & Partanen & Lassila & Kaipia & Viljainen & Verho & Järventausta & Kivikko & Kauhaniemi & Lågland & Saaristo, 2006, s. 50).

Mikroverkkototeutukset ovat kehittyneet ja yleistyneet nopeasti. Hajautetun tuotannon ja uusiutuvien energialähteiden laaja levinneisyys sekä integroitavuus tekevät mikroverkosta erittäin houkuttelevan vaihtoehdon (Zheng, D., Zhang, W., Alemu, S., N., Wang, P., Bitew, G., T., Wei, D. & Yue, J., 2021, s. 45). Mikroverkkojen monipuolinen rakenne tarjoaa sähköverkossa lukuisia etuja, kuten 1) tarvittavien siirto- ja suurjännitejakelujärjestelmien pienemisen, kun hajautettu tuotanto siirtyy lähemmäs kulutusta. 2) Hajautetun tuotannon liitettävyyden ja 3) luotettavuuden parantaminen uusiutuvan energian varastointiratkaisujen avulla. Myös loppukäyttäjien energian kulutuksen 4) joustavuus, 5) luotettavuus ja 6) tehokkuus lisääntyvät mikroverkkojen myötä, kun kuluttajat kiinnittävät huomiota omiin kulutustottumuksiin ja energian kulutuksen ajankohtiin.

Etujen lisäksi monimutkaisemmaksi kokonaisuudeksi muodostuva verkko aiheuttavat haasteita ohjauksen ja suojauksen rakentamiselle sekä luotettavuuden ja sähkönlaadun tasolle. Mikroverkkojen haasteita perinteisten vikojen lisäksi ovat 1) kaksisuuntainen tehonsiirto, 2) jännitepoikkeamat, 3) vikavirtojen riittämättömyys invertteri -pohjaisissa tuotantoyksiköissä, 4) synkronoinnin katoaminen, 5) pienempi inertia, 6) taloudellisen optimoinnin aiheuttamat muutokset toiminnallisuuksissa sekä 7) uusiutuvien energianlähteiden mahdollinen katkoja aiheuttava toiminta, mikäli ei hyödynnetä energiavarastointia.

2.1 Käsitteitä

Mikroverkkojen yhteydessä käsitellään myös erilaisia rakenteita ja toimintoja, jotka aiheuttavat välillä jopa virheellisiä tulkintoja, kun ei ymmärretä peruskäsitteistöä. Jotta lukijalle muodostuu selkeä näkemys, mitä ovat edelläkin esiteltyt mikroverkot, niin ohessa on erilaisten käsitteiden ja määritelmien lyhyet selostukset.

Energianhallintajärjestelmää (EMS, Energy Management System) pidetään yhtenä tärkeimpänä osana mikroverkossa sekä sen ohjaamisessa. Järjestelmän tehtävänä on kerätä tietoa ja ohjata erilaisia kokonaisuuksia, kuten hajautettuja energiaresursseja, energian varastointilaitteita sekä muita vastaavia toimintoja. Järjestelmä vaatii lisäksi toimiakseen tietotekniikkaan ja viestintään liittyvän tekniikan, joiden avulla toteutetaan järjestelmän energianhallintaprosessi. (Aghdam, F., H. & Kalantari, N., T., 2020, s. 233 – 245).

Energiayhteisö (EC, Energy Community) on EU:n direktiivissä määritelty olevan energiainmarkkinoille osallistuva yhteisö, jonka toiminta on sallittava tasapuolisilla ehdoilla kilpailua vääristämättä (EU Direktiivi 2019/944, s. 7). Energiayhteisönä voi toimia yksityinen oikeushenkilö tai sitten muu yhteisömuoto kuten osuuskunta, yhdistys ja jopa yritys (VNa 767/2021). Yhteisöllä on myös oikeus omistaa ja hallita jakeluverkkoja, hajautettua tuotantoa, pientuotantoa ja kulutuslaitteita, joiden avulla muodostetaan yhteisölliseen käyttöön mikroverkko (Pahkala, T., Uimonen, H. & Väre, V., 2018, s. 18). Energiayhteisön tuottama energia pyritään ensisijaisesti hyödyntämään yhteisön omassa kulutuksessa, mutta ylituotettava energia voidaan myydä yhteisön tekemien sopimusehtojen mukaisesti.

Hajautettu energian tuotanto (DG, Distributed Generation sekä DEP, Decentralized Energy Production) on määritelty olevan pienimuotoista sähkön ja/tai lämmön tuotantoa. Ne

sisältävät yleensä **hajautettuja energialähteitä** (DER, Distributed Energy Resources) jotka osallistuvat pienimuotoisesti tuotantoon. Hajautetussa tuotannossa on myös mukana paikallista energiaressia sekä ne liittyvät muihin alueen energiaverkkoihin sekä energian jakelujärjestelmiin (Vihanninjoki, V., 2015, s. 2-6). Pienimuotoisen sähköntuotannon (SSEP, Small-Scale Electricity Production) määrittely perustuu voimalan nimellis- tai maksimitehohon, joka on sähkömarkkinalaissa määritelty olevan enintään 2 MVA (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Tyypillisimmillään teholuokat ovat muutamia satoja kilowatteja ja se voi käsittää yhden tai usean voimalaitoksen (Motiva 2022a). Tämän tyyppisistä sähköntuotantoratkaisuista käytetään toisinaan myös nimitystä ”*hajautettu sähköntuotanto*” (Motiva 2012, s. 5).

Kulutusjoustossa tai **kysyntäjoustossa** (DR, Demand Response) toteutetaan energian kulutuksen muutosta vallitsevan tuotantotilanteen tai kustannustason mukaan (SFS 6008-1 osa 8-1, s. 10). Joustotoiminnalla voidaan siis pienentää, siirtää toiseen ajankohtaan tai optimoida energian kulutusta ja näillä toimenpiteillä pyritään ensisijaisesti energian ajalliseen hyödyntämiseen kustannustehokkaasti (Motiva 2022b). Sähkömarkkinoilla kysyntäjoustopäätöksiä sanotaan olevan nopein, edullisin ja tehokkain keino vaikuttaa sähköstä maksettavaan hintaan (Elfi 2022a).

Mikrotuotanto on määritelty tarkoittavan kohteen omaan käyttöön tarkoitettua tuotantolaitosta tai kokonaista tuotantojärjestelmää (Motiva 2022a). Mikrotuotantolaitteistojen teholuokka on nykyisellään enintään 100 kVA (Verkostosuositus YA9:13, 2019, s. 2-3).

Mikroverkko (MG, Microgrid) on tekninen ratkaisu, jota valvotaan ja ohjataan erilaisten tarpeiden mukaan (Sarvaranta, A., 2010, s. 42). Sen tarkempi määrittely löytyy luvusta 2.2. Mikroverkkoihin liittyy usein hajautettua energiantuotantoa, varastointia sekä kulutusta ja lisäksi ne voivat olla yleiseen sähkönjakeluverkkoon liitettyjä, toimia omassa saarekkeessaan (Kumpulainen et al. 2006, s. 50) sekä ohjautua automaattisesti verkkokäytöstä saarekekäyttöön ja takaisin. Mikroverkot voivat koostua myös useiden eri omistajien hallinnoimista verkoista. Edelläkin on tullut esille, että mikroverkko on pienikokoinen jakeluverkko, joka hoitaa oman tehotasapainon itsenäisesti (Microgridknowledge 2022a).

Mikroverkon energianhallintajärjestelmä (MEMS, Microgrid Energy Management Systems) on keskeinen osa mikroverkkojärjestelmää. MEMS voi hallita itseään ja toimia itsenäisesti ja se sisältää ohjaustoiminnot, joiden perusteella mikroverkko määritellään järjestelmäksi (IEEE Std 2030.7-2017, s. 10). Tämä järjestelmä on ennemminkin ohjelmisto, joka

suorittaa myös tietojen seuranta, analysointia ja ennusteita. (Zia, M., F., Elbouchikhi, E. & Benbouzid, M., 2018).

Mikroverkon hallintajärjestelmä (MGMS, Microgrid Management System) on määriteltävissä samoin kuin mikroverkon energianhallintajärjestelmä MEMS, mutta sen keskeinen tarkoitus on ohjata mikroverkon laitteistojen toimintaa, jotta energianhallintajärjestelmää voidaan käyttää turvallisesti ja hallitusti (Sood, V., K., Ali, M., Y. & Khan, F., 2020, s. 265; 285).

Saarekeverkko (IN, Island Network) on teknisesti toteutettu verkko, joka voidaan irrottaa yleisestä jakeluverkosta, mutta edelleen verkkoon kytkettyjen teholähteiden avulla tehontarve voidaan täyttää (Kumpulainen, L. & Ristolainen, I., 2006, s. 78). Saarekeverkko voi koostua myös omasta kokonaisuudesta, sisältäen energiantuotannon ja kulutuksen sekä mahdollisen energiavaraston, eikä saarekeverkolla ole itsenäisesti toimiessa yhteistä liityntäpistettä yleiseen jakeluverkkoon. (IEEE Std 1547.4-2011, 2011, s. 6-13). **Saarekekäyttöön** (IM, Island Mode/Islanded Mode) liittyvää toimintaa toteutetaan kyseisessä verkossa, jonka ohjaustoimenpiteet voivat olla toteutettu laadun, kustannustehokkuuden tai automaattisen vikasuojauksen toiminnan vuoksi (SFS 6008-2 osa 8-2 s. 9).

Suojaus (Protection) määritellään IEC:n mukaan oleva vikojen tai muun epänormaalin tilan havaitsemiseen, vikojen tai epänormaalin tilan poistamiseen sekä näiden ilmaisemiseen ja ilmoituksen lähettämiseen liittyvä toiminto. Termillä kuvataan yleisesti suojarusteita sekä suojausjärjestelmää. (IEC 2022c).

Suojausjärjestelmällä (Protection system) tarkoitetaan yhdestä tai useammasta suojauslaitteistosta ja muista laitteista koostuvaa kokonaisuutta, jotka ovat tarkoitettu toteuttamaan yhden tai useamman suojaustoiminnon. Järjestelmä voi sisältää yhden tai useamman suojalaitteen, mittamuuntajan, johdotuksen, laukaisupiirin, aputeholähteen ja myös mahdollisen tietoliikenteeseen liittyvät laitteet. (IEC 2022d).

Sähköenergian hallintajärjestelmä (EEMS, Electric Energy Management System) on laitteita ja kojeita sisältävä järjestelmä, jonka pääasiallinen tarkoitus on hallita ja mittauksien kautta valvoa sähköenergian käyttöä. Rakennuksissa, joiden tehonkulutus on yli 100 MWh/a tai henkilökapasiteetti ylittää 250 henkilöä, vaaditaan sähköenergian hallintajärjestelmä. (SFS 6008-1 osa 8-1 s. 35 – 37).

Uusiutuva energialähde (RES, Renewable Energy Source) sisältää ihmisenäkökulmasta katsoen rajoittamattoman määrän energiaa ja käytöstä seuraava vaje korvautuu kestäväällä tavalla (IEC 2022e). Uusiutuvia energialähteitä ovat muun muassa aurinko, tuuli, vesi, metsät, energiaviljelmät, maaperä (TEPA 2022; Motiva 2002c).

Virtuaalivoimalaitos (VPP, Virtual Power Plant) on joukko erilaisista tuotantoyksiköistä ja kulutuspeisteistä muodostettu kokonaisuus, jonka avulla energia tasapainotetaan optimaalisesti verkkoon. Esimerkiksi älykkäitä sähköverkoja sisältäviä kiinteistöjä voidaan yhdistää kattamaan kokonaisuus virtuaalivoimalaitokseksi. Virtuaalivoimalaitos ei ole aina edes energiaa tuottava vaan kulutuksen vähentämisellä saadaan verkkoon sama vaikutus kuin jos tuotantoa pyritään lisäämään. (Määttä, T., Berg, E., Härkönen, K., Österberg-Aikio, A-S. ja Katajainen, A., 2020, s. 2-5).

Älykäs sähköverkko, älysähköverkko (SG, Smart Grid) on antureita ja tuntoelimiä sisältävä sähkövoimaverkko järjestelmien, joka hyödyntää tiedonsiirtoa ja ohjausjärjestelmiä yleensä keskitetysti (IEC 2022a; SFS 6008 osa 8-2, s. 6). Älysähköverkon tavoitteena on huolehtia sähköenergian toimituksesta turvallisuus, taloudellisuus ja luotettavuus huomioiden eri tekniikoiden ja palveluiden avulla (IEC 2022b s. 2).

2.2 Mikroverkko eli Microgrid

Edellä esitettiin, että mikroverkko -käsite olisi lähtöisin USA:sta, jossa niiden avulla pyrittiin ratkaisemaan epävakaiden sähköenergiaverkkojen muodostamaa ongelmaa. Yhdysvaltain energiaministeriön (DOE, Department of Energy) mukaan mikroverkko on selkeitä rajapintoja sisältävä kuormien ja hajautettujen tuotantolähteiden muodostama verkkokokonaisuus, jonka etuja ovat:

- mahdollistaa useiden eri tekniikoiden ja teknologioiden integrointi älysähköverkkoihin
- tehostaa hajautettujen ja uusiutuvien energialähteiden käyttöä huipunleikkaukseen
- alentaa häviöistä aiheutuvia haittoja
- varmistaa kriittisten kuormien energian tarve

- valvoa ja säätää sähkön laatua ja luotettavuutta
- osallistaa asiakkaita kysynnän jouston mahdollistamiin säästöihin (Ton, D. & Smith, M., 2012).

Monenlaiset luonnon ilmiöt, kuten myrskyt, tornadot, tulvat ja muut vastaavat ovat osaltaan auttaneet mikroverkkoteknologiaa kehittymään ja samalla myös niiden luotettavuus on parantunut myös huomasti. Mikroverkkojen voidaankin sanoa nyt olevan varteenotettava vaihtoehto kriittisten kuormien sähköenergian saannin varmistamiseksi. Uusiutuvan hajautetun tuotannon ja varastoinnin avulla on mahdollista pienentää myös fossiilisten energialähteiden tuottamia haitallisia päästöjä (Danley, D., 2019).

Mikroverkon määrittämisessä korostuvat usein ohjattavuus sekä joustavuus, vaikka kyseessä olisi itsenäisiä tuotanto- tai kulutuslähteitä. Liiallisen tuotannon hallinta varastoimalla sähköenergiaa tai siirtämällä jakeluverkkoa pitkin muille verkon asiakkaille toteuttaa osaltaan joustovaatimusta. Mikroverkkojen ohjausjärjestelmän valinnassa on huomioitava niiden tarjoamat itsenäisen saarekekäyttötilanteen lisäksi välittömät energian hallinta- ja ohjaustoiminnot (Tabatabaei & Kabalci & Bizon, 2020, s. 4-6.)

Puhekielessä mikroverkko-käsitettä on käytetty jopa yksittäisten hajautettujen energiatuotantolaitteistojen tapauksessa. On syytä korostaa, ettei aurinkosähköjärjestelmää voida pitää mikroverkkona, koska se on yleensä kytkettävä saarekekäytössä irti. Myöskään yksinkertaisia varavoimageneraattoreita ei voida pitää mikroverkkojärjestelmänä, koska ne toimivat yleisesti hätätilanteiden sähköenergian varmistajina (Microgrid Knowledge, 2022a.)

Kuvassa 3 on esitetty mikroverkon tämän tutkimuksen mukaisten lähteiden avulla kerätty luokitteluvaihtoehdot. Mikroverkkojen luokittelua tehdään tuotantokapasiteetin sekä erilaisien käyttäjien markkinarakenteiden mukaan (Singh, A., R., Lei, D., Kumar, A., Singh, R. & Meena, N., K., 2020 s. 2-4). Tabatabaein mukaan luokittelu on jaettu viiteen (5) eri luokkaa, joita ovat 1) kampustyyppiset, kuten koulurakennuksien ja sairaaloiden mikroverkot, 2) kaupalliset, 3) yhteisölliset, 4) maanpuolustukseen liittyvät ja 5) puhtaasti Off-grid eli saareketyypiset mikroverkot (Tabatabaei & muut, 2020, s. 4-6). Edellisten luokkien lisäksi on esitetty myös datakeskusten, teollisuuden, asuinkiinteistöjen, kriittisten ja julkisten palveluiden perusteella luokiteltuja mikroverkkoja (Microgrid Knowledge, 2022b).



Kuva 3. Tutkimuksessa käytettyjen lähteiden perusteella luotu mikroverkkojen luokittelu-malli.

Kolmas mikroverkkojen luokitteluun liittyvä tekijä on jakelujärjestelmän tekniseen ratkaisuun perustuva. Jakelujärjestelmänä voidaan käyttää tasavirta- (DC, Direct Current), vaihtovirtajärjestelmää (AC, Alternating Current) tai näiden yhdistelmää, jota kutsutaan myös hybridimikroverkoksi (Guerrero, J. & Kandari, R., 2021, s. 4-6). Luokittelu menee jossain kohden päällekkäin, esimerkiksi markkinoiden mukaan luokitelluissa tapauksissa, jossa kriittisiksi palveluiksi voidaan lukea sekä sairaalan sähköverkkoon, että kampusrakennuksiin liittyvät mikroverkkototeutukset.

2.2.1 Etuja ja haasteita

Pienimuotoisten tuotantoyksiköiden integrointi, sähköntuotanto lähellä kuormia ja mahdollisuus toimia verkkoon kytkettynä tai erillisessä saareketilassa ovat mikroverkkojen pääpiirteitä. Näiden ominaisuuksien perusteella voidaan saavuttaa etuja, kun pyritään verkon luotettavuutta sekä ympäristöä koskeviin tavoitteisiin. Ensimmäiseksi esiin nostettakoon verkon toiminnan ja sähkön laadulliset asiat, jotka

- 1) vähentävät sähkökatkoja parantaen luotettavuutta,

- 2) alentavat häviöitä,
- 3) parantavat loistehotilannetta ja
- 4) vähentävät hajautetun tuotannon avulla keskitetystä tuotannosta sekä siirto- ja jakeluverkoista johtuvia keskeytyksiä.

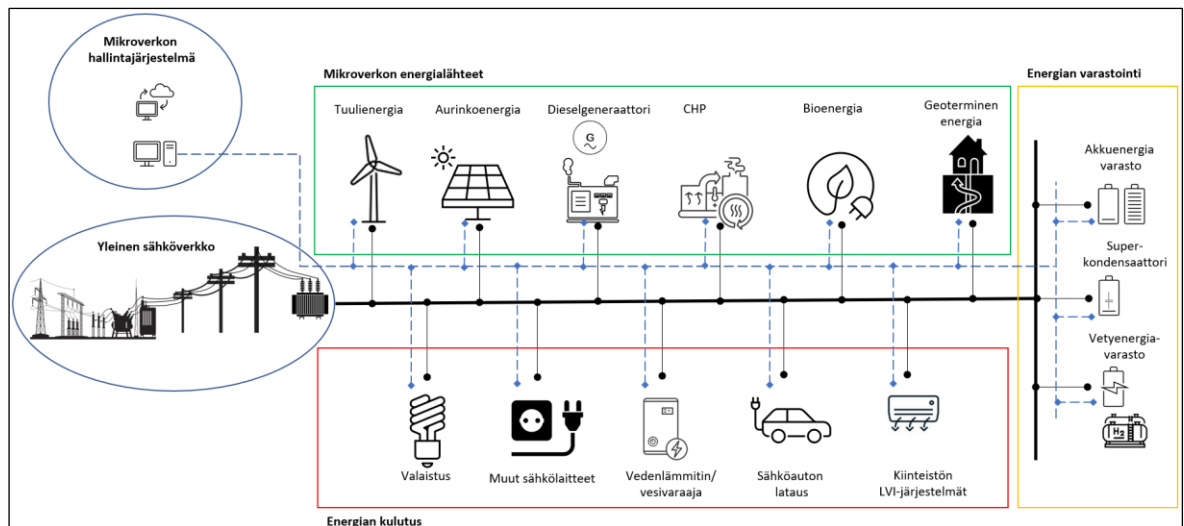
Toisena etuna nähdään ympäristöön vaikuttavat asiat, uusiutuvien energialähteiden käytön edistäminen ja kasvihuonekaasupäästöjen pienentäminen. Kolmantena etuna mainitaan taloudelliset ja markkinaan perustuvat näkökulmat, jossa mikroverkkojen ansiosta energiasta maksettava kustannus on pienempi, investointeja keskitettyyn tuotantoon voidaan vähentää sekä mahdollistetaan uusien palveluiden tuottaminen esimerkiksi energiayhteisöjen toimesta. (Delboni, L., F., N., Marujo, D., Balestrassi, P., P. & Oliveira, D., Q., 2019, s. 21-22).

Vaikka mikroverkkojen sanotaan toisinaan olevan minikokoisia sähkönjakeluverkkoja, niin niissä on joitain haasteita, joiden kehitystyö edelleen jatkuu (Delboni, L., F., N. & al, 2019, s. 22-23). Yksi keskeisistä haasteista on tätäkin työtä koskettava

- 1) suojaus, kun teho voi siirtyä kahteen suuntaan tai verkko on saarekekäytössä. Muita huomioitavia haasteellisia asioita ovat:
- 2) Stabiilisuus -haasteen muodostavat taajuus- ja jännitteensäätö, joiden vaikutukset ulottuvat myös suojauksen toteutukseen.
- 3) Kolmantena kehitystä vaativana kohteena on toiminnalliset ja topologiset näkökulmat, kuinka saadaan verkko toimimaan tekniseltä ja taloudelliselta kannalta optimaalisesti.
- 4) Neljäntenä haasteena pidetään viestintää ja sitä, kuinka sen avulla saadaan toteutettua riittävä, jossa tiedonsiirto on turvallista, edullista ja sen latenssiajat ovat lyhyitä.
- 5) Vaikka edellä etuna mainittiin taloudelliset ja markkinaperusteet, niin nämä ovat myös haasteita, koska uusiutuviin energialähteisiin perustuvien tuotantolaitosten investointikustannukset ovat korkeita. Mikroverkkojen tuottaman energian hinnoittelu ei ole vielä markkinahintojen tasolla, vaan markkinahintoja korkeampi suuremmasta kustannustasosta johtuen.

2.2.2 Pääkomponentit

IEEE:n määritelmän mukaan mikroverkon elementtejä ja komponentteja ovat: a) laitteet, jotka yhdistävät mikroverkon jakelujärjestelmään b) mikroverkon ohjausjärjestelmä, mukaan lukien energianhallintajärjestelmä c) paikallisten jakelujärjestelmien komponentit d) laitteet mikroverkkoelementtien yhteen liittämiseen ja vuorovaikutukseen e) fyysiset laitteet, kuten energialähteet ja kuormat mikroverkon rajojen sisällä. (IEEE Std 2030.7-2017, s. 12; 26-29). Pääkomponentit ovat esitetty kuvassa 4: 1. yleinen sähköverkko, 2. mikroverkon tuotantopuoli eli energialähteet, 3. mikroverkon kulutuskojeet, 4. mikroverkon energiavarastot, 5. mikroverkon hallintajärjestelmä, 6. energian siirtotie ja 7. hallintayhteydet.



Kuva 4. Tutkimuksessa käytettyjen lähteiden perusteella luotu mikroverkon yleisrakenne ja pääkomponentit.

Mikroverkkojen toteutusratkaisuja on löydettävissä eri kokoisia, monimuotoisia ja eri jännitetasoilla toimivia (Mahmoud, M., S., 2017). Edellä on jo esitetty jakoperusteita, joista pääkomponentit voidaan erotella tuotannon, kulutuksen ja varastoinnin komponentteihin. Energian siirtämiseksi tarvitaan kaapeleiden tai kiskojen avulla toteutettava jakelujärjestelmä (IEEE PES 2022a). Eri komponenteista koostuvia järjestelmiä ja yksiköitä on ohjattava ja ohjaustoimintojen suorittamiseksi tarvitaan fyysinen yhteys (Engineerexperiences 2022a). Kuvaan 2 on kerätty työn kokoamisen aikana kerätty osakomponentteja, joita mikroverkon rakenteissa usein esitetään. Käytännössä mikroverkon tuotantopuolella voi olla lukematon määrä erilaisia tuotantotapoja, eikä kaikkia muotoja kuvasta löydy. Myös varastointi ja kulutuspuolella voidaan erilaisia osakomponentteja käyttää monipuolisesti.

Mikroverkkojen tuotantokomponentit perustuvat pääsääntöisesti uusiutuviin energialähteisiin ja niitä ovat aurinkoenergia, tuulienergia, yhdistetty sähkön ja lämmön tuotanto (CHP, Combined Heat and Power), bioenergia, geoterminen energia, vesivoimaenergia (Tilastokeskus 2022a), aaltoenergia sekä kasvi- että eläinperäinen energia (Pedraza, J., M., 2015, s. 1-51; Robert, F., C., Sisodia, G., S. & Gopalan, S. 2018). Tuotantopuolella on myös fossiililla polttoaineilla toimivia energialähteitä, joita käytetään tarvittaessa uusiutuvista energialähteistä johtuvien vajeiden paikkaamiseen.

Energian varastointiin käytetään yleensä eniten akkuteknologian eri vaihtoehtoja, jolloin puhutaan akkuenergiajärjestelmistä (BESS). Muita energianvarastointiin pystyviä ratkaisuja ovat vauhtipyörän (Flywheel) tai paineilman (Compressed air energy) avulla toteutettu energiavarasto, superkondensaattorien (Supercapacitors), kemiallisten suprajohteiden (SMES, Superconducting Magnetig Energy Storage) ja vetyteknologian (Hydrogen) avulla saadaan energiaa talteen myöhempää tarvetta varten (Andrei, H., Gaiceanu, M., Stanculescu, M., Andrei, P., C., Buhosu, R. & Badea, C., A., 2020. s. 182-183). Energian varastointiin on siis useita tekniikoita ja jokaisella varastointijärjestelmällä on omat edut ja kehitettävät haasteet, kun huomioidaan taloudelliset kustannukset, energian ja tehon kapasiteetti, itsenäinen toiminta, reagointiajat verkkoon kytkeytyessä tai verkosta poiskytketyessä, käyttöikä ja vanheneminen (Bordons, C., Garcia-Torres, F. & Ridao, M., A., 2020. s. 3-5).

IEEE:n standardissa kuormitus on jaettu kahteen luokkaan sähkönsyötön luotettavuusvaatimusten sekä henkilö- ja omaisuusturvallisuuden mukaisten jakoperusteiden avulla (IEEE Std 2030.9-2019, s. 14-15). Keskeytymättömänä kuormana pidetään tilanteita, jossa sähkökatkotilanteessa henkilövahinkojen riski on korkea, taloudelliset menetykset ovat merkittävät tai kuluttajien normaali toiminta keskeytyy. Jaksottaisena kuormana on vastaavasti huippukuormituksen aikana tai hätätilanteissa kuormitus, jonka tehovirtaus saadaan katkaista tai tehovirtausta voidaan laskea.

Mikroverkkojen kulutuskomponentit rakentuvat kuluttajaa palvelevan verkkotyypin sekä kuluttajatyypin tarpeiden mukaisesti. Kuluttajatyypeillä on erilaiset tarpeet, miten kulutuskojeita tarvitaan ja mihin ajankohtaan tarve sijoittuu (Bordons, C. ja muut, 2020 s. 147-167). Kulutusta toteuttavia komponentteja onkin lukematon määrä ja tässä luodaan katsaus esimerkinomaisesti laitteisiin ja niiden yleisiin määrittämissä perusteisiin. Kulutuksen komponentit ovat jaettavissa joustamattomiin kuormituksiin, aikajoustaviin kuormituksiin sekä tehojoustaviin kuormituksiin (Nayak, A., Lee, S. & Sutherland, J.W., 2019). Joustamattomien

kuormien ottamaa kulutusta on yleensä mahdoton siirtää toiseen ajankohtaan ja näitä ovat esimerkiksi ruoan valmistukseen ja säilytykseen sisältyvät kulutuskojeet, sekä tapauskohtaisesti valaistus. Aikajoustavassa kuormituksessa kulutuksen ajankohtaa voidaan muuttaa esimerkiksi päivältä yölle ja tällaisia kojeita ovat muun muassa lämminvesivaraaja, pyykinpesukone ja astianpesukone. Tehojoustavien kuormien sanotaan olevan myös ”dynaamisia kulutuskojeita”, eli niiden tehoa voidaan säätää energian kulutuksen mukaisesti. Erilaisiksi tehojoustaviksi kulutuskojeiksi mainitaan esimerkiksi kiinteistön LVI-järjestelmä, säädettävä valaistus, sähköajoneuvojen lataus, sekä muu energian varastoimista palvelevat varastointia suorittavat laitteistot (Bordons, C. ja muut, 2020 s. 147-167).

2.2.3 Liitynnät

Standardi IEEE 2030-2011 esittää kolme arkkitehtonista näkökulmaa älykkäiden sähköverkkojen liitännöihin. Sähkövoimajärjestelmä, viestintä- ja tietotekniikkajärjestelmät muodostavat mikroverkkojen sekä vastaavien älysähköverkkojen toiminnallisuuden kannalta keskeisen kokonaisuuden, jotta yhteensopivuuteen liittyvät vaikutukset, rajoitukset ja mahdolliset ongelmat huomioitaisiin riittävän laajasti kaikkien järjestelmien osalta. (IEEE Std 2030-2011, s. 1-2; 28-29; 42; 65).

Sähkövoimajärjestelmän osalta fyysisissä liitynnöissä on otettava huomioon 1) yleisen verkon ja mikroverkon liityntäpiste (PCC, Point of Common Coupling), 2) verkon tekninen rakenne, 3) jakelujärjestelmän tyyppi ja 4) maadoitusratkaisu, sekä 5) jännitetasot, 6) laitteistojen tyypit ja määrät, 7) verkon teho ja niiden virtaukset, 7) oikosulkuvirrat sekä 8) toiminnan turvallisuus (IEEE Std 2030.9-2019, s. 17-21). Viestintäjärjestelmän fyysisten liitännöjen valintaan vaikuttavat etäisyys, haluttu siirtotie, siirtoteknologia ja investointikustannukset. Viestintäjärjestelmän siirtotie voidaan toteuttaa optisen verkon, Ethernet -verkon, automaatioväylän tai jopa langattoman verkon kautta (Avendaño J. L. S. & Martin, L. S. M. 2019, s. 73-79).

Yleiseen sähköverkkoon liityttäessä on Suomessa annettu kansallinen ohjeistus, joka määrittelee ehdot luotettavalle ja turvalliselle toiminnalle verkkoon liittämisen jälkeenkin (Verkostosuositus YA9:13, 2019). Mikroverkkojen tuotantoyksiköt ovat yleensä mikrokokoisia ja ne ovat pääsääntöisesti pienjänniteverkkoon (LV, Low Voltage) liitettäviä järjestelmiä.

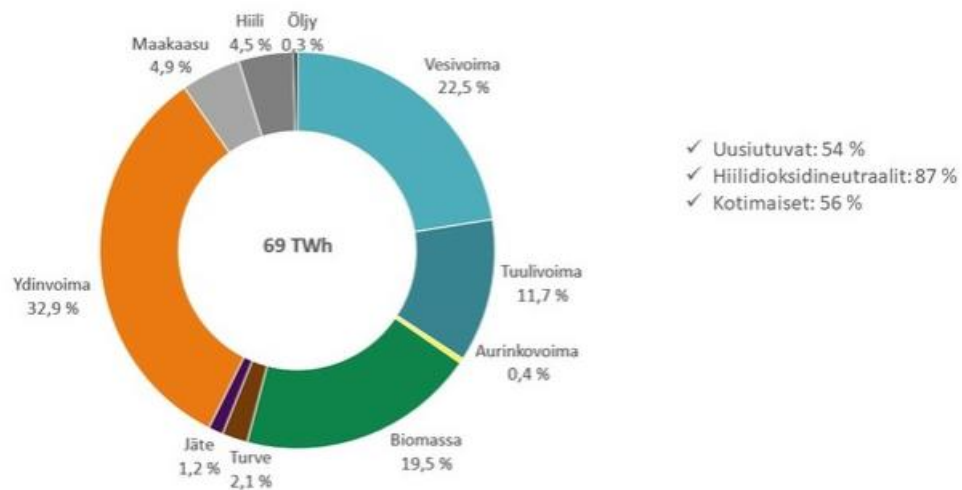
PJ-verkon tuotanto kulutetaan yleensä samassa kiinteistössä kuin se tuotetaan. Mikroverkkojen liittymisessä 1) tuotannon määrä, 2) verkkoon kytkeytyminen ja verkosta erottaminen myös vikatilanteissa, 3) työturvallisuus, 4) sähkönlaatu, 5) energian mittaus, 6) sopimus ja hinnoittelu muodostavat osaltaan kansallisesti keskeiset liityntäperiaatteet.

Mikäli kiinteistön sähköliittymä on toteutettu normaalitilanteessa syöttävänä keskijännite-liittymänä (MV, Medium Voltage), jossa mikroverkkoratkaisu on toteutettu pienjänniteverkkoon, on mahdollista ylituotantotilanteissa siirtää sähköenergiaa jakelumuuntajan kautta takaisin syöttävään verkkoon ja silloin KJ-verkko on osa mikroverkkoon kytkeytyvää kokonaisuutta. Pientuotantoa verkkoon liitettäessä on jakeluverkkokohtaisia raja-arvoja, milloin liityntä tehdään PJ-verkkoon tai milloin KJ-verkkoon. KJ-verkon liittymisessä noudatetaan samanlaisia periaatteita kuin yllä mainitussa PJ-verkossa, jolloin suojalaitteiden avulla pitää varmistaa irtikytkentä yleisestä verkosta verkkosyötön katketessa (Verkostosuositus YA9:13, 2019). Tuotannon kytkeytyminen on myös estettävä, mikäli taajuus tai jännite poikkeavat raja-arvoista.

2.3 Kiinteistön energian tuotantolaitteet

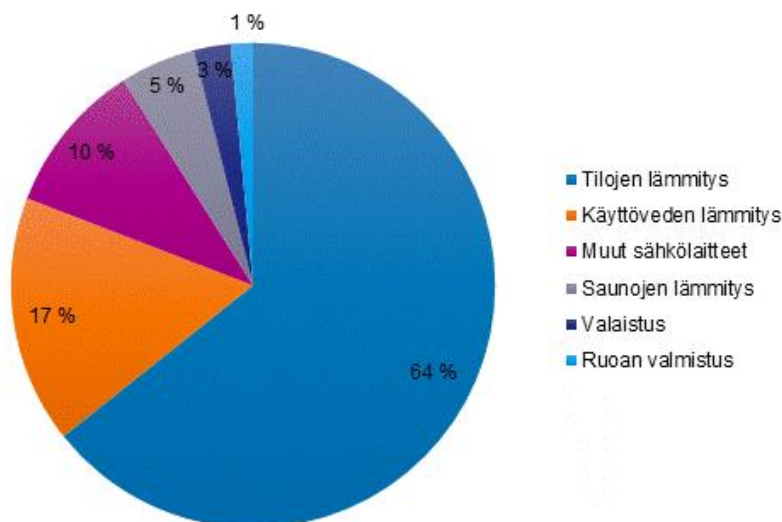
Kiinteistöissä kulutettu kiinteistön energia on perinteisesti tuotettu keskitetysti muualla ja siirretty yksisuuntaisesti kulutuskojeille. Uusiutuvien energiantuotantolähteiden hintojen laskiessa, ilmastollisten vaikutteiden sekä myös poliittisten päätösten vuoksi kiinteistöjen omistajat ja haltijat kokevat tarpeelliseksi lisätä hajautettua energian tuotantoa. Aiemmin luvun 2 komponenttien yhteydessä on kerrottu tuotantolaitteista, jotka soveltuvat pääsääntöisesti myös kiinteistön energian tuotantoon ja soveltuvat myös mikroverkkokäyttöön. Sähkön kokonaistuotanto Suomessa (Kuva 5) perustuu toistaiseksi vielä keskitettyihin ratkaisuihin, mutta huomionarvoista tässä on uusiutuvien energialähteiden osuus, joka on yli puolet kokonaistuotannosta (Energieollisuus 2022b). Uusiutuvien energialähteiden käyttö on valtakunnallisesti toteutettu keskitettynä ratkaisuna. Kiinteistöjen osalta uusiutuvan energiantuotannon laitteistot lisääntyvät tulevaisuudessa.

Sähkön tuotanto energialähteittäin 2021



Kuva 5. Sähkön tuotanto energialähteittäin vuonna 2021 (Energiateollisuus 2022b).

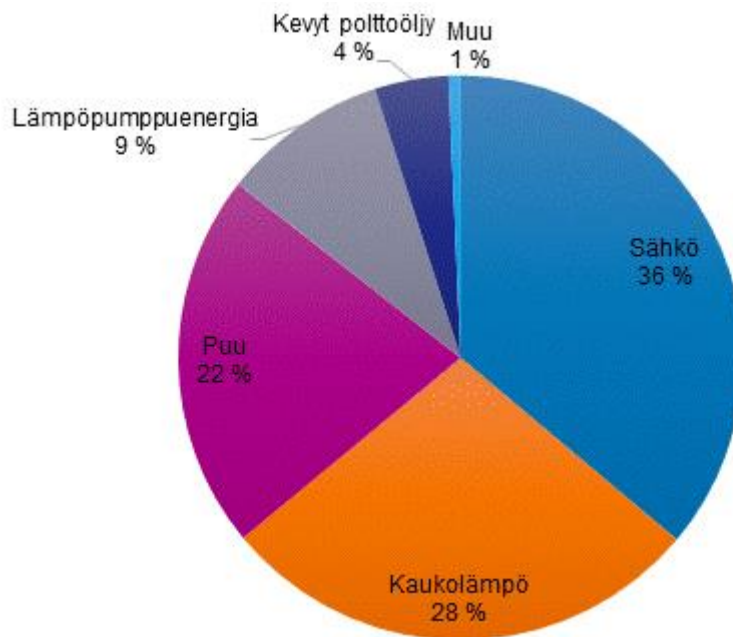
Suomessa energiankulutus jakautuu asumisen osalta kuvan 6 mukaisesti, josta selkeästi on havaittavissa energiaa kuluvan suurimmalla osuudella lämmitykseen (Tilastokeskus 2022b). Lämmityksen suuren osuuden vuoksi myös lämpöenergian tuotantoon liittyvien laitteistojen käyttö on lisääntynyt runsaasti lämpöpumppujen muodossa (Motiva 2022d, s. 12-13). Aurinkolämpötekniikkaa voidaan käyttää tukemaan lämpöenergian tuotantoa vesikiertoisissa järjestelmissä (Motiva 2022d, s. 17-18).



Kuva 6. Asumisen energiankulutus vuonna 2020 (Tilastokeskus 2022b).

Kuvassa 7 on esitetty asumisen energiankulutus energialähteittäin, josta on pääteltävissä energian tuotantoon tarvittavia tuotantumuotoja (Tilastokeskus 2022c). Lämmöntuotannon

muodot vaihtelevat erilaisissa kiinteistöissä. Kaukolämpö on merkittävin lämmönlähde asuin- ja palvelurakennuksissa, jonka pääpolttoaineet ovat maakaasu, kivihiili, turve ja puu (Motiva 2022e). Kiinteistöissä tulee todennäköisesti tilanteita, jolloin energiaa on yli tarpeen ja silloin tehotasapainon saavuttamiseksi on energian kulutusta lisättävä, energiaa varastoitava tai energia on siirrettävä muualle verkon kulutuspisteeseen (Harsia, P., Järventausta, P., Hilden, A., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Koskela, J., Mutanen, A., Rautiainen, A., Supponen, A., Uusitalo, S. & Heljo, J., 2019, s. 7).



Kuva 7. Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2020 (Tilastokeskus 2022c). Suomen kiinteistöissä yleisin sähköenergiaa mikroverkkoon tuottava laitteisto muodostuu nykyään aurinkosähköjärjestelmästä (Caruna 2022a). Aurinkosähköjärjestelmä rakentuu useista aurinkopaneeleista, sekä yhdestä invertteristä tai useimmista inverttereistä paneelien tuottaman tehon mukaan (ABB 2022a). Kiinteistöjen osalta pienemmissä rooleissa ovat muut sähköenergian tuotantoon kykenevät laitteistot ja järjestelmät. Pientuulivoimatuotanto on Suomessa vähäistä, vaikka se olisi käytettävissä läpi vuoden ja tukisi hyvin myös aurinkoenergiaa (Motiva 2022d, s. 19-20; Tuulivoimayhdistys 2022a). CHP:n asema ei ole Suomessa vielä yleistynyt pienimuotoisessa energiantuotannossa, mutta kehitysnäkymät muun muassa puu- ja biopohjaisten energialähteiden kehittyessä ovat optimistiset (Pesola, A., Vanhanen, J., Hagström, M., Karttunen, V., Larvus, L., Hakala, L. & Vehviläinen, I., 2014, s. 7-11). Pienvesivoiman hyödyntäminen olisi mahdollista, jos virtaavaa vettä on kiinteistön läheisyydessä. Pienvesivoiman hyödyntämisen haasteet liittyvät kustannusten lisäksi

lainsäädännön ja ympäristövaikutusten mukanaan tuomiin lisävaikutuksiin (Motiva 2022d, s. 23-25).

Tulevaisuudessa kun tekniikka kehittyy ja kustannustaso energiayksikköä kohden tulevat kuluttajan kannalta edullisemmiksi, on odotettavissa myös kiinteistöihin polttokennotekniikan avustuksella toimivia tuotantolähteitä (Abd el-Ghany, H.A., Rashad, E. M. & Azmy, A. M., 2022, s. 148-149). Polttokennojen ja vedyn avulla saadaan tuotantomuotoon myös toteutettua päästötön ratkaisu (VTT 2022a). Lisäksi on käytettävissä mikroturbiinien avulla tuotettava sähköenergia (Abd el-Ghany, H.A. ja muut, 2022, s. 149), joissa hyödynnetään paineistetun ilman kiertoa. Energialähteinä mikroturbiineille voidaan käyttää mm. maakaasua, biokaasua, nestemäisiä polttoaineita, nestekaasua, teollisuuden ja maatalouden jätekaasuja sekä biomassaperusteisia kaasuja (Soares, C., 2007, s. 37-38).

2.4 Kiinteistön energian kulutuslaitteet

Kiinteistöt muodostuvat erilaisista rakennuksista, jotka jaotellaan käyttötarkoitusten mukaisesti viiteentoista (15) eri pääluokkaan taulukon 1 mukaisesti (Mäkelä, P., Paavilainen, P. & Andersson, A., 2018, s. 8-9). Käyttötarkoituksen luokittelun avulla ilmaistaan energiatehokkuuden laskennalliset vaatimustasot, joiden perusteella energiatehokkuus on toteutettava uusien rakennusten sekä yleisesti 50 m² kerrosalaa lisäävien rakennuksien laajennuksissa (YMa 1010/2017). Edellä olleen kuvan 6 perusteella voidaan tehdä esimerkiksi asuinkiinteistön kulutuslaitteiden jakoa 1) lämmityslaitteisiin, 2) valaistukseen, 3) ruoan valmistukseen ja säilytykseen sekä 4) muihin sähkölaitteisiin. Teollisuus- ja tuotantokiinteistössä on lisäksi monenlaisia teolliseen tuotantoon liittyviä koneita, laitteita ja laitteistoja, joiden energian tarve on tuotanto- ja prosessikohtaista (Motiva 2022f, s. 20-23).

Taulukko 1. Rakennusluokituksen pääluokat (Mäkelä, P. ja muut, 2018, s. 8-9).

Pääluokka numero	Rakennusluokituksen pääluokka
1	Asuinrakennukset
2	Vapaa-ajan asuinrakennukset
3	Liikerakennukset
4	Toimistorakennukset
5	Liikenteen rakennukset
6	Hoitoalan rakennukset
7	Kokoontumisrakennukset
8	Opetusrakennukset
9	Teollisuuden ja kaivannaistoiminnan rakennukset
10	Energiahuoltorakennukset
11	Yhdyskuntatekniikan rakennukset
12	Varastorakennukset
13	Pelastustoimen rakennukset
14	Maatalousrakennukset ja eläinsuojat
19	Muut rakennukset

Kiinteistöjen sisältämien laitteiden, laitteistojen ja teknisten toteutusten merkitykset korostuvat, kun tavoitellaan energiatehokkuusvaatimuksien mukaisia tavoitteita. Monipuolisten teknisten ratkaisujen avulla voidaan saavuttaa uusia palvelumalleja sekä ohjaustoimenpiteitä. Kiinteistöjen energiankulutus on pidettävä mahdollisimman alhaisena ja tehohiippuja pyritään välttämään. Suomessa ollaan siirtymässä sähköenergian mittauksessa yhden (1) tunnin jaksolta 15 minuutin jaksoon (Harsia, P. ja muut, 2019, s. 13-15). Tämä aikajaksotus sekä kulutuksen ajallinen tarkastelu ovat keskeisessä roolissa esimerkiksi kulutusjoustotoimenpiteitä suunniteltaessa.

Edellisen luvun kuvien 6 ja 7 perusteella nähdään kiinteistön energiatarpeen olevan kokonaisenergiamäärässä mitattuna lämmitykseen liittyvää, joten kiinteistön energiaa kuluttavat laitteet ovat energiamäärässä tarkasteltuna yleensä lämpöenergiaa tuottavia laitteita. Lämpöenergiaa tuottavia laitteita ovat esimerkiksi sähköpatterit, lattialämmityskaapelit, kiukaat, säteilylämmittimet ja muut vastaavat sekä sähkökattilat ja sähköllä toimivat vesivaraajat (Harsia, P. ja muut 2019, s. 40-92). Lämpöpumput ovat energiatehokkaita sähkölämmittimiä ja näihin kuuluvat maa-, ilma-, poistoilma-, ilma-vesilämpöpumput (Kortetmäki, A., Harsia, P. & Kallioharju, K., 2021, s. 6-7). Kiinteistöjen sisäilman lämmityksessä käytetään pääsääntöisesti koneellista ilmanvaihtoa ja usein tuloilman lämmittämiseen käytetään sähköenergiaa. Lämmitystä tukevia laitteita, jotka käyttävät sähköenergiaa muun muassa

ohjauksiin ja havaitsemiseen ovat termostaatit, sähköiset venttiilit, vesikiertoa suorittavat moottorit kuten kiertovesipumput ja automaatiojärjestelmät.

Kiinteistö sisältää lämmityksen lisäksi lukemattoman määrän erilaisia kulutuslaitteita asuminen toiminnoissa. Ruoan valmistuksessa sähköuuni ja -liesi, ruoan säilytyksessä jääkaappi, pakastin ja viileätilat, kodin päivittäishuoltoa tukevat astianpesukone, pyykinpesukone, kuivauskaappi ja kuivausrumpu. Kiinteistötyypistä riippuen myös jäähdytys ja valaistus saattavat muodostaa suuren osuuden sähköenergiaa kuluttavista laitteistoista (Motiva 2022f, s. 16-17). Asuinkiinteistön kuluttajan omistamat pistorasialiitännäiset laitteet voivat olla myös paljon sähköenergiaa kuluttavia, joten energiatehokkuuden parantamiseksi nekin olisi hyvä selvittää kulutusjousto mietittäessä. Aiemmin auton lämmitys ja nykyään yhä enemmän sähköisten kulkuneuvojen latausjärjestelmä on asuinkiinteistöjen osalla merkittävä sähköenergian kulutuslaitteisto (Harsia, P. ja muut, 2019, s. 66-67).

Sähköenergian kulutuksen ja tuotannon pitämiseksi nk. tasapainotilanteessa on niiden oltava yhtä suuret. Perinteisesti tasapainoa on ylläpidetty säätövoiman, esimerkiksi vesivoiman, avulla vastaamaan kulutusvaihteluita, jotta tehotasapainotilanteen mukainen taajuus 50,0 Hz pysyisi mahdollisimman lähellä ($\pm 0,1$ Hz) annettua arvoa (Liedes, R., Harsia, P., Honkapuro, S., Heinola, M., Ruostetsaari, I., Karppinen, T., Honka-la, A., Sirviö, A., Valli, M., Pehkonen, E. & Ellmén, R., 2021, s. 5). Uusiutuvan energiatuotannon sekä tasaisesti tuottavan ydinvoiman lisäksi tarvitaan tehotasapainotukseen menetelmä, jos esimerkiksi taloudelliset raja-arvot nostavat lisätuotantoenergian kannattamattomaksi. Menetelmä, jolla tehotasapainotilanne voidaan saavuttaa, on kulutuslaitteiden avulla tehtävä kulutusjousto (DR,). Kulutusjousto on periaatteessa osallistua kaikki laitteet ja laitteistot, mutta käytännössä jousto pitää toteuttaa edellä mainitun luvun 2.1.2 mukaisten toiminnallisten ehtojen mukaan. Nämä toiminnalliset ehdot ovat kuormituksesta johdettuna:

- joustamaton kulutus
- aikajoustava kulutus
- tehojoustava kulutus

Joustamaton kulutus on koko ajan verkossa nk. pohjakuormaa, jonka energiantarve on tyydytettävä ”aina”. Aikajoustavan kulutuksen avulla voidaan siirtää energian tarvetta toiseen ajankohtaan, esimerkiksi vuorokauden sisällä. Tehojoustavassa kulutuksessa voidaan kulutuskorkeuteen tarvitsemää tehomäärää säätää muu kulutus huomioiden. Asuinkiinteistössä

energian kulutusjoustoja voidaan toteuttaa muun muassa sähkölämmityksen, käyttöveden lämmityksen, koneellisen ilmanvaihdon, sähköauton latauksen, jäähdytyksen ja sähkökiukaan avulla (Motiva 2022g).

3 Mikroverkkojen tekniikka

Mikroverkkojen tekniikkaa ja komponentteja on esitelty yleisellä tasolla 2 luvussa. Tämän luvun tavoitteena on antaa lukijalle tarkempi kuvaus käytettyjen laitteiden ja laitteistojen tekniikasta, teknisistä toteutuksista sekä teknologisista ratkaisuvaihtoehdoista. Mikroverkkojen tekniikka rakentuu yksittäisten komponenttien lisäksi laitteistoista, järjestelmistä sekä tehonsiirtoon ja laitteiden väliseen tiedonsiirtoon liittyvistä kaapeloinneista ja ohjelmistoratkaisuista. Kokonaisuudet ovat hyvin monipuolisia vaihdellen toteutusratkaisujen mukaisesti. Mikroverkkojen avulla pyritään hyödyntämään uusiutuvan energian mukaista tuotantoa, energian varastointia sekä energian kulutusmuutoksia, joihin rakennetaan toteutus monipuolisen tekniikan avulla. Työssä ei kuitenkaan lähdetä syventymään minkään järjestelmän toimintaperiaatteisiin, esimerkiksi siihen, kuinka auringon valosta energia muutetaan sähköenergiaksi.

Mikroverkkoihin energiaa tuottavien uusiutuvien energialähteiden sekä sähköenergian varastoinnissa käytettävät tekniikat perustuvat yleensä tehoelektroniikkaan (Chowdhury, S., Chowdhury S, P. & Crossley, P., 2009, s. 97). Tehoelektroniikka muokkaa tasasähköstä vaihtosähköä esimerkiksi aurinkopaneelien tuottamasta tasavirrasta (Molina, M., G. & Mercado, P., E., 2019, s. 49) tai muuntaa ensin vaihtosähkön tasasähköksi ja takaisin vaihtosähköksi esimerkiksi tuulivoimaloiden generaattoreista verkkoon (Molina, M. G. & Mercado, P. E., 2019, s. 41).

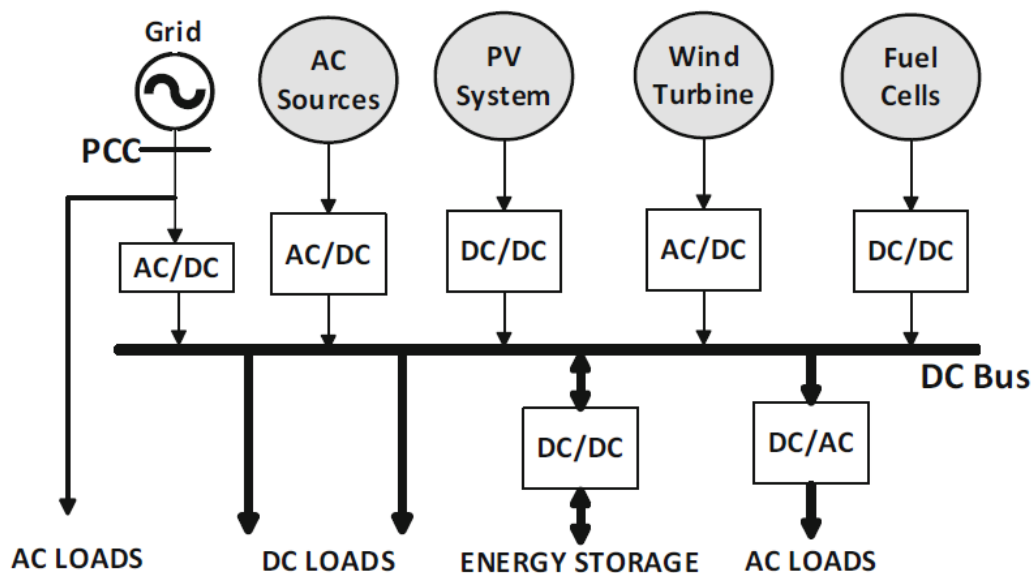
Mikroverkkojen sanotaan olevan erittäin dynaamisia rakenteita, jotka edellyttävät jatkuvaa verkon tilan seuranta ja tämän tilan seuraamiseksi tarvitaan tiedonkeruuta varten mittalaitteita, antureita sekä järjestelmän viestintäinfrastruktuuri (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 69). Viestintäinfrastruktuurin rakenne toteutetaan yleensä haluttujen toimintojen, laitteistojen sekä käytettävien yhteysmuotojen mukaisesti, joten tähänkään ei ole yhtä ja oikeaa tapaa. Myös viestintätekniikkaan liittyvät parametrit, kuten kaistanleveys, latenssi-aika, datapakettien koko, tiedonsiirtokyky ja tietojen käsittelyn suojaus (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 73). Ohjausten tekninen toteutus voidaan tehdä keskitettynä tai hajautettuna. Keskitetyssä tuotannossa mikroverkko-ohjain on yhdessä paikassa keräten kaiken tiedon ja hajautetussa järjestelmässä voi jopa jokaisella yksiköllä olla oma ohjaimensa (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 71).

3.1 Perusominaisuudet

Mikroverkkojen luokittelun yhteydessä luvussa 2.2 esitettiin eroavaisuuksia teknisten toteutusten vaihtoehdoille. Luokittelussa olivat esillä tasa- ja vaihtovirtajärjestelmät sekä hybridiratkaisut.

3.1.1 Tasavirtarakenne

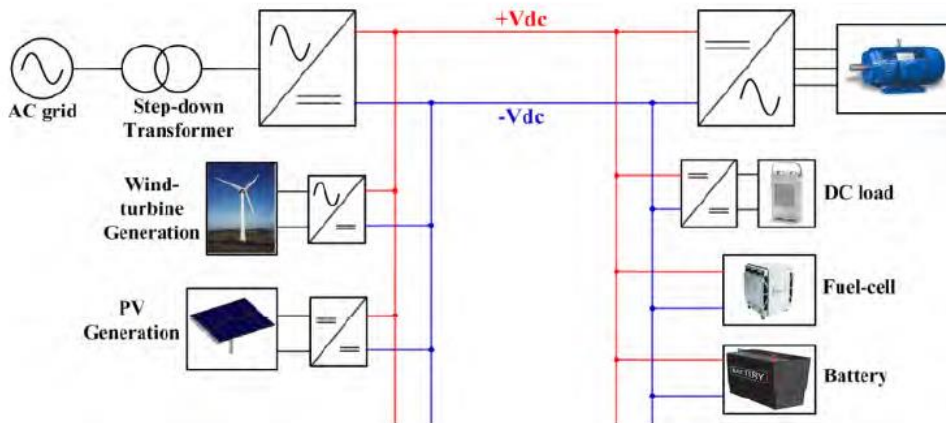
Tasavirtajärjestelmissä (DC) sähköenergian jakelu toteutetaan kuvan 8 mukaisesti tasavirtajakeluna. Tasavirran avulla toteutetuissa järjestelmissä on toisinaan, kuten muissakin mikroverkkojärjestelmissä, myös vaihtovirralla toimivia laitteita tasavirtalaitteiden lisäksi. Sähkövirran sekä jännitteen muodon ja määrän muokkaukset toteutetaan tehoelektroniikkaan perustuvien AC-DC-, DC-DC- ja DC-AC-suuntaajien avulla (Iskender, I. & Genc, N., 2020, s. 121). Verkkoonliityntä (PCC) toteutetaan yleensä verkkokytkimen ja tasasuuntaajan avulla toteutetulla ratkaisulla, jossa mikroverkon vaihtovirtalaitteita voi olla kytkettynä ennen suuntaajaa. Tasavirtaa tuottavat laitteet sekä energiavarastot ovat usein eri jännitetasoilla toimivia, joten niiden tasavirtakin on muutettava jakelua vastaavalle tasolle.



Kuva 8. Tasavirtamikroverkko (Iskender, I. & Genc, N., 2020, s.120).

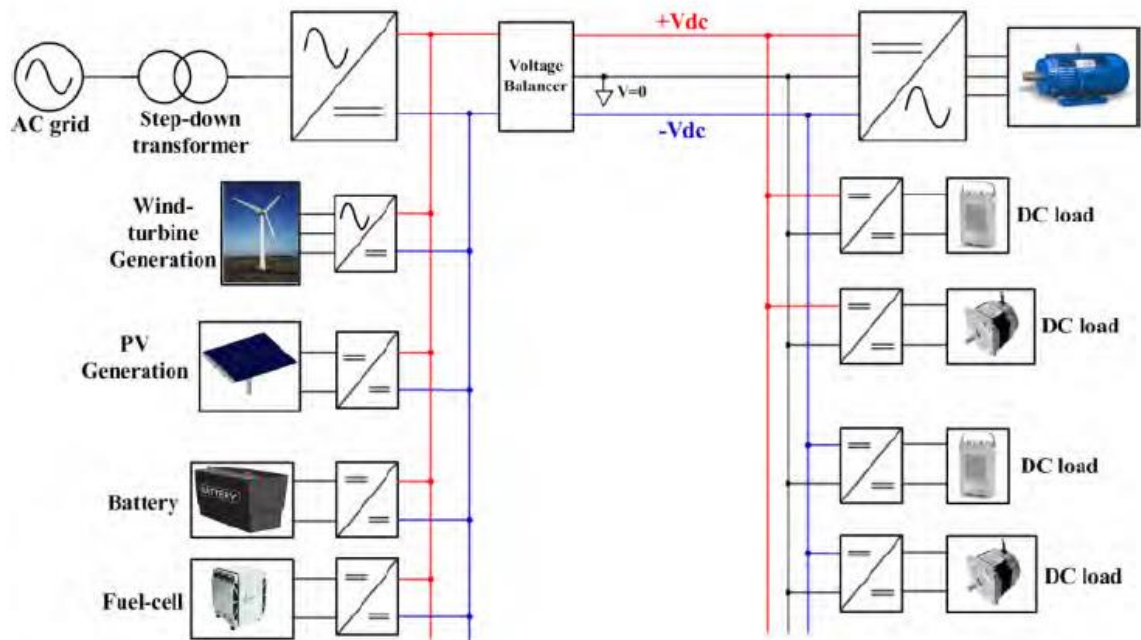
Tasavirtamikroverkoissa on lisäksi myös sisäisen rakenteen vuoksi eroavaisuuksia ja käytettävissä ovat nk. yksi- ja kaksinapainen tekniikka (Kandari, R., Neeraj & Mittal, A., 2022,

s. 94-95). Kuvan 9 mukaisessa yksinapaisessa eli ”unipolar” tekniikassa, jakelujärjestelmä koostuu kahden johtimen järjestelmästä, joista toinen on positiivinen ($+V_{DC}$) ja toinen negatiivinen ($-V_{DC}$) tai neutraali (Chauhan, R. K., Rajpurohit, B. S. & Pindoriya N.M., 2012).



Kuva 9. Yksinapainen (unipolar) ”kaksijohtiminen” tasavirtajärjestelmä (Kumar, D. & Zare, F., 2017).

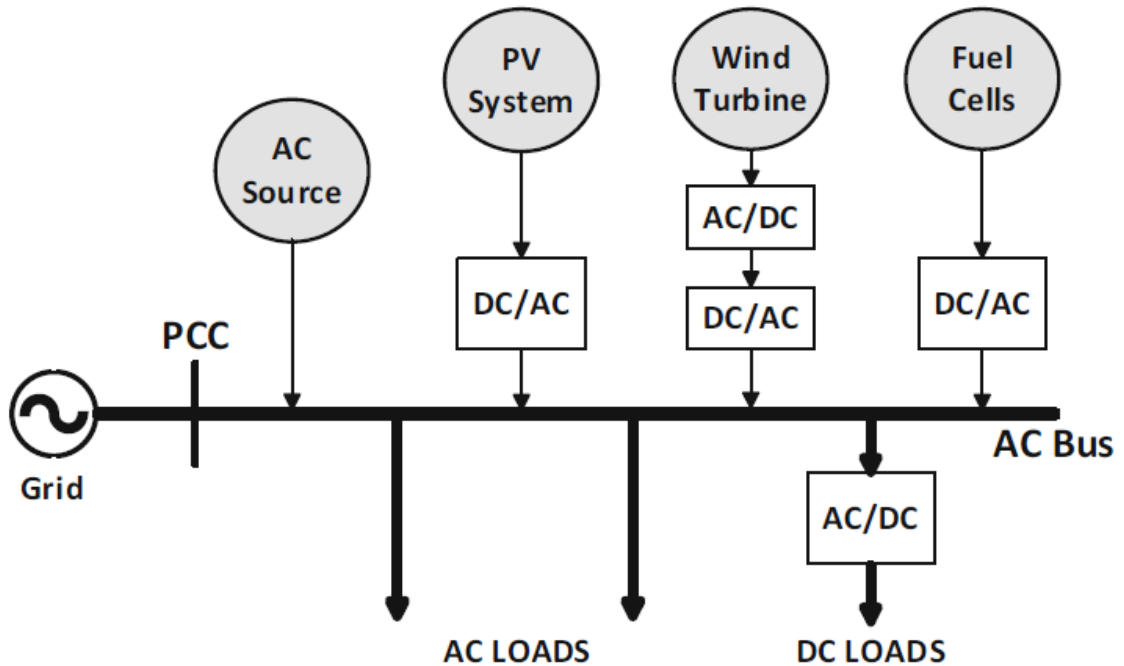
Toinen tasavirtaverkkojen jakelujärjestelmä rakentuu kolmen johtimen muodostamasta kuvan 10 mukaisesta kaksinapaisesta eli bipolar -tekniikasta. Jakelujärjestelmä koostuu kolmesta johtimesta, joista yksi on positiivinen ($+V_{DC}$) ja toinen negatiivinen ($-V_{DC}$) ja kolmas toimii neutraalina ”keskipistejohtona” (Chauhan, R. K., Rajpurohit, B. S. & Pindoriya N.M., 2012). Tämä mahdollistaa kolmen eri jännitetason käyttämisen, $+V_{DC}$, $-V_{DC}$ ja $2*V_{DC}$ ja lisäksi yhden tasavirtanavan vikaantuessa tehonsyöttöä voidaan jatkaa kahden muun johdon kautta. Yleiseen jakeluverkkoon toteutettu tutkimus- ja pilottikohde kaksinapaisesta järjestelmästä on toteutettu Suomessa haja-asutusalueelle (Kaipia, T., Karppanen, J., Nuutinen, P., Pinomaa, A., Mattsson, A., Peltoniemi, P., Silventoinen, P. & Partanen, J., 2016).



Kuva 10. Kaksinapainen (bipolar) ”kolmejohtiminen” tasavirtajärjestelmä (Kumar, D. & Zare, F., 2017).

3.1.2 Vaihtovirtarakenne

Vaihtovirtatekniikan (AC) avulla toteutetut mikroverkot ovat yleisempiä kuin tasavirta- tai hybridirakenteet (Lihu, J., Yongqiang, Z. & Yinshun, W., 2015). Vaihtovirtarakenteen mukaista mikroverkkoa ajatellen on Suomen sähkönjakelujärjestelmä rakennettu kolmivaiheisena vaihtovirtatekniikalla, jolloin tekniikan osalta ei tarvitse tehdä suuria muutoksia verkotopologiaan. Kuvassa 11 esitetään vaihtovirtamikroverkkoon perustuva periaatteellinen jakelukaavio yksiviivaesityksenä.



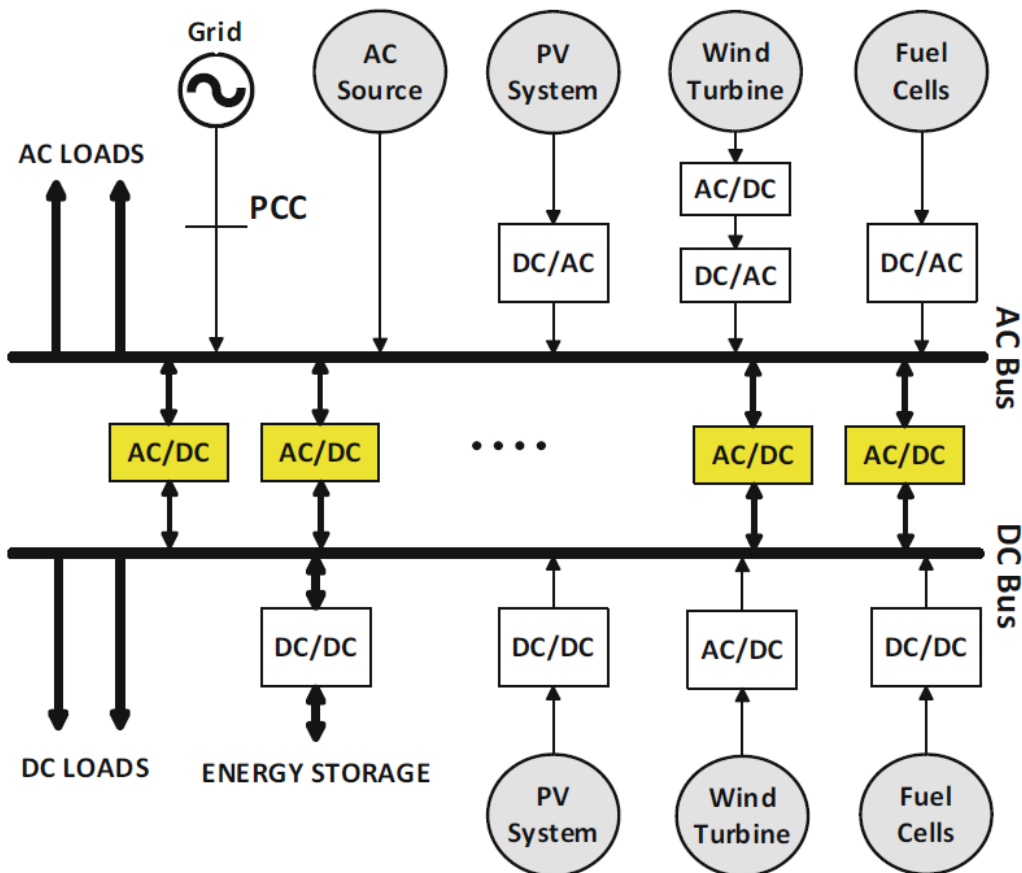
Kuva 11. Vaihtovirtamikroverkko (Iskender, I. & Genc, N., 2020, s. 118).

Mikroverkkojen liittyminen julkiseen verkkoon ja erotus julkisesta verkosta toteutetaan verkon liittymispisteessä (PCC) ja kytkentä toteutetaan joko katkaisijan, kytkimen tai kontaktorin avulla (Planas, E. Andreu, J., Gárate, J. I., Martínez de Alegría, I. & Ibarra, E., 2015). Vaihtovirtaa tuottavat energialähteet sekä vaihtovirtaverkon kuormituslaitteet liittyvät myös suoraan kiskoon suojalaitteiden välityksellä. Muiden kuin vaihtovirtaa tuottavien energiantuotantolaitteiden, energiavarastojen sekä tasavirtakuormien verkkoon liittämiseksi käytetään kuvan (kuva 11) mukaisia tehoelektroniikkaan perustuvia suuntaajia. Suuntaajat muokkaavat eri jännitetasoissa ja -muodoissa käytettävän jännitteen verkkorakenteen mukaiseen vaihtovirtaverkkoon. Verkkoon liittyneiden suuntaajien pitää huolehtia jännitteen ja taajuuden säädöstä (Gaiceanu, M., Arama, I. N. & Ghenea, I., 2020, s. 144).

3.1.3 Hybridirakenne AC-DC

Hybridi-mikroverkko koostuu sekä vaihtovirta- että tasavirtajakelusta, kuten kuvassa 12 on esitetty. Vaihtovirtakiskon puolelle voidaan kytkeä vaihtovirtaa käyttävät tuotantolaitteistot, kuormat ja verkkoliityntä samoilla periaatteilla kuin edellä kuvattiin vaihtovirtajärjestelmien yhteydessä. Tasavirtakiskoon on liitettävissä vastaavasti sitten tasavirtarakenteen yhteydessä

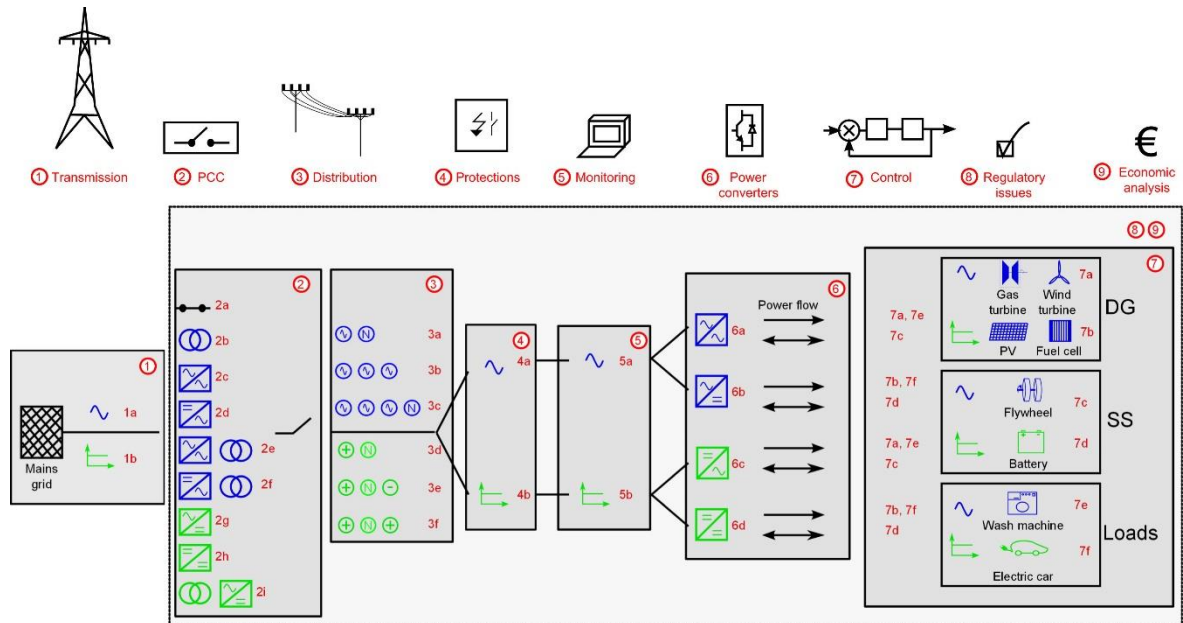
mainittuja laitteistoja samanlaisilla periaatteilla. Hybridirakenne mahdollistaa monipuolisesti toteutettavia vaihtoehtoja, sillä esimerkiksi energiatuotannon laitteistot ovat kytkettävissä sekä vaihtovirta-, että tasavirtakiskoon. Jännitteen ja virran muodon ja tason vaihto vaihtovirtajakeluverkon ja tasavirtajakeluverkon välillä tapahtuu käyttämällä kaksisuuntaista suuntaajatekniikkaa.



Kuva 12. Hybridimikroverkko (Iskender, I. & Genc, N., 2020, s. 118).

Kuvassa 13 esitetään tasavirta- ja vaihtovirtaverkon sisältämien ratkaisuvaihtoehtojen erilaisia toteutuksia, joita mikroverkon eri osissa käytetään. Yleisen sähköverkon siirto-/jakelinjassa (1) voidaan käyttää sekä vaihtojännitettä (1a), että tasajännitettä (1b). Liityntäpisteessä (2) on käytettävissä erilaisia yhdistämismuotoja julkiseen verkkoon, on suoraa liittymää (2a), muuntajan (2b) välityksellä tehtäviä liittymöitä, monenlaisia suuntaaja-/muuttajaliittymöitä (2c, 2d, 2g, 2h) ilman muuntajia ja muuntajien kanssa (2e, 2f, 2i). Mikroverkon jakelu (3) on toteutettavissa 1-vaiheisena (3a), kolmivaiheisena (3b, 3c) vaihtojännitteellä sekä erilaisilla tasajännitetoteutuksina (3d, 3e, 3f). Suojausratkaisut (4) sekä verkon tilatietojen esittäminen (5) perustuvat myös jakelujännitteen mukaiseen periaatteeseen.

Tehoelektronisten suuntaajien ja muuttajien (6) avulla jännitteen ja virran muotoa voidaan muuttaa vaihtovirrasta (6a, 6b) joko toisenlaiseen vaihtovirtatasoon tai tasavirraksi ja vastaavasti sitten tasavirrasta (6c, 6d) toiseen tasavirtatasoon tai vaihtovirraksi. Ohjausten (7) avulla toteutetaan mikroverkon toimintojen oikeellisuus verkon käyttötilanne huomioiden.



Kuva 13. Mikroverkon yleiskaavio, jossa esitetty vaihtovirta (AC) ja tasavirta (DC) järjestelmien eroavaisuudet (Planas, E. ja muut, 2015).

Edellä olevan kuvan (kuva 13) mukaan on mikroverkoissa kiinnitettävä huomioita myös teknisten reunaehtojen lisäksi sääntelystä (8) johtuviin asioihin, esimerkiksi verkkoonliittymisehtoihin sekä mahdollisen kaksisuuntaisen tehonsyötön aiheuttamaan mittarointivaatimukseen. Kustannusanalyysissä (9) pitää mukaan laskea verkon investointien lisäksi myös tulevan käytön aikaiset kustannukset ja kokonaiskustannusten avulla verrata niitä saataviin hyötyihin.

3.1.4 Mikroverkon hallinta ja ohjaustekniikka

Mikroverkon ohjausjärjestelmä (MGCS, Microgrid Control System) sisältää ohjaustoiminnot, jotka määrittelevät mikroverkon toimivan järjestelmänä:

- joka voi hallita itseään,
- toimia itsenäisesti tai verkkoon kytkettynä sekä

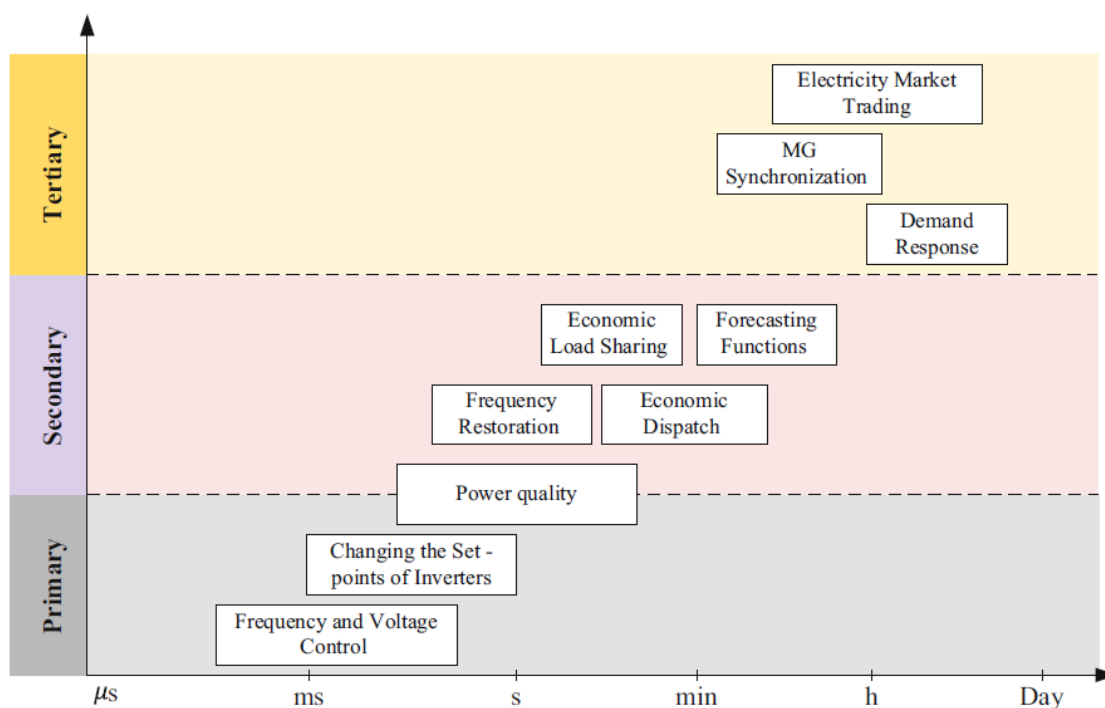
- kytkeytyä pääjakeluverkkoon ja irrottaa siitä sähkön siirtoa ja oheispalvelujen tarjoamista varten.

Mikroverkon ohjausjärjestelmään liitetään hajautetun energian lähteet (DER), hajautetun energian hallintajärjestelmä (DERMS, Distributed Energy Resources Management System) tai energianhallintajärjestelmä (EMS). Ohjausjärjestelmässä tulisi olla reaaliaikainen ohjaus ja energianhallintatoimintoja, jotka toimivat seuraavissa tilanteissa:

- a) Toiminta verkkoon kytketyissä ja saareketilassa
- b) Automaattinen siirtyminen verkkoon kytketystä tilasta saareketilaan tarjoamalla hallittu siirtyminen saareketilaan mikroverkon kuormituksille epänormaalien olosuhteiden ja/tai suunniteltujen järjestelmäkatkosten aikana
- c) Uudelleensynkronointi ja yhteyden muodostaminen saareketilasta takaisin verkkoon kytkettyyn tilaan
- d) Energianhallinta sekä todellisen, että loistehon tuotannon ja kulutuksen optimoimiseksi
- e) Liitännäispalvelujen tarjoaminen, verkon tuki ja osallistuminen energiamarkkinoihin ja/tai sähköverkkoon. (IEEE Std 2030.7-2017).

Tärkeä mikroverkon toimintaa ohjaava yksikkö on mikroverkon hallintajärjestelmä (MGMS), joka käyttää järjestelmää itsenäisesti yhdistäen sen sähköverkkoon kaksisuuntaista sähkönsiirtoa varten ja tukemalla mikroverkon komponentteja (Sood ja muut, 2020, s. 265). Järjestelmä mahdollistaa komponenttien ja eri ohjaimien vuorovaikutuksen, jotta energianhallintajärjestelmää (EMS) voidaan käyttää turvallisesti ja hallitusti.

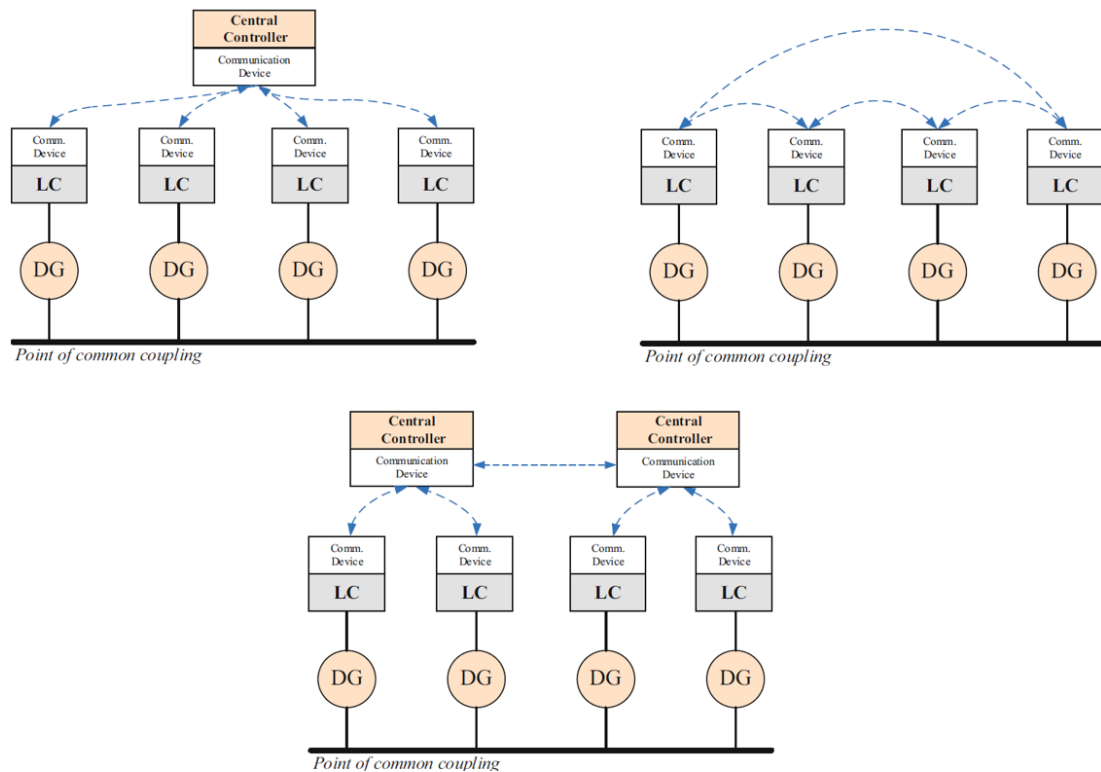
Mikroverkkojen ohjaus on yksi keskeinen ominaisuus, joka erottaa ne yksinkertaisista hajautetun tuotannon jakeluverkoista. Mikroverkkojen ohjaus jaetaan kolmeen hierarkkiseen ohjaustasoon, jotka ovat ensisijainen (primary control), toissijainen (secondary control) ja kolmossijainen (tertiary control) ohjaustaso. (Shahbazitabar, M., Abdi, H., Nourianfar, H., Anvari-Moghaddam, A., Mohammadi-Ivatloo, B. & Hatzargyriou, N., 2021, s. 7-8). Kuvassa 14 esitetään ohjaukseen vaikuttavat komponentit sekä ohjauksiin liittyvät toimintaajat.



Kuva 14. Mikroverkkojen ohjaustasot (Shahbazitabar ja muut, 2021, s. 8).

Taajuus- ja jänniteohjaus, invertterien tavoitearvon muuttaminen sekä osittain sähkön laatuun liittyvät asiat ovat ajallisesti nopeimpia toimenpiteitä ja ensisijaisella tasolla sijaitsevia ohjauksen komponentteja. Toissijaisella tasolla ovat sähkön laadun lisäksi taajuuden korjaus, taloudellisen kuormituksen ja tuotannon ohjausparametrit sekä ennusteiden toiminnot. Viimeisellä ja prioriteetiltaan vähäisimmällä tasolla sijaitsevat sitten mikroverkon synkronointi, sähkömarkkinaan ja kysynnän joustoon liittyvät ohjauskomponentit (Shahbazitabar ja muut, 2021, s. 8).

Mikroverkon ohjauskoordinaatio voidaan jakaa rakenteen puolesta keskitettyyn ohjausjärjestelmään, hajautettuun ohjausjärjestelmään tai näiden yhdistelmään, jota kutsutaan myös hybridiohjausjärjestelmäksi (Shahbazitabar ja muut, 2021, s. 9). Kuvassa 15 on koordinoitun ohjauksen rakenteen mukainen luokittelu.



Kuva 15. Mikroverkon ohjausten rakenteet, ylhäällä vasemmalla keskitetty ohjausjärjestelmä, ylhäällä oikealla hajautettu ohjausjärjestelmä ja alhaalla hybridiohjausjärjestelmä (Shahbazitabar ja muut, 2021, s. 9).

Mikroverkon keskitetyssä ohjauksessa (MGCC, Microgrid Centralized Control) kommunikointi ohjattujen yksiköiden (LC, Local Control) kanssa vaatii laajan tietoliikenneinfrastruktuurin. Keskitetyn ohjausrakenteen tärkeä etu on se, että se pystyy soveltamaan optimaalisia ratkaisuja, mutta yksi suurimmista haitoista on, että se kärsii laajasti ohjausyksiköstä johtuvasta viasta. Keskitettyä ohjausrakennetta suositellaan tyypillisesti pieniin ympäristöihin, kuten koulutuskeskuksiin ja sairaaloihin. Hajautetussa ohjauksessa jokainen paikallinen ohjain toimii itsenäisesti ilman keskusohjaimen ohjeita. Kaikki ohjaustoimenpiteet määritetään paikallisesti itse laiteohjaimen ja viereisten laiteohjaimien kesken. Rajoitetun tiedonsiirtokapasiteetin vuoksi optimaalista suorituskykyä ei yleensä saavuteta tässä topologiassa verrattuna keskitettyyn ohjausjärjestelmään. Hyvä ominaisuus on ns. ”Plug and play” -ominaisuus, mikä tarkoittaa sitä, kun jokin laitteisto liitetään tai poistetaan järjestelmästä, mikroverkko toimii ilman uudelleenkonfigurointia. Hybridiohjausjärjestelmä on yhdistelmä keskitettyjen ja hajautettujen ohjaimien muodostamaa kokonaisuutta. Hybridihierarkkinen ohjaus koostuu useista keskusohjaimista, joiden topologia on hajautettu ja koordinoitu. Jokainen keskusohjain sisältää useita paikallisia ohjaimia, jotka voivat toimia itsenäisesti. (Shahbazitabar ja muut, 2021, s. 9-10).

Mikroverkot ovat aktiivisia järjestelmiä, jotka toimivat kontrolloidusti, eli niiden toiminta perustuu mittauksiin, ohjausalgoritmeihin ja toimilaitteisiin. Jännite-, virta-, teho-, taajuus- ja tehokulmamittausten avulla saadaan paikallisen tilanteen kuvaamiseen tarvittava tieto useista kohdista mikroverkossa normaali- tai saarekekäyttötilanteessa (Kabalci, E., 2020, s. 381). Ohjausalgoritmeilla tehdään päätöksiä, jotka helpottavat ohjaustavoitteiden saavuttamista, kuten jännitteen synkronointia ja tehonjakoa. Tärkeimpiä toimilaitteita mikroverkoissa ovat suuntaajat, jotka yhdistävät sekä energialähteitä, että kulutuslaitteita ja energian varastointilaitteita mikroverkon-väyliin (Castilla, M., García de Vicuña, L. & Miret, J., 2019, s. 139).

Invertterillä on tärkeä rooli hajautettujen energialähteiden integroinnissa vaihtovirtaverkon järjestelmään. Niiden ohjaus toteutetaan enimmäkseen invertterin ohjausjärjestelmässä. ”Droop” -sääto on yksi suosituimmista ensiösäädön tyypeistä, joka säätelee taajuutta tai jännitettä säätämällä ohjatun laitteen pätö- tai loistehoa (Li, Y., 2022, s. 153). Ohjaussäätimiä on useita tyyppisiä, esimerkiksi $P - f$ (pätöteho – taajuus) ohjaus, $Q - V$ (loisteho – jännite) ohjaus, $P - V$ (pätöteho – jännite) ohjaus, $Q - f$ (loisteho – taajuus) ohjaus.

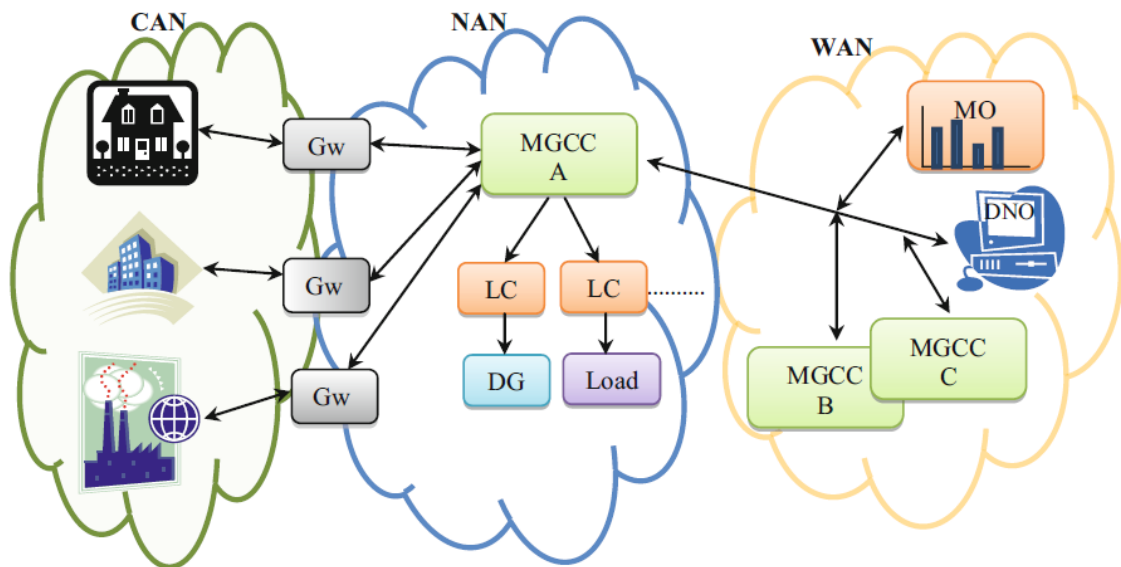
3.1.5 Mikroverkon kommunikaatio ja kommunikaatiostandardit

Mikroverkon viestintäjärjestelmällä pitää olla korkea luotettavuus ja suorituskyky pitää olla lähes reaaliaikainen. Viestintäjärjestelmän suunnittelussa tulee huomioida järjestelmän mitattava, jännitetaso, mikroverkon tyyppi ja toimintatilat. Viestintätapa tulee valita etäisyyden, rakennuskustannusten ja välitettävien tietojen mukaan. Voidaan käyttää standardiin IEC 60870-5:2018 perustuvia tiedonsiirtoprotokollia, johon perustuvia suosituksia voidaan esittää lyhyesti:

- 1) Paikallinen ohjaustaso voi käyttää laitteiden omaa viestintäprotokollaa, kuten RS485, Ethernet, optinen kuitu tai langaton.
- 2) Mikroverkon suojausosa vaatii yleensä nopeaa tiedonsiirtoa, siksi on suositeltavaa käyttää pitkän matkan ja suuren kapasiteetin kommunikaatiotekniikoita, kuten PTN-tekniikkaa, IEC61850-9-2+GOOSE-protokollaa ja muita vastaavia. Mikroverkon keskitetyllä ohjauskerroksella tulisi olla vahva tiedonsiirtokyky ja hyvä lähetyslaatu.

- 3) Optimaalisen ohjaus- ja valvontakerroksen viestinnän tulee ottaa huomioon ohjausobjektin, kohteen ja nopeuden tarve, jolloin on suositeltavaa käyttää nopeaa Ethernet-verkkoa.
- 4) Joitakin laitetoimintoverkon erityisvaatimuksia varten niitä tulee harkita erikseen. Kun otetaan huomioon esimerkiksi vikatalennusten ja virranlaadun valvontatietojen suuri määrä, on suositeltavaa käyttää erillistä verkkoa ja kommunikoida taustavalvontajärjestelmän kanssa palvelimen kautta. Älykkään sähköjärjestelmän, sähköajoneuvojen latausjärjestelmän ja säätietojen analysointijärjestelmän pääsyä varten valvontapääasemalle tulisi asettaa palomuurit. (IEEE Std 2030.9-2019, s. 32-33).

Mikroverkon tiedonsiirtoa tehdään järjestelmän sisä- ja ulkopuolella erilaisten yhteyksien, kuten kuparin (parikaapelit, puhelinlinjat tai Ethernet), valokuidun, radioaaltojen ja mikroaaltojen kautta. Peittoalueesta ja toiminnoista riippuen mikroverkon viestintäinfrastruktuurissa tunnistetaan kuvan 16 mukaisesti kolme pääalueverkkoa: asiakasalueverkot (CAN, Customer Area Networks), lähialueverkot (NAN, Neighborhood Area Networks) ja laaja-/suuralueverkko (WAN, Wide Area Networks).



Kuva 16. Mikroverkon tiedonsiirtoverkon rakenne (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 73).

Asiakasverkko tarjoaa pienen kaistanleveyden, kaksisuuntaisen viestinnän älykkäiden laitteiden ja mittarien sekä asiakkaan keskittimien ja/tai kytkimien välillä. Lähialueverkoissa toteutetaan kaksisuuntainen viestintä mikroverkko-ohjaimen ja asiakaskeskittimien välillä. Mikroverkon suojausjärjestelmän tiedot siirretään myös tämän lähialueverkon sisällä

(Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 73). Laajan alueverkon tarkoituksena on toimittaa suurien etäisyyksien välinen tiedonsiirtoväylä esimerkiksi ulkoisten tietojen saamiseksi tai eri paikkakuntien välisten mikroverkkojen toimintojen ohjaamiseksi. Lähiverkkoa kutsutaan myös LANiksi (Local Area Networks) ja sitä käytetään yleensä yksityisten mikroverkkojärjestelmien viestintään.

Viestintäteknologia voidaan toteuttaa langallisena tai langattomana. Langattomina ratkaisuna voidaan käyttää sitten useampaa vaihtoehtoa, joita ovat esimerkiksi WLAN, WiMAX, ZigBee, Bluetooth, mikroaaltotekniikka, sekä matkapuhelinverkon eri teknologiat (2G, 3G, 4G/LTE, 5G) (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 74-77). Langallista teknologiaa ovat muun muassa kantaalto-, optinen valokuitu- tai Ethernet tekniikka. Langallisessa lähiverkossa voidaan käyttää myös neljää erilaista fyysistä topologiaa, jotka ovat väylä-, rengas-, tähti- ja puutopologiat (Li, Y., 2022, s. 180).

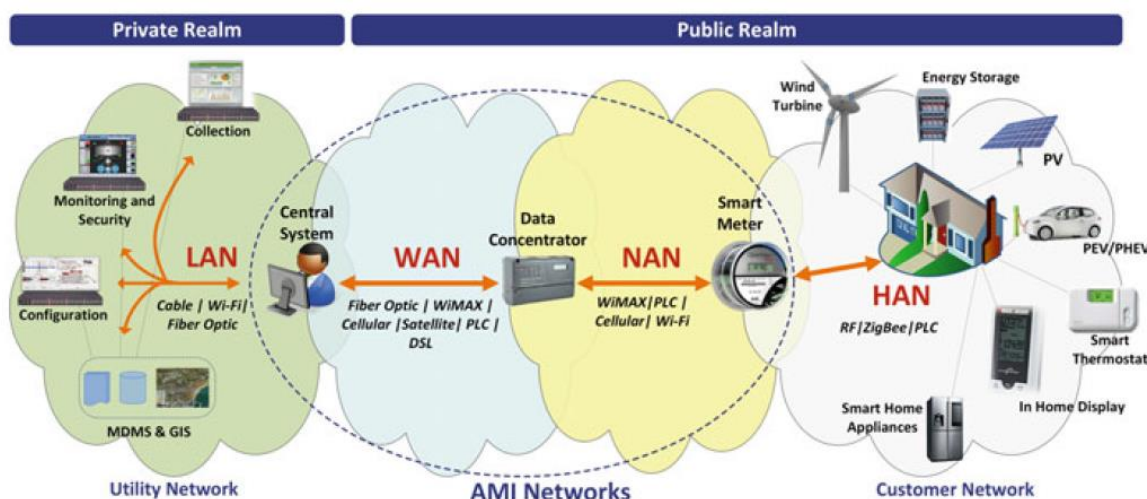
Standardi IEEE Std. 2030 määrittelee kolme integroitua arkkitehtonista näkökulmaa: sähköjärjestelmät, viestintäteknikka ja tietotekniikka ja se antaa suuntaviivat älykkäiden verkkojen yhteistoiminnalle. *Standardin IEEE 1547.3* avulla annetaan ohjeistus hajautettujen tuotantoresurssien ja sähköjärjestelmien väliseen yhteistoimintaan, jotta valvonnan, tiedonvaihdon ja ohjauksen toteuttaminen onnistuu sekä teknisen että taloudellisen näkökulman kannalta luotettavasti. *Standardi NISTIR 7628-1* esittää analyyttisiä ohjeita älykkään verkon kyberturvallisuudesta, jonka avulla sidosryhmät voivat kehittää tehokkaita kyberturvallisuusstrategioita, jotka ovat räätälöity heidän erityispiirteisiinsä, riskeihinsä ja haavoittuvuuksiinsa. *IEC 62351* on standardi, joka sisältää tavoitteet tiedonsiirron todentamisesta digitaalisten allekirjoitusten avulla, todennetun pääsyn varmistamisesta, salakuuntelun estämisestä, toiston ja huijauksen estämisestä sekä järjestelmään tunkeutumisen havaitsemisesta.

IEC 61850 antaa puitekehukset sähköjärjestelmien viestintätiedon esittämiselle ja kehyksen avulla kaikki yhteysosapuolet voivat jakaa ja käyttää tehokkaasti standardin mukaista tietoa. Se määrittelee laitteisiin sisältyvien tietojen rakenteen, datan nimeämiskäytännöt, kuinka laitteita ohjataan sovelluksilla sekä standardin mukaisen testausmenettelyn. Tekniikka perustuu Ethernet -teknologiaan ja standardin avulla mahdollistetaan yleisesti sähköasemien suojareleistysten välinen kommunikaatio sekä testaustoiminta. *IEC 60870* on standardijoukko, joka on kehitetty sähköjärjestelmän valvontaa, ohjausta ja niihin liittyvää tiedonsiirtoa varten kauko-ohjauksessa, ohjauksen suojauksessa ja niihin liittyvässä tietoliikenteen sähköjärjestelmissä. *IEC 61968* on myös standardijoukko, jotka on suunnattu

sähköjakelujärjestelmien väliseen tiedonvaihtoon. Standardi on suunniteltu tukemaan tapahtumiin perustuvaa integrointia löyhästi kytketyissä ja heterogeenisissä ympäristöissä.

3.1.6 Mittaus

Älykkäällä mittauksella voi olla ratkaiseva rooli mikroverkon hallinnassa. Siinä klassinen keskitetyn energian tuotannon, siirron ja loppukäyttäjien kulutuksen ketju on korvattu kaksisuuntaisella tehovirralla, jossa on energian hajautettu tuotanto ja kulutus sekä varastointi ovat tulleet jäädäkseen. Älykkäällä mittarilla tarkoitetaan ”automaattisesti luettavaa mittaria” tai ”etäluettavaa mittaria” (Sarvaranta, A. 2010, s. 24). Mikroverkon toimintojen suorittamiseksi tarvitaan älymittareihin perustuva edistynyt kuvan 17 mukaista mittausrakennetta (AMI, Advanced Metering Infrastructure) joka on avainelementti, jotta koko mikroverkkojärjestelmä toimii halutulla tavalla (Coelho, P., Gomes, M. & Moreira, C., 2019, s. 111). AMI-infrastruktuuri tarjoaa keskeytymättömän vuorovaikutuksen asiakkaan ja laitoksen välillä kaksisuuntaisen tiedonsiirron sisältävän mittausratkaisun kautta, keräten tietoja älymittareista, analysoi tietoa ja tarjoaa siten älykästä energiapalvelujen hallintaa. Mittausjärjestelmästä käytetään myös nimitystä ”automaattinen mittarinluenta” (AMR, Automatic Meter Reading) (Sarvaranta, A., 2010, s. 24).



Kuva 17. Älykäs mittausjärjestelmä (Coelho, P. ja muut, 2019, s. 115).

Älykäs mittausjärjestelmä koostuu ensinnäkin älykkäistä mittareista (Smart meter), joka ensisijaisesti mittaa kuluttajan sähköenergian kulutusta sekä mahdollista verkkoon tuotettua

energiaa. Lisäksi mittari toimii kuluttajan päätelaitteena verkon suuntaan, välittäen yhdyskäytävää pitkin tiedot esimerkiksi laskutusta varten. Kuluttajan omassa kotiverkossa (HAN, Home Area Networks) voi olla liitettynä erilaisia älykkäitä mittareita tukevia laitteita, jossa on oma mittaus tai syötön puolelle on lisätty erillisillä mittareita. Älykäs mittari on koko järjestelmän mittauksen perusta ja sen pitää pystyä havaitsemaan energian kulutus tai tuotanto reaaliajassa (Coelho, P. ja muut, 2019, s. 113).

3.2 Mikroverkon toimintatilat ja energianhallinta

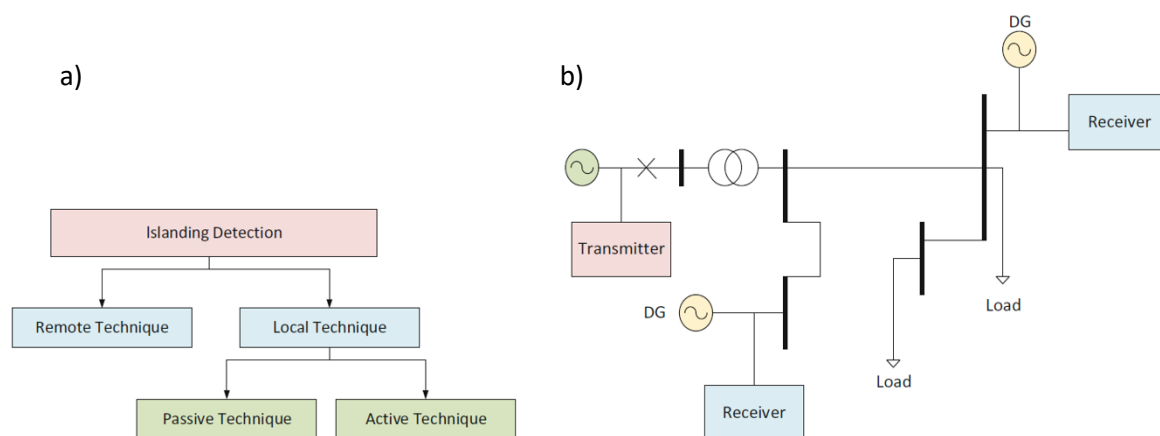
Mikroverkko voi toimia kahdessa eri tilassa, verkkoon kytketty tila ja saarekekäyttötila. Verkkoon kytketty tila on lisäksi jaettavissa kahteen erilliseen toimintatilaan, tehon kannalta ”epäsovitettuun” toimintatilaan ja ”tehosovitettuun” toimintatilaan mikroverkon ja sähköverkon välisen sähkönvaihdon mukaisesti (Singh, A. ja muut, 2020, s. 11). Epäsovitetussa tilassa pätö- ja loisteho ovat nolasta poikkeavia ($P \neq 0$ ja $Q \neq 0$) sekä teho syötetään julkisesta verkosta mikroverkon suuntaan tai mikroverkon tehoa syötetään julkisen verkon suuntaan. Tehosovitetussa tilanteessa pätöteho ja loisteho ovat järjestelmien välisessä siirrossa tasapainotilanteessa, eli tehoa ei siirry ($P = 0$, $Q = 0$) julkisesta verkosta mikroverkkoon eikä myöskään mikroverkosta julkiseen verkkoon vaan mikroverkon tuottama energia kulutetaan mikroverkon sisällä. Toimintatilan vaihtaminen verkkoon kytketystä tilasta saareketilaan tai päinvastoin, toteutetaan verkkoon kytkeytymispisteessä (PCC) (Mittal, A., Rajput, A., Johar, K. & Kandari, R., 2022, s. 8).

3.2.1 Saarekekäyttö

Saareketilassa mikroverkkoa käytetään erillään julkisesta sähköverkosta. Verkkotila muutetaan saareketilaan julkisen verkon vikatilanteessa, mikäli jännite romahtaa tai syöttö muuten katkeaa sekä verkon huolto- ja kunnossapitotilanteissa. Saarekekäytössä mikroverkkojen teholahteina ovat hajautetut energialähteet, joiden riippuvuus luonnonolosuhteista on suuri, sekä energiavarastot, joissa kapasiteetti on rajoitettu. Saareketilassa tuotettu sähköenergia ei toisinaan riitä tuottamaan kulutuksessa tarvittavaa energiamäärää, joten tätä tilannetta varten on priorisoitava kriittiset kuormat (Singh, A. ja muut, 2020, s. 12). Saarekekäyttötilassa

mikroverkko voi kohdata haasteita jännitteen ja taajuuden säätelyssä tai vaaditun tehon laadun ylläpitämisessä (Shahbazitabar ja muut, 2021, s. 6), tämän vuoksi mikroverkkojärjestelmällä on oltava oma jännitteen ja tehon ohjausjärjestelmä (Dola, S. A., Badal, Md. F. R., Das, S. K., Islam, Md. R. & Xu, W., 2022, s. 7).

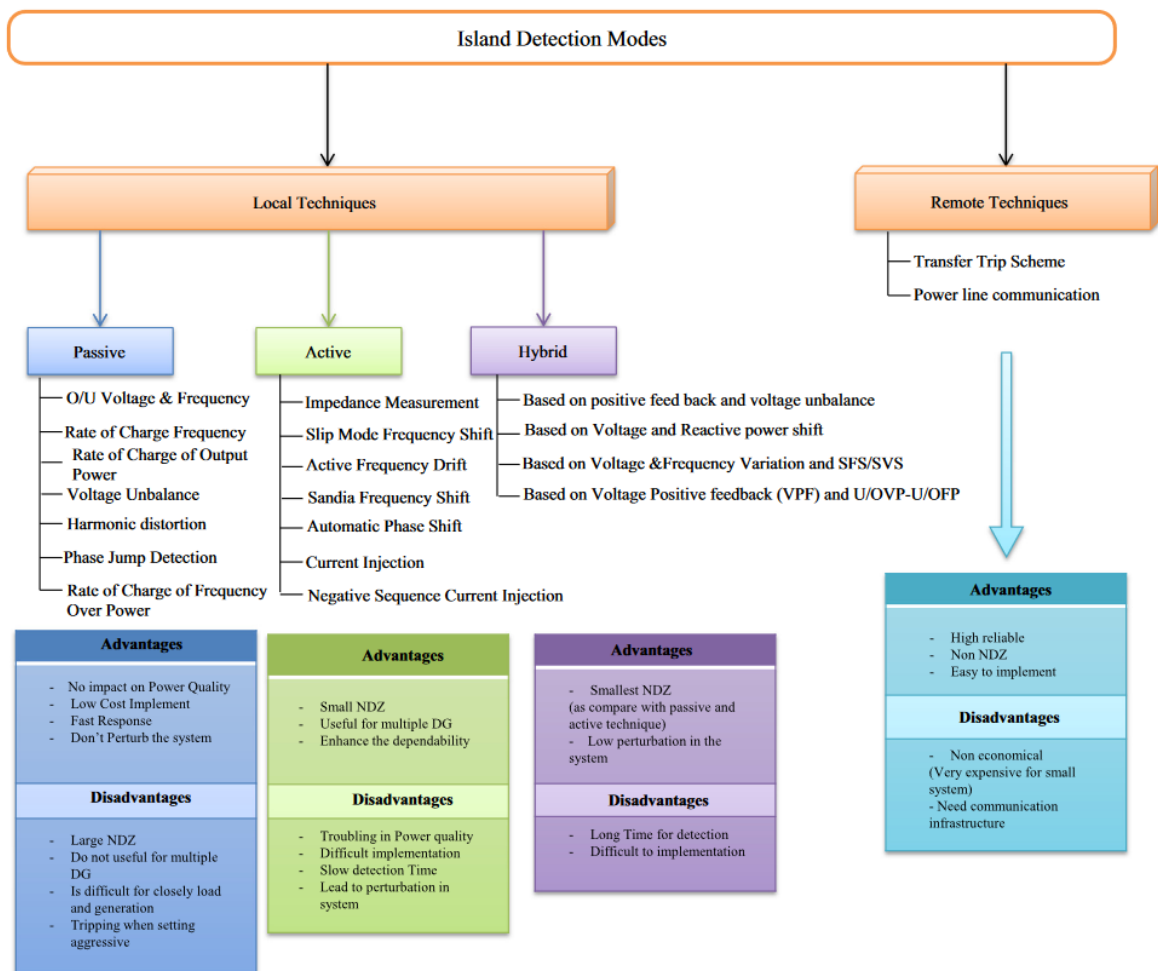
Saarekekäytön mahdollistamiseksi on tärkeää ymmärtää hajautettujen energialähteiden toiminta sekä koordinaatio koko alueen sähköjärjestelmien osalta. Yllä mainittujen haasteiden lisäksi on hyvä ymmärtää myös yleisnäkymä, saareketyypit ja suunnitellut käyttöolosuhteet (IEEE Std 1547.4-2011, s. 5). Valvonta-, tiedonvaihto- ja ohjauslaitteita (MIC, Monitoring, Information exchange and Control) tarvitaan saareketoiminnan ohjaamiseen ja siirtymisen toteuttamiseksi normaalitilasta saareketilaan sekä normaalitilaan palautumiseen. Riippuen tarvittavien valvonta- ja ohjausominaisuuksien asteesta, ohjaimen on oltava pitkälle kehitetty. Saarekekäytössä on huomioitava kaikissa olosuhteissa paikallinen maadoitusratkaisu (IEEE Std 1547.4-2011, s. 6). Saareketilan tunnistaminen voidaan tehdä kuvan 18 mukaisten teknisten toteutusten avulla ja useimmiten tunnistaminen tehdään tehonlaatuindeksien avulla (Castelo, T., Zambroni de Souza, M.F., Duque, C. & Ribeiro, P. F., 2019, s. 271).



Kuva 18. Saarekekäyttöinen jakelujärjestelmä ja tunnistautuminen, a) tunnistustekniikka ja b) etätekniiikan periaate (Castelo, T. ja muut, 2019, s. 272).

Laatuindeksien perusteella voidaan saareketunnistus jakaa paikallisiin (Local Technique) ja etätekniiikoihin (Remote Tehnique), sekä paikallisen tekniikan jaotteluna vielä passiiviseen (Passive Technique) ja aktiiviseen (Active Technique) toimenpiteeseen. Etätekniiikka perustuu tietoliikennejärjestelmän avulla toteutettavaan lähetin – vastaanotin tekniikkaan, jotka hyödyntävät sähkönjakelulinjaa viestintäkanavana kuvan 18b mukaan. Mikäli vastaanotin ei havaitse lähettimen signaalia, tulkitaan tilan olevan saareketilassa. Paikallisen tunnistusjärjestelmän passiivinen tunnistus valvoo järjestelmän parametreja, kuten jännitteen

epätasapainoa ja taajuuden vaihtelua (Castelo, T. ja muut, 2019, s. 273). Aktiivinen tunnistus pyrkii havaitsemaan järjestelmän parametrien häiriöt, kuten esimerkiksi loistehovirhe ja impedanssipoikkeama sekä ohjaa toimintaa sen mukaan. (Castelo, T. ja muut, 2019, s. 272). Kuvassa 19 on esitetty aktiivisen ja passiivisen tunnistusmenetelmän lisäksi vielä erillinen hybriditunnistusjärjestelmä. Hybridimenetelmässä on yhdistetty passiivisen ja aktiivisen menetelmän tekniikat (Palizban, O., Kauhaniemi, K & Guerrero, J.M., 2014). Kuvassa on myös selkeästi nähtävissä tunnistuksen monipuolisuus, sekä edut ja haitat.



Kuva 19. Mikroverkon saarekekäytön tunnistusmenetelmän luokitus (Palizban, O. ja muut, 2014).

Kaikissa järjestelmissä on etujen lisäksi haittoja. Etujen ja haittojen vertailun avulla päästään toteuttamaan valinta, jonka mukaan saarekekäytön ohjausmenetelmä tullaan toteuttamaan. Esimerkiksi hybridijärjestelmän tärkeimpiä etuja on minimoida tunnistamattomat alueet (NDZs, Non-Detection Zones) verrattuna aktiivisen ja passiivisen järjestelmän tunnistusmenetelmään, mutta vastaavasti tunnistamiseen kuluva aika on pitkä ja se koetaan haitaksi.

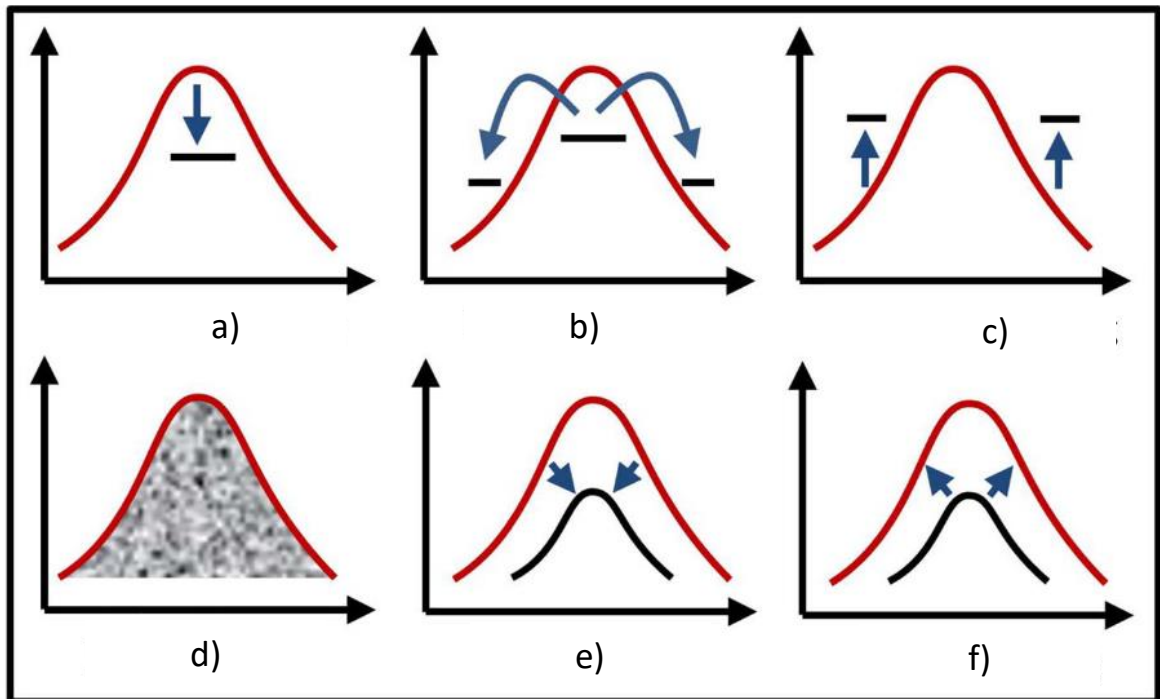
3.2.2 Kulutusjousto

Mikroverkkojen osalta tulee erityisesti saarekekäytössä tilanteita, että tuotantoa ei ole saatavilla, eikä varastoissa ole tarpeeksi kapasiteettia, että päästäisiin tasapainotilanteeseen. Lisäksi on myös tilanteita, jolloin tuotantoa on enemmän kuin kulutusta ja energiavarastot ovat täynnä. Näiden kahden edellä kuvatun mukaisessa epätasapainotilanteessa on pyrittävä löytämään tasapainottamiseen keinot. Kun energiaresurssia ei ole riittävästi käytössä, joudutaan turvautumaan kulutusjoustoön ja vastaavasti energian ylituotantotilanteissa pitää saada tuotanto joustamaan tai ylituotanto on kulutettava joustavissa resursseissa. Luvun 2 kappaleissa on jo nostettu esille erilaisten laitteiden mukanaan tuomia joustopotentiaaleja, mutta laite tai laitteisto ei yksinään riitä vaan niitä toteutetaan ohjausjärjestelmän avulla. Itse kulutusjoustotoimenpide on Suomessa ollut käytössä pitkään esimerkiksi sähkölämmityksen aikasähköohjauksena (Liedes, R. ja muut, 2021, s. 8). Lisääntyvien sähköisten laitteiden ja laitteistojen mukanaan tuoma älykäs mittaus mahdollistaa joustopotentiaalın kasvattamisen (Pahkala, T. ja muut, 2018, s. 14, 28, 30).

Joustoa toteuttavan tehon hallintaan voidaan vaikuttaa sekä ulkoisten, että sisäisten ohjausimpulssien johdosta. Ulkoisia ohjausimpulsseja ovat esimerkiksi 1) hinta, joka tehosta/energiasta maksetaan, 2) luotettavuus, joka aiheuttaa lisäkustannuksia, mikäli joustoa ei toteuteta tai 3) luotettavuuden lisäämisestä aiheutuva kompensatio, joka maksetaan, kun voidaan osallistua joustotoimintaan (Harsia, P. ja muut, 2019, s. 71). Sisäisiä ohjausimpulsseja ovat taasen kuluttajan tarpeiden mukaiset asiat, joissa esimerkiksi lämmitys, ruoan valmistus, vaatehuolto ja muut vastaavat ovat erityisesti huipputehon hallintaan liittyviä ohjauskomponentteja. Sisäisiä ohjausimpulsseja ovat myös kuluttajan oman tuotannon avulla tehtävät toimenpiteet.

Kuva 20 havainnollistaa tärkeimpiä menetelmiä, joita voidaan hyödyntää kysynnän ja kulutuksen jouston sekä tuotannon jouston mukaisissa tapauksissa. a) Huippujen leikkaaminen, b) kuorman siirto, c) pienen kulutuksen tasoittaminen, d) joustava /dynaaminen kuormitus,

e) energian säästäminen ja f) kuormituksen lisääminen muodostavat monipuolisen rakenteen toteutustavoille. (Bastani, M., Damgacioglu, H. & Celik, N., 2017).



Kuva 20. Jouston toteutuksen menetelmät (Bastani, M. ja muut, 2017).

Kulutuksen ja tuotannon joustoa voidaan siis tehdä kuvan 20 erilaisten menetelmien mukaan, josta lyhyet kuvaukset alla:

- a) Huippujen leikkaamisella tarkoitetaan huippukuormituksen tai kulutuspiikin alentamista tietyllä ajanhetkellä. Esimerkiksi sähkölämmitteisissä kiinteistöissä, kiukaan vuorottelun avulla toteutetaan sähkölämpökuorman ohjausta, joka leikkaa huippukuormitusta.
- b) Kuorman siirron avulla toteutetaan huippukuorman/-kuormien siirtäminen huipun käyttöajan ulkopuolelle.
- c) Pienen kulutuksen tasoittamisen avulla saadaan kuluttajalle hinnoittelumekanismilla kannattavammaksi lisätä kulutusta silloin, kun muuta kulutusta ei verkossa juuri ole. Esimerkiksi sähköauton lataus voidaan toteuttaa tämän periaatteen mukaan.
- d) Joustava kuormitus sisältää dynaamista kuormien hallintaa, kuten esimerkiksi kiinteistön valaistus, jota voidaan mukauttaa hyvin monipuolisesti esimerkiksi DALI-väyläohjattuna tai KNX-taloautomaation kautta.

- e) Energian säästämisen tarkoituksena on pienentää tarvittavaa kuormaa esimerkiksi energiatehokkaampia vaihtoehtoja valitsemalla.
- f) Kuormituksen lisääminen tai energiamäärän kasvattaminen voivat olla seurausta esimerkiksi oman energiatuotannon ylituotantotilanteissa.

Huippujen leikkaukseen sopivaa tekniikkaa ovat kuormituksen ja kysynnän jouston lisäksi myös energiavarastojen avulla toteutetut ratkaisut, sekä sähköajoneuvojen verkkointegraatio (Uddin, M., Romlie, M. F., Abdullah, M. F., Halim, S.a., Bakar, A.H.A. & Kwang, T. C., 2017). Edellisten lisäksi voidaan huipputehojen aikana hyödyntää ”huipunleikkaukseen” myös perinteisiä dieselgeneraattoreita (Enertec 2022a). Generaattorin avulla ei leikata huipputehoa, vaan pyritään saamaan kustannukset alemmas tuottamalla sähköenergiaa kalliille käyttöajankohdalle, jolloin leikataan huippukustannuksia.

Tehojen ja energianhallinnassa erilaisten ohjausten ja laitteiden lisäksi suuressa roolissa ovat älykkäät mittarit sekä tekniikkaa tukevat automaatiojärjestelmät (Pahkala, T. ja muut, 2018, s. 28-29). Energianhallintajärjestelmien (EMS) avulla saadaan toteutettua ennusteita, kuinka ohjausta tehtäisiin esimerkiksi säätiedon tai sähkön hinnan perusteella, mutta on huomattava, ettei energianhallintajärjestelmä kykene aina tehon hallintaan (Harsia, P. ja muut, 2019, s. 74). Joustosta puhuttaessa on tehon huippukäyttö ensisijaisena tarkastelukohteena, jolloin energiaakin kuluu hetkellisesti paljon, mutta yleensä lyhyen ajanjakson sisällä. Mikroverkoissa haasteelliseksi saattaa muodostua huipputehojen ajankohdat, mikäli tuotantoa tai varastokapasiteettia ei ole tarpeeksi. Verkon vakaa ja stabiili tila heikkenee ja johtaa sähkön laatua heikentävään tilanteeseen.

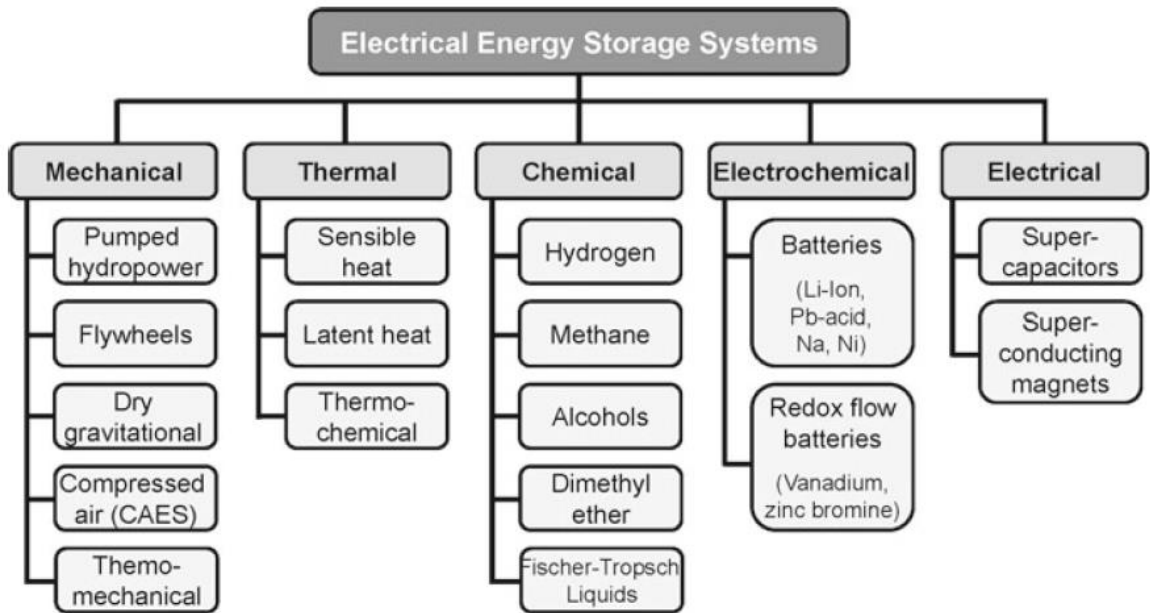
3.2.3 Energian varastointi

Edellisen kappaleen mukaista joustoa toteutettaessa yksi tekninen toteutusvaihtoehto on energian varastoiminen. Energian varastoimiseen on esitetty luvussa 2 erilaisia vaihtoehtoja, joista akkuteknologian mukaiset ratkaisut ovat yleisimpiä (Honkapuro, S., Haapaniemi, J., Haakana, J. Lassila, J., Partanen, J., Lummi, K., Rautiainen, A., Supponen, A., Koskela, J. & Järventausta, P., 2017, s. 65). Mikroverkon energiavaraston käytön päätarkoitus on kompensoida satunnaista ja ajoittaista uusiutuvien energialähteiden sähköntuotantoa, kuten tuuli- ja aurinkovoiman tuotantoa (IEEE Std 2030.2-2015, s. 76). Sähköenergian varastoinnin

sovellusmahdollisuuksia ovat tehon ja kuormien hallinnan lisäksi sähköjakeluverkon stabiilisuuden ja hajautetun tuotannon energian hallinta, sähkönsyötön varmistaminen sekä sähköiseen liikenteeseen liittyvät mahdollisuudet (Sarvaranta, A., 2010, s. 53-54). Yleensä mikroverkkoihin asennetaan suurikapasiteettinen varasto, jossa varastoyksikön tehontarve on täytettävä pitkällä aikavälillä ja pienempiä varastoja voidaan käyttää mikroverkon syötön tukemiseen huipunkäyttöaikoina. (Rahmanov, N.R. & Karimov, O. Z., 2020, s. 66).

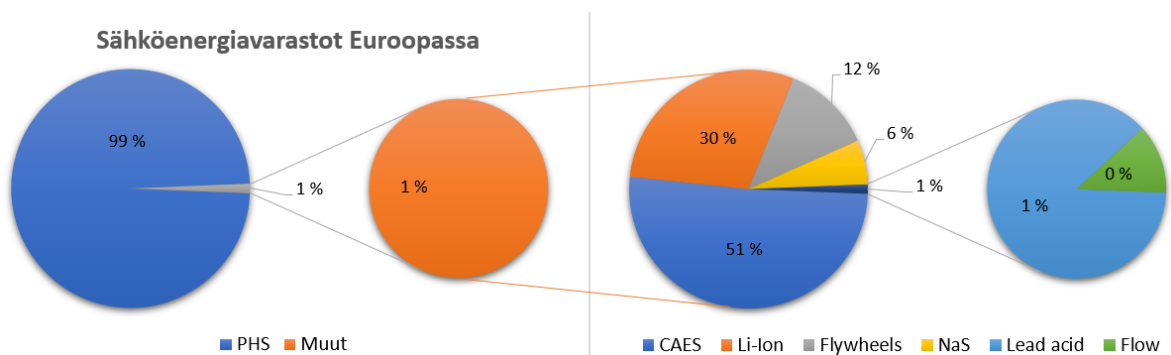
Sähköjärjestelmät käyttävät monenlaisia energian varastointitekniikoita takaamaan vaaditun tasapainon kysynnän ja tuotannon välillä. Varastointijärjestelmien on täytettävä useita toisiinsa liittyviä tekijöitä, kuten korkea ominaisenergia, suuri ominaisteho, sopiva lämpötila-alue, korkea vasteaika, turvallisuus ja luotettavuus, alhaiset käyttö- ja pääomakustannukset, pitkä käyttöikä ja alhainen itsepurkautuminen (Bailera, M., Lisbona, P., Peña, B & Romeo, L. M., 2020, s. 4).

Energian varastointijärjestelmät voidaan luokitella varastointiprosessien luonteen mukaan viiteen kategoriaan (kuva 21), jotka ovat mekaaniset, lämpö-, kemialliset, sähkökemialliset ja sähkökenttään energiaa varastoivat järjestelmät. Akkuteknologia eli sähkökemiallinen teknologia on vanhin sähkön varastointitekniikka sekä kehittyneen tekniikan ja kaupallisen aseman vuoksi helposti saatavilla (Bailera, M. ja muut, 2020, s. 11). Suomessa on viime vuosina uutisoitu useista sähköenergiavarastointiin kykenevistä suuremman kokoluokan (yli 1 MW) akkuratkaisista (Enertec 2022b; Fingrid 2022g; TVO 2022a), joita voidaan hyödyntää uusiutuvien energialähteiden tuottaman sähköenergian varastointiin.



Kuva 21. Sähköenergian varastointijärjestelmien luokittelu ja varastointitekniikat (Bailera, M. ja muut, 2020, s. 4).

Kuten kuvan 21 perusteella havaitaan, on varastointiratkaisuja tarjolla monipuolisesti, joista kehityksen kärjessä ovat parhaillaan kemialliseen teknologiaan perustuva vetyklusteri (Salinen, P., 2021). Myös sähkökentän avulla varastointiin on tuotettu erilaisia ratkaisuja, joilla voidaan varmistaa energian saantia lyhytaikaisesti esimerkiksi superkondensaattorien avulla (Korpela, A., 2018, s. 21-25). Sähköenergian varastointiratkaisusta ylivoimaisesti hallitsevin muoto Euroopassa on pumppuvoimalaitoksiin (PHS, Pumped Hydro Storage) perustuvat ja toiseksi hallitsevin on paineilmaan (CAES, Compressed Air Energy Storage) perustuvat varastointimuodot (Blomqvist, K., Härkönen, J. & Makkonen, T., 2017, s. 5). Kuvasta 22 havaitaan selkeät erot tehoasteikolla mitattuna olevista varastointiratkaisuista.



Kuva 22. Verkkoon kytketty sähköenergian varastointikapasiteetti Euroopan alueella (EA-SAC, 2017, s. 1).

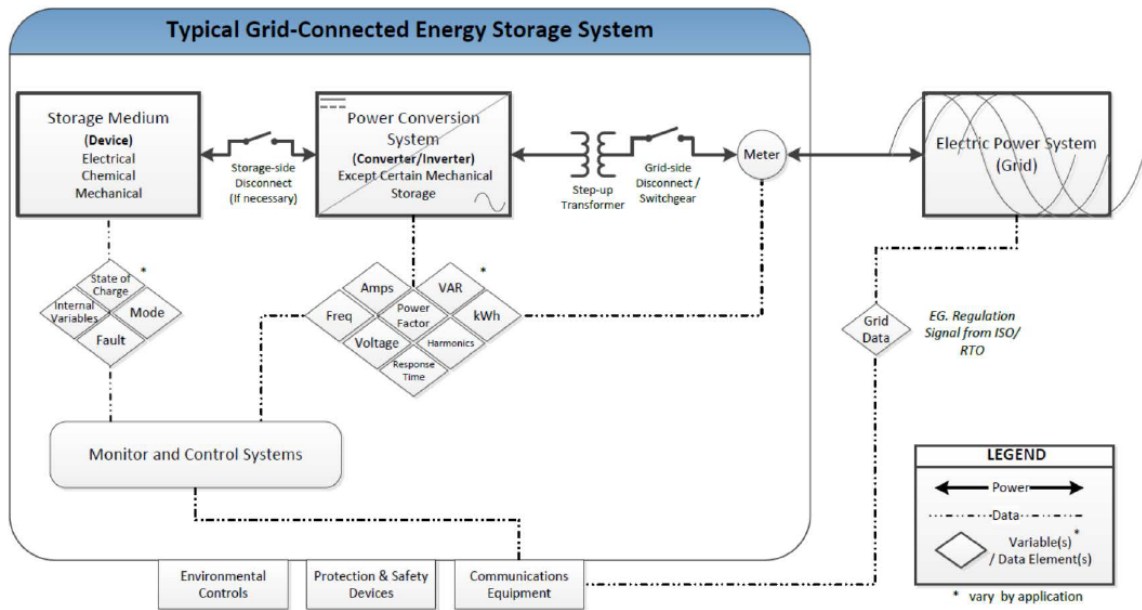
Vaikka Euroopan mittakaavassa pumppuvoimalaitoskapasiteetti on valtava verrattuna muihin verkkoon kytkettyyn kapasiteettiin, Suomessa on vasta suunnitelmissa rakentaa ensimmäinen voimalaitos Pyhäjärvelle (EVP 2022a). Suomessa ei toistaiseksi ole myöskään paineilmaan perustuvia varastoja kaupallisessa käytössä, vaikka sitä on tutkittu 1990-luvun alkupuolella (Energiateollisuus 2022). Teknologian kehittyminen ja hintojen lasku ovat edistäneet akkuteknologian käyttöä tukemaan uusiutuvan energian tuotantoa Suomessa (Blomqvist, K. ja muut, 2017, s. 6-7). Taulukossa 2 esitetään yleisesti sähköenergiavarastoinnin perusominaisuuksia. Ja tästäkin voidaan havaita, että mikroverkoissa akkuteknologiaa puoltaa myös niiden teholuokat (alle 30 MW), joissa kuitenkin on purkauskestoisuutta moniin eri tarpeisiin.

Taulukko 2. Sähköenergian varastointijärjestelmien perusominaisuudet (Delboni, L. F. N., ja muut, 2019, s.15).

Energian varastointitekniikka	Energiakapasiteetti		Purkauksen kestoaika		Tehotaso		Vasteaika		Tehokkuus		Elinikä vuosina [a]	
Pumped Hydro	<24	GWh	12	h	<2	GW	30	ms	70–80	%	40	a
Compressed Air	400–7200	MWh	4–24	h	100–300	MW	3–15	min	85	%	30	a
Fly Wheel	<100	kWh	0–1	h	<100	kW	5	ms	80–85	%	20	a
Battery	<200	MWh	1–8	h	<30	MW	30	ms	60–80	%	2–10	a
SMES	0,6	kWh	10	s	200	kW	5	ms	95–98	%	40	a
Supercapacitors	0,3	kWh	10	s	100	kW	5	ms	95	%	40	a

Akkuenergiavarastoissa (BESS) olennainen heikkous on niiden lyhyt elinikä, joka heikkenee myös lataussykleistä riippuen. Lataustila (SoC, State of Charge) ja purkaussyvyys (DoD, Depth of Discharge) ovat akkuenergiavarastoissa kriittisesti mitoitettavia tekijöitä, mutta myös lataus-purkaussuhde saattaa vaikuttaa järjestelmän mitoitukseen (IEEE Std 2030.2-2015, s. 7; 12). Akkujen mitoituksessa on huomioitava myös lämpötila sekä akkukennon optimaalisen toiminnan kannalta myös minimi- ja maksimijännite, korjauskerroin ja käyttömäärä (Mittal, A. ja muut, 2022, s. 28). Väärän kokoisen energiavaraston integrointi ei auta taajuussäädössä saareketilassa olevissa mikroverkoissa. Ylimitoitettu energiavarasto aiheuttaa korkeita pääomakustannuksia, kun taas vastaavasti alimitoitettu energiavarasto ei välttämättä pysty tarjoamaan toivottuja taloudellisia tai toiminnallisia etuja (Gao, D. W., 2015, s. 125).

Kuvassa 23 on esitetty IEEE:n kuvaaman energiavarastojärjestelmän peruslohkokaavio. Tämän mukaan järjestelmä koostuu kolmesta pääkomponentista: 1) varastoratkaisusta, 2) suuntaajajärjestelmästä (PCS) ja 3) verkkoliityntäjärjestelmästä sisältäen muuntajan, katkaisijan/erottimen sekä mittauksen.



Kuva 23. Energiavaraston järjestelmälohkokaavio (IEEE Std 2030.2-2015, S. 9).

Yllä olevassa kuvassa (kuva 23) on nähtävissä myös energian varastointiin liittyvä peruskommunikaatio pääkomponenttien ja hallintajärjestelmän välillä. Energiavaraston suuntaajan sisältämän tehoelektronikan avulla pystytään ohjaamaan lähtöjännitettä ja taajuutta sekä voidaan toteuttaa pätö-loistehosuhteen muokkausta (Kerdphol, T., Qudaih, Y. & Mitani, Y., 2016).

3.3 Mikroverkko sähkömarkkinoilla

Älykkäiden mittareiden ja kuluttajien energiatietonäyttöjen käyttöönotto on luonut pohjan markkinapohjaisemmalle käyttäytymiselle ja ymmärtämiselle sähköstä sekä sen mahdollisuuksista. Mikroverkkojen myötä markkinatoiminta muuttuu todennäköisesti vielä enemmän vähittäistasolla, perinteiseen ”sähkö ostetaan paikalliselta myyntiyhtiöltä” verrattuna älykkäiden verkkojen seurauksena (IEEE Std 2030.2-2015, s. 90).

Suomessa sähkön hinta koostuu kolmesta osasta, jotka ovat 1) sähköenergian hinta, 2) sähkönsiirron hinta sekä 3) sähkö- ja arvonlisävero (Energiateollisuus 2022d). Sähköenergian hinta muodostuu tukkumarkkinahinnan mukaisesti ja kuluttajat ostavat ne pääsääntöisesti vähittäismyynnin ja -markkinoiden kautta haluamaltaan sähkönmyyjältä (Energiateollisuus 2022e). Suomi kuuluu pohjoismaihin, jossa on käytössä yhteispohjoismainen

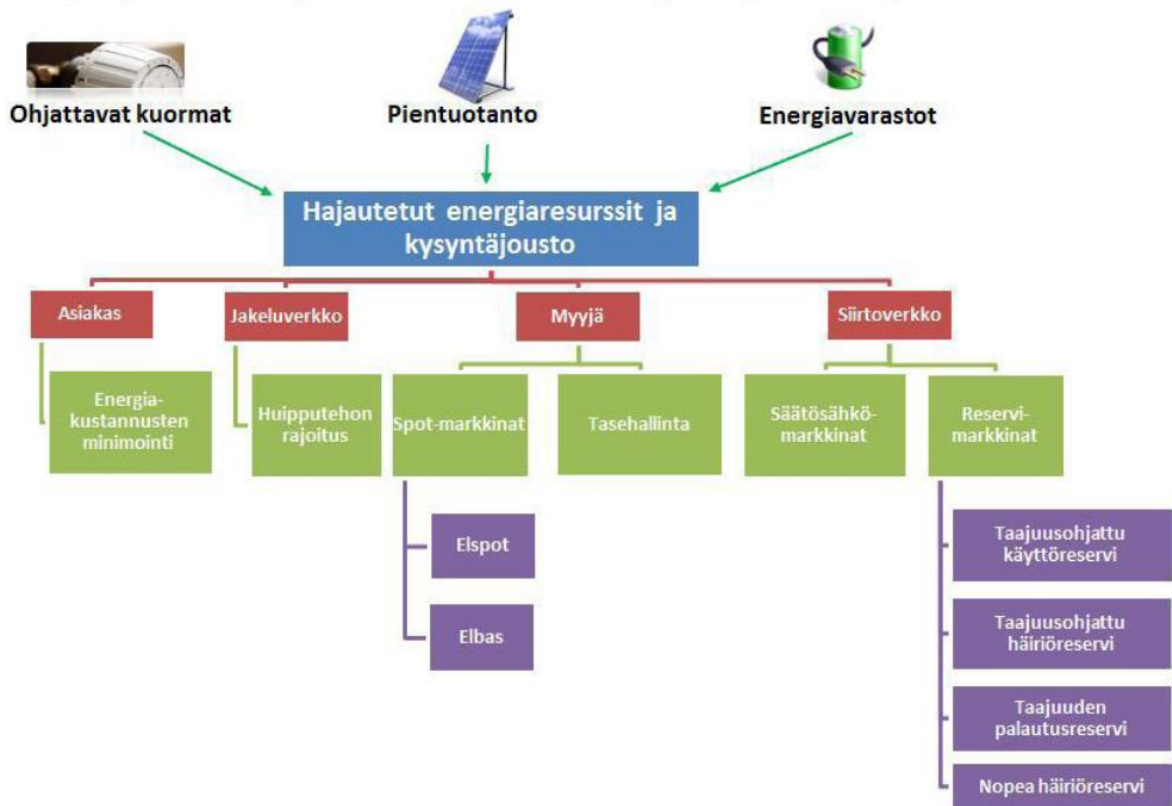
sähköpörssijärjestelmä ”Nord Pool Spot”, joka on osa eurooppalaista tukkusähkömarkkinaa (Fingrid 2022c). Mikroverkkoissa ylijäävä tuotanto voidaan myydä sähkömarkkinoille muiden hyödynnettäväksi, kun tekniset edellytykset täyttyvät (Verkostosuositus YA9:13, 2019). Kuva 24 antaa yleisnäkymän sähkömarkkinoiden monipuolisuudesta ja mahdollisuuksista, joita mikroverkkojen haltijat pystyvät hyödyntämään.



Kuva 24. Sähkömarkkinoiden rakenne (Fingrid 2022d).

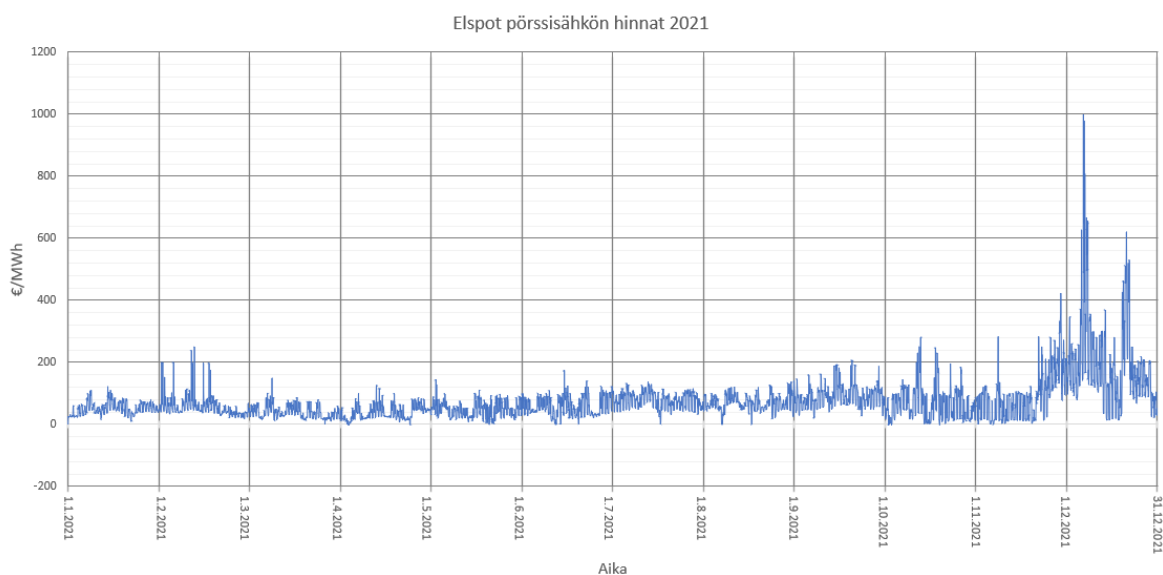
Mikroverkkojen avulla pyritään ensisijaisesti hyödyntämään verkonhaltijan omaa tuotantoa ja varastointia omassa käytössä, mutta esimerkiksi aurinkovoimalan tuottama sähköenergian ylijäämä voi olla kannattavaa myydä sähkömarkkinoille (Narayanan, A., Haapaniemi, J. Kaipia, T. & Partanen, J., 2018). Toinen mahdollisuus sähkömarkkinoille osallistumiseen muodostuu kysynnän jouston avulla toteuttaen (Honkapuro, S., Valtonen, P., Tuunanen, J. & Partanen, J., 2015). Markkinamekanismeina hyödynnetään kysynnän joustossa tuntipohjaisia vuorokausi ja päivänsisäisiä markkinoita, säätösähkö- ja reservimarkkinoita (Järventausta, P., Repo, S., Trygg, P., Rautiainen, A., Mutanen, A., Lummi, K., Supponen, A., Heljo, J., Sorri, J., Harsia, P., Honkiniemi, M., Honkapuro, S., Valtonen, P., Tuunanen, J. & Belonogova, N., 2015, s. 18). Kolmas mahdollisuus muodostuu energiavarastojen kautta myytävään sähköenergiaan (Tikka, V., Belonogova, N., Honkapuro, S., Lassila, J., Haakana, J., Lana, A., Romanenko, A., Haapaniemi, J., Narayanan, A., Kaipia, T., Niemelä, H. & Partanen, J., 2018, s. 96). Kuvassa 25 on esitetty mikroverkkoihinkin sovellettavissa oleva markkinoiden osapuolet ja liitännäisyydet.

Kysynnän jousto – toimijat ja tarpeet



Kuva 25. Mikroverkon kysynnän jouston ja energiareсурssien markkinat (Järventausta, P. ja muut, 2015, s.24).

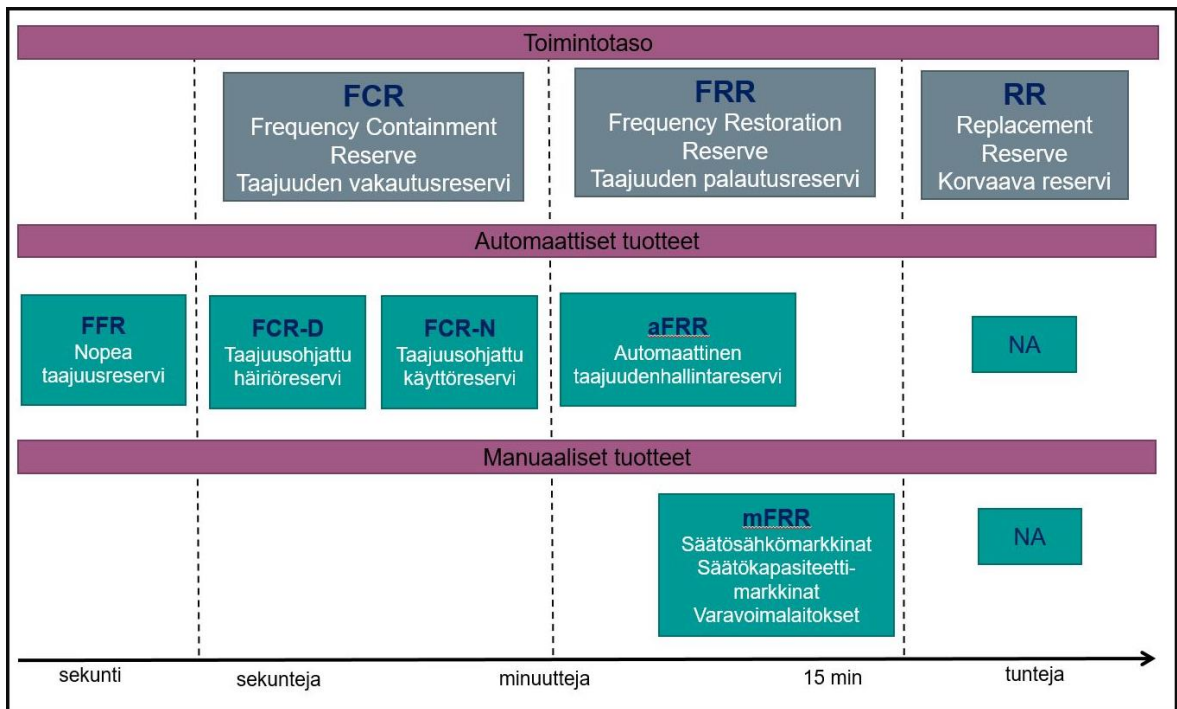
Kun mikroverkon kokoluokka täyttää tekniset vähimmäisehdot verkkoonliittämiseksi ja sillä on riittävästi kapasiteettia markkinoille, niin lainsäädännön puolesta tälle ei ole esteitä (Sähkömarkkinalaki 588/2013). Julkiseen verkkoon toimitetun energian hinta noudattaa yleensä sähköpörssin spot-hintaa (Motiva 2022h), joka on kysynnän ja tarjonnan perusteella muodostuva markkinahinta. Kuvassa 26 on esillä Suomen alueellisen spot-hinnan vaihtelukäyrät. Kulutusjoustotoimenpiteitä voidaan suunnitella spot-hinnan avulla, esimerkiksi siirtämällä hintapiikkien aikana toteutettavaa käyttöä halvemman hinnan ajankohtaan. Markkinoilla olevat hintamuutokset voivat olla voimakkaita ja aiheuttaa myös ennakoimattomia kustannuksia, mikäli mikroverkkojen tekniikan tai markkinaosapuolten välisillä sopimuksilla tähän ei reagoita (IEEE Std 2030.2-2015, s. 90).



Kuva 26. Sähkön spot-markkinahintavaihtelu vuoden 2021 ajalta (Nordpool 2022a).

Sähköenergian hinta muuttuu siis kysynnän ja tarjonnan perusteella, lisäksi hintaan vaikuttavat hankintakustannukset, sääolosuhteet, vuoden- ja vuorokaudenaika, teollisuuden sähkön kysyntä, yleinen taloustilanne sekä päästöoikeuksien mukainen hinnoittelu (Energiateollisuus 2022f). Sääolosuhteille alttiita tuotantomuotoja ovat vesivoima, tuulivoima ja aurinkovoima (Fingrid 2022f) ja samat energiareсурssit ovat suuressa roolissa myös uusiutuvan energian käytössä.

Uusiutuvan energian tuotannon vaihdellessa olosuhteiden mukaan, on reservimarkkinoiden avulla mahdollisuus osallistua tehotasapainomarkkinoille. Reservimarkkinat sisältävät tuotannon lisäksi myös kulutusta sekä varastojen avulla toimitettavaa sähköenergiaa. Reservimarkkinat jakautuvat kuvan 27 mukaisesti kolmeen toimintotasoon: 1) taajuuden vakautusreserviin (FCR), 2) taajuuden palautusreserviin (FRR) ja 3) korvaavaan reserviin (RR), näiden lisäksi on vielä pienen inertian tilanteeseen nopea taajuusreservi -tuote (FFR). FCR-tuotteet ovat tarkoitettun normaalin toiminnan aikaiseen taajuudenhallintaan 49,9 – 50,1 Hz taajuudella ja siellä erityisesti FCR-N on mikroverkkotehojen (vaatimus vähintään 100 kW) luokkaan soveltuvia. FCR-N markkinoiden minimitehovaatimus saadaan täytettyä myös eri tasevastaavien reservitehojen yhteenliittämisen mahdollistavana aggregoiduilla resursseilla. (Fingrid 2022d).



Kuva 27. Reservimarkkinoiden lajit (Fingrid 2022d).

Reservimarkkinoille pääsemiseksi on täytettävä tuotteen tekniset vaatimukset sekä markkinapaikan edellytykset. Useimmilla reservimarkkinoilla mikroverkkojen kannalta mahdollistaviksi tekijöiksi muodostuvat teho vaatimus (yleensä > 1 MW), aktivointiaikavaatimus ja aktivoinnin kesto aikavaatimus (Fingrid 2022d). Mikäli mikroverkon avulla osallistutaan reservimarkkinoille, niin tehoreservoima varataan vain reservin täyttämiseksi, eikä se mahdollista osallistumista kaupalliselle markkinoille (Fingrid 2022h).

4 Mikroverkon suojaus

Mikroverkoissa esiintyy erilaisia häiriöitä, joilta suojautumalla halutaan saavuttaa riittävän luotettava ja turvallinen taso, jolloin turvallisuusvaatimukset sekä käyttäjän toiminnallisuusvaatimukset toteutuvat. Edellä luvussa 2.2.1 on esitetty haasteita, joissa suojauksen toimintaa on yksi keskeinen tekijä sähkön laadullisten sekä toiminnallisten stabiilisuushkien rajoittamiseksi.

Mikroverkon suojauksen tulee olla luotettava, selektiivinen, herkkä ja nopea järjestelmävirian poistamiseksi. Suojausjärjestelmän valinnan tekemiseksi on tiedettävä mikroverkon koko, jännite- ja vikavirtataso sekä maadoitustapa (IEEE Std 2030.9-2019, s. 21). Suojaussuunnitelmassa huomioidaan yleiseen sähköverkkoon kytketty tilanne ja mikroverkon erillinen saareketilanne. Verkkoon liitettyjen tuotantolaitteiden tai sähkökulutuslaitteiden suojauksen lisäksi myös mikroverkkoon liitettyjen virtakiskojen ja lähtevien syöttöjohtojen suojauksen tulee olla riittävän mitoituksen avulla suunniteltu täyttämään keskeiset turvallisuusvaatimukset. Mikroverkon kaksisuuntainen tehovirtaus ja mikroverkon hajautettujen tuotantoyksiköiden vikavirta voi aiheuttaa tavanomaisen ylivirtasuojan virhetoiminnon tai toimintahäiriön (IEEE Std 2030.9-2019, s. 22). Huomioitavaa on, että invertterien syöttämä vikavirta on yleensä rajoitettu, jonka vuoksi ylivirtasuojarele tai sulake ei pysty näissä tilanteissa havaitsemaan vikoja.

Mikroverkon suojauksessa noudatetaan kansallisesti sähköturvallisuuslainsäädännön vaatimuksia, joka 12 § ja 31 § mukaisesti asettaa vaatimukset laitteiden ja laitteistojen suojauksen toteutukselle (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016). Sähköturvallisuuslainsäädäntöä täydentävät lisäksi asetukset sähkölaitteistosta, joiden liitteissä tarkemmin määritellään sähköverkon laitteiden ja laitteistojen olennaiset turvallisuusvaatimukset (VNa 1434/2016; VNa 1437/2016). Olennaisten turvallisuusvaatimusten täyttämiseksi on käytettävä sähköturvallisuusviranomaisen ilmoittamia standardeja, joista voidaan poiketa, mikäli standardien turvallisuustason mukainen vaatimus voidaan muutoin saavuttaa (Sähköturvallisuuslaki 1135/2016, 32 § - 34 §). Standardit löytyvät Tukesin julkaisemasta listasta S10-2019 (Tukes 2022).

Pienjännitesähköasennusten standardin mukaisesti on tunnistettava vaarat, jotka suojauksen toteuttamisen avulla pyritään estämään. Suojauksessa on kiinnitettävä huomio siihen, kuinka toteutetaan:

- suojaus sähköiskulta
- suojaus lämmön vaikutuksilta
- suojaus ylivirroilta
- suojaus vikavirroilta
- suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta vaikutuksilta, sekä
- suojaus syötön keskeytykseltä. (SFS 6000-1:2017, s. 8-9).

Perinteiset pienjännitejakeluverkot, sekä yleiset että kiinteistöjen sisäiset, ovat suunniteltu siten, että ne toimivat säteittäisesti. Tällöin teho virtaa tuotantopisteestä kulutukseen säteittäisen verkon kautta yhteen suuntaan. Yksinkertainen verkkoarkkitehtuuri tekee verkon suojausjärjestelmästä yksinkertaisen ja suoraviivaisen. Perinteiset suojalaitteet, kuten ylivirtareleet, katkaisijat ja sulakkeet, ovat toimineet luotettavasti tavanomaisten jakeluverkkojen suojaamisessa ja täyttäneet edellä mainitut turvallisuusvaatimukset.

Mikroverkon suojauksen perusvaatimukset ovat samanlaisia kuin yleisesti muihin sähköjärjestelmiin määritetyt perusvaatimukset. Nämä perusvaatimukset ovat luotettavuus, nopeus, selkeys, selektiivisyys ja herkkyys. Taloudellisuus ja yksinkertaisuus voivat olla myös vaatimuksia, jotka mikroverkon suhteellisen pienen kokonsa ja kokonaiskustannusten vuoksi voivat olla kriittisiä. Mikroverkon suojauksen erityispiirteitä aiheuttavat hajautetun tuotannon yksiköt, jotka muuttavat yhden teholähteen syöttämän verkon monimutkaisemmaksi kahden tai jopa useamman teholähteen syöttämäksi järjestelmäksi. Tämä tuottaa mikroverkkojen suojaamisesta monimutkaisemman ja erilaisia huomioitavia asioita suojauksen kannalta ovat:

- jakeluverkon rakenteelliset ja käytön muutokset, jotka johtavat kaksisuuntaisiin energiavirtoihin sekä pienjännite- että keskijännitetasolla
- toimintatila saarekeverkossa ja liitettynä julkiseen verkkoon
- muutokset tuotannon, varastoinnin ja kulutuksen yksiköissä

- hajautetun tuotannon vaihtelevuus
- tehoelektronikkalaitteiden tuottama rajoitettu oikosulkuvirta, joka on vain 1,2–2 kertainen nimellisvirtaan nähden
- laitteiden vioista johtuva ennenaikainen vanheneminen ja lisääntynyt ylläpitotarve
- tehonsyötön luotettavuus kriittisillä kuormilla sekä korkeampi selektiivisyys suojausjärjestelmällä. (Zheng, D. et al, 2021, s. 121–127).

Kuten edellä on todettu, mikroverkkojen suojaaminen on haastava tehtävä. Mikroverkkojen suojaus poikkeaa merkittävästi perinteisen jakeluverkon suojauksesta, eikä perinteinen suojaus ole optimaalinen ratkaisu. Vikasuuntien tunnistamiseksi voidaan käyttää suunnattua ylivirtarelettä ja vaihtaa releiden asetusvalinnat mikroverkon tilaa vastaavaksi. Suojauksen kehitystyössä on testattu kokonaisharmonisen säröön, jännitteenalenemaan, differentiaalisuojaukseen ja vaihekulmavertailuun perustuvia ratkaisuvaihtoehtoja. Nämä edellä mainitut koekielut vaativat myös luotettavan tietoliikennejärjestelmän, joka voi nostaa kustannuksia merkittävästi. Merkittäviä haasteita saattaa myös tulla virtamuuntajien soveltumattomuudesta johtuen, sekä myös edellä mainittujen vikavirtojen suuruuksien ja suuntien vaihtelusta johtuvista seurauksista. Suojaushaasteissa pitää huomioida erityisesti mikroverkon toimintatavoista johtuvat oikosulkuvirrat, releiden toiminta-alueiden asettelu, kaksisuuntainen tehovirtaus sekä jänniteprofiili. (Zheng, D. et al, 2021, s. 52–53).

Saareketilanteessa selektiivisyyden toteutumista ei yleensä pystytä varmistamaan, mutta silloin tästä on saatava tieto käyttökäyttäjille. Saarekekäyttö voi aiheuttaa myös suojausjärjestelmän muutostarpeita, kuten distanssireleen käyttöä maasulkujen poistamiseen sekä uudelleen asetuksia hajautetun tuotannon laitteille sekä suojareleille. (IEEE Std 1547.4-2011, s. 39).

4.1 Mikroverkon sähkönlaatu

Sähköntuotantolaitokset tuottavat tavallisesti tehoa vaihtovirran (AC) ja -jännitteen muodossa tietyllä amplitudilla ja taajuudella. Useimmat asiakkaiden käyttämät sähkölaitteet on myös suunniteltu toimimaan kapealla jännite- ja taajuuskaistalla, jolloin kaikki poikkeamat kyseisiltä alueilta voivat johtaa laitteiden suorituskyvyn heikkenemiseen (Chowdhury, S. ja

muut, 2009, s. 126). Sähkön laatu on yksi suurimmista ongelmista mikroverkoissa tehoelektroniikan, uusiutuvan energian tuotannon ja epälineaaristen elektroniikkakuormien käytön vuoksi (Bordons, C. ja muut, 2020, s. 227). Kaksi eniten huolta aiheuttavaa aluetta sähkön laadussa nykyään ovat kuormien elektroniikasta muodostuvat harmoniset virrat ja niiden aiheuttamat jännitteen muodon häiriöt (IEEE Std 1854-2019, s. 27).

Verkkoon kytketyssä -toimintatilassa sähkön laatuindeksin tulee täyttää voimassa olevan standardin SFS-EN 50160 mukaiset vaatimukset taajuudelle, jännitteen suuruudelle, aalto muodolle ja kolmivaiheisen jännitteen symmetrisyydelle (SFS-EN 50160, s. 7). Mikroverkoissa sähkön laadullinen perusindeksi sisältää taajuus-/jännitepoikkeaman sekä tehokertoimen, mutta lisäksi suositellaan huomioimaan jännitteen nousut ja laskut, vaihtelut ja välkkyminen, harmoniset virrat, tasavirtakomponentti sekä epäsymmetria (IEEE Std 2030.9-2019, s. 30). Saarekekäyttötilassa yliaaltojen huolellinen seuranta auttaa pitämään myös virran laadun harmonisten suhteen hyväksyttävällä tasolla (IEEE Std 2030.4-2011, s. 39). Saareke -käyttötilassa pitää mikroverkon omistajan tai käyttäjän määrittää sähkön laatuindeksit (IEEE Std 2030.9-2019, s. 30).

Kun yleensä mikroverkon elementit liitetään suuntaajiin, jotka vastaavat mikroverkon sähkön laatutasoista, suuntaajien ohjauksesta tulee merkittävä kokonaisuus mikroverkoissa (Yu, X., Khambadkone, A. M., Wang, H. & Terence, S. T. S., 2010). Sähköjärjestelmissä mikä tahansa poikkeama suhteessa teoreettiseen arvoon katsotaan häiriöksi sähköverkon sähkön laadussa. Poikkeama voi muuttaa mitä tahansa aallon parametreja, kuten taajuutta, amplitudia, aaltomuotoa ja vaiheiden välistä symmetriaa (Bordons, C. ja muut, 2020, s. 227). Jänniteongelmat voivat johtua useista syistä, kuten virheellisestä jännitteen säädöstä, jännitteen epätasapainosta, ajoittaisista energialähteistä tai suunnittelemattomasta järjestelmän kuormituksesta (IEEE Std 1854-2019, s. 27). Mikroverkon laadullisia vaikutuksia koskevan tutkimuksen mukaan tasavirtajärjestelmiä pidetään vaihtovirtajärjestelmiä parempina sähkövirran laatukysymyksissä, koska niissä ei esiinny haitallisia määriä harmonisia virtoja eikä loisivirtoja (Jadeja, R., Bizon, N., Trivedi, T., Ved, A. & Chudasama, M., 2020, s. 720).

4.1.1 Jännite

Verkon jännite vaihtelee tuotannon ja kulutuksen vaihdellessa. Normaalisti pienjänniteverkon nimellisjännite $U_n = 230 \text{ V}$. Viikon mittausjaksolla nimellisjännite ei jakeluverkkoon liitettynä saisi ylittää $\pm 10 \%$:a nimellisestä arvosta 10 minuutin jaksolta mitattaessa. Jännitteen vaihtelulle sallitaan jopa $+10 \dots -15 \%$ vaihteluväli, mikäli jakeluverkon ja siirtoverkon välinen liitos puuttuu tai kyseessä on syrjäseudulla sijaitseva jakeluverkko. Jännitteen tason vaihteluille on standardissa esitetty lisävaatimuksia sallituille nopeille jännitemuutoksille, joita ovat esimerkiksi transientit ja välkyntä. Myös jännitteen epäsymmetriat, harmoniset yliaaltojännitteet sekä epäharmoniset yliaaltojännitteet ovat haitallisia jännitehäiriöitä, joille on standardissa annettu sallitut arvot. (SFS-EN 50160, s. 14-15).

Nopeita jännitemuutoksia aiheuttavat asiakkaiden laitteet, kuten oikosulkumoottorit, kompressorit ja hitsauslaitteet sekä sähköjärjestelmän kytkentämuutokset. Nopeiden jännitetasojen muutosten seurauksena valaisinten luminanssitaso vaihtelee, jolloin ilmiö havaitaan välkyntänä. Transienttiylijännitteet ovat hyvin lyhytaikaisia alle mikrosekunnista muutamiin millisekunteihin kestäviä ylijännitteitä, jotka aiheutuvat yleensä ukkosesta sekä kytkentätilanteista. Transientit jaotellaan vielä lyhyisiin transientteihin ($< 1 \mu\text{s}$), keskipitkiin transientteihin ($1 \dots 100 \mu\text{s}$) ja pitkiin transientteihin ($> 100 \mu\text{s}$) (Energiateollisuus 2022h, s. 18-19). Transienttiylijännitteiden ylijännitesuojauksen toteuttamiseksi tulee käyttää IEC 60364-5-53 mukaisia ylijännitesuojia (SFS-EN 50160, s. 19). Ukkosista johtuviin ylijännitteisiin liittyvät suojausperusteet ja riskien arviointi löytyvät standardista SFS-EN 62305-2 (SFS-EN 62305-2).

Jännite-epäsymmetriaa aiheuttavat yleisesti pienjänniteverkossa epätasaisesti jaettu kuormitus, yhden vaiheen katkos sekä maasulku (Energiateollisuus 2022h, s. 16). Epäsymmetria määritellään jännitteen vastakomponentin ja myötäkomponentin suhteen avulla, joka normaalikäyttötilanteessa on $0 \dots 2 \%$ (SFS-EN 60160, s. 16).

Harmoniset ja epäharmoniset yliaaltojännitteet ovat seurauksia tehoelektroniikkaa sisältävien suuntaajien, taajuusmuuttajien yms. käytön aiheuttamista häiriöistä (Masoum, M. A. S & Fuchs, E. F., 2015, s. 25-26). Harmoninen vääristymä tarkoittaa, että tehovirtauksessa on vakiotehotaajuuskomponentin lisäksi korkeataajuisia komponentteja (Chowdhury, S. ja muut, 2009, s. 128-129). Harmonisille yliaaltojännitteille on määritelty sallitut taulukon 3

mukaiset maksimiarvot. Epäharmonisille sallittavat tasot on harkittava tapauskohtaisesti lisätietojen perustella (SFS-EN 50160, s. 16).

Taulukko 3. Sallitut harmoniset yliaaltojännitteet (SFS-EN 50160, s. 16).

Parittomat harmoniset				Parilliset harmoniset	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset		Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	1,0 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,75 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 harmonisille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

Jännitteen kokonaissärökertoimen saa olla maksimissaan 8 % aina 40. harmoniseen saakka (SFS-EN 50160, s. 16). Verkossa olevat resonanssipiirit voivat aiheuttaa jännitevääristymään vahvistusta, joka samalla vahvistaa myös yliaaltoja (Energiateollisuus 2022h, s. 16).

Jännitekuoppa on jännitteen äkillinen aleneminen 1-90 %:a nimellisestä jännitteestä U_n ja ne aiheutuvat yleensä vikatilanteista sekä suurempien kuormien kytkemisestä (Energiateollisuus 2022h, s. 18). Jännitekuoppien esiintyvyys on hyvin satunnaista ja ennalta arvaamattonta sekä yleisesti lyhytkestoisia (alle 1 s) (SFS-EN 50160, s. 17-18; 38). Ylijännitteitä esiintyy ajoittain kytkentätilanteiden muutoksien seurauksena ja kuorman poiskytkennän seurauksena (Energiateollisuus 2022h, s. 18). Ylijännitteiden suojauksen suunnittelussa on otettava huomioon laiteherkkyys sekä suojaustaso, jota tavoitellaan (IEC/TR 61000-5-1, s. 14).

4.1.2 Taajuus

Taajuuspoikkeamia, jotka mikroverkoissa voi olla huomattavan suuria, aiheuttavat sähkövoimajärjestelmässä pätötehon tuotannon ja kulutuksen välinen ero (Castilla, M. ja muut, 2019, s. 150). Pohjoismaissa sähköverkon taajuus pyritään pitämään nimellistaajuusarvossa 50 Hz \pm 0,1 Hz, mutta taajuus voi kuitenkin vaihdella normaalikäytön aikana 49,0 – 51,0 Hz

tai jopa 47,5 – 51,5 Hz poikkeustapauksissa (Fingrid 2022h). Taulukossa 4 on koottuna verkon taajuudet ja standardin mukaiset käyttöarvot. Taajuuspoikkeama aiheuttaa laitteiden toimintavirheitä ja osa uusiutuvan energian tuotantolaitteista ei pysty toimimaan poikkeavilla taajuuksilla (IEEE Std 1547.4-2011, s. 22).

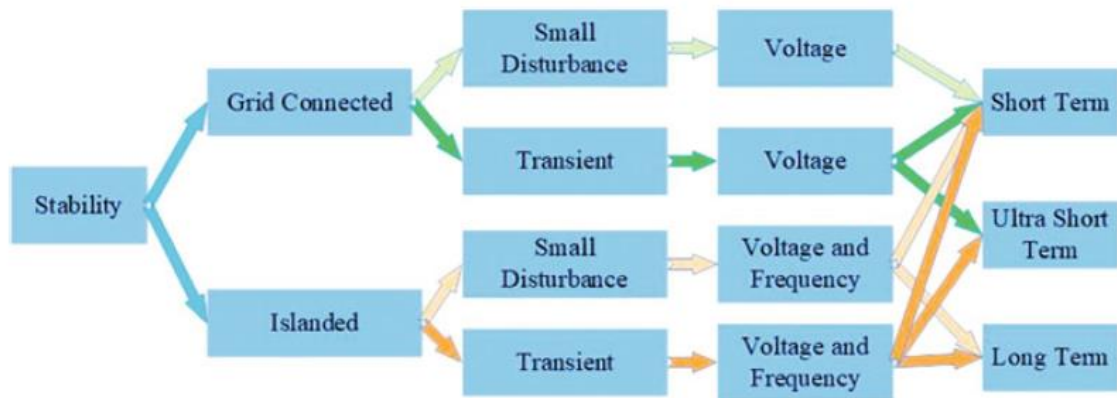
Taulukko 4. Jakelujännitteen normaalin käyttöolosuhteen perustaajuuden keskiarvo 10 s ajanjaksolla (SFS-EN 50160, s. 21).

	Nimellis- taajuus	Suhteellinen vaihtelualue	Taajuuden vaihteluväli		10 s ajanjakson pysyvyysaika
			Min. [Hz]	Max [Hz]	
Yhteiskäyttöverkko	50 Hz	± 1 %	49,5	50,5	99,5 % vuodesta
	50 Hz	+ 4 % ... - 6 %	47	52	100 % ajasta
Erillisverkot	50 Hz	± 2 %	49	51	95 % viikosta
	50 Hz	± 15 %	42,5	57,5	100 % ajasta

Standardissa ei määritellä erillisiä rajoja mikroverkon käyttöön, mutta laadukkaan taajuuden toteutuksena voidaan pitää yhteiskäyttöverkon mukaisia rajoja ja vähimmäisvaatimustasona erillisverkkojen taajuusrajoja. Taajuuden seuranta ja ohjaus on mahdollista suuntaajien avulla, käyttäen esimerkiksi FLL-ohjausta (Frequency Locked Loop), joka mittaa järjestelmän taajuutta reaaliajassa (Castilla, M. ja muut, 2019, s. 150). Saarekekäyttötilanteen muuttuessa verkkokäyttöiseksi tarvitaan taajuustieto julkisesta verkosta sekä mikroverkosta, ettei verkon vakaa toiminta häiriinny (Das., P & Biswal, M., 2020, s. 184-186).

4.1.3 Stabiilisuus

Mikroverkkojen stabiilisuusongelmat voivat liittyä useisiin näkökohtiin, joilla lisäksi voi olla erilaisia ominaisuuksia, mukaan lukien muun muassa verkon ja käytön ominaisuudet, tehovirrat, sähköhäiriöt ja ohjausstrategiat (Solano, J., Rey, J. M., Bastidas-Rodríguez, J. D. & Hernández, A. I., 2019, s. 306). Mikroverkossa stabiilisuus voidaan jaotella kuvan 28 mukaisesti, jossa on jännitteen ja taajuuden vaikutuksista aiheutuvat häiriöt ovat myös aika-riippuvaisia. Lisäksi saarekekäytössä uusiutuvan tuotannon vaihtelevuus sekä pieni inertia aiheuttavat stabiilisuuteen omat tekniset haasteet (Shahbazitabar, M. ja muut, 2021, s. 10).



Kuva 28. Mikroverkon stabiilisuuden määrittäminen (Shahbazitabar, M. ja muut, 2021, s. 11).

On tärkeää tunnistaa ja luokitella stabiilisuuden syyt ominaisuuksien mukaan, jolla mahdollistetaan eri ohjausstrategioiden soveltaminen (Solano, J. ja muut, 2019, s. 306). Ohjausstrategiat liittyvät olennaisesti eri luvun 3.1.4 mukaisiin ohjaustasoihin, jotka määrittelevät ohjaustarpeiden prioriteetin. Standardissa 2030.9 on esitetty myös vaatimus stabiilisuuden arvioinnille, joka tehdään, kun verkossa on synkronointia vaativia laitteita (IEEE Std 2030.9, s. 20). Yksi mikroverkon lopullisista tavoitteista on lieventää verkon pienjännitetaso sähkölaatuhäiriöiden vaikutusta (Bordons, C. ja muut, 2020, s. 245).

4.2 Perussuojaus ja vikasuojaus

Perussuojauksen toteuttamisella pyritään estämään jännitteelle alttiiden osien koskettaminen (SFS 6000-1:2017, s. 8). Perussuojaus voidaan toteuttaa jännitteisten osien peruseristyksen sekä suojausten ja kotelointien avulla. Peruseristyksessä suojataan kokonaan peittäväällä eristyksellä jännitteelle alttiit osat, eikä eristystä voi poistaa muuten kuin rikkomalla se. Suojuksien ja kotelointien tarkoituksena on pitää jännitteelle alttiit osat riittävän pienien aukkojen ja esteiden avulla kosketuksen ulottumattomissa. Suojukset ja koteloinnit voidaan poistaa työkalujen tai avainten avulla. (SFS 6000-4-41:2017, s. 7; 18; 23).

Vikasuojauksella toteutetaan peruseristyksen vikaantuessa suojaus kosketusjännitteeltä (SFS 6000-1:2017, s. 8). Vikasuojausvaatimuksessa syötön automaattinen poiskytkentä edellyttää suojamaadoitusta tai suojaavaa potentiaalintasausta (SFS 6000-4-41:2017, s. 7). Kaksoiseristyksen ja vahvistetun eristyksen avulla mahdollistetaan perussuojauksen toteuttaminen peruseristyksellä ja vikasuojauksen toteuttaminen lisäeristyksellä (SFS 6000-4-

41:2017, s. 15). Syötön automaattisen poiskytkennän toteuttamiseksi noudatetaan taulukon 5 mukaisia poiskytkentäaikoja ryhmäjohtoilte.

Taulukko 5. TN- ja TT-jakelujärjestelmien poiskytkentäajat (SFS 6000-4-41:2017, s. 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 potentiaalintasaus 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.

Yllä olevan taulukon mukaiset poiskytkentäaikoja käytetään ryhmäjohtojen suojausvaatimuksissa, kun suojalaitteen mitoitusvirta ei ylitä 63 A:n virtaa yhtä tai useampaa pistorasiaa syötettäessä, eikä 32 A:n virtaa kiinteästi asennettuja sähkölaitteita syötettäessä. Pääjohtoilte, joita edellä mainittu vaatimus ei koske, sallitaan maksimissaan 5 sekunnin poiskytkentäaika TN-järjestelmissä. TT-järjestelmissä poiskytkentäaika on pääjohtoilte sallittu olevan maksimissaan 1 sekunnin. Vikasuojauslaite on valittava siten, että se erottaa vähintään äärijohtimen vaaditussa ajassa. (SFS 6000-4-41:2017, s. 8-9).

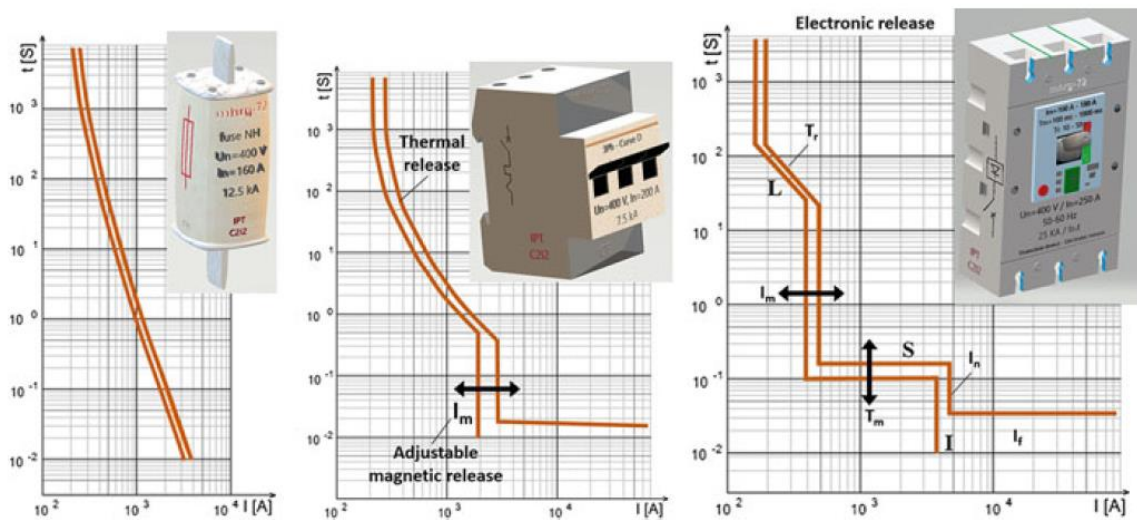
4.3 Ylivirtasuojaus

Ihmiset, kotieläimet ja omaisuus on suojattava ylivirran vaaroilta rajoittaen ylivirran suuruutta tai kestoaikaa (SFS 6000-1:2017, s. 9). Ylivirtasuojauksen toteuttamisessa huomioidaan ääri- ja nollajohtojen suojaaminen, jakelujärjestelmä, harmoniset virrat, suojalaitteiden tyypit ja ominaisuudet (SFS 6000-4-43:2017, s. 6-8). Ylivirtasuojaa käytetään virtapiirin katkaisuun, jos virta ylittää sallitun arvon annetussa ajassa (SFS 6000-1:2017, s. 28). Suojalaitteiden tehtävänä on katkaista ylikuormitusvirran lisäksi myös oikosulkuvirta, jolloin käytetään ylikuormituksesta laukaisevia katkaisijoita, varokkeita katkaisijoiden kanssa sekä varokkeita gG-tyyppisillä sulakkeilla varustettuina (SFS 6000-4-43:2017, s. 7).

Invertteri-/suuntaajapohjainen tuotantojärjestelmä vähentää oikosulkuvirtaa, eivätkä tavanomaiset ylivirtasuojat toimi vikatilanteissa lainkaan tai ne ottavat enemmän aikaa kuin

sallitaan. Suojausjärjestelmän reagoinnin viivästyminen vaarantaa esimerkiksi komponentit, jos niiden lämpörajat ylittyvät. Näin ollen mikroverkoissa voi syntyä suojausongelmia, jotka liittyvät herkkyyteen (havaitsemattomat viat), nopeuteen (viiveellinen laukaisu) ja selektiivisyyteen (väärä/tarpeeton laukaisu). (Gomes, M., Coelho, P. & Moreira, C. 2019, s. 312-313).

Perinteisessä pienjännitejaketuverkossa on säteittäinen topologia, jonka suojaus on suunniteltu yksisuuntaisen virran kulkusuunnan mukaan. Tällaisissa verkoissa suojaukset perustuvat siis suurten vikavirtojen havaitsemiseen kuvan 29 sulakkeiden ja katkaisijoiden avulla.



Kuva 29. Ylivirtasuojalaitteita: sulake/varoke, lämpötilaan ja magneettiseen ilmiöön perustuva katkaisija ja virtamittaukseen perustuva katkaisija (Gomes, M. ja muut, 2019, s. 319).

Sulakkeiden toiminta-alue perustuu virranrajoitusominaisuuteen I^2t (SFS-EN 60269-1, s. 24). Lämpötilaan ja magneettiseen ilmiöön perustuvassa katkaisijassa on toiminta-alue esitettävissä termisen laukaisukäyrän ja magneettisen laukaisukäyrän alueena, jossa terminen alue toimii ylikuormitussuojauksessa hidastettuna ja magneettinen alue toimii oikosulkusuojauksessa pikalaukaisuna (ABB 2022b, s. 6; 11). Virtaa mittaavat elektronisen releen sisältävät katkaisijat voidaan asettaa useilla arvoilla laukaisua toteuttaviksi. Laukaisualue voidaan määrittellä esimerkiksi katkaisijan nimellisvirran mukaan $0,6 - 15 * I_n$ (Gomes, M. ja muut, 2019, s. 319). Laukaisukäyrä käsittää niin sanotun käänteisaikaosan L , jota käytetään ylikuormitussuojaukseen. Lisäksi katkaisijassa on vakioaikaviive ominaisuus S , eli lyhytaikaviivelaukaisu ja hetkellisen laukaisun ominaisuus I oikosulkua vastaan. Vakioaikaviive voi sisältää useita portaita ja elektronisissa ylivirtareleissä kaikki laukaisukäyrän osat ovat yleensä säädettävissä laajalla alueella pienin askelin.

Ylivirtapohjaisten suojausratkaisujen käytössä pitää ylivirtalaitteiden suojausasetteluiden säädöt olla riittävät hajautetun tuotannon liittämiseksi. Riittävien säätöjen avulla varmistetaan mikroverkkojen selektiivisyys eri toimintatilojen tapauksissa. Keskijänniteverkoissa on tavallista asettaa ylivirtasuojausaika vakioaikaylivirtatoimintona, jossa katkaisija avataan, kun asetettu virta-arvo on ollut ylittynään asetellun vakioajan. Hajautetun tuotannon liittämiseen liittyvät ongelmat voitaisiin ratkaista joustavalla suojausten mukauttamisella: yhdistämällä releasetukset suuntareleisiin. (Gomes, M. ja muut, 2019, s. 319-320).

4.3.1 Ylikuormitussuojaus

Kaapeleiden ylikuormitukselta suojaavan suojalaitteen on täytettävä seuraavat ehdot,

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (1)$$

$$I_2 \leq 1,45 \leq I_Z \quad (2)$$

jossa

I_B = mitoitusvirta

I_Z = johtimen jatkuva kuormitettavuus

I_n = suojalaitteen mitoitusvirta

I_2 = suojalaitteen toimimisen varmistava virta määrättyssä toiminta-ajassa.

(SFS 6000-4-43:2017, s. 8)

Kun suojalaitteena käytetään sulaketta, on huomioitava myös sulakkeen ylempi sulamisrajavirta, joka yleisesti yli 16 A:n nimellisvirralla olevien sulakkeiden osalta on 1,6. Tällöin kuormitettavuus on huomioitava kaavan 3 mukaisesti:

$$k * I_n \leq 1,45 * I_Z \quad (3)$$

jossa

k = sulakkeen ylempään sulamisrajavirran ja nimellisvirran suhde. (Tiainen, E., 2010, s. 33).

Ylikuormitussuojan voi sijoittaa johto-osalla mihin tahansa kohtaa, kunhan johdon poikkipinnan, lajin, asennustavan tai muun rakenteen ja sijoituspaikan välillä ei ole johtohaaroituksia tai pistorasioita. Lisäksi johto pitää olla oikosulkusuojattu tai johto on enintään 3 metriä pitkä ja oikosulkuvaara on mahdollisimman pieni. Ylikuormitussuoja voidaan jättää pois, kun:

- syöttöpuolen suojalaite suojaa johtoa ylikuormitukselta
- ilman pistorasioita ja haaroittamatonta johto, joka on oikosululta suojattu, eikä ylikuormitusta todennäköisesti esiinny
- kyseessä on yleisen jakeluverkon liittymisjohto, jos se täyttää jakeluverkon standardin SFS 6000-8-801 mukaiset suojausvaatimukset
- jakeluverkon kaapelit ovat maahan asennettuja kaapeleita tai ilmajohtoja, joiden ylikuormitus ei aiheuta vaaraa
- kyseessä on tietoliikenteen, ohjauksen ja merkinannon asennuksista. (SFS 6000-4-43:2017, s. 9)

Mikroverkoissa esiintyy suuntaajakäyttöistä johtuen harmonisia yliaaltoja, jotka kolmivaihepiireissä voivat summautua nollajohtimeen. Tämä aiheuttaa lisävaatimuksia nollajohtimen ylivirtavalvonnalle sekä poiskytkennälle (SFS 6000-5-53:2017, s. 22). Nollajohtimen poiskytkennässä on äärijohtimien kytkeydyttävä pois ennen nollajohtimen poiskytkentää (SFS 6000-4-43:2017, s. 7). Harmonisten virtojen vaikutuksia voidaan pienentää käyttämällä suodattimia tai muita vastaavia menetelmiä (SFS 6000-5-53:2017, s. 22).

4.3.2 Oikosulkusuojaus

Oikosulku aiheutuu eri potentiaalierojen välille tahattomissa tai tahallisissa kosketuksissa tapahtuvasta pieni-impedanssisesta yhteydestä, jossa potentiaaliero pyrkii tasaantumaan lähes nollassa (SFS 6000-1:2017, s. 28). Kolmivaiheisessa vaihtosähköverkossa kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa kaikkiin vaiheisiin samansuuruisen virran ja kyseessä on symmetrinen vika. Epäsymmetrisiä vikoja ovat kaksivaiheinen oikosulku sekä maasulku, joka TN-jakeluverkossa on sama kuin yksivaiheinen oikosulku. Oikosulkusuojauksen määrittämiseksi on määritettävä myös prospektiivinen oikosulkuvirta tarpeellisiksi katsotuissa

verkon pisteissä (SFS 6000-4-43:2017, s. 9). Oikosulkusuojauksen tarkoitus on saada viallinen verkon osa erotettua niin, ettei siitä aiheudu vaaraa ihmisille, eläimille eikä omaisuuksille.

Oikosulkusuojan pitää täyttää prospektiivisen oikosulkuvirran mukainen katkaisukykyvaatimus, ellei syöttöpuolella ole riittävän katkaisukyvyyn sisältävää suojalaitetta. Käytettäessä kahta suojalaitetta on kummankin suojalaitteen ominaisuudet yhteensovitettava vikatilanteessa läpi kulkevan energiamäärän mukaan sekä niiden on kestävä energiamäärä vahingoittumatta. Oikosulkuvirrat pitää katkaista riittävän nopeasti, jotta virtapiirin rakenteiden sallitut lämpötilarajat eivät ylity. Suurimmillaan 5 sekuntia kestävien oikosulkujen aikakes- toisuus voidaan määrittää kaavasta 4.

$$t = \left(\frac{k \cdot S}{I} \right)^2 \quad (4)$$

jossa

t = kesto aika (s)

S = poikkipinta-ala (mm²)

I = tehollinen oikosulkuvirta (A)

k = kerroin, jolla huomioidaan materiaalin ominaisuuksia, kuten resistiivisyys, lämpötilakerroin, lämmönvarauskyky. (SFS 6000-4-43:2017, s. 12).

Kaapelin ja johtimien valmistajat ilmoittavat yleensä oikosulkukestoisuuden 1 sekunnin mukaan, joka on muunnettava suojaustarkastelua varten termisen kestoisuuden kaavan 5 avulla.

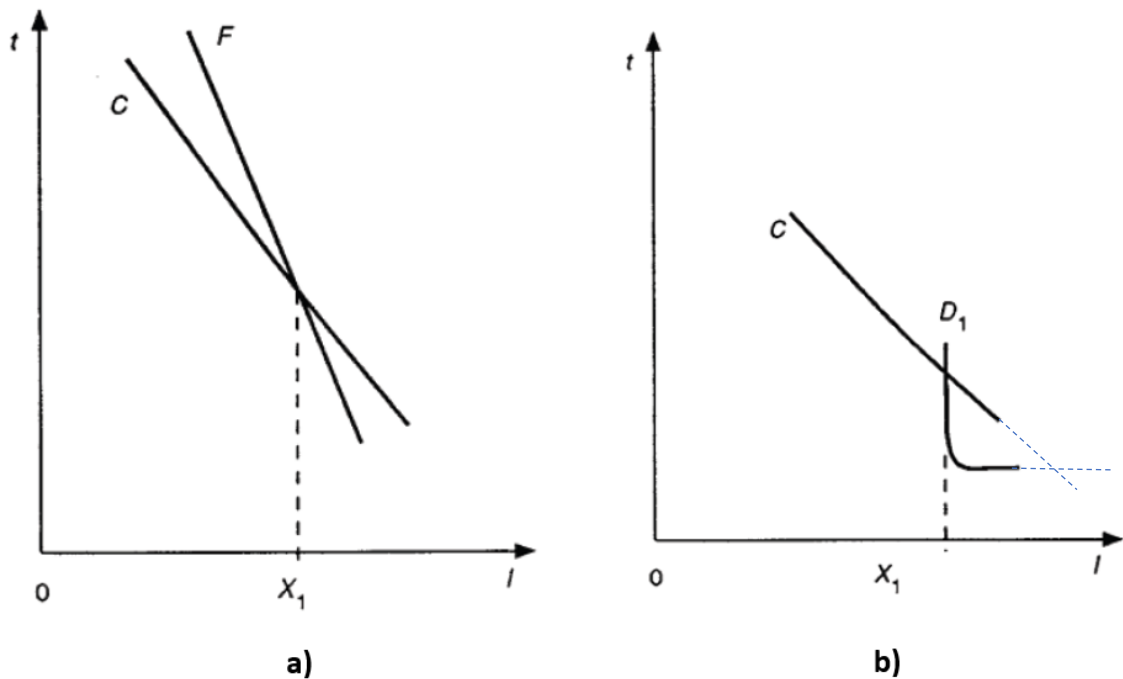
$$I_t = \frac{I_{1s}}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

Taulukosta 6 saadaan oikosulkukestoisuuden laskemiseksi tarvittavan kertoimen k arvo.

Taulukko 6. Oikosulkusuojauksen k arvoja (SFS 6000-4-43:2017, s. 13).

Ominaisuus/ olosuhde	Johtimen eristys							
	PVC		PVC 90°C		EPR PEX	Kumi 60 °C	Mineraali	
							PVC Päällystetty	Paljas Päällystämätön
Johtimen poikki-pinta-ala mm²	≤ 300	> 300	≤ 300	> 300				
Alkulämpötila °C	70		90		90	60	70	105
Loppulämpötila °C	160	140	160	140	250	200	160	250
Johtimen materiaali:								
Kupari	115	103	100	86	143	141	115	135 -115 ^a
Alumiini	76	68	66	57	94	93	-	-
Kuparijohtimien tina- juotetut liitokset	115	-	-	-	-	-	-	-
^a Tätä arvoa pitää käyttää kosketeltavissa oleville paljaille johtimille.								
HUOM. 1 Muut kertoimen k arvot ovat harkittavana: - pienille johtimille (erityisesti alle 10 mm ² poikkipinnoille) - muun tyyppisille johtimien liitoksille - paljaille johtimille.								
HUOM. 2 Oikosulkusuojan mitoitusvirta voi olla suurempi kuin kaapelin kuormitettavuus.								
HUOM. 3 Yllä olevat arvot perustuvat julkaisuun IEC 60724.								
HUOM. 4 Kertoimen k laskemiseksi katso SFS 6000-5-54 liite 54A:								

Oikosulkusuojan valinta tehdään katkaisukyvyyn ja poiskytkentäajan mukaisten vaatimusten täyttämiseksi. Katkaisukyvyyn on oltava vähintään yhtä suuri kuin odotettavissa oleva suojattavan verkonosan oikosulkuvirta. Poiskytkentäaika on yleensä maksimissaan 5 sekuntia ja suojalaitteesta (sulake tai katkaisija) johtuen on suojaus tarkasteltava pienimmän oikosulkuvirran mukaisesti. Kuvassa 30 esitetään pienimmän oikosulkuvirran määrittäminen sulakkeelle ja katkaisijalle.



Kuva 30. Poiskytkentäajan määrittäminen a) sulakkeilla/varokkeilla ja b) katkaisijoilla (SFS 6000-5-53:2017, s. 23-24).

Kuvamerkinnot:

X_I = pienin oikosulkuvirta, jolla suojalaite suojaa johdotusta

C = ominaiskäyrä, joka vastaa suojattavan virtatien lämpörasitusta

F = sulakkeen/varokkeen sulamiskäyrä (toiminta-alueen yläraja)

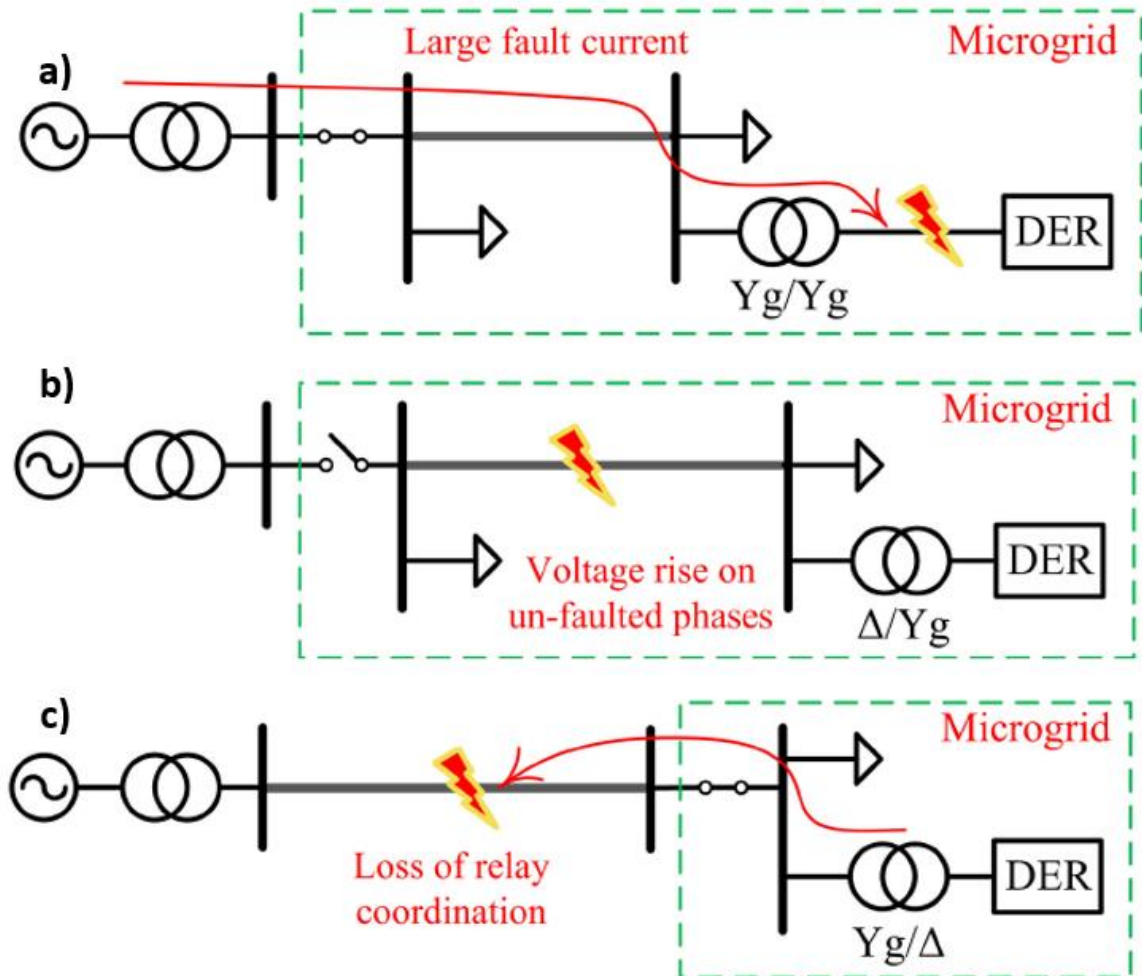
D_I = katkaisijan toimintakäyrä.

Sulakkeita ja varokkeita (a) käytettäessä pienin prospektiivinen oikosulkuvirta pitää olla vähintään X_I :n suuruinen. Mikäli X_I ylittää 5 sekuntia, on se korvattava 5 sekunnin toiminta-ajan toteuttavalla sulamisvirta-arvolla. Katkaisijoilla (b) pitää myös pienin oikosulkuvirta olla minimissään X_I :n suuruinen, jota käytetään lämpörasitusten kestävyuden määrittämisessä. Toinen leikkauspiste on suurin vikavirta, joka pitää huomioida myös laitevalintoja tehdessä. Katkaisijoissa on käytettävä valmistajan antamaa läpivirtausenergian (I^2t) arvoa, kun vikavirrat ovat pikalaukaisun, eli käyrän D_I pystyakselin raja-arvoja suurempia. (SFS 6000-5-53:2017, s. 22-23).

4.4 Maadoitus

TN-jakelujärjestelmän suojauksen toiminnan luotettavuus edellyttää toimivaa maadoitusjärjestelmää. Jakelujärjestelmän tehonsyötön nolla- tai keskipiste on maadoitettava ja mikäli kyseistä pistettä ei ole, on maadoitus tehtävä äärijohtimeen (SFS 6000-4-41:2017, s. 10). Maadoitusjärjestelmän avulla toteutetaan johtava yhteys maapotentiaaliin, jolloin voidaan täyttää suojausvaatimukset, johtaa vikavirrat maahan tai toteuttaa toiminnallisen suojauksen tarkoitukset (SFS 6000-5-54:2017, s. 7).

Verkon maadoitusta voidaan pitää suojausjärjestelmän osana, jonka puuttuminen voi aiheuttaa suojausjärjestelmän toimintaan vakavia puutteita. Vaihtovirtapohjaisten mikroverkkojen ominaisuudet johtavat lisäkriteereihin, jotka vaikuttavat myös maadoitusstrategioiden valintaan (Mohammadi, J., Badrkhani Ajaei, F. & Stevens, G., 2019). Chandran ja muiden mukaan pienjännitteisille mikroverkoille suositellaan TN-jakelujärjestelmää, koska se sallii riittävän vikavirran suojajärjestelmän aktivoimiseksi sekä tuottaa alemman kosketusjännitteen kuin TT tai IT, vähentäen terveistä vaiheista syöttävien laitteiden jänniterasitusta ja varmistaa turvallisuuden käyttäjille (Chandra, A., Singh, G. K. & Pant, V., 2020). Lisävaatimuksia maadoitukseen aiheutuu kuvan 31 mukaisesti vikavirran suuruudesta (a), takaisinsyöttötilanteesta saarekekäytössä (b) ja hajautetun tuotannon vaikutuksista keskijännitepuolelle (c).



Kuva 31. Maadoitusten huomioiminen vikatapauksissa (Mohammadi, J. ja muut, 2019).

Kun vika tapahtuu hajautetun tuotannon pienjännitepuolella (a), vikavirran suuruus riippuu liityntämuuntajan kytkentäryhmästä, joten muuntajan maadoitusimpedanssiin on kiinnitettävä huomioita. Saarekekäytössä verkonliittymispisteen katkaisijan ollessa auki, voi vikatapauksessa (b) keskijännitepuolen vioissa esiintyä jopa vaihejännitteen suuruisia ylijännitteitä. Syöttöpuolen suuri-impedanssisissa vioissa (c) voi esiintyä suojarleiden havahtumisen kannalta haitallisia ilmiöitä, joka voi aiheuttaa releen toimimattomuutta. (Mohammadi, J. ja muut, 2019).

4.5 Ylijännitesuojus

Kytkehtätapahtumien ylijännitteet ovat transienteja aiheuttavia ilmastollisia ylijännitteitä pienempiä. Tämän vuoksi transienttiyläjännitesuojus toteuttaa yleensä myös

kytkentäylijännitteiden suojauksen, mutta mikäli ilmastollinen ylijännitesuojus puuttuu, saattaa olla aiheellista toteuttaa erillinen kytkentäylijännitesuojus. Transientit ovat lyhytaikaisempia ja sisältävät usein vähemmän energiaa, kuin kytkennöistä johtuvat ylijännitteet. Jakelujärjestelmän tyyppi, käytettävä rakenne, liittymän syöttöpuolen ylijännitesuojauksen toteutus ja syöttävän järjestelmän jännitetasot vaikuttavat myös transienttiylijännitteiden ominaisuuksiin. Transienttiylijännitesuojus tehdään ylijännitesuojilla. Ylijännitteiden aiheuttamiin vahinkoihin on varauduttava ylijännitesuojauksella seuraavissa kohteissa, ellei riskiarviolaskelmin pystytä toisin osoittamaan:

- ihmishenkien menetystä uhkaavat kohteet, kuten terveydenhuoltolaitokset
- julkisia palveluita tuottavat kohteet sekä kulttuuriperintökohteet, kuten museot ja muut vastaavat
- teollisia tai kaupallisia toimintoja sisältävät kohteet, kuten pankit, maatilat yms.
- suuria ihmismääriä vetävät kohteet, kuten koulut.

Lisäksi ylijännitesuojausta kannattaa harkita, kun käytetään esimerkiksi pienjännitegeneraattoreita tai varastointiyksiköitä. (SFS 6000-4-44:2017, s. 11-13).

Saarekekäyttötilanteessa kuormien ja tuotannon muutokset aiheuttavat yli- ja alijännitetilanteita, joissa suojauksen avulla pienennetään epänormaalista tilanteesta aiheutuvaa haittaa (Usta, O., 2020, s. 653). Kytkennällisiä ylijännitteitä esiintyy muun muassa hajautetun tuotannon, kuten aurinkovoiman sekä energiavarastoinnin tehoelektroniikalla tapahtuvien muunnosten yhteydessä. Mikroverkkojen liittyessä yllä mainittuihin kiinteistökohteisiin on ylijännitesuojaustarkastelu tehtävä ja muissa kohteissa ylijännitesuojus tulee näiden edellä mainittujen ominaisuuksien takia harkittavaksi ja suojausjärjestelmän kannalta suositeltavaksi.

Ylijännitesuojien asentaminen on tehtävä mahdollisimman lähelle liittymispaikkaa. Ylijännitesuojat valitaan ominaisuuksien perusteella, joita ovat:

- jännitetaso suojattavassa laitteessa
- impulssijännitteen mitoitusarvo
- jakelujärjestelmä
- käyttöjännite

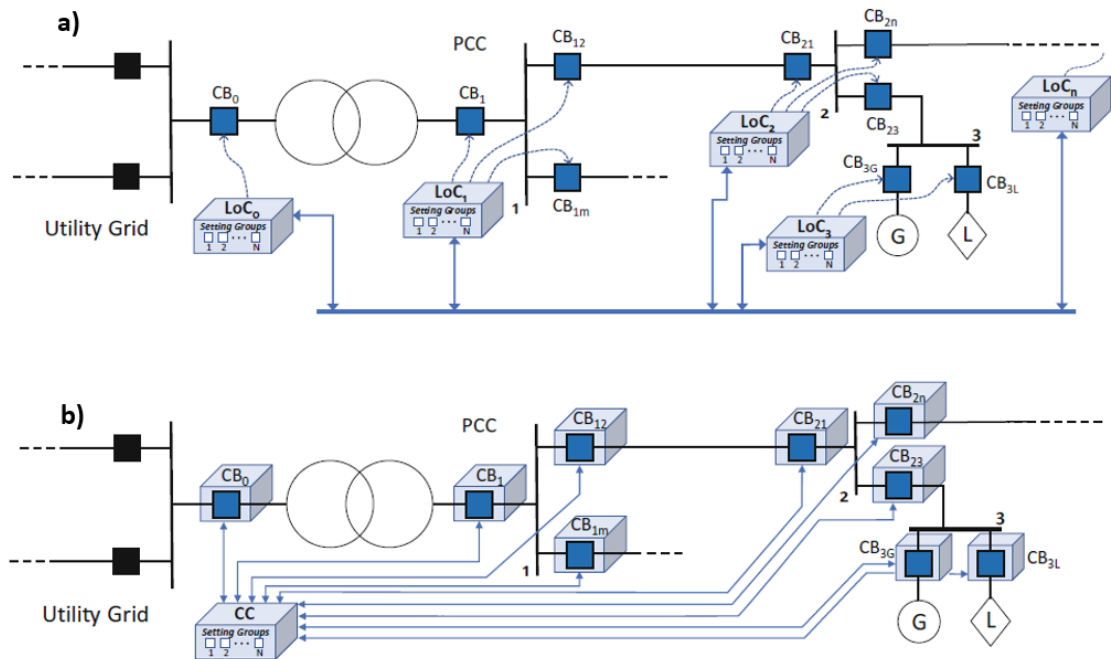
- nimellinen purkausvirta
- impulssivirta
- ylijännitesuojien yhteensopivuus (käytettäessä useita suojalaitteita)
- oikosulkuvirta
- jälkivirran katkaisukyky. (SFS 6000-5-53:2017, s. 24-28).

Ylijännitesuojien lisäksi voidaan ylijännitesuojaus toteuttaa ylijännitereleillä (Usta, O., 2020, s. 653). Ali-/ylijänniterele valvoo jatkuvasti järjestelmän jännitettä ja havahtuu mikäli jännite on sallittujen jänniterajojen ulkopuolella sekä reagoi määritellyn aikaviiveen jälkeen. Ylijännitteiden vaikutuksia voidaan pienentää myös esimerkiksi loistehoa säätämällä (Nguyen, P. H., Viyathukattuva Mohamed Ali, M. M., Portelinha Jr, F. M., Ribeiro, P. F. & Cobben, J. F. G, 2019, s. 221-222). Jokainen tuotantoyksikkö säätää yksilöllisen loistehonsa vastaamaan järjestelmän keskimääräistä loistehoa PID-algoritmillä, joka korjaa alhaisen tai korkean järjestelmäjännitteen (IEEE Std 1547.4-2011, s. 28). Loistehon säädössä on kuitenkin huomioitava, että verkkovian aikana syötetty loisteho voi vaarantaa suojareleiden koordinaation (Beheshtaein, S., Cuzner, R., Savaghebi, M. & Guerrero, J. M., 2019).

4.6 Tietoliikenneyhteydet

Tieto- ja viestintäteknikka on yksi mikroverkkojen pääelementeistä ja viestintäjärjestelmä käyttää erilaisia viestintäteknologioita toteuttaakseen viestinnän älykkäiden elektronisten laitteiden sähköverkon laitteiden kanssa (IEEE Std 2030.9-2019, s. 32). Kyberhyökkäyksen mahdollisuus, joka voi estää järjestelmän koko toiminnan, on olemassa joka päivä. Hyökkäysuhat tapahtuvat yleensä järjestelmän heikompiin osiin, jotka mikroverkkojen tapauksessa ovat langaton verkkoinfrastruktuuri, anturisolmut ja viestintäprotokollat (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 85). Kyberturvajärjestelmien on oltava riittävän vahvoja estämään mahdolliset hyökkäykset. Mikä tahansa häiriö tietojen käsittelyssä tai lähettämisessä yksi- tai kaksisuuntaiseen viestintään perustuvassa tietojärjestelmässä voi vaarantaa koko järjestelmän turvallisuuden (Limbasiya, T. & Arya, A., 2018, s. 61-64). Hajautettu ohjausjärjestelmä (kuva 32a) on haavoittuvuuksien suhteen alttiimpi kuin keskitetty ohjausjärjestelmä (kuva 32b), koska sillä on useita rajapintoja ulkoisiin tietoverkkoihin (Moradi, M.

& Akbari Foroud, A., 2021, s. 24-25). Hyökkääjän perimmäisenä tavoitteena on joko viedä yksityisiä tietoja tai käynnistää virheellisiä ohjaustoimenpiteitä, mikä häiritsee sähköjärjestelmän asianmukaista toimintaa (Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019, s. 85).



Kuva 32. Hajautetun ja keskitetyn suojausjärjestelmän kommunikaatioperiaate (Gomes, M. ja muut 2019, s. 327-328).

Suojauksen kannalta tietoliikenneverkon toiminta on erittäin tärkeä tilatietojen sekä mahdollisen vian eristämiseksi (Bawayan, H. & Younis, M., 2021). Kuvan 32 a-kohdan hajautetun suojausjärjestelmän mukaisesti rakennetussa verkossa on suojalaitteiden väliseen viestintään paikallisohjaimet (LoC) sekä oma erillinen viestintäjärjestelmä. Keskitetyssä järjestelmässä (kuva 32b) on pääohjainlähteenä toimiva keskusyksikkö (CC), josta yhteydet on toteutettu suojareleille.

Kyberturvallisuus on koko järjestelmää koskeva haaste, joka vaatii kattavan ratkaisun (IEEE Std 1547-2018, s. 112). Tietoliikenneverkon suojaus on sähköverkon ohella suuri haaste, johon liittyy monipuolisia näkemyksiä erilaisten verkko- ja suojausskenaarioiden muodossa. Asiakkaiden ja palvelimien välisen viestiyhteyden suojaaminen salattujen yhteyksien, pääsykoodien ja laitevarmenteiden avulla, voidaan toteuttaa ulkoisia tietoturvaratkaisuja tarjoavien palvelutuottajien avulla (IEEE Std 2030.5-2018, s. 32-59). Hajautettua tuotantoa sisältävän järjestelmän pitää kattaa kyberturvallisuuden lisäksi tietoliikenneyhteydet, tietokannat ja ohjelmistosovellusten väliset rajapinnat (IEEE Std 1547.3-2007, s. 35-36).

Mikroverkon tietoliikennejärjestelmällä tulee olla korkea luotettavuus ja reaaliaikainen suorituskyky, jolloin suunnittelussa tulee ottaa huomioon järjestelmän mittakaava, jännitetaso, mikroverkon tyyppi ja toimintatilat. Viestintätapa tulee valita etäisyyden, rakennuskustannusten ja välitettävien tietojen mukaan käyttäen standardiin IEC 60870-5:2018 perustuvia tiedonsiirtoprotokollia. Suositeltavia tapoja ovat esimerkiksi tapaukset, kun:

1. paikallistasolla käytetään laitteiden omaa viestintäprotokollaa, kuten kuitua tai Ethernetiä
2. suojaustasolla käytetään suuren kapasiteetin omaavaa kommunikaatiotekniikkaa, kuten IEC 61850-9-2 + GOOSE-protokollaa
3. ohjaus- ja valvontatasolla on huomioitava ohjauskohde ja nopeus, johon Ethernet pohjainen ratkaisu sopii
4. laitetoimintojen erityisvaatimukset on tapauskohtaisesti harkittava, kuten vikatilantallenteet, virranlaadun mittaustiedot ja muut vastaavat
 - on harkittava myös, tarvitaanko kommunikaation sallimista taustaverkon kanssa
5. mikroverkon ja ylemmän tason ohjauksen väliseen tiedonsiirtoon käytetään standardien IEC-60870-5-101, IEC-60870-5-101 tai IEC 61850:n vastaavaa osaa (IEEE Std 2030.9-2019, s. 32-33).

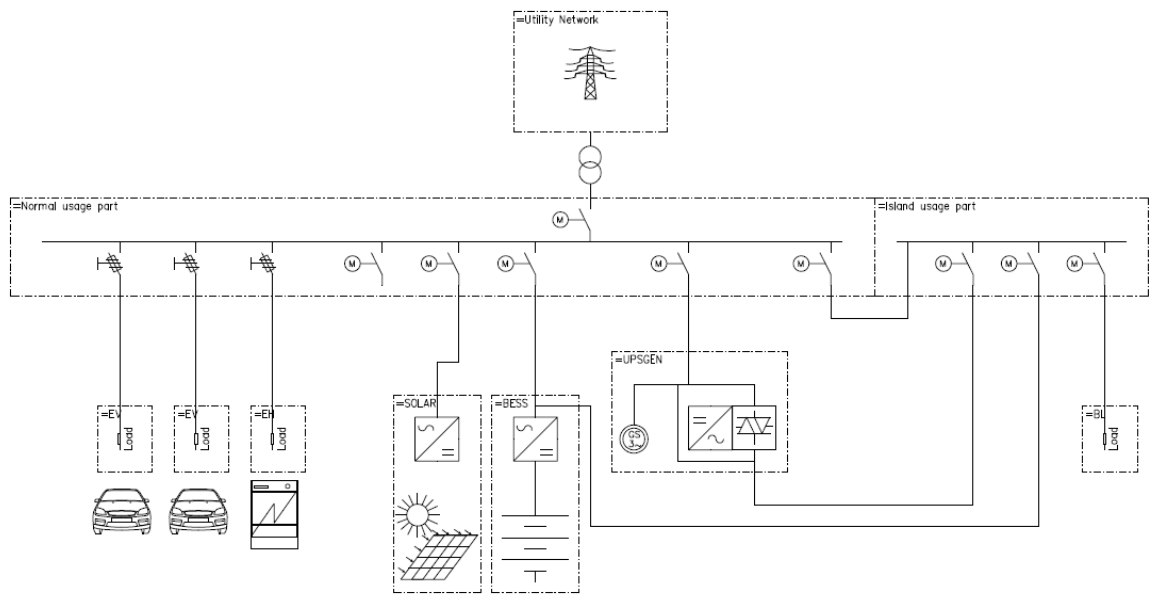
IEC 61850 -standardiin perustuva täysautomaattinen mikroverkkoinfrastruktuuri olisi ihanteellinen ratkaisu mikroverkkojen suojaamiseen, ohjaamiseen ja hallintaan (Usta, O., 2020, s. 654). Ensimmäisestä julkaisustaan lähtien IEC-61850-standardi on kehittynyt jatkuvasti kattamaan uusia näkökohtia tulevaisuuden energiajärjestelmistä, jonka vuoksi on odotettavissa, että IEC-61850 sanelee tavan, jolla tietoa käsitellään ja siirretään tulevissa älyverkkosovelluksissa (Wong, T. Y., Shum, C., Lau, W. H., Chung, S. H., Tsang, K. F. & Tse, C. F., 2016). Suojausjärjestelmän odotetaan havaitsevan, paikantavan ja lieventävän järjestelmän alkavia vikoja laajan tietoliikennejärjestelmän avulla, joka kerää tietoa useista EPS:n antureista, analysoi ne mahdollisen vikatilanteen havaitsemiseksi, luokittelee vian luonteen ja tunnistaa sopiva vianpoistomekanismi (Patnaik, B., Mishra, M., Bansal, R. C. & Jena, R. K., 2020). Kaikki nämä toimet on suoritettava nopeasti, normaalia vianpoistoaikaa lyhyemmällä aikavälillä (Chandra, A. ja muut, 2020).

5 CASE – Oamk:n hybridilaboratorion mikroverkko

Oulun Ammattikorkeakoulu Oy:n toiminnot sosiaali- ja terveystaloon ottamatta ovat muuttaneet Oulun yliopiston kanssa samalle kampusalueelle. Tekniikan yksiköiden laboratoriotiloja on keskitetty energia-, talotekniikan- sekä sähkö- ja automaatiotekniikan osalta yhteisiin hybridilaboratoriotiloihin. Hybridilaboratoriotiloissa on monipuoliset puitteet toteuttaa energianhallinnan opetusta tekniikan alan insinöörikoulutuksessa ja samalla vastata kansallisesti ja osittain kansainvälisesti asetettuihin koulutuspoliittisiin, alueellisiin ja ympäristöllisiin tavoitteisiin. Oamkin hybridilaboratorion älysähköverkon osuuden kehittämiseen on myönnetty EU:n aluekehitysrahaston kautta hankerahoitusta, jossa pyritään löytämään konkreettinen toteutusratkaisu mikroverkon muodossa.

Suojaustarkastelu tehdään Oamk:n hybridilaboratorion älysähköverkon osaan, johon mikroverkkoperiaatteen mukainen koulutusympäristö tullaan toteuttamaan. Älysähköverkko on rakennettu aiemmin ja siihen on valittu suojalaitteet ja asetukset rakentamishetkellä tiedossa olevien lähtötietojen mukaisesti. Mikroverkon kannalta on tarkasteltava ylivirtatilanteet verkkokäyttö- ja saarekekäyttötilanteissa, oikosulkusuojaus, yli- ja alijännitesuojauksen toteutuminen.

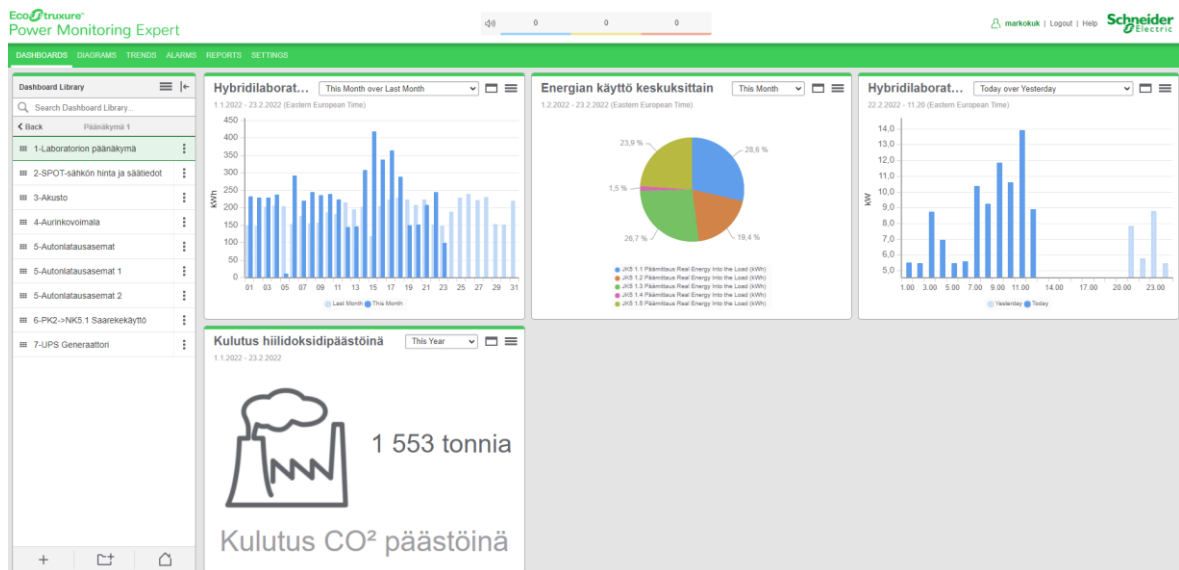
Oamkin hybridilaboratoriotiloissa on käytössä alla olevan periaatekuvan (kuva 33) mukainen opetusta palveleva älysähköverkko, joka muutetaan mikroverkon opetusympäristöksi. Sähköverkko koostuu verkkoliitynnästä sekä aurinkoenergian ja generaattorin muodostamasta tuotantoenergiälähteistä, akkusähkövarastosta sekä verkon kuormituslaitteista. Kuormituslaitteina ovat sähköautojen latauslaitteistot sekä sähkökattila, vesivaraaja ja kiinteistön hybridilaboratoriotilojen muu kuorma, kuten pistorasiat ja valaistus. Energian hallinnan avulla voidaan toteuttaa tehonrajoitusta ja huipputehojen tasausta.



Kuva 33. Oamkin hybridilaboratorion mikroverkon periaate.

Energiatohokkuus, kysyntä- ja kulutusjoustopalvelut, kustannussäästöt ja monipuolistuva sähköenergiatuotanto on avannut tietä mikroverkoille. Mikroverkon suojausten kansallisen ohjeistuksen puuttuessa pitää verkon suojaus tarkastella tapauskohtaisesti. Esimerkkiverkon avulla pyritään selvittämään, kuinka mikroverkon tapauskohtainen suojaustarkastelu toteutetaan, jotta sen käyttö on sähköturvallisuuslain asettaman määräyksen mukainen.

Äly sähköverkolle on ominaista suuri mittausstiheys ja tiedonkeruu. Esimerkkiverkon saarekeosan takana olevien jakokeskusten yksittäistenkin lähtöjen jännite-, virta-, teho- ja energiatiedot mitataan sekä tallennetaan tietokantaan. Tiedon tallennusratkaisuna ja visuaalisena ympäristönä toimii Schneider Electricin toimittama energian hallintaan ja valvontaan soveltuva WEB-selainpohjainen ohjelmisto (PME, Power Monitoring Expert) järjestelmä (kuva 34).



Kuva 34. Oamk:n hybridilaboratorion energian käyttöä voidaan visualisoida Schneider Electricin toimittaman PME-järjestelmän avulla.

PME:stä on saatavilla tietoa monipuolisesti ja sen visuaalista rakennetta pystytään rakentamaan ja esittämään yrityskohtaisesti. Järjestelmän toiminta perustuu monipuoliseen mittaukseen, jossa erilaisten mittauselementtien avulla tieto tallennetaan SQL-tietokantaan reaaliaikaisesti. SQL-tietokantaan kerätty tieto tuodaan järjestelmän avulla näkyväksi esimerkiksi kuvassa 2 näkyvien grafiikoiden muodossa.

5.1 Case -verkko

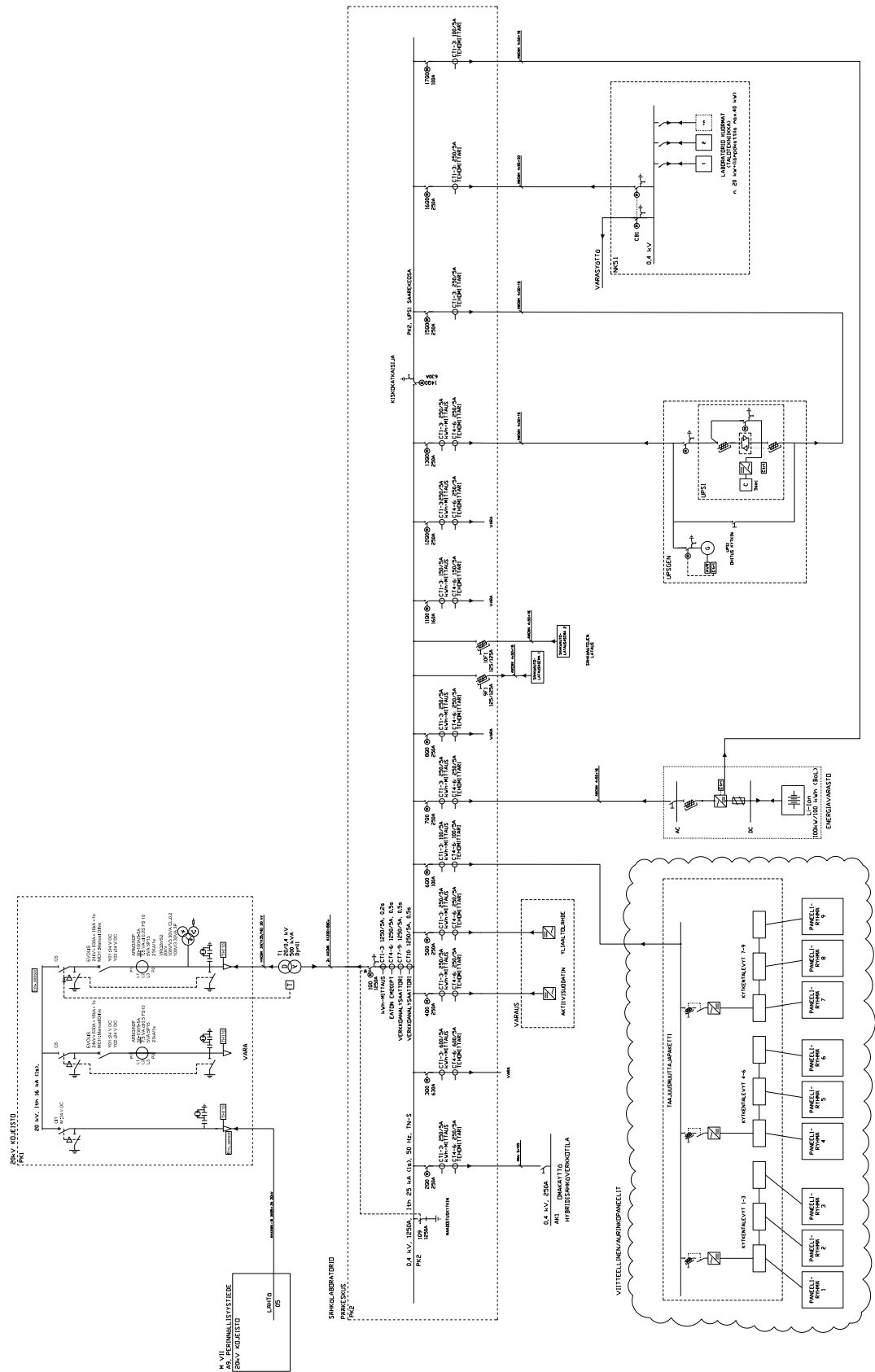
Tarkasteltavan verkon komponentit jakautuvat kuvan 33 mukaisesti tuotanto, kulutus ja varastointiratkaisuihin. Kulutuslaitteistoon liittyviä laitteita ja laitteistojen sisältöä ovat:

- 2 kpl Schneider Electricin EvLink Parking 22 kW 2xT2 latausasemaa
- 1 kpl 1500 l vesivaraaja, sisältäen 18 kW:n sähkövastustehokuormaa
- 1 kpl 36 kW:n sähkökattila laboratorion sisäisen kaukolämpöverkon veden lämmitykseen
- 1 kpl nousukeskus ja 5 kpl jakokeskuksia, joissa on hyödynnettävissä kuormanohjauksia
- valaistusta (noin 10 kW) ohjataan osittain Ledvancen Encelium -järjestelmän avulla.

Tuotantoratkaisuiksi kuuluvat:

- hybridilaboratoriota syöttävä kampuksen verkko, joka on yhteydessä julkiseen 20 kV:n jakeluverkkoon, mikroverkkoon sisältyy Oamkin 20 kV:n kojeisto sekä 500 kVA:n jakelumuuntaja
- 35 kWp:n aurinkoenergialaitteisto, aurinkopaneeleita 100 kpl, 4 kpl Hoymiles 1200 mikroinvertteriä sekä 4 kpl SunnyPowerin kolmivaiheinvertteriä 15 kW, 10 kW, 3 kW ja 3 kW
- Eaton Oy:n valmistama 50 kVA:n UPSG-laitteisto, joka toimii myös varateholaitteistona.

Oamk:n älysähköverkon jakelukaavio on kuvassa 35, jossa 20 kV:n keskijännitesyöttö tulee hybridilaboratorion läheisyydessä olevalle 20 kV:n kojeistolle ja edelleen jakelumuuntajalle. Jakelumuuntajalta sähköenergia saadaan pienjännitetasossa hybridilaboratoriota palvelevalle sähköpääkeskukselle PK2. Pääkeskus on tämän tapauksen keskeinen laitteisto-osa, jossa verkon suojalaitteet sijaitsevat. Muut verkkoon liittyvät laitteet ovat pääkeskuksen välittömässä läheisyydessä, poislukien aurinkosähköjärjestelmä, jonka invertterit sijaitsevat 4.kerroksen IV-konehuoneessa.



Kuva 35. Oamkin älysähköverkon jakelukaavio.

5.2 Case -verkon laitteet

Tämän luvun yhteydessä esitetään Oamk:n hybridilaboratorion älysäähköverkon mikroverkototeutukseen liittyvät laitteet sekä niissä olevat tiedossa olevat asetteluarvot. Verkon suojaus on toteutettu taulukon 7 mukaisesti nousujohtolähdöillä sekä ryhmäjohtolähdöillä joko moottoriohjatuilla katkaisijoilla, johdonsuojakatkaisijoilla tai sulakkeilla. Moottoriohjattuja katkaisijoita on erityyppisiä ja eri nimellisarvoilla olevia, joiden suojausasettelut ovat aseteltavissa katkaisijan suojaarelelle. Taulukossa 7 on mainittu sijainti, suojalaite, tyyppi, katkaisijan suojaarele, käyttö sekä liitetyt kaapelit.

Taulukko 7. Oamk hybridilaboratorion pääkeskuksen PK2 suojalaitteet.

	Sijainti		Suojalaite	Tyyppi	Suojaarele	HUOM	Kaapeli	
	Keskus	Taranne						
Normaalikäyttö	PK2	1Q0	Ilmakatkaisija	Masterpact MTZ2 1250A, Type H3 42kA	Micrologic 5.0X	Syöttö jakelumuntajalta	2 x AXCMK 4x300+88Cu	
	PK2	2Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D	Omakäyttö	MMJ 5x10S	
	PK2	3Q0	Kompaktikatkaisija	NSX630F 3P	MicroLogic 5.3 E 3P3P, 630A			
	PK2	4Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D	(Varaus aktiivisuodattimelle)		
	PK2	5Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D			
	PK2	6Q0	Kompaktikatkaisija	NSX100B 3P	Micrologic 5.2 E 100A 3P3D	Aurinkosähköjärjestelmä	AMCMK 4x50+16	
	PK2	7Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D	Energiavarasto	AMCMK 4x50+16	
	PK2	8Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D			
	PK2	9F1	Kahvasulake	125/125		Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	
	PK2	10F1	Kahvasulake	125/125		Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	
	PK2	11Q0	Kompaktikatkaisija	NSX160B 3P	Micrologic 5.2 E 160A 3P3D			
	PK2	12Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D			
	PK2	13Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D	UPSGEN lähtö	AMCMK 4x50+16Cu	
	PK2	14Q0	Ilmakatkaisija	Masterpact MTZ1 4P, 630A	Micrologic 5.0X			
	PK2	26F1	Kahvasulake	25/63		Kiskokatkaisija		
	PK2	27F1	Kahvasulake	35/63		Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	
	PK2	28F1	Kahvasulake	/63		Sähkökattila	MMJ 5x16S	
	PK2	29F1	Kahvasulake	40/63				
	PK2	30F1	Johdonsuojakatkaisija	C16		Keskuksen omakäytön etukoje		
	PK2	31F2	Johdonsuojakatkaisija	C16		Pistorasia keskuksen kannessa		
	PK2	32F3	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	33F4	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	34F5	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	35F6	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	36F7	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	37F8	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	38F9	Johdonsuojakatkaisija	C16				
	PK2	39F1	Johdonsuojakatkaisija	C2		Verkonvalvontarele		
	PK2	40F1	Kahvasulake	25/63		Apusähkön etukoje (varatila)		
	Saarekekäyttö	PK2	15Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D	UPSGEN tulo	AMCMK 4x50+16Cu
		PK2	16Q0	Kompaktikatkaisija	NSX250B 3P	Micrologic 5.2 E 250A 3P3D	SÄHKÖLABORATORIO NK5.1	AMCMK 4x95+50Cu
		PK2	17Q0	Kompaktikatkaisija	NSX100B 3P	Micrologic 5.2 E 100A 3P3D	Energiavaraston saarekekäyttö	AMCMK 4x50+16Cu
PK2		18F1	Kahvasulake	25/63		Apusähkön etukoje (käyttötila)		
PK2		19F1	Johdonsuojakatkaisija	C16				
PK2		20F2	Johdonsuojakatkaisija	C16				
PK2		21F3	Johdonsuojakatkaisija	C10		Katkaisijat + moottorit		
PK2		22F4	Johdonsuojakatkaisija	C2		Tehomittarit		
PK2		23F5	Johdonsuojakatkaisija	C2		Katk. väylälait. + rele ja väylälaitteet		
PK2		24F6	Johdonsuojakatkaisija	C2		Verkonvalvontarele		
PK2	25F7	Johdonsuojakatkaisija	C2		Poweritag keskitin			

Tämän työn suojaustarkastelussa huomioidaan mikroverkon käytön kannalta olennaiset asetelut (taulukko 8) ja näihin sisältyvät pienjännitepuolen katkaisijoista syötön pääkatkaisija 1Q0, aurinkosähköjärjestelmän katkaisija 6Q0, energiavaraston katkaisijat 7Q0 ja 17Q0, UPS-generaattorin katkaisijat 13Q0 ja 15Q0, nousukeskuslähtö 16Q0. Lisäksi tarkastelu tehdään sulakesuojauksen perässä kuormina toimiville sähköautonlatauspaikoille 9F1 ja 9F2, sähkökattilalle 27F1.

Kuvassa 36 on esitetty jakelumuuntajan tyyppikilven avulla tekniset arvot. Teknisiä arvoja hyödynnetään laskelmien lähtöarvoina, muiden tietojen lisäksi. Muuntajan suojaus tarkastellaan ylivirtasuojauksen näkökulmasta.

Malli		Vuosi		kVA		Jäähd.		kVA	
ED3R24		2020		500		AN			
N°		Kytäk		Po		Sydän		kg	
16759.1		Dyn11		0,78		C.R.G.O.		1080	
Asennus		Hz		Pk		Käämi		kg	
Indoor		50		6,22		AI/AI		260	
Lämpötila lk.		Vaihe		Uk		Kok. paino		kg	
F/F		3		6,4		1680			
Käyttö		Ref. Lämp.				IP			
Distribution		120 °C				00			

	Jännite [kV]	Virta [A]	Teho [kVA]	Kytäk.	Jännite. lk
Ensiö 1	20,0	14,4	500	D	24/50/125
Ensiö 2					
Ensiö 3					
Toisio 1	0,4	721,7	500	lyn	1,1/3
Toisio 2					
Toisio 3					
Toisio 4					

VÄLIOTOT	
+++	
++	5-6
+	4-5
0	3-4
-	2-3
--	1-2

Step ±2x2,5%

Kuva 36. Oamk:n hybridisähkölaboratorion jakelumuuntajan tyyppikilpi.

Muuntaja on sähköaseman kallein yksittäinen komponentti, jonka vahingoittuminen voi johtaa pidempään käyttökeskeytykseen pitkien toimitusaikojen vuoksi. Muuntajan suojaus on toteutettu vain ylivirtasuojalla, jossa suojareleelle virtatieto tuodaan 50/5 A:n virtamuuntajalta. Älynsähköverkon rakentamisen yhteydessä releelle tallennetut asettelut ovat hidastetulle laukaisulle $I > 150 \text{ A}$, $3xI_n$ ja $t > 0,3 \text{ s}$, sekä pikalaukaisulle $I >> 360 \text{ A}$, $7,2xI_n$ ja $t >> 0,1 \text{ s}$. Suojareleen kolmatta laukaisuporrasta ei ole otettu käyttöön. Tarkasteltavan kohteen suojausasetteluarvot on kirjattu taulukkoon 8.

Taulukko 8. Oamk:n hybridilaboratorion äly sähköverkon releiden suoja-asettelut.

Lähtötunnus	Käyttökohde	Jännite	Huom!	Suojareleiden asetteluarvot								
				I>			I>>			I>>>		
				A	s	$x I_n$	A	s	$x I_n$	A	s	$x I_n$
1Q0	Syöttö jakelumuuntajalta	400 V		687	6	0,55	2541	0,3	3,7	6250	0	5
2Q0	Omakäyttö	400 V		250	0,5	1	375	0	1,5	3000	0	12
6Q0	Aurinkosähköjärjestelmä	400 V		100	0,5	1	150	0	1,5	1500	0	15
7Q0	Energiavarasto	400 V		100	0,5	0,4	250	0,2	2,5	1250	0	5
13Q0	UPSGEN lähtö	400 V		200	0,5	0,8	800	0,2	4	1200	0	4,8
15Q0	UPSGEN tulo	400 V		100	0,5	0,75	150	0,3	1,5	1200	0	5
16Q0	SÄHKÖLABORATORIO NKS.1	400 V		200	0,5	0,8	800	0,2	4	1200	0	5
17Q0	Energiavaraston saarekekäyttö	400 V		75	0,5	0,4	100	0,2	2,5	600	0	6
J05	KJ-syöttö (Muuntamolta MVII)	20 kV	Virtamuuntaja 200/1 A	210	0,45	1,05	650	0,25	3,25	-	-	-
J03	Schneider Electric SM6, Muuntajalähtö J03	20 kV	Virtamuuntaja 50/5A	150	0,3	3	360	0,1	7,2	-	-	-

Pienjänniteverkon kompaktikatkaisijoiden Micrologic 5.2E mallin mukaisen suojareleiden asettelu ei mahdollista kaksia asetteluarvoja (Schneider 2022a), joiden avulla huomioitaisiin verkon käyttötilanteen muuttuminen. Ilmatkaisijan suojareleeseen Micrologic 5.0X on mahdollista toteuttaa myös toiset asettelut (Schneider 2022b) saarekekäyttötilannetta ajatellen. Mikroverkon käytössä pääsyttökaapeleiden tiedot ja ominaisarvot laskelmien toteuttamiseksi on esitetty taulukossa 9.

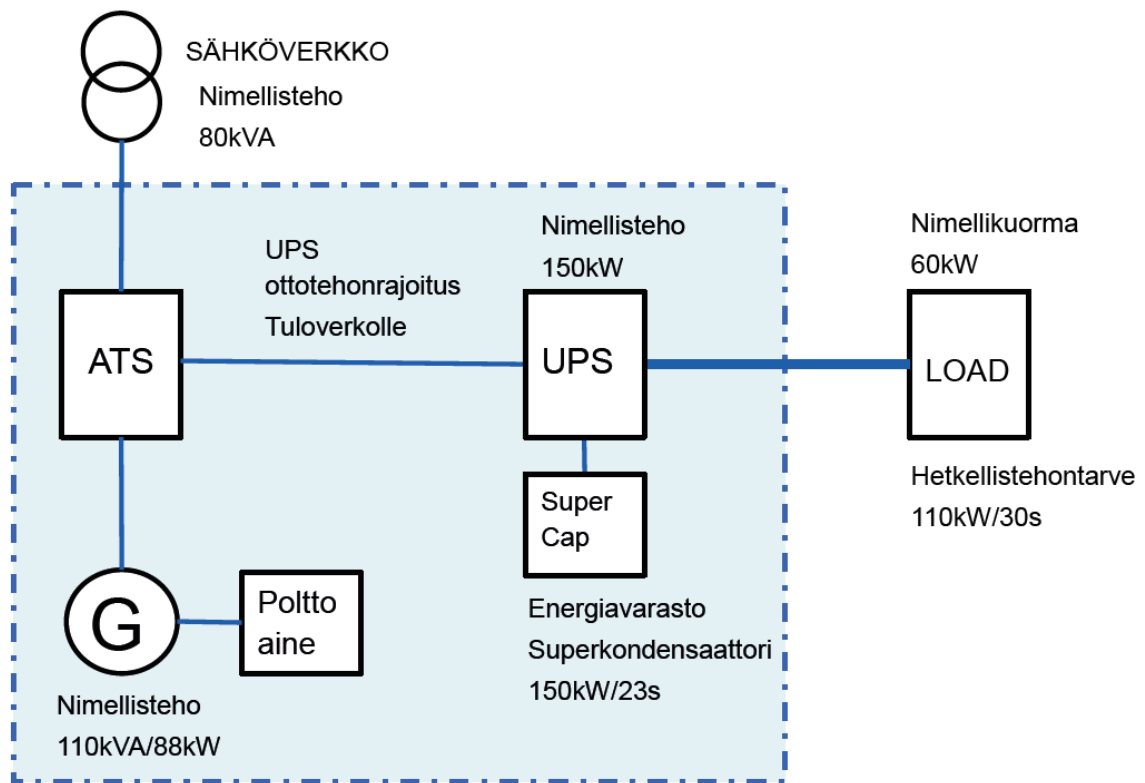
Taulukko 9. Oamk:n hybridilaboratorion mikroverkkoalueen kaapelit ja ominaistiedot suojaustarkastelua varten (Prysmian 2022a, s. 33; 80; 83; 99; 111).

Kohde	Tyyppi	I_r				I_{rMAX15}	I_{rMAX15}	R_{vj} (20 °C)	R_{vj} (70 °C)	R_{PE} (20 °C)	L/vaihe	$C_{käyttö}$
		Uppoas. (A)	Pinta-as. (C)	Maassa (D)	Ilmassa (E)	Vaihejohdin	PE-johdin	[Ω/km]	[Ω/km]	[Ω/km]	[mH/km]	[μF/km]
		[A]	[A]	[A]	[A]	[kA]	[kA]					
Syöttö jakelumuuntajalta	2 x AXCMK 4x300+88Cu	-	-	430	396	28,2 ¹⁾	12,8 ¹⁾	0,1	0,13	0,206	0,25	0,55
Aurinkosähköjärjestelmä	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
Energiavarasto	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
UPSGEN lähtö	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	41	60	-	-	-	-	1,83	2,244	-	0,094 ²⁾	-
Sähkökattilla	MMJ 5x16S	55	80	-	-	-	-	1,15	1,415	-	0,090 ²⁾	-
UPSGEN tulo	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
SÄHKÖLABORATORIO NKS.1	AMCMK 4x95+50Cu	-	-	220	194	7,2	4,6	0,32	0,39	0,641	0,26	0,65
Energiavaraston saarekekäyttö	AMCMK 4x50+16Cu	-	-	150	124	3,8	2,6	0,641	0,77	1,15	0,27	0,5
20 kV KJ-kaapeli	AHXAMK-W 3x95+35	-	-	235	230	8,9	-	0,32	0,41	-	0,4	0,22
20 kV KJ-kojeisto-Muuntaja	HXCMK 3x(1x35/16)	-	-	195	180	5,0	-	0,524	0,69	-	0,64	0,16

HUOM!
1) yhden johtimen arvo
2) ilmoitettu arvo mΩ/km

Mikroverkon kaapelipituudet ovat esimerkkiverkossa lyhyitä (alle 50 metriä), joten jännitteenalenuma pysyy standardissa ilmoitettujen suositeltujen maksimiarvojen alapuolella, eikä täten kyseisen verkon osalta aiheuta suojaustasoon alenemasta johtuvaa korjattavaa. Ylivirran vaikutukset ja transienttijännitteet ovat tutkittavan verkon kannalta oleellimmat suojauslähtökohdat myös kaapeleiden normaalin käyttöön saavuttamiseksi.

Saarekekäytön kannalta Eatonin UPSG-konttiratkaisu toimii kuvan 37 periaatekuvan mukaisesti.



Kuva 37. UPSG-laitteiston esimerkkikokoonpano (Eaton 2022a).

Verkkoon on tulossa lisäksi Schneider Electric Oy:n toimittama aktiivisuodatin tyyppiä PCSN060Y4CH00. Aktiivisuodattimen avulla voidaan poistaa haitalliset symmetriset ja epäsymmetriset harmoniset virrat ja jännitteet. Aktiivisuodatin sijoitetaan pääkeskuksen PK2 verkkosyöttöosaan (kuva 35), joten saarekekäytössä sen hyödyntäminen ei onnistu.

5.3 Case -verkon suojauslaskelmat

Ylivirtatilanteiden haitallisten vaikutusten ilmiöt pyritään estämään pitämällä kuormitusvirrat virtateiden sallittujen kestorajojen alapuolella sekä mahdolliset oikosulkukestot mahdollisimman lyhyinä. Aluksi tarkastellaan verkon tilannetta kuormitusten kannalta.

Syöttökaapeli on asennettu muuntajalta pääkeskukselle PK2 kaapelihyllylle, joka vastaa SFS 6000 standardin mukaista, ilmaan asennettavan johdon asennustapaa E. Valmistajan ilmoittama kuormitusvirta yhden kaapelin tapauksessa on maksimissaan $I_Z = 396$ A ilmaan asennettaessa + 70 °C lämpötilassa (Prysmian 2022a, s. 83). Standardissa ilmoitettu vastaavan poikkipinnan omaavalle kaapelille on kyseisellä asennustavalla 381 A (SFS 6000-5-52:

2017, s. 47). Syöttö on toteutettu kahdella rinnakkaisella 300 mm² alumiinikaapelilla, jolloin lisäehtojen mukaan voidaan käyttää johtojen kuormitettavuuden summaa (SFS 6000-4-43:2017, s. 10). Kaapelit sijaitsevat tikashyllyllä vierekkäin ja hybridilaboratoriossa kulkiesaan ovat samalla hyllyllä myös kolmen muun kaapelin kanssa, jolloin asennustavasta ja olosuhteista aiheutuva tasauskerroin saadaan SFS 6000-5-52:2017 taulukon B.52.17 mukaisesti $k_1 = 0,8$. Johtimen kuormitusvirran ja tasauskerroimen avulla voidaan laskea lopullinen kuormitettavuus:

$$I_{rMAX} = k_{RIN} * I_Z * k_1 = 2 * 396 A * 0,8 = 634 A$$

Kaikkien mikroverkon kaapeleiden kuormituskestoisuus tarkastellaan saman periaatteen mukaisesti pienjänniteverkon osalta. Tulokset koottu taulukkoon 10, josta on havaittavissa myös suojalaitteiden sallima kuormitettavuus, jota verrataan suurimpaan sallittuun kuormitettavuusarvoon esimerkiksi aurinkosähköjärjestelmän tapauksessa:

$$I_{rMAX} \geq I_{sall} = 124 A \geq 100 A$$

Taulukko 10. Kuormitettavuuden laskentaparametrit ja tulokset.

Kohde	Tyyppi	Yhden johtimen sallittu	Rinnanky-	Olosuhde-	Suurin sallittu	Suojalaitteen	Aika
		kuormitettavuus CASE-verkossa	kentäkerroin	kerroin	kuormitettavuus	sallima kuormitettavuus	
		[A]	k_{RIN}	k_1	[A]	[A]	[s]
Syöttö jakelumuuntajalta	2 x AXCMK 4x300+88Cu	396	2	0,8	633,6	687	6
Aurinkosähköjärjestelmä	AMCMK 4x50+16Cu	124	1	1	124	100	0,5
Energiavarasto	AMCMK 4x50+16Cu	124	1	0,8	99,2	100	0,5
Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	150	1	0,75	112,5	138	
Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	150	1	0,75	112,5	138	
UPSGEN lähtö	AMCMK 4x50+16Cu	124	1	0,8	99,2	200	0,5
Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	60	1	0,8	48	28	
Sähkökattila	MMJ 5x16S	80	1	0,75	60	39	
UPSGEN tulo	AMCMK 4x50+16Cu	124	1	0,8	99,2	100	0,5
SÄHKÖLABORATORIO NK5.1	AMCMK 4x95+50Cu	194	1	0,75	145,5	200	0,5
Energiavaraston saarekekäyttö	AMCMK 4x50+16Cu	124	1	0,8	99,2	75	0,5
20 kV KJ-kaapeli	AHXAMK-W 3x95+35	230			230	210	0,45
20 kV KJ-kojeisto-Muuntaja	HXCMK 3x(1x35/16)	180			180	150	0,3

Taulukossa on sulakkeiden osalta huomioitu sulakkeen ylempään sulamisrajakäyrän mukainen varmuuskerroin kaavan 3 mukaisesti. Kaapelin ja johdon termisen suojauksen toteuttamiseksi on huomioitu asennustapa sekä asennusolosuhteet. Taulukossa on punaisella korostettu suojalaitteen sallima kuormitusvirta-arvo, joka ylittää suurimman sallitun kuormitettavuuden ja voi aiheuttaa kaapelin liiallisen lämpenemisen.

Sähköenergiaa tuottavat laitteistot sisältävät omat ylikuormitussuojaukset, jolla pyritään suojaamaan laitteistoa itseään. Esimerkiksi Eatonin tapauksessa ylikuormitusta sallitaan 10 minuutin ajan 102 – 110 %:n ylityksen energiavarastolle määritellystä nimelliskuormasta (Eaton 2022a). UPS:n ylikuormitussuojaus on toteutettu generaattoripuolen suojareleen virtamittauksen ohjaaman katkaisijan avulla (Agco 2022a).

Oikosulkulaskelmissa tarkastellaan oikosulkukestoisuutta sekä suojauksen poiskytkentäaikoja. Lähtötietoina on keskijännitepuolelta minimi- ja maksimioikosulkutehot sekä jännite. Laskentamenetelmänä käytettiin Theveninin menetelmää liitteen 1 mukaisesti. Verkon lähtötiedot ja muuntajan mittausdokumentin arvoista on koottu tiedot taulukkoon 11.

Taulukko 11. Lähtötietotaulukko.

Lähtötietoja					
Taustaverkko			DYN11-kytketyn muuntajan tiedot:		
Suure	Määrä	Yksikkö	Suure	Määrä	Yksikkö
S_{kMAX}	355	MVA	S_n	500	kVA
S_{kMIN}	156	MVA	U_{n1}	20,0	kV
U_{k20}	20,5	kV	U_{n2}	0,40	kV
			$I_{0\%}$	0,29	%
IEC61909 mukaiset jännitekertoimet			Z_k	6,40	%
c_1	1,10		Z_0	7,68	%
c_2	1,00		P_k	6104,0	W
c_3	0,95		P_0	889,45	W

Taulukossa 11 muuntajan suhteellisen tyhjäkäyntiimpedanssin z_0 arvo on laskettu periaatteella, jossa Dyn-kytkentäisen muuntajan impedanssi z_0 on noin 1,2-kertainen kuormitusimpedanssiin z_k nähden (ABB TTT, 2000, Luku 11, s. 5). Äly sähköverkon kaapeleiden pituuksien mukaiset resistanssi, reaktanssi ja impedanssiarvot ovat laskettu ja luetteloitu taulukossa 12. Lähtötietojen sekä edellä mainittujen kaapeleiden ja suojareleiden (taulukko 8) tietojen avulla toteutetaan ensiksi oikosulkulaskelmat ja lopuksi oikosulkutarkastelu laskettujen arvojen sekä oikosulkukestoisuuksia vertailemalla.

Taulukko 12. Oamk:n mikroverkon runkokaapeleiden laskennallisia arvoja.

Kohde	Tyyppi	Pituus	Resistanssi	Reaktanssi	Impedanssi
		<i>l</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>Z</i>
		[m]	[mΩ]	[mΩ]	[mΩ]
Syöttö jakelumuuntajalta	2 x AXCMK 4x300+88Cu	25	1,625	0,98	1,90
Aurinkosähköjärjestelmä	AMCMK 4x50+16Cu	55	42,35	4,67	42,61
Energiavarasto	AMCMK 4x50+16Cu	10	7,7	0,85	7,75
Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	15	11,55	1,27	11,62
Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	20	15,4	1,70	15,49
UPSGEN lähtö	AMCMK 4x50+16Cu	15	11,55	1,27	11,62
Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	10	22,44	0,00	22,44
Sähkökattila	MMJ 5x16S	30	42,45	0,00	42,45
UPSGEN tulo	AMCMK 4x50+16Cu	15	11,55	1,27	11,62
SÄHKÖLABORATORIO NK5.1	AMCMK 4x95+50Cu	30	11,7	2,45	11,95
Energiavaraston saarekekäyttö	AMCMK 4x50+16Cu	10	7,7	0,85	7,75
20 kV KJ-kaapeli	AHXAMK-W 3x95+35	200	82	25,13	85,77
20 kV KJ-kojeisto-Muuntaja	HXCMK 3x(1x35/16)	5	3,45	1,01	3,59

Oikosulkuvirran määrittämiseksi oli selvillä edeltävän verkon minimi ja maksimi oikosulkutehot, joiden avulla pystyttiin määrittämään edeltävän verkon impedanssi. Impedanssi määritettiin käyttäen kaavaa 6 (Huotari, K. & Partanen, J., 1998, s. 11).

$$Z_k = \frac{c \cdot U_k^2}{S_k} \quad (6)$$

jossa

Z_k = laskettava impedanssi (Ω)

U_k = vian aikainen vikapaikan jännite (V)

S_k = oikosulkuteho (VA)

c = IEC60909:n mukainen jännitteestä riippuva kerroin.

Kaapelien sisältämien impedanssien tulokset on laskettu oikosulkulämpötilan mukaisista arvoista, käyttäen valmistajan teknisestä taulukosta otettuja ominaisarvoja. Muuntajan impedanssi saadaan laskettua suhteellisen oikosulkuimpedanssin avulla kaavalla 7 (Huotari, K. & Partanen, J., 1998, s. 18).

$$Z_T = \frac{z_k}{100} * \frac{U_n^2}{S_n} \quad (7)$$

jossa

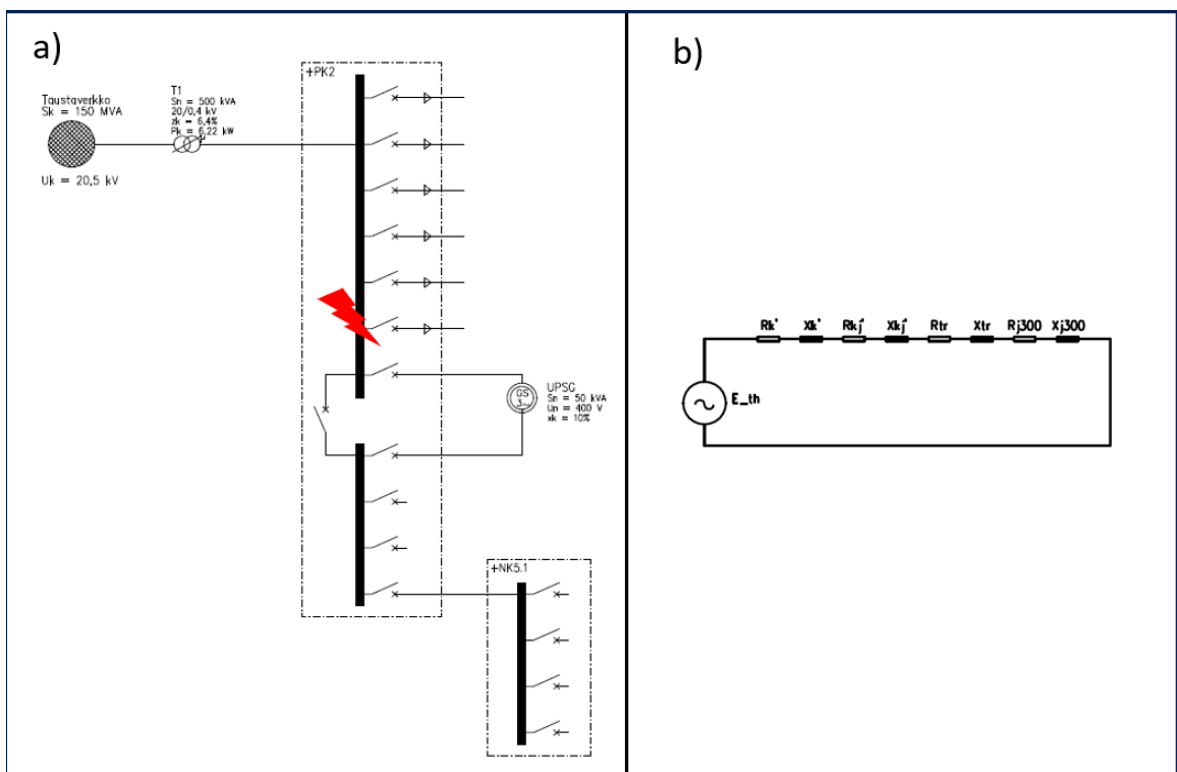
Z_T = muuntajan laskettava impedanssi (Ω)

z_k = muuntajan suhteellinen oikosulkuimpedanssi (%)

U_n = muuntajan nimellisjännite (V)

S_n = muuntajan nimellisteho (VA).

Kun verkkoa vastaavien komponenttien impedanssiarvot saatiin laskettua, verkon muodon mukaisesta tilanteesta luotiin yksivaiheinen sijaiskytkentä, kuten esimerkiksi kuvassa 38. Sijaiskytkennän avulla saadaan vikavirtapiiristä kuvattua selkeä ja yksinkertainen malli, joka auttaa hahmottamaan verkon rakennetta.



Kuva 38. Esimerkkiverkon yksivaiheisen sijaiskytkennän muodostaminen. Verkon a) PK2:n kiskon vika kuvattuna yksivaiheisena sijaiskytkentänä b) vikatilanteessa.

Kuvan 38 a) mukaisessa tilanteessa vika tapahtuu verkonsyöttötilanteessa pääkeskuksella PK2. Niistä muodostetaan yksivaiheinen sijaiskytkentä, kuvaten verkkoon kytkeytyneet komponentit, jotka vaikuttavat oikosulkuvirran arvoon. Sijaiskytkennän komponenttien arvojen redusointitoimenpiteellä muutetaan eri jänniteportaassa olevat arvot tarkasteltavaan jännitetasoon. Kolmevaiheisen vian oikosulkuvirta on laskettu kaavalla 8 (ABB TTT, 2000, Luku 7, s. 2).

$$I_{k3v} = \frac{c \cdot U_k}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (8)$$

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran avulla on laskettu kaksivaiheinen oikosulkuvirta käyttäen kaavaa 9 (Huotari, K. & Partanen, J., 1998, s. 11).

$$I_{k2v} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3v} \quad (9)$$

Suojauksen kannalta maksimioikosulkuvirta-arvoa tarvitaan laitteiden virtakestoisuuden määrittämiseksi. Vastaavasti minimioikosulkuvirta on tiedettävä, jotta voidaan määrittää poiskytkentäaika. Taulukossa 13 on ilmoitettu mikroverkon runkokaapeleiden alkupään maksimioikosulkuvirta sekä kahdessa viimeisessä sarakkeessa kaapeleiden loppupään mini- ja maksimioikosulkuvirrat suojaustarkastelua varten. Laskettuja arvoja verrataan kaapelien oikosulkukestoisuuksiin (taulukko 9) sekä suojalaitteiden oikosulkua vastaan tehtyihin taulukon 8 mukaisiin ylivirtasuojausasetuksiin.

Taulukko 13. Oikosulkuvirtojen laskenta-arvoja kaksi- ja kolmivaiheisessa viassa.

Kohde	Tyyppi	$I_{kMAX 1s}$	I_t	I_{k3-MAX}	I_{k3-MAX}	I_{k3-MIN}	I_{k2-MAX}	I_{k2-MIN}
		Vaihejohdin		alkupää	loppupää			
		[kA]		[kA]	[kA]	[kA]	[kA]	[kA]
Syöttö jakelumuuntajalta	2 x AXCMK 4x300+88Cu	56,4	89,2	11,39	10,99	10,18	9,52	8,81
Aurinkosähköjärjestelmä	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	11,5	10,91	3,69	3,48	3,20	3,01
Energiavarasto	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	6,9	10,91	7,68	7,16	6,65	6,20
Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	-	10,91	7,31	6,83	6,33	5,91
Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	-	10,91	6,53	6,11	5,65	5,29
UPSGEN lähtö	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	6,9	10,91	6,82	6,38	5,91	5,52
Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	-	-	10,91	4,47	4,20	3,87	3,64
Sähkökattila	MMJ 5x16S	-	-	10,91	2,48	2,34	2,14	2,20
UPSGEN tulo	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	6,0	0,170	0,168	0,160	0,146	0,139
SÄHKÖLABORATORIO NK5.1	2 x AMCMK 4x95+50Cu	7,2	13,1	10,91	8,62	8,02	7,46	6,95
Energiavaraston saarekekäyttö	AMCMK 4x50+16Cu	3,8	6,9	0,144	0,143	0,136	0,124	0,117
20 kV KJ-kaapeli	AHXAMK-W 3x95+35	8,9	15,0	10,00	9,38	4,26	8,66	3,81
20 kV KJ-kojeisto-Muuntaja	HXCMK 3x(1x35/16)	5,0	11,2	9,38	9,36	4,25	8,10	3,68

Kaapeleiden oikosulkukestoisuuden määrittämiseksi laskettiin virta I_t yhden sekunnin kestoisuuden mukaan (kaavalla 5) suojareleen asettelun sallima aika huomioiden lisäksi valokaaren sammumiseen kuluva aika 100 ms. Taulukon 13 I_t sarakkeen pitää olla suurempi kuin sallitun 1 sekunnin oikosulkuvirran arvon $I_{kMAX 1s}$ edellisessä sarakkeessa, eli:

$$I_{kMAX 1s} < I_t$$

Sulakkeilla suojattujen lähtöjen tarkastelu tehdään liitteessä 3 olevien sulakkeiden virranrajoitusominaisuuksien vertailujen avulla. Esimerkiksi sähköautonlataus 2:n tilanteessa on minimioikosulkuvirta noin 5 kA, joka sulakkeen käyrästäön mukaan toimii alle 100 ms:ssa.

Myös tarkastelemalla saman liitteen (liite 4 taulukko 1) yhden (1 s) sekunnin arvoa, nähdään tarkasteltavan 125 A:n kahvasulakkeen toimivan noin 0,75 kA:n virralla, joka riittää hyvin virtapiirin katkaisemiseksi riittävän nopeasti. Liitteen 4 taulukosta 2 nähdään saman 125 A:n kahvasulakkeen rajoittavan maksimivirran noin 8,0 kA:iin.

UPSG ja energiavarasto sisältävät tehoelektroniikkaa, joiden tuottama oikosulkuvirta on rajoitettua. Energiavaraston tuottama oikosulkuvirta on vain 144 A 300 ms:n ajan (Eaton 2022b). UPSG:ssä on neljä tyypillistä ajotilannetta, jolloin oikosulkuvirta vaihtelee ja nämä tilanteet ovat:

1. Verkkokäyttötilanteessa teho kulkee normaalisti UPS:n läpi alapuoliseen verkkoon, jolloin syöttävän verkon oikosulkuvirta vaikuttaa alapuoliseen verkkoon.
2. Yhteys julkiseen verkkoon on poikki ja syöttävä verkko on alhaalla, teho tuotetaan UPS:n ja superkondensaattoreiden avulla alapuoliseen verkkoon katkottomasti, tällöin vaikuttaa UPS invertterin maksimioikosulkuvirta 170A/ 400ms.
3. Jatkumoa edelliseen, mikäli kondensaattorit purkautuvat ja generaattori käynnistetään jatkamaan varakäyntiaikaa, jolloin alapuoliseen verkkoon vaikuttaa myös UPS invertterin maksimioikosulkuvirta 170A/400ms, koska teho ajetaan invertterin läpi.
4. Mikäli UPS on huollossa ja ohitus on kiinni, generaattori käynnistyy normaalisti omalla käynnistysajallaan tuloverkon katketessa, silloin oikosulkuvikatilanteessa alapuoliseen verkkoon vaikuttaa generaattorin noin 280A:n vakiintunut oikosulkuvirta. (Räty, M., 2021).

UPSG:n kohdalla 170A:n suuruinen ja 400ms:n kestoinen oikosulkuvirta on pienin arvo, joka laitteiston läpi tulee ja se on huomioitu laskelmissa.

Yksivaiheiset ja kaksivaiheiset viat ovat ns. epäsymmetrisiä vikoja, joita kuvataan komponenttiverkkojen avulla. Yksivaiheinen oikosulkuvirta lasketaan kaavan 10 mukaan (ABB TTT, 2000, Luku 7, s. 3).

$$\underline{I}_{k1} = \frac{\sqrt{3} * c * \underline{U}_{kN}}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_0} \quad (10)$$

jossa

\underline{I}_{k1} = yksivaiheinen oikosulkuvirta (A)

c = IEC60909:n mukainen jännitteestä riippuva kerroin

\underline{U}_{kN} = nimellispääjännite (V)

\underline{Z}_1 = oikosulkupiirin myötäimpedanssi (Ω)

\underline{Z}_2 = oikosulkupiirin vastaimpedanssi (Ω)

\underline{Z}_0 = oikosulkupiirin nollaimpedanssi (Ω)

Yksivaiheisesta oikosulusta muodostetaan esimerkiksi liitteen 2 kuvan 1 mukainen komponenttiverkko, jossa kuvataan myötä-vasta- ja nollaverkko. Komponenttiverkossa myötä- ja vastaverkko kytkeytyvät samalla tavalla, mutta nollaverkon kytkeytyminen johtuu muuntajan kytkentäryhmästä (ABB TTT, 2000, Luku 7, s. 2). Kyseessä on Dyn-kytkentäinen muuntaja, jonka tähtipiste on maadoitettu, tällöin vikapiirin impedanssi vaikuttaa virran paluujohdinten lisäksi muuntajan nollaimpedanssi. Muuntajan nolaresistanssin ja -reaktanssin laskennassa on käytetty oletusta, jonka mukaan suhteellinen nollaimpedanssi jakautuu resistanssiksi ja reaktanssiksi samassa suhteessa kuin suhteellinen oikosulkuimpedanssi.

Yksivaiheisen oikosulkuvirran laskemisessa voidaan käyttää myös kolmivaiheisen oikosulkuvirran mukaista kaavaa 11 (Huotari, K. & Partanen, J., 1998, s. 12).

$$\underline{I}_{k1v} = \frac{3 * \underline{I}_{k3v}}{1 + \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_0}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_1}} \quad (11)$$

Liitteessä 2 esitetään myös esimerkkiverkon mukaiset yksivaiheiset laskelmat. Suojajohtimien oikosulkulämpötila-arvojen mukainen lukuarvo on valittu valmistajan taulukoista vastaavien poikkipintojen mukaan ja keskuksen pistorasian syötön johtimien arvot valittu Tiaisen johdon mitoituksen ja suojauksen taulukosta (2010, s. 90). Taulukkoon 14 on tallennettu yksivaiheiset oikosulkuvirrat.

Taulukko 14. Kolmivaiheset maksimi- ja yksivaiheiset minimoikosulkuvirrat.

Kohde	Tyyppi	I_{k3-MAX}	I_{k1-MAX}	I_{k1-MIN}
		alkupää		
		[kA]	[kA]	[kA]
Syöttö jakelumuuntajalta	2 x AXCMK 4x300+88Cu	11,39	10,37	9,65
Aurinkosähköjärjestelmä	AMCMK 4x50+16Cu	10,91	-	1,75
Energiavarasto	AMCMK 4x50+16Cu	10,91	-	5,48
Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	10,91	-	5,03
Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	10,91	-	4,13
UPSGEN lähtö	AMCMK 4x50+16Cu	10,91	-	4,45
Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	10,91	-	3,07
Sähkökattila	MMJ 5x16S	10,91	-	1,44
UPSGEN tulo	AMCMK 4x50+16Cu	0,170	-	0,157
SÄHKÖLABORATORIO NK5.1	2 x AMCMK 4x95+50Cu	10,91	-	5,34
Energiavaraston saarekekäyttö	AMCMK 4x50+16Cu	0,144	-	0,135

Case-tapauksen yksivaiheista oikosulkuvirtaa laskettaessa huomioitiin sarjaan kytketyn komponenttiverkon impedanssi, joka on suurimmillaan silloin kun vikapiiri sulkeutuu suojaohjaintien kautta. Tässä tapauksessa yksivaiheinen vikavirta on pienin mahdollinen. Lasketut yksivaiheiset minimoikosulkuvirrat ovat esitetty taulukon 14 sarakkeessa I_{k1-MIN} . Saman taulukon 14 sarakkeessa I_{k1-MAX} on pääkeskuksen PK2 suurin yksivaiheisen oikosulkuvirran laskennallinen maksimitulos. Lähellä tähtipistemaadoitettua jakelumuuntajaa yksivaiheinen oikosulkuvirta voi olla jopa suurempi, kuin kolmivaiheinen oikosulkuvirta (ABB TTT, 2000, Luku 7, s. 3).

5.4 Case -verkon suojausten arviointi

Kuormitusvirtojen laskelmien perusteella nähdään, ettei kaikkien mikroverkon kaapeleiden suojaus ole optimaalinen, mikäli kuormitusta on yli kaapeleiden sallitun, mutta kuitenkin alle suojausalueen laukaisuportaan. Tässä tapauksessa suojausalueen ohjaama katkaisija ei laukaise kaapelin kuormitusvirtakestoisuuden ylittävällä kuormitusvirralla esimerkiksi UPSG:n syöttökaapelin eikä nousukeskukselle NK5.1 menevän syöttökaapelin tapauksissa. Varokesuojattujen sähköautolatauslähtöjen ylemmällä sulamisrajavirralla on myös vaara, että kaapelit pääsevät vaurioitumaan ylikuormitustapauksessa.

Ylikuormitussuojauksen muuttamista releasetteluiden osalta kriittisissä verkon osissa sekä varokkeiden koon muuttaminen pienempään kokoluokkaan saattavat verkon suojausten ylikuormituksen osalta suojausten vaatimalle tasolle. Huomattava on kuitenkin myös verkkoon

liitetty kuormitus, joka ei itsessään ylitä kaapelin kuormitettavuutta. Esimerkiksi yhden kaapelin syöttämän latausaseman (2x22kW) tehon mukainen virta on tehokertoimella $\cos\phi = 0,8$ on noin 80 A. Nousukeskuksen takana oleva kuormitus on vaihtelevaa sähköenergiaa kuluttavaa kuormaa. Vuoden 2021 aikana mitattu suurin teho on ollut marraskuussa 22 kW, joka ei aiheuta välitöntä vaaraa kaapelin kestoisuudelle.

Oikosulkukestoisuuden osalta kyseinen mikroverkko sijaitsee lähellä jakelumuuntajaa, jolloin mikroverkon oikosulkuvirrat verkkokäyttötilassa ovat suurempia kuin tavanomaisen pienjänniteliittymän kohdalla. Tarkasteltavan mikroverkon osalta oikosulkukestoisuus on mitoitettu oikein, eikä suojauksen osalta tarvitse tehdä muutoksia. UPSG:n ja energiavaraston syöttöpuolen oikosulkukestoisuudet ovat 10 kA:n mitoitusten mukaan tehty, eikä laitteistoissa tapahtuva oikosulkuvirta ylitä niitä arvoja. Suurimman oikosulkuvirran tilanne on jakelumuuntajan liittimien läheisyydessä ja muuntajan sekä pääkeskuksen PK2 välisellä kaapeliosuudella. Kaapelin 1 sekunnin ylivirtakestoisuus on noin 56 kA:n luokkaa ja jo 2,5 kA:n ylivirta laukaistaan pois 0,3 sekunnissa.

Verkkokäyttötilassa poiskytkentäehtojen mukaiset vaatimukset toteutuvat kaikkien mikroverkon kaapelointien osalta. Saarekekäyttötilanteessa ongelman muodostaa nousukeskuksen NK5.1 takana olevat suojalaitteet, joiden luotettavaa toimintaa ei saavuteta. Esimerkiksi johdonsuojakatkaisijoiden C16 tapauksessa, minimioikosulkuvirtavaatimus 0,4 sekunnin poiskytkentäajalle on 160 A ja prospektiivinen kolmivaiheinen oikosulkuvirta on välillä 159 – 167 A UPSG-käytössä sekä 138 – 145 A energiavarastokäytössä. Yksivaiheisessa oikosulussa oikosulkuvirta on nousukeskuksella UPSG käytössä noin 152 A ja energiavaraston tapauksessa noin 131 A, joten henkilösuojaus ei näissä tapauksissa toteudu riittävän nopeasti tarkasteltavalla C16 johdonsuojakatkaisijalla. Nousukeskuksella on lisäsuojina 30 mA:n vikavirtasuojakytkimet, joiden avulla henkilösuojaus saadaan määrätyissä tapauksissa toteutumaan standardissa mainitun poikkeuksen avulla (SFS 6000-4-41:2017, s. 7; 21 – 22; 30). Huomattava on, ettei vikavirtasuojan avulla voida korvata perussuojauksen vaatimia suojausmenetelmiä.

Mikroverkkojen yksi keskeinen tavoite on luotettava toiminta. Suojausta tarkasteltaessa syöttävän verkon luotettavuus edellyttää myös selektiivistä rakennetta. Mikroverkon tuotantolaitteiden ja laitteistojen oma tekniikka huolehtii osaltaan ylivirran rajoituksesta, mutta aiheuttaa haasteita poiskytkentäaikaisten toteutumiseen verkon heikoimpien osien kohdalla. Saarekekäytön vikatilanteessa on mahdollista, että UPSG:n tai energiavaraston

oikosulkusuojaus tai ylikuormitussuojaus toimivat ennen varsinaista suojalaitetta. Esimerkiksi UPSG:n invertterissä (liite 4 taulukko 4) noin 108 A:n ylikuormitusvirta katkaistaan 0,3 sekunnissa, kun vastaavasti johdonsuojakatkaisijan poiskytkentäaika on 0,4 sekuntia kun vaadittu toimintavirta ylitetään. Tämä aiheuttaa mahdollisen epäselektiivisen toiminnan ja vaarantaa mikroverkon luotettavan toiminnan.

Aurinkopaneelit ovat kytkeytyneenä vain silloin, kun verkkoyhteys on olemassa, jolloin vikatilanteessa virransyöttöä vikapaikkaan voi tapahtua hetkellisesti myös inverttereistä. Yhden invertterin tuottama vikavirta on suurimmissa invertterimalleissa noin 50 A:n luokkaa, joten yksittäisen invertterin vaikutukset ovat pienet ja oikosulkutapauksissa invertterien sisäinen suojaus katkaisee syötön noin 100 ms:ssa (SMA 2022a). Kun ollaan kytkeytyneenä verkkoon invertterien ollessa rinnankytkettyinä, on mahdollista, että vikatilanteessa oikosulkuvirta muodostuu invertterien oikosulkuvirtasummasta. Tällöin invertterien liittämispisteessä on ryhmäkeskuksen ARK kahvasulakkeet (80 A) suojaamassa, mikäli invertterien sisäiset suojalaitteet eivät vikaa havaitse.

Mikroverkon ylijännitesuojaus on toteutettu mikroverkossa tuotantolaitteistojen omien ylijännitesuojien avulla. Aurinkopaneelijärjestelmän invertteri ja energiavarasto sisältävät tyyppin 2 ylijännitesuojan, jotka kykenevät suojaamaan laitteistoa myös lyhytaikaisten ylijännitteiden kuten transienttien vaikutuksilta. Verkonvalvontareleen avulla voidaan verkkokäyttötilanteessa ohjata pidempiaikaisessa ali- ja ylijännitetilanteessa saarekekäyttötilaan, jolloin verkon jännitteet pysyvät sallituissa rajoissa UPSG:n tuottaman jännitesäädön avulla. Transienttiylijännitteiden vaikutuksien poistamiseksi olisi verkkoon asennettava lisäsuojia, joilla saadaan mikroverkkoon liittyvien muiden laitteiden ja laitteistojen suojaus toteutettua luotettavammin nykytasoon verrattuna.

Älysähköverkon taajuutta voidaan mitata syöttävän verkon puolelle sijoitetulla verkonvalvontareleellä. Verkon ali- tai ylitaajuustilanteessa voidaan releen ohjaamana siirtyä saarekkeeseen, jolloin saareketilan taajuudesta huolehtii UPSG:n tehoelektroniikka pitäen taajuuden 50 Hz:n suuruisena. Toistaiseksi saarekekäytössä ei ole taajuutta mittaavaa ja ohjaavaa ”master”-relettä, jolloin yhtäaikaisesti ei voida käyttää UPSG:tä ja energiavarastoa, ettei synny kahden tehoelektroniikan tuottaman taajuuden synkronoinnissa vahinkoa. Tämä on yksi tulevaisuuden kehityskohde, jolla saadaan useampi tuotantolaitteisto sekä energiavarasto liitettyä saarekekäyttöön.

Useiden laitteiden tuottamat harmoniset häiriövirrat ja jännitteet saattavat summautua nol-lajohtoon aiheuttaen lämpenemää tai jopa haitallista ylikuormitusta. Harmonisten häiriöiden suojaus saadaan poistettua aktiivisuodattimen avulla verkkokäyttötilanteessa. Mikroverk-koon liittyvissä tehoelektroniikkalaitteissa on omat sisäiset suodattimet sekä virranlaadun käsittelijät, joilla saadaan harmonisten häiriöiden vaikutuksia pienennettyä.

Pääkeskuksen PK2 kannessa olevalta pistorasialta sekä pistorasian syöttökiskolta tehtiin oi-kosulkuvirran mittaus kolmella erilaisella asennustesterillä. Jokaisella mittarilla mittaus tois-tettiin viisi kertaa ja mittaustuloksista laskettiin mittarin mittaustuloksen keskiarvo. Mittaus-tulosten keskiarvo on kirjattu vertailutaulukkoon (taulukko 15). Pääkeskuksen kannessa ole-van pistorasian syöttö on rakennettu ensin kiskolta etukojeelle, etukojeelta jakelukiskolle (pituus noin 2 metriä) ja jakelukiskolla olevalta johdonsuojakatkaisijalta vikavirtasuojakyt-kimelle ja lopuksi vielä pistorasialle. Pistorasian suojamaadoitusjohdin on liitetty lähellä ja-kelukiskon alapuolella olevalle riviliitinrimalle ja johtojen pituus pistorasialle on noin 2 met-riä. Mittaukset tehtiin testerien omilla mittajohdoilla, jotka nollattiin ennen mittaustapahtu-maa.

Taulukko 15. Mittaus- ja laskentatulosten vertailu.

Mittaus nro	Mittauspiste	Mittalaite	Mittaustulos [kA]	Laskentatulok [kA]
1	Pistorasia	Fluke 1654B	3,98	4,30
2	Pistorasia	Profitest 0100SII ^(*)	3,59	4,30
4	Pistorasia	Profitest MTECH M200	4,56	4,30
5	Kisko	Fluke 1654B ^(**)	> 10	8,81
6	Kisko	Profitest 0100SII	7,66	8,81
8	Kisko	Profitest MTECH M200	7,11	8,81
^(*) Mittaus tehty N-johtimesta vikavirtasuojakyt-kimen laukaisun estämiseksi.				
^(**) Mittaus toistettu vastaavan mallisella mittarilla ja tulokset > 10 kA				

Mittaustuloksista voidaan päätellä, että teoreettiset laskelmat ovat oikean suuntaisia. Liit-teessä 3 esitetään myötä-, vasta- ja nollaverkon periaatteella muodostettava sijaiskytkentä sekä laskelmat yksi-, kaksi- ja kolmevaiheisista oikosulkuvirroista keskuksen pistorasialle jännitteellä 400V.

Laskelmien perusteella voidaan havaita jakelumuuntajaa lähellä olevien keskusten yksivai-heisten oikosulkuvirtojen olevan riittävän suuria, jotta kosketusjännitesuojauksen mukainen suojausaikavaatimus toimii riittävän nopeasti alle 0,4 sekunnissa, kun kyseessä on

verkkokäyttötilanne. Saarekekäyttötilanteissa oikosulkuvirrat ovat kaikissa tapauksessa huomattavan paljon pienempiä, joka aiheuttaa perinteisten suojalaitteiden toiminnalle haasteet, eikä poiskytkentäaikojen mukaisia vaatimuksia kaikkien ryhmäjohtojen kohdalla tulla saavuttamaan aikaisemmin rakennetun verkon mukaisella suojaustavalla. Suojaus saadaan lain edellyttämälle tasolle vaihtamalla esimerkiksi C-tyypin johdonsuojakatkaisijat B-tyypin johdonsuojakatkaisijoiksi. B-tyypillä 0,4 sekunnin oikosulkuvirtavaatimus on 80 A, joka toteutuu verkon ollessa myös saarekekäyttötilassa. Samalla myös mikroverkon selektiivisyys muuttuu luotettavuuden kannalta paremmaksi.

6 Johtopäätökset

Mikroverkkojen toteutusvaihtoehtojen runsaus sekä käyttötilanteiden useat variaatiot aiheuttavat mikroverkon suojauksen suunnittelulle ja toteutukselle haasteita. Suojusrakenne voidaan ajatella koostuvan jopa kolmesta erilaisesta näkökulmasta, joista ensimmäinen on turvallisuussuojaus, toinen toiminnallinen suojaus ja kolmas laadullinen suojaus. Turvallisuussuojauksen lähtökohtien pitää täyttää sähköturvallisuuslainsäädännön vaatimukset kaikissa verkon käyttötilanteissa. Toiminnallisen suojauksen tarkoituksena on varmistaa mikroverkon laadukas ja tehokas käyttö verkon erilaisten käyttötilanteiden aikana esimerkiksi keskitetyn ohjausjärjestelmän avulla rakennetulla suojausautomaatiolla. Laadullisessa suojauksessa huomioidaan mikroverkon sähkön laatuun liittyvät asiat, kuten harmoniset virrat sekä niiden suodattaminen.

Suuremman kokoluokan mikroverkoissa suojaus toteutetaan ensisijaisesti suojareleiden avulla. Kiinteistöissä suojaus voidaan toteuttaa verkon perussuojalaitteiden, kuten sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoidenkin avulla, jos mikroverkon tuotanto- ja varastointilaitteistot sisältävät omat suojalaitteensa. Tämä johtaa kuitenkin usein selektiivisyyden menettämiseen ja huonoimmassa tapauksessa koko mikroverkon suojauksen toimimattomuuteen. Kahdet tai useammat asettelut salliva suojarele on suositeltavin yksittäinen suojalaite, jolla myös selektiivisyyden aiheuttamiin haasteisiin voidaan vastata.

Mikroverkkojen suojauksen keskeiset elementit, joiden ympärille suojausfunktiot toteutetaan, ovat ylivirta-suojaus, ali- ja ylijännitesuojaus, maadoitusrakenne, tietoverkot ja tietoturvallisuus. Useiden lähteiden perusteella korostettiin mikroverkon suunnittelun ja suojauksen toteuttamiseksi simulaation tärkeyttä, jota tämän työn yhteydessä ei ole toteutettu. Suojasasetteluiden mekaanisen laskennan ja simulaation vertailun avulla olisi saanut vielä lisäsyvyyttä tutkimuksen aiheeseen. Yksi lisätutkimuksen aihe voisi olla mikroverkon suojauksen simulaatiomallin toteuttaminen. Myös lisätutkimuksen aiheiksi soveltuvat mikroverkon aiheuttamien sähkön laadun poikkeavuuksien tarkastelu ja laadullisilta häiriöiltä suojautuminen sekä mikroverkon tietoverkon ja tietoturvan suojaus.

Mikroverkko voi rakentua monenlaisista vaihtoehdoista ja komponenteista, joka aiheuttaa suojauksen toteuttamisen haasteen. Suojausratkaisuun vaikuttavat ominaisuuksien osalta

esimerkiksi jakelujärjestelmän tyyppi, käytettävät jännitteet ja niiden muodot, tarvittavat tehot ja liitettävät laitteistot. Olosuhteiden muutoksien myötä suojausten pitää sopeutua uuteen tilanteeseen, esimerkiksi saarekekäyttötilaan siirryttäessä releasettelut muuttuvat automaattisesti uusien asetusten mukaisiksi.

Suojaussuunnitteluvaiheessa laskentatuloksien perusteella voidaan jo havaita keskeiset muutostarpeet ja pystytään valitsemaan tarpeelliset ominaisuudet sisältävät suojalaitteet. Suojaustasoa arvioitaessa on huomioitava koko verkon laajuus, käyttötilanne, mahdolliset viat sekä mahdolliset kustannusvaikutukset. Mikroverkon turvallisuus on keskeinen vaadittava ominaisuus, josta ei voida tinkiä missään olosuhteissa.

Tutkimuksen mukaisen verkon tapauksessa on suojalaitteet valittu suojaamaan verkkoa yksisuuntaisen tehonjaon periaatteella, syöttävästä verkosta kulutuspiisteelle. Perinteiset ylivirtareleiden ohjaamat katkaisijat ja sulakkeet ovat toimineet verkon suojalaitteina, joita pyritään hyödyntämään toteutettavan mikroverkon suojauksessa. Minimiturvallisuustaso saadaan pienillä asetusmuutoksilla toteutettua, mutta optimaalisen ratkaisun saamiseksi pitäisi vaihtaa suojarkeitä, jotka mahdollistavat vähintään kahdet asetellut ja suojausväylänä käytetään IEC61850 standardin mukaista toteutusta.

Uusiutuvan energiatuotannon laitteistojen halpenemisen myötä on odotettavissa mikroverkkojen määrän lisääntymistä pienimmissäkin kokoluokissa kuluttajatasolla. Lisäksi mikroverkot tullaan suurimmalla todennäköisyydellä toteuttamaan aiemmin rakennettuun verkkoinfrastruktuuriin, joka vastaa osittain tämän tutkimustyön mukaista verkkoesimerkkiä. Mikroverkkojen osalta hyviä jatkotutkimusaiheita ovat edellä mainittujen suojausten lisäksi mikroverkkojen kuormanohjaus, energian varastointipotentiaali Suomessa muilla kuin akkuenergiavarastoilla ja hybridimikroverkon toteuttaminen vaihtovirtapohjaiseen pientalo-kiinteistöön.

Lähteet

ABB 2022a. Aurinkosähkö osana energiamurrosta: PV-voimalan suunnittelijan opas. <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107492A5440&LanguageCode=fi&DocumentPartId=&Action=Launch>. Viitattu 25.3.2022.

ABB 2022b. Pienjännitekojeet. Saatavissa <https://library.e.abb.com/public/6b2e3b61cdc65b49c2256e7e0026aeb4/1SCC400004C1801.pdf>. Viitattu 13.5.2022

ABB 2022c. Kahvasulakkeet, 2...1600 A gG ja aM -tyypit. Saatavissa <https://library.e.abb.com/public/6bac18b236fde340c1257927002efd8c/1SCC317002C1801.pdf>. Viitattu 22.5.2022.

ABB TTT, 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita -käsikirja. Saatavissa <http://www.oamk.fi/~kurki/automaatiolabrat/TTT/>

Abd el-Ghany, H.A., Rashad, E. M. & Azmy, A. M., 2022. Advances in Control Techniques for Smart Grid Applications: Identifying Hosting Capacity of Renewable DG Units in Smart Grids Considering Protection Systems. ISBN 978-981-16-9856-9 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-981-16-9856-9>

Agco 2022a. Agco Power -dieselgeneraattori. Käyttäjän käsikirja – 2019. © AGCO. Viitattu 23.5.2022.

Aghdam, F., H., & Kalantari, N., T., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Energy Management Requirements for Microgrids. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

Andrei, H., Gaiceanu, M., Stanculescu, M., Andrei, P., C., Buhosu, R. & Badea, C., A., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Energy Storage Systems in Microgrid. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3_8.

Avendaño, J. L. S. & Martín, L. S. M., 2019. Microgrids Design and Implementation: Communication in Microgrids. ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

- Bailera, M., Lisbona, P., Peña, B & Romeo, L. M., 2020. Energy Storage: Hybridization of Power-to-Gas Technology and Carbon Capture. ISBN 978-3-030-46527-8 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46527-8>
- Bastani, M., Damgacioglu, H. & Celik, N., 2017. A δ -constraint multi-objective optimization framework for operation planning of smart grids. Artikkelin 2210-6707 Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.12.006>
- Bawayan, H. & Younis, M., 2021. Microgrid Protection through Adaptive Overcurrent Relay Coordination. Artikkelin, saatavissa <https://doi.org/10.3390/electricity2040031>
- Beheshtaein, S., Cuzner, R., Savaghebi, M. & Guerrero, J. M., 2019. Review on microgrids protection. IEEE artikkelin ISSN 1751-8687. Saatavissa doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5212
- Blomqvist, K., Härkönen, J. & Makkonen, T., 2017. Sähkön varastointitekniikat- ja markkinat. Hankeraportti – Mobiilisähkövarastoilla energiahuoltovarmuutta ja säätövoimaa uusiutuvalle energialle. Saatavissa <https://vanha.karelia.fi/mobiilisahkovarastot/wp-content/uploads/2018/02/Sahkon-varastointitekniikat-ja-markkinat.pdf>
- Bordons, C., Garcia-Torres, F. & Ridao, M., A., 2020. Model Predictive Control of Microgrids. ISBN 978-3-030-24570-2 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-24570-2>
- Caruna 2022a. Omavarainen sähkön pientuotanto. <https://www.caruna.fi/palvelut/omasahkontuotanto/muu-pientuotanto>. Viitattu 25.3.2022.
- Caruna 2022b. Carunan liittymisperiaatteet 1.12.2020. https://images.caruna.fi/carunan_liittymisperiaatteet_2020.pdf Viitattu 23.4.2022.
- Castelo, T., Zambroni de Souza, M.F., Duque, C. & Ribeiro, P. F., 2019. Microgrids Design and Implementation: Power Quality and Hosting Capacity in Islanding Microgrids. ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>
- Castilla, M., García de Vicuña, L. & Miret, J., 2019. Microgrids Design and Implementation: Control of Power Converters in AC Microgrids: ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

- Chandra, A., Singh, G. K. & Pant, V., 2020. Protection of AC microgrid integrated with renewable energy sources – A research review and future trends. *Tutkimusartikkeli Electric Power Systems* 193 (2021) 107036. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.epr.2021.107036>
- Chauhan, R. K., Rajpurohit, B. S. & Pindoriya N.M., 2012. DC Power Distribution System for Rural Applications. Saatavissa DOI: 10.13140/2.1.2152.2726 <https://www.researchgate.net/publication/257836882>
- Chowdhury, S., Chowdhury S, P. & Crossley, P., 2009. *Microgrids and Active Distribution Networks*. The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom. ISBN 978-1-84919-014-5. E-kirja, saatavissa Knovel -tietokannasta.
- Coelho, P., Gomes, M. & Moreira, C., 2019. *Microgrids Design and Implementation: Smart Metering Technology*. ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>
- Danley, D., R., 2019. Defining a Microgrid Using IEEE 2030.7. Saatavissa [IEEE Xplore](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8800000).
- Das, P. & Biswal, M., 2020. *Microgrid: Operation, Control, Monitoring and Protection - Protection Challenges with Microgrid*. ISBN 978-981-15-1781-5 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1781-5>
- Delboni, L., F., N., Marujo, D., Balestrassi, P., P. & Oliveira, D., Q., 2019. *Microgrids Design and Implementation: Electrical Power Systems: Evolution from Traditional Configuration to Distributed Generation and Microgrids*. ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>
- Dola, S. A., Badal, Md. F. R., Das, S. K., Islam, Md. R. & Xu, W., 2022. *Advances in Control Techniques for Smart Grid Applications: A Robust Controller for Multilevel Distributed Generation Based Islanded Microgrid*. ISBN 978-981-16-9856-9 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-981-16-9856-9>
- EASAC, 2017. Valuing dedicated storage in electricity grids. EASAC policy report 33, ISBN: 978-3-8047-3729-7. Saatavissa https://easac.eu/fileadmin/PDF_s/reports_statements/Electricity_Storage/EASAC_Electricity_Web_low_res_30_June.pdf
- Eaton 2022a. Eaton UPSG-konttiratkaisuesite. Saatavissa <http://powerquality.eaton.com/suomi/products-services/backup-power-ups/upsg.asp> . Viitattu 18.5.2022.

Eaton 2022b. Installation Manual – Eaton xStorage Compact 20 – 40kW Energy Storage System. Viitattu 23.5.2022. Saatavissa <https://www.eaton.com/content/dam/eaton/products/energy-storage/xstorage-compact/en-us/eaton-xstorage-compact-installation-manual-en-us.pdf>

Eaton 2022c. Eaton 93PM UPS Technical Specifications. Saatavissa <https://powerquality.eaton.com/SEA/Products-services/Backup-Power-UPS/93PM-UPS/93PM-specs.asp?cx=23>. Viitattu 1.6.2022

Elfi 2022a. Sähkönkäytön kysyntäjousto. <https://www.elfi.fi/sahkomarkkinat/sahkonkayton-kysyntajousto/>. Viitattu 10.3.2022.

Elovaara, J. & Haarla, L. 2011. Sähköverkot I – Järjestelmätekniiikan ja sähköverkon laskenta. 1.p. Helsinki, Gaudeamus Helsinki University Press/Otatieto.

Energiamaailma 2022a. Vesivoima. <https://energiamaailma.fi/energiasta/energiantuotanto/vesivoima/> Viitattu 6.4.2022.

Energiateollisuus 2022a. Sähköä kannattaa käyttää joustavasti. <https://energia.fi/energiasta/energiamarckkinat/sahkomarkkinat/kulutuspousto>. Viitattu 10.3.2022.

Energiateollisuus 2022b. Sähköntuotanto. <https://energia.fi/energiasta/energiantuotanto/sahkontuotanto>. Viitattu 26.3.2022

Energiateollisuus 2022c. <https://vanhalehti.energi uutiset.fi/uutiset/vesisahko-huolehtii-tasapainosta.html> Viitattu 6.4.2022.

Energiateollisuus 2022d. Sähkön hinta koostuu kolmesta osasta. https://energia.fi/energiasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_hinta Viitattu 20.4.2022.

Energiateollisuus 2022e. Avoimet sähkömarkkinat <https://energia.fi/energiasta/energiamarckkinat/sahkomarkkinat> Viitattu 20.4.2022.

Energiateollisuus 2022f. Sähkön hinta pähkinänkuoressa https://energia.fi/files/624/Sahkon_hinta_-esite.pdf. Viitattu 20.4.2022.

Energiateollisuus 2022g. Mistä lisäjoustoja sähköjärjestelmään? Energiateollisuus ry:n ja Fingrid Oyj: loppuraportti. https://energia.fi/files/694/Mista_lisajoustoja_sahkojarjestelmaan_loppuraportti_28_11_2012.pdf Viitattu 25.4.2022.

Energiateollisuus 2022h. Sähkötoimituksen laatu- ja toimitustapavirheen sovellusohje. Energiateollisuus ry, 2014. https://energia.fi/files/881/Sahkontoimituksen_laatu_ja_toimitustapavirheen_sovellusohje_2014.pdf Viitattu 3.5.2022.

Enertec 2022a. Huipunleikkaus onnistuu kalliin sähkön aikana varavoimakoneella. <https://www.enertec.fi/natiivi/3344/huipunleikkaus-onnistuu-kalliin-sahkon-aikana-varavoimakoneella%20>. Viitattu 19.4.2022.

Enertec 2022b. Energian tuotanto, jakelu ja varastointi. <https://www.enertec.fi/aihe/161/energian%20tuotanto,%20jakelu%20ja%20varastointi> Viitattu 19.4.2022.

Engineerexperiences 2022a. <https://engineerexperiences.com/microgrid-definition-and-introduction.html>. Viitattu 19.3.2022.

EU-Direktiivi 2019/944. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944&from=FI>. Viitattu 10.3.2022.

EVP 2022a. Pyhäsalmen kaivokseen pumppuvoimalaitos. <https://www.epv.fi/project/pyhasalmen-kaivokseen-pumppuvoimalaitos/> Viitattu 25.4.2022.

Fingrid 2022a. Kysyntäjousto. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/pilottihankkeita/kysyntajousto/>. Viitattu 10.3.2022.

Fingrid 2022b. Mitä on inertia? <https://www.fingridlehti.fi/mita-on-inertia/> Viitattu 6.4.2022.

Fingrid 2022c. Johdanto sähkömarkkinoihin. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyss/johdanto-sahkomarkkinoihin/#saatosahko--ja-reservimarkkinat> Viitattu 20.4.2022.

Fingrid 2022d. Reservimarkkinat. <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/#reservilajit> Viitattu 20.4.2022.

Fingrid 2022e. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/julkaisut/uusi_versio_sahkomarkk.pdf. Viitattu 20.4.2022.

Fingrid 2022f. Sähkö riittää Suomessa tulevana talvena. <https://www.fingrid.fi/sivut/ajankohtaista/tiedotteet/2020/sahko-riittaa-suomessa-tulevana-talvena/> Viitattu 20.4.2022

Fingrid 2022g. Pohjoismaiden suurin akkuvarasto nousee Yllikkälään. <https://www.fingrid-lehti.fi/pohjoismaiden-suurin-akkuvarasto-nousee-yllikkalaan/> Viitattu 19.4.2022.

Fingrid 2022h. Kulutuksen ja tuotannon tasapainon ylläpito. <https://www.fingrid.fi/kantaverkko/sahkonsiirto/kulutuksen-ja-tuotannon-tasapainon-yllapito/> Viitattu 28.4.2022.

Gabbar, H. A., Abdussami, M. R. & 2020. Optimal Planning of Nuclear-Renewable Micro-Hybrid Energy System by Particle Swarm Optimization. IEEE Artikkeli 08/2020. Saatavissa DOI: 10.1109/access.2020.3027524

Gaiceanu, M., Arama, I. N. & Ghenea, I., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Power Electronic Converters in AC Microgrid. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

Gao, D. W., 2015. Energy Storage for Sustainable Microgrid. ISBN: 978-0-12-803374-6. E-kirja, saatavissa Knovel -tietokannasta.

Gomes, M., Coelho, P. & Moreira, C. 2019. Microgrids Design and Implementation: Microgrid Protection Schemes: ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

Harsia, P., Järventausta, P., Hilden, A., Kallioharju, K., Kortetmäki, A., Koskela, J., Mutanen, A., Rautiainen, A., Supponen, A., Uusitalo, S. & Heljo, J., 2019. SÄTE-opas – Opas pientalojen suunnitteluun: Sähkötehojen hallinta osana rakennuksen energiatehokkuutta.

Hirsch, A., Parag, Y. & Guerrero, J., 2018. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.040>

Honkapuro, S., Haapaniemi, J., Haakana, J. Lassila, J., Partanen, J., Lummi, K., Rautiainen, A., Supponen, A., Koskela, J. & Järventausta, P., 2017. Jakeluverkon tariffirakenteen kehittymismahdollisuudet ja vaikutukset. ISBN: 978-952-335-105-9. Saatavissa <https://lut-pub.lut.fi/handle/10024/143710>

Honkapuro, S., Valtonen, P., Tuunanen, J. & Partanen, J., 2015. Demand side management in open electricity markets from retailer viewpoint. IEEE konferenssijulkaisu. Saatavissa DOI: 10.1109/EEM.2015.7216652

Huotari, K. & Partanen, J., 1998. Teollisuusverkkojen oikosulkuvirtojen laskeminen. ISBN 951-764-282-2. Saatavissa http://www.uotila.cc/images/teollisuusverkkojen_oikosulkuvirrat.pdf

IEC 2022a. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=617-04-13>. Viitattu 4.3.2022.

IEC 2022b. <https://www.iec.ch/basecamp/bringing-intelligence-grid>. Viitattu 5.2.2022.

IEC 2022c. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=448-11-01>. Viitattu 6.3.2022.

IEC 2022d. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=448-11-04>. Viitattu 6.3.2022.

IEC 2022e. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=617-04-11>. Viitattu 10.3.2022.

IEC/TR 61000-5-1: 2012. Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC). Osa 5: Ohjeita sähkömagneettisten häiriövaikutusten minimoimiseen asennuksissa. Kappale 1: Yleiset näkökohdat. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

IEEE PES 2022a. Saatavissa https://www.ewh.ieee.org/r6/san_francisco/pes/pes_pdf/SFPES_Microgrids_Nov_2014.pdf. Viitattu 19.3.2022.

IEEE Std 1547.3-2007. IEEE Guide for Monitoring, Information Exchange, and Control of Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems. ISBN 0-7381-5634-5. Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

IEEE Std 1547.4-2011. IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. ISBN 978-0-7381-6688-9. Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

IEEE Std 1854-2019. IEEE Trial-Use Guide for Smart Distribution Applications. ISBN 978-1-5044-5892-4 Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

IEEE Std 2030.2-2015. IEEE Guide for the Interoperability of Energy Storage Systems Integrated with the Electric Power Infrastructure. ISBN 978-0-7381-9638-1. Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

IEEE Std 2030.4-2011. IEEE Guide for Design, Operation, and Integration of Distributed Resource Island Systems with Electric Power Systems. ISBN 978-0-7381-6688-9. Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

IEEE Std 2030.7-2017. IEEE Standard for the Specification of Microgrid Controllers. ISBN 978-1-5044-4608-2. Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

IEEE Std 2030.9-2019. IEEE Recommended Practice for the Planning and Design of the Microgrid. ISBN 978-1-5044-5681-4. Saatavissa http://www.ieee.org/portal/innovate/products/standard/standards_dictionary.html

Iskender, I. & Genc, N. 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Power Electronic Converters in DC Microgrid. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

Jadeja, R., Bizon, N., Trivedi, T., Ved, A. & Chudasama, M., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Luku 30 - Power Quality Issues and Mitigation Techniques in Microgrid. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

Järventausta, P., Repo, S., Trygg, P., Rautiainen, A., Mutanen, A., Lummi, K., Supponen, A., Heljo, J., Sorri, J., Harsia, P., Honkiniemi, M., Honkapuro, S., Valtonen, P., Tuunanen, J. & Belonogova, N., 2015. Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli) – Loppuraportti. ISBN 978-952-15-3485-0 Saatavissa <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/116742>

Kabalci, E., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Hierarchical Control in Microgrid. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

Kaipia, T., Karppanen, J., Nuutinen, P., Pinomaa, A., Mattsson, A., Peltoniemi, P., Silventoinen, P. & Partanen, J., 2016. LVDC Rules – Towards Industrial-Scale Applications of

Low-Voltage Direct Current in Public Power Distribution. CIRED Workshop artikkeli 0333, Helsinki 06/2016. Saatavissa DOI: 10.1049/cp.2016.0717

Kandari, R., Neeraj & Mittal, A., 2022. Microgrids - Modeling, Control and Applications: Luku 4 - DC microgrid. ISBN: 978-0-323-85463-4 E-kirja. Saatavissa DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85463-4.00007-1>

Kerdphol, T., Qudaih, Y. & Mitani, Y., 2016. Optimum battery energy storage system using PSO considering dynamic demand response for microgrids. Artikkelin Electrical Power and Power Systems 83/2016. Saatavissa <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.03.064>

Koljonen, T., Honkatukia, J., Maanvilja, L., Ruuskanen, O-P., Similä, L. & Soimakallio, S. 2021. Hiilineutraali Suomi 2035 – ilmasto ja energiapolitiikan toimet ja vaikutukset (HIISI). Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 2021:62. Saatavissa [Valtioneuvosto – julkaisut](#).

Korpela, A., 2018. Suuren kokoluokan energianvarastointitekniikoiden teknis-taloudelliset näkymät. ISBN 978-952-7266-32-8. Hankeraportti, Tampereen ammattikorkeakoulun julkaisu. Saatavissa <https://julkaisut.tamk.fi/PDF-tiedostot-web/B/113-Suuren-kokoluokan-energiavarastointitekniikoiden-teknis-taloudelliset-nakymat.pdf>

Kortetmäki, A., Harsia, P. & Kallioharju, K., 2021. ST-esimerkit 12: Keinoja sähköteho- ja energianhallintaan asuinkiinteistöissä, Sähkötieto ry, Espoo.

Kumar, D. & Zare, F., 2017. DC Microgrid Technology: System Architectures, AC Grid Interfaces, Grounding Schemes, Power Quality, Communication Networks, Applications and Standardizations Aspects. IEEE Artikkelin 04/2017, DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2705914 Saatavissa <https://www.researchgate.net/publication/317297459>

Kumpulainen, L., Laaksonen, H., Komulainen, R., Martikainen, A., Lehtonen, M., Heine, P., Silvast, A., Imris, P., Partanen, J., Lassila, J., Kaipia, T., Viljainen, S., Verho, P., Järventausta, P., Kivikko, K., Kauhaniemi, K., Lågland, H. & Saaristo, H. 2006. Verkkovisio 2030 – Jakelu- ja alueverkkojen teknologiavisio. VTT tiedotteita ISBN 951-38-6883-4. Saatavissa [VTT:n tiedotteet](#).

Kumpulainen, L. & Ristolainen, I., 2006. Sähköjakeluverkon ja siihen liitetyn hajautetun tuotannon sähköteknisen suojauksen kehittäminen. Projektiraportti VTT-R-05644-06. Saatavissa https://www.merinoiva.fi/wp-content/uploads/2016/10/suojaus_loppuraportti_87.pdf

Li, Y., 2022. Cyber-Physical Microgrids. ISBN 978-3-030-80724-5 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-80724-5>

Liedes, R., Harsia, P., Honkapuro, S., Heinola, M., Ruostetsaari, I., Karppinen, T., Honkala, A., Sirviö, A., Valli, M., Pehkonen, E. & Ellmén, R., 2021. ST-esimerkit 13: Näkökulmia kulutusjouston toteuttamiseen, Sähkötieto ry, Espoo.

Lihu, J., Yongqiang, Z. & Yinshun, W., 2015. Architecture Design for New AC-DC Hybrid Micro-grid. IEEE artikkeli 2015. ISBN 978-1-4799-9880-7, Saatavissa DOI: 10.1109/ICDCM.2015.7152020

Limbasiya, T. & Arya, A., 2018. Smart Micro-Grid Systems Security and Privacy: Power Systems - A Matter of Security and Privacy. ISBN 978-3-319-91427-5 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91427-5>

Mahmoud, M., S., 2017. Microgrid – Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration. ISBN: 978-0-08-101753-1 E-kirja, 1.luku. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101753-1.00001-2>

Masoum, M. A. S & Fuchs, E. F., 2015. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines: Second Edition. ISBN: 978-0-12-800782-2. E-kirja, saatavissa Knovel -tietokannasta.

Microgrid Knowledge, 2022a. <https://microgridknowledge.com/microgrid-defined/>. Viitattu 16.2.2022.

Microgrid Knowledge, 2022b. <https://microgridknowledge.com/category/microgrids/>. Viitattu 17.2.2022.

Mittal, A., Rajput, A., Johar, K. & Kandari, R., 2022. Microgrids - Modeling, Control and Applications: Luku 1 - Microgrids, their types, and applications. ISBN: 978-0-323-85463-4 E-kirja. Saatavissa DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85463-4.00008-3>

Mohammadi, J., Badrkhani Ajaei, F. & Stevens, G., 2019. Grounding the AC Microgrid. IEEE artikkeli Vol. 55, No.1. Digital Object Identifier 10.1109/TIA.2018.2864106 Saatavissa DOI: 10.1109/TIA.2019.2928278

Molina, M., G. & Mercado, P., E., 2019. Microgrids Design and Implementation: Renewable Energy Technologies for Microgrids: ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

Moradi, M. & Akbari Foroud, A., 2021. Microgrids: Advances in Operation, Control, and Protection. Luku 2 - Operation Management of Microgrid Clusters. ISBN 978-3-030-59750-4 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4>

Motiva 2012. Opas sähkön pientuottajalle 04/2012. https://www.motiva.fi/files/5724/Opas_sahkon_pientuottajalle_2012.pdf. Viitattu 5.3.2022.

Motiva 2022a. Sähkön pientuotanto. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/sahkon_pientuotanto. Viitattu 5.3.2022.

Motiva 2022b. Pieni sanakirja kulutusjousta. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/sahkon_kulutusjousto/pieni_sanakirja_kulutusjousta. Viitattu 10.3.2022.

Motiva 2022c. Uusiutuva energia. https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia. Viitattu 10.3.2022.

Motiva 2022d. Selvitys hajautetusta ja paikallisesta energiantuotannosta erilaisilla asuinalueilla – Loppuraportti 12/2010. https://www.motiva.fi/files/7938/Selvitys_hajautetusta_ja_paikallisesta_energiantuotannosta_erilaisilla_asuinalueilla_Loppuraportti.pdf. Viitattu 26.3.2022.

Motiva 2022e. Kaukolämpö. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo. Viitattu 26.3.2022.

Motiva 2022f. Energiatehokas teollisuuskiinteistö. Saatavissa https://www.motiva.fi/files/5847/Energiatehokas_teollisuuskiinteisto.pdf. Viitattu 27.3.2022.

Motiva 2022g. Sähkön kulutusjousto – Joustavaa ja älykästä sähkönkäyttöä. https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/sahkon_kulutusjousto. Viitattu 3.4.2022.

Motiva 2022h. Ylijäämänsähkön myynti https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti Viitattu 20.4.2022.

Mäkelä, P., Paavilainen, P. & Andersson, A., 2018. Rakennusluokitus 2018: Käyttäjän käsikirja. ISBN 978-952-244-637-4. Saatavissa https://www.stat.fi/tup/julkaisut/tiedostot/julkaisuluettelo/yksk2_201800_2018_21483_net.pdf. Viitattu 27.3.2022.

Määttä, T., Berg, E., Härkönen, K., Österberg-Aikio, A-S. ja Katajainen, A., 2020, Luettu 8.3.2022. Saatavissa <https://6aika.fi/wp-content/uploads/2020/11/Na%CC%88in-teet-kiinteisto%CC%88sta%CC%88si-virtuaalivoimalaitoksen-opas.pdf>

Narayanan, A., Haapaniemi, J. Kaipia, T. & Partanen, J., 2018. Economic impacts of power-based tariffs on peer-to-peer electricity exchange in community microgrids. IEEE konferenssijulkaisu Saatavissa DOI: 10.1109/EEM.2018.8469778

Nayak, A., Lee, S. & Sutherland, J., W., 2019. Storage trade-offs and optimal load scheduling for cooperative consumers in a microgrid with different load types. Saatavissa <https://doi.org/10.1080/24725854.2018.1460517>

Nguyen, P. H., Viyathukattuva Mohamed Ali, M. M., Portelinha Jr, F. M., Ribeiro, P. F. & Cobben, J. F. G, 2019. Microgrids Design and Implementation: Emerging Control Technologies and Load Management in Microgrids. ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

Nordpool 2022a. Suomen tuntialuehinnat vuodelta 2021. <https://www.nordpoolgroup.com/en/Market-data1/Dayahead/Area-Prices/FI/Hourly/?view=table> Viitattu 19.4.2022.

Pahkala, T., Uimonen, H. & Väre, V., 2018. Joustava ja asiakaskeskeinen sähköjärjestelmä – Älyverkkotyöryhmän loppuraportti. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 33/2018. Saatavissa <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161119>.

Palizban, O., Kauhaniemi, K & Guerrero, J.M., 2014. Microgrids in active network management – part II: System operation, power quality and protection. Artikkelit 05/2014 Saatavissa <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.048>

Patnaik, B., Mishra, M., Bansal, R. C. & Jena, R. K., 2020. AC microgrid protection – A review: Current and future prospective. Artikkelit 0306-2619. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115210>

Planas, E. Andreu, J., Gárate, J. I., Martínez de Alegría, I. & Ibarra, E., 2015. AC and DC technology in microgrids: A review. Artikkele 1364-0321/2014, Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.067>

Pesola, A., Vanhanen, J., Hagström, M., Karttunen, V., Larvus, L., Hakala, L. & Vehviläinen, I., 2014. Sähkön pientuotannon kilpailukyvyyn ja kokonaistaloudellisten hyötyjen analyysi. Luettu 24.3.2022. Saatavissa https://www.motiva.fi/files/9439/Sahkon_pientuotannon_kilpailukyvyyn_ja_kokonaistaloudellisten_hyotyjen_analyysi_Loppuraportti.pdf.

Prysmian 2022a. Energia-, teollisuus- ja talonrakennuskaapelit. Saatavissa https://fi.prysmiangroup.com/sites/default/files/atoms/files/Energialuettelo_2018_lowres.pdf

REN21 2022a. Renewables 2021 Global Status Report. Saatavissa https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf.

Robert, F., C., Sisodia, G., S. & Gopalan, S. 2018. A critical review on the utilization of storage and demand response for the implementation of renewable energy microgrids. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.04.008>.

Ribbe, L. & Katting, T., 2020. Euroopan talous- ja sosiaalikomitean lausunto aiheesta ”*Euroopan laajuinen superverkko ja paikalliset energiasaarekkeet – hajautettujen ratkaisujen ja keskitettyjen rakenteiden oikeanlainen yhdistelmä taloudellisesti, sosiaalisesti ja ekologisesti kestävää energiakäännettä varten*”. Saatavissa EU:n [EUR-Lex sivustolta](#).

Räty, M., 2021. Sähköposti 13.1.2021 Eaton/M.Räty – Oamk/M.Kukkola. UPSG:n oikosulkuvirta.

Sallinen, P., 2021. Valmiiksi vetyä varten. Energiateollisuuden energiauutiset – Artikkele. <https://www.energiiauutiset.fi/kategoriat/markkinat/valmiiksi-vetya-varten.html> Viitattu 24.4.2022.

Sarvaranta, A., 2010. Älykkäät sähköverkot ja niiden kehitys Euroopan unionissa ja Suomessa. Energiateollisuus – Selvitys. Saatavissa https://energia.fi/files/665/Alykkaat_sahko-verkot_Suomessa_ja_Euroopassa.pdf

Schneider 2022a. Micrologic 5.2 E suojariele. Saatavissa <https://www.se.com/fi/fi/product/C1635E160/compact-nsx-micrologic-5-2-e-suojarele-160a-3napainen-nsx160250->

[katkaisijaan/?node=46306192226-katkaisijat&range=39910531-compact-nsx-uusi-suku-polvi&selected-node-id=46306192748](#) . Viitattu 20.5.2022.

Schneider 2022b. Micrologic 5.0X suojarahle. Saatavissa <https://www.se.com/fi/fi/product/LV848499/masterpact-mtz2-3-suojarele-micrologic-5-0x-runko-ulosvedett%C3%A4v%C3%A4/> . Viitattu 20.5.2022.

SFS 6000-1:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 1: Peruseriaatteet, yleisten ominaisuuksien määrittely ja määritelmät. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6000-4-41:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6000-4-43:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6000-4-44:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-44: Suojausmenetelmät. Suojaus jännitehäiriöiltä ja sähkömagneettisilta häiriöiltä. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6000-5-53:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-53: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Erottaminen, kytkentä ja ohjaus. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6000-5-54:2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-54: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Maadoittaminen ja suojajohtimet. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6008-1:2020. Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-1: Toiminnallisuus. Energiatehokkuus. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS 6008-2:2020. Pienjännitesähköasennukset. Osa 8-2: Toiminnallisuus. Tuottaja-kuluttajan pienjännitesähköasennukset. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS-EN 50160:2010 + A1:2015 + A2:2019 + A3:2019. Yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähköön jänniteominaisuudet. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS-EN 60269-1:2008. Pienjännitevarokkeet. Osa 1: Yleiset vaatimukset. . Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

SFS-EN 62305-2:2013. Protection Against Lightning - Part 2: Risk Management. Suomen Standardoimisliitto SFS ry, Helsinki.

Shahbazitabar, M., Abdi, H., Nourianfar, H., Anvari-Moghaddam, A., Mohammadi-Ivatloo, B. & Hatziaargyriou, N., 2021. Microgrids - Advances in Operation, Control, and Protection: An Introduction to Microgrids, Concepts, Definition, and Classifications. ISBN 978-3-030-59750-4 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59750-4>

Singh, A., R., Lei, D., Kumar, A., Singh, R. & Meena, N., K., 2020. Microgrid: Operation, Control, Monitoring and Protection - Microgrid System. ISBN 978-981-15-1781-5 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-981-15-1781-5>.

SMA 2022a. Operating manual. Sunny Tripower 15000TL/20000TL/25000TL. Saatavissa https://files.sma.de/downloads/STP15-25TL-30-BE-en-18_.pdf . Viitattu 23.5.2022.

Soares, C., 2007. Microturbines: Applications for Distributed Energy Systems. ISBN 13: 978-0-7506-8469-9 E-kirja. Saatavissa EBSCO- eBook tietokannasta.

Solano, J., Rey, J. M., Bastidas-Rodríguez, J. D. & Hernández, A. I., 2019. Microgrids Design and Implementation: Stability Issues in Microgrids. ISBN 978-3-319-98687-6 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-319-98687-6>

Sood, V., K., Ali, M., Y. & Khan, F., 2020. Microgrid: Operation, Control, Monitoring and Protection - Energy Management System of a Microgrid Using Particle Swarm Optimization (PSO) and Communication System. ISBN 978-981-15-1781-5 E-kirja. Saatavissa https://doi.org/10.1007/978-981-15-1781-5_9

Sähkömarkkinalaki 836/1995. Luettu 15.2.2022. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1995/19950386#Lidm45237816569728>

Sähkömarkkinalaki 588/2013. Luettu 15.2.2022. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588#Lidm45237815237424>

Sähköturvallisuuslaki 1135/2016. Luettu 7.3.2022. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161135>

Tabatabaei, N., M., Kabalci, E. & Bizon, N., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Overview of Microgrid. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

TEPA 2022, TEPA-Termipankki. <https://termipankki.fi/tepa/fi/> Viitattu 10.3.2022.

Tiainen, E., 2010. Johdon mitoitus ja suojaus. Sähkö- ja teleurakoitsijaliitto STUL ry, Sähköinfo Oy, Espoo.

Tikka, V., Belonogova, N., Honkapuro, S., Lassila, J., Haakana, J., Lana, A., Romanenko, A., Haapaniemi, J., Narayanan, A., Kaipia, T., Niemelä, H. & Partanen, J., 2018. Multi-objective role of battery energy storages in an energy system. Loppuraportti ISBN 978-952-335-203-2. Saatavissa <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-335-203-2>

Tilastokeskus 2022a. Saatavissa https://www.stat.fi/meta/kas/uusiutuvat_ener.html. Viitattu 20.3.2022.

Tilastokeskus 2022b. Saatavissa https://www.stat.fi/til/asen/2020/asen_2020_2021-12-16_kuv_002_fi.html. Viitattu 26.3.2022.

Tilastokeskus 2022c. Saatavissa https://www.stat.fi/til/asen/2020/asen_2020_2021-12-16_kuv_001_fi.html. Viitattu 26.3.2022.

Ton, D., T. & Smith, M., A., 2012. The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.tej.2012.09.013>

Tukes 2022, Turvallisuus ja kemikaalivirasto (Tukes) – Standardit. Luettu 8.3.2022. Saatavissa <https://tukes.fi/teollisuus/standardit>

Tuulivoimayhdistys 2022a. Saatavissa <https://tuulivoimayhdistys.fi/tietoa-tuulivoimasta-2/pientuulivoima/yleista-pientuulivoimasta>. Viitattu 26.3.2022.

TVO 2022a. Olkiluotoon rakennetaan Euroopan suurimpiin kuuluva akkuenergiavarasto. <https://www.tvoy.fi/ajankohtaista/tiedotteetporssitiedotteet/2021/olkiluotoonrakennetaan-euroopansuurimpiinkuuluva-akkuenergiavarasto.html> Viitattu 19.4.2022.

Uddin, M., Romlie, M. F., Abdullah, M. F., Halim, S.a., Bakar. A.H.A. & Kwang, T. C., 2017. A review on peak load shaving strategies. Artikkele Renewable and Sustainable Energy Reviews 82. Saatavissa <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.056>

Usta, O., T., 2020. Microgrid Architectures, Control and Protection Methods: Microgrid Protection and Automations. ISBN 978-3-030-23723-3 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1007/978-3-030-23723-3>

- Verkostosuositus YA9:13, 2019. Mikrotuotannon liittäminen sähkönjakeluverkkoon. Energiateollisuus ry., Helsinki.
- Vihanninjoki, V., 2015. Hajautettu energiantuotanto Suomessa. Suomen ympäristökeskus SYKE. Luettu 7.3.2022. Saatavissa <http://www.syke.fi/download/noname/%7BDD119785-B537-45DE-AEF0-8360DCAB1BDF%7D/111845>
- VNa 1434/2016, Valtioneuvoston asetus sähkölaitteistosta. Luettu 7.3.2022. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/smur/2016/20161434>
- VNa 1437/2016, Valtioneuvoston asetus sähkölaitteiden turvallisuudesta. Luettu 7.3.2022. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2016/20161437>
- VNa 767/2021, Valtioneuvoston asetus sähköntoimitusten selvityksestä ja mittauksesta. Luettu 2.4.2022. Saatavissa <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2021/20210767>
- VTT 2022a. Polttokenno ja vety. Luettu 4.4.2022. Saatavissa <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/polttokennot-ja-vety>
- VTT 2022b. Ydinenergian tulevaisuus. Luettu 4.4.2022. Saatavissa <https://www.vttresearch.com/fi/palvelut/ydinenergian-tulevaisuus>
- Wong, T. Y., Shum, C., Lau, W. H., Chung, S. H., Tsang, K. F. & Tse, C. F., 2016. Modeling and Co-simulation of IEC61850-Based Microgrid Protection. IEEE artikkeli EISBN: 9781509040759. Saatavissa DOI: 10.1109/SmartGridComm.2016.7778824
- Yu, X., Khambadkone, A. M., Wang, H. & Terence, S. T. S., 2010. IEEE artikkeli 0885-8993. Control of Parallel-Connected Power Converters for Low-Voltage Microgrid—Part I: A Hybrid Control Architecture. Saatavissa <http://ieeexplore.ieee.org>
- Zheng, D., Zhang, W., Alemu, S., N., Wang, P., Bitew, G., T., Wei, D. & Yue, J., 2021. Microgrid Protection and Control. ISBN 978-0-12-821189-2 E-kirja. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/C2019-0-01293-9>
- Zia, M., F., Elbouchikhi, E. & Benbouzid, M., 2018. Microgrids energy management systems - A critical review on methods, solutions, and prospects. Saatavissa <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.04.103>

Liite 1: Kaksi- ja kolmevaiheiset oikosulkuvirtalaskelmat

Oamk hybridilaboratorion verkon oikosulkuimpedanssien ja kolme ja kaksivaiheisten oikosulkuvirtojen käsinlaskelmat

$$S_{k20MAX} := 355 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}$$

$$S_{k20MIN} := 156 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{A}$$

$$U_{k20} := 20.5 \text{ kV}$$

$$c_{1MAX} := 1.1 \quad c_{2MAX} := 1.0$$

$$c_{1MIN} := 1.0 \quad c_{2MIN} := 0.95$$

$$I_{k20MAX} := \frac{S_{k20MAX}}{\sqrt{3} \cdot U_{k20}} = 9.998 \text{ kA}$$

$$I_{k20MIN} := \frac{S_{k20MIN}}{\sqrt{3} \cdot U_{k20}} = 4.393 \text{ kA}$$

$$Z_{k20MAX} := \frac{c_{1MAX} \cdot U_{k20}^2}{S_{k20MAX}} = 1.302 \Omega$$

$$Z_{k20MIN} := \frac{c_{1MIN} \cdot U_{k20}^2}{S_{k20MIN}} = 2.694 \Omega$$

$$I_{k20MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k20MAX} = 8.659 \text{ kA}$$

$$I_{k20MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k20MIN} = 3.805 \text{ kA}$$

KJ-kaapeli kojeistolle

$$l_{AHX} := 200 \text{ m} \quad r_{AHX} := 0.41 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad f := 50 \text{ Hz} \quad L_{AHX} := 0.4 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{AHX} := r_{AHX} \cdot l_{AHX} = 0.082 \Omega$$

$$X_{AHX} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AHX} \cdot l_{AHX} = 0.025 \Omega$$

$$Z_{AHX} := \sqrt{R_{AHX}^2 + X_{AHX}^2} = 0.086 \Omega$$

KJ-kaapeli kojeistolta muuntajan yläjännitelaitteisiin

$$l_{HX} := 5 \text{ m} \quad r_{HX} := 0.69 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L_{HX} := 0.64 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{HX} := r_{HX} \cdot l_{HX} = 0.003 \Omega$$

$$X_{HX} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{HX} \cdot l_{HX} = 0.001 \Omega$$

$$Z_{HX} := \sqrt{R_{HX}^2 + X_{HX}^2} = 0.004 \Omega$$

Oikosulkuvirrat KJ-kojeistolla

$$Z_{KJ_MAX} := Z_{k20MAX} + Z_{AHX} = 1.388 \Omega$$

$$Z_{KJ_MIN} := Z_{k20MIN} + Z_{AHX} = 2.78 \Omega$$

$$I_{kMAX_KJ} := \frac{c_{1MAX} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{KJ_MAX}} = 9.38 \text{ kA}$$

$$I_{kMIN_KJ} := \frac{c_{1MIN} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{KJ_MIN}} = 4.258 \text{ kA}$$

Oikosulkuvirrat muuntajan yläjänniteliittimissä:

$$Z_{K_YJ_MAX} := Z_{k20MAX} + Z_{AHX} + Z_{HX} = 1.392 \, \Omega$$

$$Z_{K_YJ_MIN} := Z_{k20MIN} + Z_{AHX} + Z_{HX} = 2.783 \, \Omega$$

$$I_{kMAX_YJ} := \frac{c_{1MAX} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K_YJ_MAX}} = 9.356 \, kA$$

$$I_{kMIN_YJ} := \frac{c_{1MIN} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K_YJ_MIN}} = 4.252 \, kA$$

$$I_{kMAX_YJ_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kMAX_YJ} = 8.103 \, kA$$

$$I_{kMIN_YJ_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kMIN_YJ} = 3.683 \, kA$$

K-kaapeleiden yhteinen resistanssi, reaktanssi ja impedanssi:

$$R_{kaap20kV} := R_{AHX} + R_{HX} = 0.085 \, \Omega$$

$$X_{kaap20kV} := X_{AHX} + X_{HX} = 0.026 \, \Omega$$

$$Z_{kaap20kV} := Z_{AHX} + Z_{HX} = 0.089 \, \Omega$$

Muuntajan arvot:

$$\begin{aligned} S_{nT} &:= 500 \cdot 10^3 \, V \cdot A & z_{kT} &:= 6.32 \, \% \\ U_{nT1} &:= 20 \, kV & P_k &:= 6.104 \, kW \\ U_{nT2} &:= 400 \, V \end{aligned}$$

$$r_{kT} := \frac{P_k}{S_{nT}} \cdot 100 = 1.221 \, \% \qquad x_{kT} := \sqrt{z_{kT}^2 - r_{kT}^2} = 6.201 \, \%$$

$$Z_{T20kV} := \frac{z_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT1}^2}{S_{nT}} \right) = 50.56 \, \Omega$$

$$Z_{T400V} := \frac{z_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = 0.02 \, \Omega$$

$$R_{T400V} := \frac{r_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (3.907 \cdot 10^{-3}) \, \Omega$$

$$X_{T400V} := \frac{x_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (19.843 \cdot 10^{-3}) \, \Omega$$

Taustaverkon arvojen redusointi toisioon (PJ-verkon jännitetasoon):

$$U_{k400V} := \left(\frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right) \cdot U_{k20} = 0.41 \text{ kV}$$

$$Z_{k400VMAX} := \left(\frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right)^2 \cdot Z_{k20MAX} = (520.873 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$Z_{k400VMIN} := \left(\frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right)^2 \cdot Z_{k20MIN} = (1.078 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

KJ-kaapelien arvojen redusointi toisioon:

$$R'_{AHX} := \left(\frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right)^2 \cdot R_{kaap20kV} = (3.418 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$X'_{AHX} := \left(\frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right)^2 \cdot X_{kaap20kV} = (1.046 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$Z'_{AHX} := \left(\frac{U_{nT2}}{U_{nT1}} \right)^2 \cdot Z_{kaap20kV} = (3.574 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat muuntajan alajännitepuolen liittimissä:

$$Z_{k_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} = (20.781 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{k_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} = (21.337 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{k_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{k_MAX}} = 11.391 \text{ kA}$$

$$I_{k_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{k_MIN}} = 10.539 \text{ kA}$$

$$I_{k_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k_MAX} = 9.865 \text{ kA}$$

$$I_{k_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k_MIN} = 9.127 \text{ kA}$$

Muuntaja-PK2: 2xAXCMK 4x300+88

$$l_{AXC300} := 10 \text{ m} \quad r_{AXC300} := 0.13 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L_{AXC300} := 0.25 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{AXC300} := \frac{r_{AXC300} \cdot l_{AXC300}}{2} = (650 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{AXC300} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC300} \cdot l_{AXC300}}{2} = (392.699 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$Z_{AXC300} := \sqrt{R_{AXC300}^2 + X_{AXC300}^2} = (759.416 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat pääkeskuksella PK2:

$$Z_{kPK2_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} = (21.54 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kPK2_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} = (22.097 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kPK2_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kPK2_MAX}} = 10.989 \text{ kA}$$

$$I_{kPK2_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kPK2_MIN}} = 10.177 \text{ kA}$$

$$I_{kPK2_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kPK2_MAX} = 9.517 \text{ kA}$$

$$I_{kPK2_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kPK2_MIN} = 8.814 \text{ kA}$$

PK2-SOLAR: AMCMK 4x50+16

$$l_{AXC50Solar} := 55 \text{ m} \quad r_{AXC50} := 0.77 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L_{AXC50} := 0.27 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{AXC50Solar} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50Solar} = (42.35 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50Solar} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50Solar} = (4.665 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{AXC50Solar} := \sqrt{R_{AXC50Solar}^2 + X_{AXC50Solar}^2} = (42.606 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat aurinkopaneelien inverttereiden lähellä olevalla jakokeskuksella:

$$Z_{kSolar_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50Solar} = (64.146 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kSolar_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50Solar} = (64.703 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kSolar_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSolar_MAX}} = 3.69 \text{ kA}$$

$$I_{kSolar_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSolar_MIN}} = 3.476 \text{ kA}$$

$$I_{kSolar_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSolar_MAX} = 3.196 \text{ kA}$$

$$I_{kSolar_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSolar_MIN} = 3.01 \text{ kA}$$

PK2-BESS: AMCMK 4x50+16

$$l_{AXC50BESS} := 12 \text{ m}$$

$$R_{AXC50BESS} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50BESS} = (9.24 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50BESS} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50BESS} = (1.018 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{AXC50BESS} := \sqrt{R_{AXC50BESS}^2 + X_{AXC50BESS}^2} = (9.296 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat energiavaraoston vaihtovirtakiskolla:

$$Z_{kBESS_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50BESS} = (30.836 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kBESS_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50BESS} = (31.393 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kBESS_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kBESS_MAX}} = 7.677 \text{ kA}$$

$$I_{kBESS_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kBESS_MIN}} = 7.163 \text{ kA}$$

$$I_{kBESS_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kBESS_MAX} = 6.648 \text{ kA}$$

$$I_{kBESS_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kBESS_MIN} = 6.204 \text{ kA}$$

PK2-SAL1 ja PK2-SAL2: AMCMK 4x50+16

$l_{AXC50SAL1} := 14 \text{ m}$

$l_{AXC50SAL2} := 19 \text{ m}$

$$R_{AXC50SAL1} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL1} = (10.78 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50SAL1} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL1} = (1.188 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{AXC50SAL1} := \sqrt{R_{AXC50SAL1}^2 + X_{AXC50SAL1}^2} = (10.845 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{AXC50SAL2} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL2} = (14.63 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50SAL2} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL2} = (1.612 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{AXC50SAL2} := \sqrt{R_{AXC50SAL2}^2 + X_{AXC50SAL2}^2} = (14.719 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat sähköautojen latauspaikoilla:

$$Z_{kSAL1_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50SAL1} = (32.385 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kSAL1_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50SAL1} = (32.942 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kSAL1_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSAL1_MAX}} = 7.309 \text{ kA}$$

$$I_{kSAL1_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSAL1_MIN}} = 6.826 \text{ kA}$$

$$I_{kSAL1_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSAL1_MAX} = 6.33 \text{ kA}$$

$$I_{kSAL1_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSAL1_MIN} = 5.912 \text{ kA}$$

$$Z_{kSAL2_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50SAL2} = (36.259 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kSAL2_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50SAL2} = (36.815 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kSAL2_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSAL2_MAX}} = 6.528 \text{ kA}$$

$$I_{kSAL2_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSAL2_MIN}} = 6.108 \text{ kA}$$

$$I_{kSAL2_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSAL2_MAX} = 5.654 \text{ kA}$$

$$I_{kSAL2_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSAL2_MIN} = 5.29 \text{ kA}$$

PK2-UPSG: AMCMK 4x50+16

$l_{AXC50UPSG} := 17 \text{ m}$

$R_{AXC50UPSG} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50UPSG} = (13.09 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$X_{AXC50UPSG} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50UPSG} = (1.442 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$Z_{AXC50UPSG} := \sqrt{R_{AXC50UPSG}^2 + X_{AXC50UPSG}^2} = (13.169 \cdot 10^{-3}) \Omega$

Oikosulkuvirrat UPSG:n jakokeskuksessa:

$Z_{kUPSG_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50UPSG} = (34.709 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$Z_{kUPSG_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC50UPSG} = (35.266 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$I_{kUPSG_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSG_MAX}} = 6.82 \text{ kA}$

$I_{kUPSG_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSG_MIN}} = 6.377 \text{ kA}$

$I_{kUPSG_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSG_MAX} = 5.906 \text{ kA}$

$I_{kUPSG_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSG_MIN} = 5.522 \text{ kA}$

PK2-AK1: MML 5x10S

$l_{MMJ10AK1} := 14 \text{ m}$

$r_{MMJ10} := 2.244 \frac{\Omega}{\text{km}}$

$x_{MMJ10} := 0.094 \frac{\Omega}{\text{km}}$

$R_{MMJ10AK1} := r_{MMJ10} \cdot l_{MMJ10AK1} = (31.416 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$X_{MMJ10AK1} := x_{MMJ10} \cdot l_{MMJ10AK1} = (1.316 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$Z_{MMJ10AK1} := \sqrt{R_{MMJ10AK1}^2 + X_{MMJ10AK1}^2} = (31.444 \cdot 10^{-3}) \Omega$

Oikosulkuvirrat sähköjakelun alakeskuksella AK1:

$Z_{kAK1_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{MMJ10AK1} = (52.984 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$Z_{kAK1_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{MMJ10AK1} = (53.54 \cdot 10^{-3}) \Omega$

$I_{kAK1_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kAK1_MAX}} = 4.468 \text{ kA}$

$I_{kAK1_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kAK1_MIN}} = 4.2 \text{ kA}$

$I_{kAK1_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kAK1_MAX} = 3.869 \text{ kA}$

$I_{kAK1_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kAK1_MIN} = 3.637 \text{ kA}$

PK2-Sähkökattila: 5x16S $l_{MMJ16SK} := 33 \text{ m}$

$$r_{MMJ16} := 2.244 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad x_{MMJ16} := 0.094 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_{MMJ16SK} := r_{MMJ16} \cdot l_{MMJ16SK} = (74.052 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MMJ16SK} := x_{MMJ16} \cdot l_{MMJ16SK} = (3.102 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{MMJ16SK} := \sqrt{R_{MMJ16SK}^2 + X_{MMJ16SK}^2} = (74.117 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat sähkökattilan kytkentäkotelossa:

$$Z_{kSK_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{MMJ16SK} = (95.657 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kSK_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{MMJ16SK} = (96.214 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kSK_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSK_MAX}} = 2.475 \text{ kA}$$

$$I_{kSK_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kSK_MIN}} = 2.337 \text{ kA}$$

$$I_{kSK_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSK_MAX} = 2.143 \text{ kA}$$

$$I_{kSK_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kSK_MIN} = 2.024 \text{ kA}$$

PK2-NK5.1: Rinnakkain 2 x AMCMK 4x95+29 $l_{AXC95NK} := 29 \text{ m}$

$$L_{AXC95} := 0.26 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$r_{AXC95} := 0.39 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_{AXC95NK} := \frac{r_{AXC95} \cdot l_{AXC95NK}}{2} = (5.655 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC95NK} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95} \cdot l_{AXC95NK}}{2} = (1.184 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{AXC95NK} := \sqrt{R_{AXC95NK}^2 + X_{AXC95NK}^2} = (5.778 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat nousukeskuksella NK5.1:

$$Z_{kNK_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC95NK} = (27.318 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kNK_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{AHX} + Z_{T400V} + Z_{AXC300} + Z_{AXC95NK} = (27.874 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kNK_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kNK_MAX}} = 8.665 \text{ kA}$$

$$I_{kNK_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kNK_MIN}} = 8.068 \text{ kA}$$

$$I_{kNK_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kNK_MAX} = 7.504 \text{ kA}$$

$$I_{kNK_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kNK_MIN} = 6.987 \text{ kA}$$

Saarekekäyttö: $I_{kUPSG} := 170 \text{ A}$ $U_{kUPSG} := 400 \text{ V}$

$I_{kBESS} := 144 \text{ A}$ $U_{kBESS} := U_{kUPSG} = 400 \text{ V}$

Oikosulkuimpedanssit UPSG ja BESS saarekekäytössä:

$$Z_{kUPSG_J} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot I_{kUPSG}} = 1.358 \text{ } \Omega$$

$$Z_{kBESS_J} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot I_{kBESS}} = 1.604 \text{ } \Omega$$

UPSG-PK2: AMCMK 4x50+16

Kaapelityyppi ja pituus sama, kuin edellä laskettu, käytetään sitä arvoa kaapelin osalta. Oikosulkuvirrat PK2:n kiskolla saarekekäytössä (pelkästään UPSG:llä):

$$Z_{kUPSG_J_{PK2}} := Z_{kUPSG_J} + Z_{AXC50UPSG} = 1.372 \text{ } \Omega$$

$$I_{kUPSG_J_{PK2}_{MAX}} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSG_J_{PK2}}} = 168.368 \text{ A}$$

$$I_{kUPSG_J_{PK2}_{MIN}} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSG_J_{PK2}}} = 159.949 \text{ A}$$

$$I_{kUPSG_J_{PK2}_{MAX}_{2v}} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSG_J_{PK2}_{MAX}} = 145.811 \text{ A}$$

$$I_{kUPSG_J_{PK2}_{MIN}_{2v}} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSG_J_{PK2}_{MIN}} = 138.52 \text{ A}$$

Oikosulkuvirrat nousukeskuksella NK5.1 UPSG-saarekekäytössä:

$$Z_{kUPSG_{NK}} := Z_{kUPSG_J_{PK2}} + Z_{AXC95NK} = 1.377 \text{ } \Omega$$

$$I_{kUPSG_{J_{NK}_{MAX}}} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSG_{NK}}} = 167.662 \text{ A}$$

$$I_{kUPSG_{J_{NK}_{MIN}}} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSG_{NK}}} = 159.279 \text{ A}$$

$$I_{kUPSG_{J_{NK}_{MAX}_{2v}}} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSG_{J_{NK}_{MAX}}} = 145.199 \text{ A}$$

$$I_{kUPSG_{J_{NK}_{MIN}_{2v}}} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSG_{J_{NK}_{MIN}}} = 137.939 \text{ A}$$

BESS-PK2: AMCMK 4x50+16

*Kaapelityyppi ja pituus sama, kuin edellä laskettu, käytetään sitä arvoa kaapelin osalta.
Oikosulkuvirrat PK2:n kiskolla saarekekäytössä (pelkästään BESS:llä):*

$$Z_{kBESS_J_PK2} := Z_{kBESS_J} + Z_{AXC50BESS} = 1.613 \, \Omega$$

$$I_{kBESS_J_PK2_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kBESS}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kBESS_J_PK2}} = 143.17 \, A$$

$$I_{kBESS_J_PK2_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{kBESS}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kBESS_J_PK2}} = 136.012 \, A$$

Oikosulkuvirrat nousukeskuksella NK5.1 BESS-saarekekäytössä:

$$Z_{kBESS_NK} := Z_{kBESS_J_PK2} + Z_{AXC95NK} = 1.619 \, \Omega$$

$$I_{kBESS_J_NK_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kBESS_NK}} = 142.659 \, A$$

$$I_{kBESS_J_NK_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kBESS_NK}} = 135.526 \, A$$

$$I_{kBESS_J_NK_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kBESS_J_NK_MAX} = 123.546 \, A$$

$$I_{kBESS_J_NK_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kBESS_J_NK_MIN} = 117.369 \, A$$

Oikosulkuimpedanssi ja virta PK2:lla, jos UPSG ja BESS ovat yhtäaikaan päällä:

$$Z_{kUPSGBESS} := \frac{Z_{kUPSG_NK} \cdot Z_{kBESS_NK}}{(Z_{kUPSG_NK} + Z_{kBESS_NK})} = 0.744 \, \Omega$$

$$I_{kUPSGBESS_J_PK2_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kBESS}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSGBESS}} = 310.321 \, A$$

$$I_{kUPSGBESS_J_PK2_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{kBESS}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSGBESS}} = 294.805 \, A$$

$$I_{kUPSGBESS_J_PK2_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSGBESS_J_PK2_MAX} = 268.746 \, A$$

$$I_{kUPSGBESS_J_PK2_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSGBESS_J_PK2_MIN} = 255.308 \, A$$

Oikosulkuvirrat nousukeskuksella NK5.1, jos UPSG ja BESS ovat saarekekäytössä yhtäaikaisesti:

$$Z_{kUPSGBESS_NK} := Z_{kUPSGBESS} + Z_{AXC95NK} = 0.75 \, \Omega$$

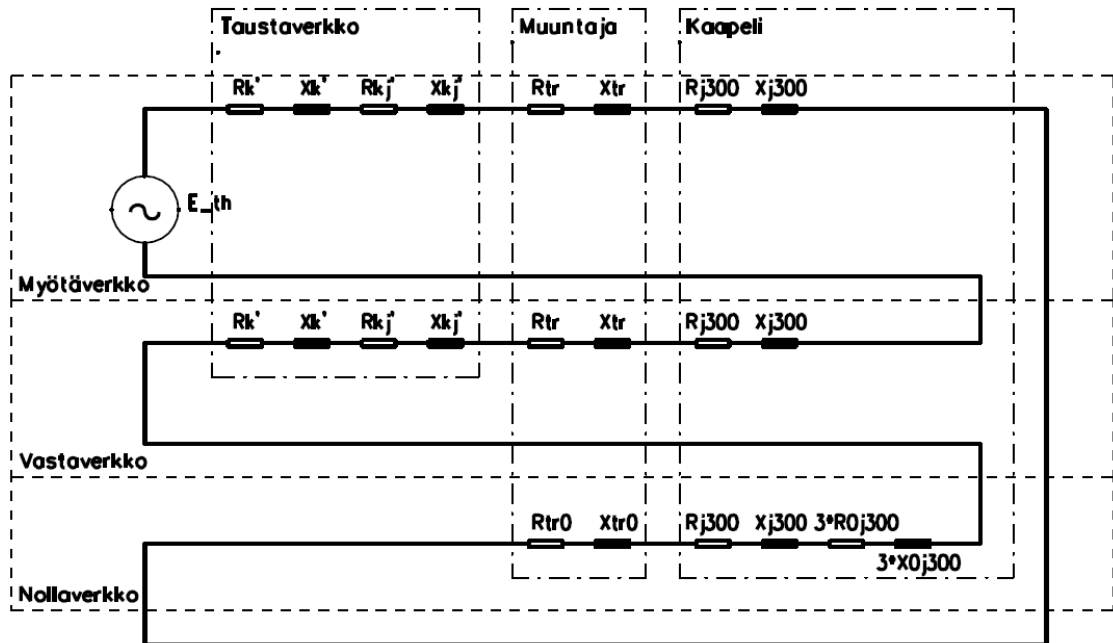
$$I_{kUPSGBESS_J_NK_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSGBESS_NK}} = 307.93 \, A$$

$$I_{kUPSGBESS_J_NK_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot Z_{kUPSGBESS_NK}} = 292.534 \, A$$

$$I_{kUPSGBESS_J_NK_MAX_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSGBESS_J_NK_MAX} = 266.675 \, A$$

$$I_{kUPSGBESS_J_PK2_MIN_2v} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{kUPSGBESS_J_NK_MIN} = 253.342 \, A$$

Liite 2: Yksivaiheisten oikosulkuvirtojen laskelmat.



Kuva 1. Komponentein kuvattu sijaiskytkentäperiaate verkkoon kytketyssä tilassa yksivaiheisessa oikosulkuvikatapauksessa pääkeskuksella PK2.

Komponenttiverkossa esitetyt komponentit ovat:

R_k' Taustaverkon redusoitu resistanssi

X_k' Taustaverkon redusoitu reaktanssi

R_{kj}' Keskijännitekaapelin redusoitu resistanssi

X_{kj}' Keskijännitekaapelin redusoitu reaktanssi

R_{tr} Muuntajan resistanssi

X_{tr} Muuntajan reaktanssi

R_{tr0} Muuntajan nollaresistanssi

X_{tr0} Muuntajan nollareaktanssi

R_{j300} Muuntajan ja pääkeskuksen PK2 välisen syöttökaapelin vaihejohtimen resistanssi

- X_{j300} Muuntajan ja pääkeskuksen PK2 välisen syöttökaapelin vaihejohtimen reaktanssi
- R_{0j300} Muuntajan ja pääkeskuksen PK2 välisen syöttökaapelin vikavirran paluujohtimen (nollajohdin) resistanssi
- X_{0j300} Muuntajan ja pääkeskuksen PK2 välisen syöttökaapelin vikavirran paluujohtimen (nollajohdin) resistanssi

Yksivaiheiset vikavirtalaskelmat (myötä-vasta-nollaverkkovaikutukset)

$$\begin{aligned} S_{k20MAX} &:= 355 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{A} \\ S_{k20MIN} &:= 156 \cdot 10^6 \text{ V} \cdot \text{A} \\ U_{k20} &:= 20.5 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{1MAX} &:= 1.1 & c_{2MAX} &:= 1.0 \\ c_{1MIN} &:= 1.0 & c_{2MIN} &:= 0.95 \end{aligned}$$

$$I_{k20MAX} := \frac{S_{k20MAX}}{\sqrt{3} \cdot U_{k20}} = 9.998 \text{ kA}$$

$$I_{k20MIN} := \frac{S_{k20MIN}}{\sqrt{3} \cdot U_{k20}} = 4.393 \text{ kA}$$

$$Z_{k20MAX} := \frac{c_{1MAX} \cdot U_{k20}^2}{S_{k20MAX}} = 1.302 \text{ } \Omega$$

$$Z_{k20MIN} := \frac{c_{1MIN} \cdot U_{k20}^2}{S_{k20MIN}} = 2.694 \text{ } \Omega$$

$$X_{k20MAX} := 0.995 \cdot Z_{k20MAX} = 1.296 \text{ } \Omega$$

$$X_{k20MIN} := 0.995 \cdot Z_{k20MIN} = 2.68 \text{ } \Omega$$

$$R_{k20MAX} := 0.1 \cdot X_{k20MAX} = 0.13 \text{ } \Omega$$

$$R_{k20MIN} := 0.1 \cdot X_{k20MIN} = 0.268 \text{ } \Omega$$

Taustaverkon arvojen redusointi toisioon (PJ-verkon jännitetasoon):

$$\mu := \frac{400}{20000} \quad U_{k400V} := \mu \cdot U_{k20} = 0.41 \text{ kV}$$

$$Z_{k400VMAX} := \mu^2 \cdot Z_{k20MAX} = (520.873 \cdot 10^{-6}) \text{ } \Omega$$

$$Z_{k400VMIN} := \mu^2 \cdot Z_{k20MIN} = (1.078 \cdot 10^{-3}) \text{ } \Omega$$

$$X_{k400VMAX} := \mu^2 \cdot X_{k20MAX} = (518.269 \cdot 10^{-6}) \text{ } \Omega$$

$$X_{k400VMIN} := \mu^2 \cdot X_{k20MIN} = (1.072 \cdot 10^{-3}) \text{ } \Omega$$

$$R_{k400VMAX} := \mu^2 \cdot R_{k20MAX} = (51.827 \cdot 10^{-6}) \text{ } \Omega$$

$$R_{k400VMIN} := \mu^2 \cdot R_{k20MIN} = (107.218 \cdot 10^{-6}) \text{ } \Omega$$

KJ-kaapeli kojeistolle

$$l_{AHX} := 200 \text{ m} \quad r_{AHX} := 0.41 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad f := 50 \text{ Hz} \quad L_{AHX} := 0.4 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{AHX} := r_{AHX} \cdot l_{AHX} = 0.082 \Omega$$

$$X_{AHX} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AHX} \cdot l_{AHX} = 0.025 \Omega$$

$$Z_{AHX} := \sqrt{R_{AHX}^2 + X_{AHX}^2} = 0.086 \Omega$$

KJ-kaapeli kojeistolta muuntajan yläjänniteliittimiin

$$l_{HX} := 5 \text{ m} \quad r_{HX} := 0.69 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L_{HX} := 0.64 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{HX} := r_{HX} \cdot l_{HX} = 0.003 \Omega$$

$$X_{HX} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{HX} \cdot l_{HX} = 0.001 \Omega$$

$$Z_{HX} := \sqrt{R_{HX}^2 + X_{HX}^2} = 0.004 \Omega$$

Oikosulkuvirrat KJ-kojeistolla

$$Z_{K,KJ_MAX} := Z_{k20MAX} + Z_{AHX} = 1.388 \Omega$$

$$Z_{K,KJ_MIN} := Z_{k20MIN} + Z_{AHX} = 2.78 \Omega$$

$$I_{kMAX_KJ} := \frac{c_{1MAX} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K,KJ_MAX}} = 9.38 \text{ kA}$$

$$I_{kMIN_KJ} := \frac{c_{1MIN} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K,KJ_MIN}} = 4.258 \text{ kA}$$

Oikosulkuvirrat muuntajan yläjänniteliittimissä:

$$Z_{K,YJ_MAX} := Z_{k20MAX} + Z_{AHX} + Z_{HX} = 1.392 \Omega$$

$$Z_{K,YJ_MIN} := Z_{k20MIN} + Z_{AHX} + Z_{HX} = 2.783 \Omega$$

$$I_{kMAX_YJ} := \frac{c_{1MAX} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K,YJ_MAX}} = 9.356 \text{ kA}$$

$$I_{kMIN_YJ} := \frac{c_{1MIN} \cdot U_{k20}}{\sqrt{3} \cdot Z_{K,YJ_MIN}} = 4.252 \text{ kA}$$

KJ-kaapeleiden yhteinen resistanssi, reaktanssi ja impedanssi:

$$R_{kaap20kV} := R_{AHX} + R_{HX} = 0.085 \Omega$$

$$X_{kaap20kV} := X_{AHX} + X_{HX} = 0.026 \Omega$$

$$Z_{kaap20kV} := Z_{AHX} + Z_{HX} = 0.089 \Omega$$

KJ-kaapeliin arvojen redusointi toisioon:

$$R'_{j20kV} := \mu^2 \cdot R_{kaap20kV} = (3.418 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$X'_{j20kV} := \mu^2 \cdot X_{kaap20kV} = (1.046 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$Z'_{j20kV} := \mu^2 \cdot Z_{kaap20kV} = (3.574 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

Muuntajan arvot:

$$\begin{array}{lll} S_{nT} := 500 \cdot 10^3 \text{ V} \cdot \text{A} & z_{kT} := 6.32 \text{ ‰} & z_{dT} := 1.2 \cdot z_{kT} = 7.584 \text{ ‰} \\ U_{nT1} := 20 \text{ kV} & P_k := 6.104 \text{ kW} & \\ U_{nT2} := 400 \text{ V} & P_0 := 889.45 \text{ W} & \end{array}$$

$$r_{kT} := \frac{P_k}{S_{nT}} \cdot 100 = 1.221 \text{ ‰} \quad x_{kT} := \sqrt{z_{kT}^2 - r_{kT}^2} = 6.201 \text{ ‰}$$

$$Z_{T20kV} := \frac{z_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT1}^2}{S_{nT}} \right) = 50.56 \Omega$$

$$Z_{T400V} := \frac{z_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = 0.02 \Omega$$

$$R_{T400V} := \frac{r_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (3.907 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{T400V} := \frac{x_{kT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (19.843 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$r_{dT} := \frac{P_0}{S_{nT}} \cdot 100 = 0.178 \text{ ‰} \quad x_{dT} := \sqrt{z_{dT}^2 - r_{dT}^2} = 7.582 \text{ ‰}$$

$$Z_{dT20kV} := \frac{z_{dT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT1}^2}{S_{nT}} \right) = 60.672 \Omega$$

$$Z_{dT400V} := \frac{z_{dT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (24.269 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{dT400V} := \frac{r_{dT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (569.248 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{dT400V} := \frac{x_{dT}}{100} \cdot \left(\frac{U_{nT2}^2}{S_{nT}} \right) = (24.262 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Oikosulkuvirrat muuntajan alajännitepuolen liittimissä:

Resistanssien ja reaktanssien avulla laskettuna:

$$R_{k_MAX} := R_{k400VMAX} + R'_{j20kV} + R_{T400V} = (3.993 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{k_MIN} := R_{k400VMIN} + R'_{j20kV} + R_{T400V} = (4.048 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{k_MAX} := X_{k400VMAX} + X'_{j20kV} + X_{T400V} = (20.372 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{k_MIN} := X_{k400VMIN} + X'_{j20kV} + X_{T400V} = (20.926 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{k_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{k_MAX}^2 + X_{k_MAX}^2}} = 11.403 \text{ kA}$$

$$I_{k_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{k_MIN}^2 + X_{k_MIN}^2}} = 10.551 \text{ kA}$$

Impedanssien avulla laskettuna:

$$Z_{k_MAX} := Z_{k400VMAX} + Z'_{j20kV} + Z_{T400V} = (20.781 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{k_MIN} := Z_{k400VMIN} + Z'_{j20kV} + Z_{T400V} = (21.337 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{k_MAX} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{k_MAX}} = 11.391 \text{ kA}$$

$$I_{k_MIN} := \frac{c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{\sqrt{3} \cdot Z_{k_MIN}} = 10.539 \text{ kA}$$

Muuntaja-PK2: 2 x AXCMK 4x300+88

$$l_{AXC300} := 10 \text{ m} \quad r_{AXC300} := 0.13 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L_{AXC300} := 0.25 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$r_{AXC300_0} := 0.13 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad L_{AXC300_{PE}} := 0.24 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$r_{AXC300_{PE}} := 0.242 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

Vaihejohtimen arvot:

$$R_{AXC300} := \frac{r_{AXC300} \cdot l_{AXC300}}{2} = (650 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{AXC300} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC300} \cdot l_{AXC300}}{2} = (392.699 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$Z_{AXC300} := \sqrt{R_{AXC300}^2 + X_{AXC300}^2} = (759.416 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

Paluutien arvot:

HUOM! Yksivaiheisessa oikosulussa voi tapahtua vaiheen ja nollan välinen tai vaiheen ja suojamaan (PE) välinen pien-impedanssinen vika, joten tarkastelu tehdään tässä yhteydessä molempien tapausten mukaan.

$$R_{AXC300_0j} := R_{AXC300} = (650 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{AXC300_0j} := X_{AXC300} = (392.699 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$R_{AXC300_{PEj}} := \frac{r_{AXC300_{PE}} \cdot l_{AXC300}}{2} = (1.21 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC300_{PEj}} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC300_{PE}} \cdot l_{AXC300}}{2} = (376.991 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

Myötäverkon komponentit

$$R_{MyMAX} := R_{k400VMAX} + R'_{j20kV} + R_{T400V} + R_{AXC300} = (4.643 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{MyMIN} := R_{k400VMIN} + R'_{j20kV} + R_{T400V} + R_{AXC300} = (4.698 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MyMAX} := X_{k400VMAX} + X'_{j20kV} + X_{T400V} + X_{AXC300} = (20.765 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MyMIN} := X_{k400VMIN} + X'_{j20kV} + X_{T400V} + X_{AXC300} = (21.318 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Vastaverkon komponentit

$$R_{VaMAX} := R_{k400VMAX} + R'_{j20kV} + R_{T400V} + R_{AXC300} = (4.643 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{VaMIN} := R_{k400VMIN} + R'_{j20kV} + R_{T400V} + R_{AXC300} = (4.698 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VaMAX} := X_{k400VMAX} + X'_{j20kV} + X_{T400V} + X_{AXC300} = (20.765 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VaMIN} := X_{k400VMIN} + X'_{j20kV} + X_{T400V} + X_{AXC300} = (21.318 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Nollaverkon komponentit

$$R_{0v0j} := R_{0T400V} + R_{AXC300} + 3 \cdot (R_{AXC300_0j}) = (3.169 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{0vPEj} := R_{0T400V} + R_{AXC300} + 3 \cdot (R_{AXC300_PEj}) = (4.849 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{0v0j} := X_{0T400V} + X_{AXC300} + 3 \cdot (X_{AXC300_0j}) = (25.833 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{0vPEj} := X_{0T400V} + X_{AXC300} + 3 \cdot (X_{AXC300_PEj}) = (25.786 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Komponenttiverkon vikaresistanssit ja -reaktanssit nolla- ja suojajohdin piirin kautta:

$$R_{MAX_1vVIKA_0} := R_{MyMAX} + R_{VaMAX} + R_{0v0j} = (12.454 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{MIN_1vVIKA_0} := R_{MyMIN} + R_{VaMIN} + R_{0v0j} = (12.565 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{MAX_1vVIKA_PE} := R_{MyMAX} + R_{VaMAX} + R_{0vPEj} = (14.134 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{MIN_1vVIKA_PE} := R_{MyMIN} + R_{VaMIN} + R_{0vPEj} = (14.245 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MAX_1vVIKA_0} := X_{MyMAX} + X_{VaMAX} + X_{0v0j} = (67.362 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MIN_1vVIKA_0} := X_{MyMIN} + X_{VaMIN} + X_{0v0j} = (68.47 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MAX_1vVIKA_PE} := X_{MyMAX} + X_{VaMAX} + X_{0v0j} = (67.362 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MIN_1vVIKA_PE} := X_{MyMIN} + X_{VaMIN} + X_{0v0j} = (68.47 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Vian aikainen impedanssi sekä vikavirta pääkeskuksella PK2, kun vikavirta palaa

- 1) nollajohtoja pitkin ja oikosulkuteho on suurimmillaan
- 2) suojajohtinta (PE) pitkin ja oikosulkuteho on suurimmillaan
- 3) nollajohtoja pitkin ja oikosulkuteho on pienimmillään
- 4) suojajohtinta (PE) pitkin ja oikosulkuteho on pienimmillään

$$Z_{MAX_PK2_1v_0j} := \sqrt{R_{MAX_1vVIKA_0}^2 + X_{MAX_1vVIKA_0}^2} = (68.504 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kPK2_MAX_1v0} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{Z_{MAX_PK2_1v_0j}} = 10.366 \text{ kA}$$

$$Z_{MAX_PK2_1v_PEj} := \sqrt{R_{MAX_1vVIKA_PE}^2 + X_{MAX_1vVIKA_PE}^2} = (68.829 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kPK2_MAX_1vPE} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MAX} \cdot U_{k400V}}{Z_{MAX_PK2_1v_PEj}} = 10.317 \text{ kA}$$

$$Z_{MIN_PK2_1v_0j} := \sqrt{R_{MIN_1vVIKA_0}^2 + X_{MIN_1vVIKA_0}^2} = (69.613 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kPK2_MIN_1v0} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{Z_{MIN_PK2_1v_0j}} = 9.691 \text{ kA}$$

$$Z_{MIN_PK2_1v_PEj} := \sqrt{R_{MIN_1vVIKA_PE}^2 + X_{MIN_1vVIKA_PE}^2} = (69.936 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{kPK2_MIN_1vPE} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{Z_{MIN_PK2_1v_PEj}} = 9.646 \text{ kA}$$

Tästä eteenpäin laskettu arvot vain maksimi-impedanssiarvoilla, joilla saadaan pienimmät minimioikosulkuvirtatulokset, kun vikavirta palaa nolla- tai suojajohtinta pitkin takaisin.

PK2 1-v pistorasia: ML 3x2.5S

Keskukseen kannessa olevan pistorasian minimioikosulkuvirran laskenta.

$$\begin{aligned} r_{ML2.5} &:= 8.77 \frac{\Omega}{\text{km}} & x_{ML2.5} &:= 0.11 \frac{\Omega}{\text{km}} & l_{ML2.5} &:= 2 \text{ m} \\ r_{ML16} &:= 1.415 \frac{\Omega}{\text{km}} & x_{ML16} &:= 0.090 \frac{\Omega}{\text{km}} & l_{ML16} &:= 2 \text{ m} \end{aligned}$$

$$R_{ML2.5} := r_{ML2.5} \cdot l_{ML2.5} = (17.54 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{ML2.5} := x_{ML2.5} \cdot l_{ML2.5} = (220 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$R_{ML16} := r_{ML16} \cdot l_{ML16} = (2.83 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{ML16} := x_{ML16} \cdot l_{ML16} = (180 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_PK2_PR} := R_{M_{yMIN}} + R_{ML16} + R_{ML2.5} = (25.068 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_PK2_PR} := X_{M_{yMIN}} + X_{ML16} + X_{ML2.5} = (21.718 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_PK2_PR} := R_{MV_PK2_PR} = (25.068 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_PK2_PR} := X_{MV_PK2_PR} = (21.718 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_PK2_PR_{0j}} := R_{0_{0j}} + R_{ML16} + R_{ML2.5} + 3 \cdot (R_{ML16} + R_{ML2.5}) = (84.649 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_PK2_PR_{PE}} := R_{0_{PEj}} + R_{ML16} + R_{ML2.5} + 3 \cdot (R_{ML16} + R_{ML2.5}) = (86.329 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_PK2_PR_{0j}} := X_{0_{0j}} + X_{ML16} + X_{ML2.5} + 3 \cdot (X_{ML16} + X_{ML2.5}) = (27.433 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_PK2_PR_{PE}} := X_{0_{PEj}} + X_{ML16} + X_{ML2.5} + 3 \cdot (X_{ML16} + X_{ML2.5}) = (27.386 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit pistorasiolla:

$$Z_{MV_PK2_PR} := \sqrt{(R_{MV_PK2_PR})^2 + (X_{MV_PK2_PR})^2} = (33.168 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_PK2_PR} := \sqrt{(R_{VV_PK2_PR})^2 + (X_{VV_PK2_PR})^2} = (33.168 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_PK2_PR} := \sqrt{(R_{NV_PK2_PR_{PE}})^2 + (X_{NV_PK2_PR_{PE}})^2} = (90.569 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kok} := Z_{MV_PK2_PR} + Z_{VV_PK2_PR} + Z_{NV_PK2_PR} = (156.904 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_PK2_PR} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_PK2_PR} + Z_{VV_PK2_PR} + Z_{NV_PK2_PR})} = 4299.655 \text{ A}$$

MV:

$$R_{MV_PK2_kisko} := R_{MyMIN} + R_{ML16} = (7.528 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_PK2_kisko} := X_{MyMIN} + X_{ML16} = (21.498 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_PK2_kisko} := R_{MV_PK2_kisko} = (7.528 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_PK2_kisko} := X_{MV_PK2_kisko} = (21.498 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_PK2_kisko_0j} := R_{0v0j} + R_{ML16} + 3 \cdot (R_{ML16}) = (14.489 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_PK2_kisko_PE} := R_{0vPEj} + R_{ML16} + 3 \cdot (R_{ML16}) = (16.169 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_PK2_kisko_0j} := X_{0v0j} + X_{ML16} + 3 \cdot (X_{ML16}) = (26.553 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_PK2_kisko_PE} := X_{0vPEj} + X_{ML16} + 3 \cdot (X_{ML16}) = (26.506 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit johdonsuojatkaisijan kiskolla:

$$Z_{MV_PK2_kisko} := \sqrt{(R_{MV_PK2_kisko})^2 + (X_{MV_PK2_kisko})^2} = (22.778 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_PK2_kisko} := \sqrt{(R_{VV_PK2_kisko})^2 + (X_{VV_PK2_kisko})^2} = (22.778 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_PK2_kisko} := \sqrt{(R_{NV_PK2_kisko_PE})^2 + (X_{NV_PK2_kisko_PE})^2} = (31.048 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{kisko} := Z_{MV_PK2_kisko} + Z_{VV_PK2_kisko} + Z_{NV_PK2_kisko} = (76.605 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_PK2_kisko} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_PK2_kisko} + Z_{VV_PK2_kisko} + Z_{NV_PK2_kisko})} = 8806.647 \text{ A}$$

PK2-SOLAR: AXCMK 4x50+16

$$l_{AXC50Solar} := 55 \text{ m}$$

$$r_{AXC50} := 0.77 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad r_{AXC50_0} := r_{AXC50} \quad r_{AXC50_PE} := 1.38 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$L_{AXC50} := 0.27 \frac{\text{mH}}{\text{km}} \quad L_{AXC50_PE} := 0.26 \frac{\text{mH}}{\text{km}}$$

$$R_{AXC50_Solar} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50Solar} = (42.35 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC50_Solar_0} := R_{AXC50_Solar}$$

$$R_{AXC50_Solar_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50Solar} = (75.9 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50_Solar} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50Solar} = (4.665 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC50_Solar_0} := X_{AXC50_Solar}$$

$$X_{AXC50_Solar_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50Solar} = (4.492 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_Solar} := R_{MyMIN} + R_{AXC50_Solar} = (47.048 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_Solar} := X_{MyMIN} + X_{AXC50_Solar} = (25.984 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_Solar} := R_{VaMIN} + R_{AXC50_Solar} = (47.048 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_Solar} := X_{VaMIN} + X_{AXC50_Solar} = (25.984 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_Solar_0j} := R_{0v0j} + R_{AXC50_Solar} + 3 \cdot R_{AXC50_Solar_0} = (172.569 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_Solar_PEj} := R_{0vPEj} + R_{AXC50_Solar} + 3 \cdot R_{AXC50_Solar_PE} = (274.899 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_Solar_0j} := X_{0v0j} + X_{AXC50_Solar} + 3 \cdot X_{AXC50_Solar_0} = (44.494 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_Solar_PEj} := X_{0vPEj} + X_{AXC50_Solar} + 3 \cdot X_{AXC50_Solar_PE} = (43.928 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_Solar} := \sqrt{(R_{MV_Solar})^2 + (X_{MV_Solar})^2} = (53.746 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_Solar} := \sqrt{(R_{VV_Solar})^2 + (X_{VV_Solar})^2} = (53.746 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_Solar} := \sqrt{(R_{NV_Solar_PE})^2 + (X_{NV_Solar_PE})^2} = (278.387 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_Solar} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_Solar} + Z_{VV_Solar} + Z_{NV_Solar})} = 1748.301 \text{ A}$$

PK2-BESS: AMCMK 4x50+16

$$l_{AXC50BESS} := 12 \text{ m}$$

$$R_{AXC50_BESS} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50BESS} = (9.24 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC50_BESS_0} := R_{AXC50_BESS}$$

$$R_{AXC50_BESS_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50BESS} = (16.56 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50_BESS} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50BESS} = (1.018 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC50_BESS_0} := X_{AXC50_BESS}$$

$$X_{AXC50_BESS_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50BESS} = (980.177 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_BESS} := R_{MjMIN} + R_{AXC50_BESS} = (13.938 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_BESS} := X_{MjMIN} + X_{AXC50_BESS} = (22.336 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_BESS} := R_{VjMIN} + R_{AXC50_BESS} = (13.938 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_BESS} := X_{VjMIN} + X_{AXC50_BESS} = (22.336 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_BESS_0j} := R_{0v0j} + R_{AXC50_BESS} + 3 \cdot R_{AXC50_BESS_0} = (40.129 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_BESS_PE} := R_{0vPEj} + R_{AXC50_BESS} + 3 \cdot R_{AXC50_BESS_PE} = (63.769 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_BESS_0j} := X_{0v0j} + X_{AXC50_BESS} + 3 \cdot X_{AXC50_BESS_0} = (29.904 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_BESS_PE} := X_{0vPEj} + X_{AXC50_BESS} + 3 \cdot X_{AXC50_BESS_PE} = (29.744 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_BESS} := \sqrt{(R_{MV_BESS})^2 + (X_{MV_BESS})^2} = (26.328 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_BESS} := \sqrt{(R_{VV_BESS})^2 + (X_{VV_BESS})^2} = (26.328 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_BESS} := \sqrt{(R_{NV_BESS_PE})^2 + (X_{NV_BESS_PE})^2} = (70.365 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_BESS} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_BESS} + Z_{VV_BESS} + Z_{NV_BESS})} = 5483.867 \text{ A}$$

PK2-SAL1: AMCMK 4x50+16

$$l_{AXC50SAL1} := 14 \text{ m}$$

$$R_{AXC50_SAL1} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL1} = (10.78 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC50_SAL1_0} := R_{AXC50_SAL1}$$

$$R_{AXC50_SAL1_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50SAL1} = (19.32 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50_SAL1} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL1} = (1.188 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC50_SAL1_0} := X_{AXC50_SAL1}$$

$$X_{AXC50_SAL1_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50SAL1} = (1.144 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_SAL1} := R_{MgMIN} + R_{AXC50_SAL1} = (15.478 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_SAL1} := X_{MgMIN} + X_{AXC50_SAL1} = (22.506 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_SAL1} := R_{VgMIN} + R_{AXC50_SAL1} = (15.478 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_SAL1} := X_{VgMIN} + X_{AXC50_SAL1} = (22.506 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_SAL1_0j} := R_{0v0j} + R_{AXC50_SAL1} + 3 \cdot R_{AXC50_SAL1_0} = (46.289 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_SAL1_PE} := R_{0vPEj} + R_{AXC50_SAL1} + 3 \cdot R_{AXC50_SAL1_PE} = (73.589 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_SAL1_0j} := X_{0v0j} + X_{AXC50_SAL1} + 3 \cdot X_{AXC50_SAL1_0} = (30.583 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_SAL1_PE} := X_{0vPEj} + X_{AXC50_SAL1} + 3 \cdot X_{AXC50_SAL1_PE} = (30.404 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_SAL1} := \sqrt{(R_{MV_SAL1})^2 + (X_{MV_SAL1})^2} = (27.315 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_SAL1} := \sqrt{(R_{VV_SAL1})^2 + (X_{VV_SAL1})^2} = (27.315 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_SAL1} := \sqrt{(R_{NV_SAL1_PE})^2 + (X_{NV_SAL1_PE})^2} = (79.623 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_SAL1} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_SAL1} + Z_{VV_SAL1} + Z_{NV_SAL1})} = 5025.136 \text{ A}$$

PK2-SAL2: AMCMK 4x50+16

$$l_{AXC50SAL2} := 19 \text{ m}$$

$$R_{AXC50_SAL2} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL2} = (14.63 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC50_SAL2,0} := R_{AXC50_SAL2}$$

$$R_{AXC50_SAL2_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50SAL2} = (26.22 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50_SAL2} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50SAL2} = (1.612 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC50_SAL2,0} := X_{AXC50_SAL2}$$

$$X_{AXC50_SAL2_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50SAL2} = (1.552 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_SAL2} := R_{MyMIN} + R_{AXC50_SAL2} = (19.328 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_SAL2} := X_{MyMIN} + X_{AXC50_SAL2} = (22.93 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_SAL2} := R_{VaMIN} + R_{AXC50_SAL2} = (19.328 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_SAL2} := X_{VaMIN} + X_{AXC50_SAL2} = (22.93 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_SAL2,0j} := R_{0v0j} + R_{AXC50_SAL2} + 3 \cdot R_{AXC50_SAL2,0} = (61.689 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_SAL2_PE} := R_{0vPEj} + R_{AXC50_SAL2} + 3 \cdot R_{AXC50_SAL2_PE} = (98.139 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_SAL2,0j} := X_{0v0j} + X_{AXC50_SAL2} + 3 \cdot X_{AXC50_SAL2,0} = (32.279 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_SAL2_PE} := X_{0vPEj} + X_{AXC50_SAL2} + 3 \cdot X_{AXC50_SAL2_PE} = (32.053 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_SAL2} := \sqrt{(R_{MV_SAL2})^2 + (X_{MV_SAL2})^2} = (29.989 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_SAL2} := \sqrt{(R_{VV_SAL2})^2 + (X_{VV_SAL2})^2} = (29.989 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_SAL2} := \sqrt{(R_{NV_SAL2_PE})^2 + (X_{NV_SAL2_PE})^2} = (103.241 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{Ik_SAL2} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_SAL2} + Z_{VV_SAL2} + Z_{NV_SAL2})} = 4133.286 \text{ A}$$

$$\underline{PK2-UPSG: AMCMK 4x50+16} \quad l_{AXC50UPSG} := 17 \text{ m}$$

$$R_{AXC50_UPSG} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50UPSG} = (13.09 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC50_UPSG_0} := R_{AXC50_UPSG}$$

$$R_{AXC50_UPSG_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50UPSG} = (23.46 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50_UPSG} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50UPSG} = (1.442 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC50_UPSG_0} := X_{AXC50_UPSG}$$

$$X_{AXC50_UPSG_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50UPSG} = (1.389 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_UPSG} := R_{M\phi MIN} + R_{AXC50_UPSG} = (17.788 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_UPSG} := X_{M\phi MIN} + X_{AXC50_UPSG} = (22.76 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_UPSG} := R_{V\phi MIN} + R_{AXC50_UPSG} = (17.788 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_UPSG} := X_{V\phi MIN} + X_{AXC50_UPSG} = (22.76 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_UPSG_0j} := R_{0\phi 0j} + R_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot R_{AXC50_UPSG_0} = (55.529 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_UPSG_PE} := R_{0\phi PEj} + R_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot R_{AXC50_UPSG_PE} = (88.319 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_UPSG_0j} := X_{0\phi 0j} + X_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot X_{AXC50_UPSG_0} = (31.601 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_UPSG_PE} := X_{0\phi PEj} + X_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot X_{AXC50_UPSG_PE} = (31.394 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_UPSG} := \sqrt{(R_{MV_UPSG})^2 + (X_{MV_UPSG})^2} = (28.887 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_UPSG} := \sqrt{(R_{VV_UPSG})^2 + (X_{VV_UPSG})^2} = (28.887 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_UPSG} := \sqrt{(R_{NV_UPSG_PE})^2 + (X_{NV_UPSG_PE})^2} = (93.733 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_UPSG} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_UPSG} + Z_{VV_UPSG} + Z_{NV_UPSG})} = 4452.838 \text{ A}$$

PK2-AK1: MMJ 5x10S

$$l_{MMJ10_AK1} := 14 \text{ m}$$

$$r_{MMJ10} := 2.244 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad x_{MMJ10} := 0.094 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_{MMJ10_AK1} := r_{MMJ10} \cdot l_{MMJ10_AK1} = (31.416 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{MMJ10_AK1_PE} := R_{MMJ10_AK1} = (31.416 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MMJ10_AK1} := x_{MMJ10} \cdot l_{MMJ10_AK1} = (1.316 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MMJ10_AK1_PE} := X_{MMJ10_AK1} = (1.316 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_AK1} := R_{M_yMIN} + R_{MMJ10_AK1} = (36.114 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_AK1} := X_{M_yMIN} + X_{MMJ10_AK1} = (22.634 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_AK1} := R_{V_aMIN} + R_{MMJ10_AK1} = (36.114 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_AK1} := X_{V_aMIN} + X_{MMJ10_AK1} = (22.634 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_AK1_0j} := R_{0_{0j}} + R_{MMJ10_AK1} + 3 \cdot R_{MMJ10_AK1_PE} = (128.833 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_AK1_PE} := R_{0_{0PEj}} + R_{MMJ10_AK1} + 3 \cdot R_{MMJ10_AK1_PE} = (130.513 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_AK1_0j} := X_{0_{0j}} + X_{MMJ10_AK1} + 3 \cdot X_{MMJ10_AK1_PE} = (31.097 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_AK1_PE} := X_{0_{0PEj}} + X_{MMJ10_AK1} + 3 \cdot X_{MMJ10_AK1_PE} = (31.05 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_AK1} := \sqrt{(R_{MV_AK1})^2 + (X_{MV_AK1})^2} = (42.621 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_AK1} := \sqrt{(R_{VV_AK1})^2 + (X_{VV_AK1})^2} = (42.621 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_AK1} := \sqrt{(R_{NV_AK1_PE})^2 + (X_{NV_AK1_PE})^2} = (134.156 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_AK1} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_AK1} + Z_{VV_AK1} + Z_{NV_AK1})} = 3074.938 \text{ A}$$

PK2-Sähkökattila: 5x16S

$$l_{MMJ16_SK} := 33 \text{ m}$$

$$r_{MMJ16} := 2.244 \frac{\Omega}{\text{km}} \quad x_{MMJ16} := 0.094 \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$R_{MMJ16_SK} := r_{MMJ16} \cdot l_{MMJ16_SK} = (74.052 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{MMJ16_SK_PE} := R_{MMJ16_SK} = (74.052 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MMJ16_SK} := x_{MMJ16} \cdot l_{MMJ16_SK} = (3.102 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MMJ16_SK_PE} := X_{MMJ16_SK} = (3.102 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_SK} := R_{MyMIN} + R_{MMJ16_SK} = (78.75 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_SK} := X_{MyMIN} + X_{MMJ16_SK} = (24.42 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

WV:

$$R_{VW_SK} := R_{VdMIN} + R_{MMJ16_SK} = (78.75 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VW_SK} := X_{VdMIN} + X_{MMJ16_SK} = (24.42 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_SK_0j} := R_{0v0j} + R_{MMJ16_SK} + 3 \cdot R_{MMJ16_SK_PE} = (299.377 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_SK_PE} := R_{0vPEj} + R_{MMJ16_SK} + 3 \cdot R_{MMJ16_SK_PE} = (301.057 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_SK_0j} := X_{0v0j} + X_{MMJ16_SK} + 3 \cdot X_{MMJ16_SK_PE} = (38.241 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_SK_PE} := X_{0vPEj} + X_{MMJ16_SK} + 3 \cdot X_{MMJ16_SK_PE} = (38.194 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_SK} := \sqrt{(R_{MV_SK})^2 + (X_{MV_SK})^2} = (82.449 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VW_SK} := \sqrt{(R_{VW_SK})^2 + (X_{VW_SK})^2} = (82.449 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_SK} := \sqrt{(R_{NV_SK_PE})^2 + (X_{NV_SK_PE})^2} = (303.47 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_SK} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_SK} + Z_{VW_SK} + Z_{NV_SK})} = 1440.389 \text{ A}$$

PK2-NK5.1: Rinnakkain 2 x AMCMK 4x95+29

$$r_{AXC95} := 0.39 \frac{\Omega}{km} \quad r_{AXC95_0} := r_{AXC95} \quad l_{AXC95_NK} := 29 \text{ m}$$

$$r_{AXC95_PE} := 0.63 \frac{\Omega}{km} \quad L_{AXC95} := 0.26 \frac{mH}{km}$$

$$L_{AXC95_PE} := 0.27 \frac{mH}{km}$$

$$R_{AXC95_NK} := \frac{r_{AXC95} \cdot l_{AXC95_NK}}{2} = (5.655 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC95_NK_0} := R_{AXC95_NK}$$

$$R_{AXC95_NK_PE} := \frac{r_{AXC95_PE} \cdot l_{AXC95_NK}}{2} = (20.01 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC95_NK} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95} \cdot l_{AXC95_NK}}{2} = (1.184 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC95_NK_0} := X_{AXC95_NK}$$

$$X_{AXC95_NK_PE} := \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95_PE} \cdot l_{AXC95_NK}}{2} = (1.23 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_NK} := R_{MyMIN} + R_{AXC95_NK} = (10.353 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_NK} := X_{MyMIN} + X_{AXC95_NK} = (22.503 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VV:

$$R_{VV_NK} := R_{VdMIN} + R_{AXC95_NK} = (10.353 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_NK} := X_{VdMIN} + X_{AXC95_NK} = (22.503 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NV:

$$R_{NV_NK_0j} := R_{0v0j} + R_{AXC95_NK} + 3 \cdot R_{AXC95_NK_0} = (25.789 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{NV_NK_PEj} := R_{0vPEj} + R_{AXC95_NK} + 3 \cdot R_{AXC95_NK_PE} = (70.534 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_NK_0j} := X_{0v0j} + X_{AXC95_NK} + 3 \cdot X_{AXC95_NK_0} = (30.57 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_NK_PEj} := X_{0vPEj} + X_{AXC95_NK} + 3 \cdot X_{AXC95_NK_PE} = (30.66 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

M-, V-, N-komponenttiverkon impedanssit:

$$Z_{MV_NK} := \sqrt{(R_{MV_NK})^2 + (X_{MV_NK})^2} = (24.77 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_NK} := \sqrt{(R_{VV_NK})^2 + (X_{VV_NK})^2} = (24.77 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_NK} := \sqrt{(R_{NV_NK_PE})^2 + (X_{NV_NK_PE})^2} = (76.91 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$I_{1k_NK} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{k400V}}{(Z_{MV_NK} + Z_{VV_NK} + Z_{NV_NK})} = 5335.178 \text{ A}$$

Saarekekäyttö: $I_{kUPSG} := 170 \text{ A}$ $U_{kUPSG} := 400 \text{ V}$

Oikosulkuimpedanssi UPSG saarekekäytössä:

$$Z_{kUPSG,J} := \frac{c_{2MAX} \cdot U_{kUPSG}}{\sqrt{3} \cdot I_{kUPSG}} = 1.358 \Omega$$

UPSG-PK2: AMCMK 4x50+16

Kaapelityyppi ja pituus sama, kuin edellä laskettu, käytetään sitä arvoa kaapelin osalta. Oikosulkuvirrat PK2:n kiskolla saarekekäytössä (pelkästään UPSG:llä):

$$R_{AXC50_UPSG} := r_{AXC50} \cdot l_{AXC50UPSG} = (13.09 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC50_UPSG,0} := R_{AXC50_UPSG}$$

$$R_{AXC50_UPSG_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50UPSG} = (23.46 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC50_UPSG} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50} \cdot l_{AXC50UPSG} = (1.442 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC50_UPSG,0} := X_{AXC50_UPSG}$$

$$X_{AXC50_UPSG_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC50UPSG} = (1.389 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_UPSG,S} := R_{AXC50_UPSG} = (13.09 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_UPSG,S} := X_{AXC50_UPSG} = (1.442 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{MV_UPSG,S} := Z_{kUPSG,J} + \sqrt{(R_{MV_UPSG,S}^2 + X_{MV_UPSG,S}^2)} = 1.372 \Omega$$

VV:

$$R_{VV_UPSG,S} := R_{AXC50_UPSG} = (13.09 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_UPSG,S} := X_{AXC50_UPSG} = (1.442 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_UPSG,S} := Z_{kUPSG,J} + \sqrt{(R_{VV_UPSG,S}^2 + X_{VV_UPSG,S}^2)} = 1.372 \Omega$$

NV:

$$R_{NV_UPSG_PE,S} := R_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot R_{AXC50_UPSG_PE} = (83.47 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_UPSG_PE,S} := X_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot X_{AXC50_UPSG_PE} = (5.608 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_UPSG,S} := Z_{kUPSG,J} + \sqrt{(R_{NV_UPSG_PE,S}^2 + X_{NV_UPSG_PE,S}^2)} = 1.442 \Omega$$

1-v oikosulkuvirta pääkeskuksen PK2 saarekeosassa:

$$I_{1k_UPSG} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{kUPSG}}{(Z_{MV_UPSG,S} + Z_{VV_UPSG,S} + Z_{NV_UPSG,S})} = 157.256 \text{ A}$$

1-v oikosulkuvirta nousukeskuksessa NK5.1 UPSG-saarekekäytössä.

$$R_{AXC95_NK} := r_{AXC95} \cdot l_{AXC95_NK} = (11.31 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC95_NK_0} := R_{AXC95_NK}$$

$$R_{AXC95_NK_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC95_NK} = (40.02 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC95_NK} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95} \cdot l_{AXC95_NK} = (2.369 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC95_NK_0} := X_{AXC95_NK}$$

$$X_{AXC95_NK_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95_PE} \cdot l_{AXC95_NK} = (2.46 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_NK_S} := R_{AXC50_UPSG} + R_{AXC95_NK} = (24.4 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_NK_S} := X_{AXC50_UPSG} + X_{AXC95_NK} = (3.811 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{MV_NK_S} := Z_{kUPSG_J} + \sqrt{(R_{MV_NK_S}^2 + X_{MV_NK_S}^2)} = 1.383 \Omega$$

VV:

$$R_{VV_NK_S} := R_{AXC50_UPSG} + R_{AXC95_NK} = (24.4 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_NK_S} := X_{AXC50_UPSG} + X_{AXC95_NK} = (3.811 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_NK_S} := Z_{kUPSG_J} + \sqrt{(R_{VV_NK_S}^2 + X_{VV_NK_S}^2)} = 1.383 \Omega$$

NV:

$$R_{NV_NK_PE_S} := R_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot R_{AXC50_UPSG_PE} + R_{AXC95_NK} + 3 \cdot R_{AXC95_NK_PE} = (214.84 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{NV_NK_PE_S} := X_{AXC50_UPSG} + 3 \cdot X_{AXC50_UPSG_PE} + X_{AXC95_NK} + 3 \cdot X_{AXC95_NK_PE} = (15.356 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_NK_S} := Z_{kUPSG_J} + \sqrt{(R_{NV_NK_PE_S}^2 + X_{NV_NK_PE_S}^2)} = 1.574 \Omega$$

1-vaiheinen oikosulkuvirta nousukeskuksella NK5.1 UPSG saarekekäytössä.

$$I_{1k_NK_S} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{kUPSG}}{(Z_{MV_NK_S} + Z_{VV_NK_S} + Z_{NV_NK_S})} = 151.647 \text{ A}$$

Oikosulkuimpedanssi BESS saarekekäytössä:

$$I_{k\text{BESS}} := 144 \text{ A} \quad U_{k\text{BESS}} := U_{k\text{UPSG}} = 400 \text{ V}$$

$$Z_{k\text{BESS}_J} := \frac{c_{2\text{MAX}} \cdot U_{k\text{UPSG}}}{\sqrt{3} \cdot I_{k\text{BESS}}} = 1.604 \Omega$$

$$R_{\text{AXC50_BESS}} := r_{\text{AXC50}} \cdot l_{\text{AXC50_BESS}} = (9.24 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{\text{AXC50_BESS}_0} := R_{\text{AXC50_BESS}}$$

$$R_{\text{AXC50_BESS_PE}} := r_{\text{AXC50_PE}} \cdot l_{\text{AXC50_BESS}} = (16.56 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{\text{AXC50_BESS}} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\text{AXC50}} \cdot l_{\text{AXC50_BESS}} = (1.018 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{\text{AXC50_BESS}_0} := X_{\text{AXC50_BESS}}$$

$$X_{\text{AXC50_BESS_PE}} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{\text{AXC50_PE}} \cdot l_{\text{AXC50_BESS}} = (980.177 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

MV:

$$R_{\text{MV_BESS}_S} := R_{\text{AXC50_BESS}} = (9.24 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{\text{MV_BESS}_S} := X_{\text{AXC50_BESS}} = (1.018 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{\text{MV_BESS}_S} := Z_{k\text{BESS}_J} + \sqrt{(R_{\text{MV_BESS}_S}^2 + X_{\text{MV_BESS}_S}^2)} = 1.613 \Omega$$

VV:

$$R_{\text{VV_BESS}_S} := R_{\text{AXC50_BESS}} = (9.24 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{\text{VV_BESS}_S} := X_{\text{AXC50_BESS}} = (1.018 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{\text{VV_BESS}_S} := Z_{k\text{BESS}_J} + \sqrt{(R_{\text{VV_BESS}_S}^2 + X_{\text{VV_BESS}_S}^2)} = 1.613 \Omega$$

NV:

$$R_{\text{NV_BESS_PE}_S} := R_{\text{AXC50_BESS}} + 3 \cdot R_{\text{AXC50_BESS_PE}} = (58.92 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{\text{NV_BESS_PE}_S} := X_{\text{AXC50_BESS}} + 3 \cdot X_{\text{AXC50_BESS_PE}} = (3.958 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{\text{NV_BESS}_S} := Z_{k\text{BESS}_J} + \sqrt{(R_{\text{NV_BESS_PE}_S}^2 + X_{\text{NV_BESS_PE}_S}^2)} = 1.663 \Omega$$

1-v oikosulkuvirta pääkeskuksen PK2 saarekeosassa:

$$I_{1k_BESS_S} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2\text{MIN}} \cdot U_{k\text{BESS}}}{(Z_{\text{MV_BESS}_S} + Z_{\text{VV_BESS}_S} + Z_{\text{NV_BESS}_S})} = 134.627 \text{ A}$$

1-v oikosulkuvirta nousukeskuksessa NK5.1 BESS-saarekekäytössä.

$$R_{AXC95_NK} := r_{AXC95} \cdot l_{AXC95_NK} = (11.31 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad R_{AXC95_NK_0} := R_{AXC95_NK}$$

$$R_{AXC95_NK_PE} := r_{AXC50_PE} \cdot l_{AXC95_NK} = (40.02 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{AXC95_NK} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95} \cdot l_{AXC95_NK} = (2.369 \cdot 10^{-3}) \Omega \quad X_{AXC95_NK_0} := X_{AXC95_NK}$$

$$X_{AXC95_NK_PE} := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{AXC95_PE} \cdot l_{AXC95_NK} = (2.46 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

MV:

$$R_{MV_NK_SB} := R_{AXC50_BESS} + R_{AXC95_NK} = (20.55 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{MV_NK_SB} := X_{AXC50_BESS} + X_{AXC95_NK} = (3.387 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{MV_NK_SB} := Z_{kBESS_I} + \sqrt{(R_{MV_NK_SB}^2 + X_{MV_NK_SB}^2)} = 1.625 \Omega$$

VV:

$$R_{VV_NK_SB} := R_{AXC50_BESS} + R_{AXC95_NK} = (20.55 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{VV_NK_SB} := X_{AXC50_BESS} + X_{AXC95_NK} = (3.387 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{VV_NK_SB} := Z_{kBESS_I} + \sqrt{(R_{VV_NK_SB}^2 + X_{VV_NK_SB}^2)} = 1.625 \Omega$$

NV:

$$R_{NV_NK_PE_SB} := R_{AXC50_BESS} + 3 \cdot R_{AXC50_BESS_PE} + R_{AXC95_NK} + 3 \cdot R_{AXC95_NK_PE} = (190.29 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

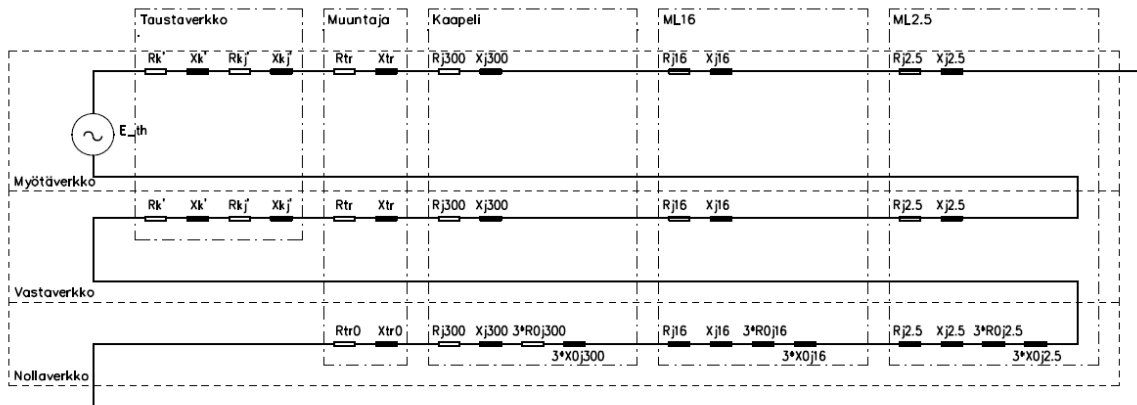
$$X_{NV_NK_PE_SB} := X_{AXC50_BESS} + 3 \cdot X_{AXC50_BESS_PE} + X_{AXC95_NK} + 3 \cdot X_{AXC95_NK_PE} = (13.707 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{NV_NK_PE_SB} := Z_{kBESS_I} + \sqrt{(R_{NV_NK_PE_SB}^2 + X_{NV_NK_PE_SB}^2)} = 1.795 \Omega$$

1-vaiheinen oikosulkuvirta nousukeskuksella NK5.1 UPSG saarekekäytössä.

$$I_{1k_NK_SB} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{2MIN} \cdot U_{kBESS}}{(Z_{MV_NK_SB} + Z_{VV_NK_SB} + Z_{NV_NK_SB})} = 130.496 \text{ A}$$

Liite 3: Pääkeskuksen PK2 pistorasian oikosulkuvirtalaskelmat.



Kuva 1. Tarkasteltavan kohdan yksivaiheisen oikosulun komponenttiverkon sijaiskytkentä.

Lähtötiedot:

$$R'_{kMAX} := (107.218 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$R'_{kMIN} := (51.827 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$R'_{kj} := (3.418 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$R_{Tr} := (3.907 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{Tr0} := 4.1 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{j300} := (650 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$R_{0j300MIN} := (650 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$R_{0j300MAX} := (1.21 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{j16} := (2.83 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{0j16} := R_{j16} = (2.83 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{j2.5} := (17.54 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{0j2.5} := R_{j2.5} = (17.54 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X'_{kMAX} := (1.072 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X'_{kMIN} := (518.269 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X'_{kj} := (1.046 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$X_{Tr} := (19.843 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{Tr0} := 14.0 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$X_{j300} := (392.699 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{0j300MAX} := (392.699 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{0j300MIN} := (376.991 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{j16} := (180 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{0j16} := X_{j16} = (180 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{j2.5} := (220 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$X_{0j2.5} := X_{j2.5} = (220 \cdot 10^{-6}) \Omega$$

$$U := 400 \text{ V} \quad c_{min} := 0.95 \quad c_{max} := 1.0$$

$$U_v := \frac{U}{\sqrt{3}} = 230.94 \text{ V}$$

Laskelmat:

MYÖTÄVERKKO:

$$R_{1MAX} := R'_{kMAX} + R'_{kj} + R_{Tr} + R_{j300} + R_{j16} + R_{j2.5} = (25.068 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{1MAX} := X'_{kMAX} + X'_{kj} + X_{Tr} + X_{j300} + X_{j16} + X_{j2.5} = (21.718 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{1MAX} := \sqrt{R_{1MAX}^2 + X_{1MAX}^2} = (33.168 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{1MIN} := R'_{kMIN} + R'_{kj} + R_{Tr} + R_{j300} + R_{j16} + R_{j2.5} = (25.013 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{1MIN} := X'_{kMIN} + X'_{kj} + X_{Tr} + X_{j300} + X_{j16} + X_{j2.5} = (21.164 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{1MIN} := \sqrt{R_{1MIN}^2 + X_{1MIN}^2} = (32.766 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

VASTAVERKKO:

$$Z_{2MAX} := Z_{1MAX} = (33.168 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{2MIN} := Z_{1MIN} = (32.766 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

NOLLAVERKKO:

$$R_{0MAX} := R_{Tr0} + R_{j300} + R_{j16} + R_{j2.5} + 3 \cdot (R_{0j300MAX} + R_{0j16} + R_{0j2.5}) = (89.86 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{0MAX} := X_{Tr0} + X_{j300} + X_{j16} + X_{j2.5} + 3 \cdot (X_{0j300MAX} + X_{0j16} + X_{0j2.5}) = (17.171 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$R_{0MIN} := R_{Tr0} + R_{j300} + R_{j16} + R_{j2.5} + 3 \cdot (R_{0j300MIN} + R_{0j16} + R_{0j2.5}) = (88.18 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{0MIN} := X_{Tr0} + X_{j300} + X_{j16} + X_{j2.5} + 3 \cdot (X_{0j300MIN} + X_{0j16} + X_{0j2.5}) = (17.124 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{0MAX} := \sqrt{R_{0MAX}^2 + X_{0MAX}^2} = (91.486 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$Z_{0MIN} := \sqrt{R_{0MIN}^2 + X_{0MIN}^2} = (89.827 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta:

$$I_{k3MIN} := \frac{c_{min} \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (Z_{1MAX})} = 6.615 \text{ kA}$$

$$I_{k3MAX} := \frac{c_{max} \cdot U}{\sqrt{3} \cdot (Z_{1MIN})} = 7.048 \text{ kA}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta:

$$I_{k2MIN} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3MIN} = 5.728 \text{ kA}$$

$$I_{k2MAX} := \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3MAX} = 6.104 \text{ kA}$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta: (Kaksi eri kaavaa)

$$I_{k1MINve1} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{min} \cdot U}{(Z_{1MAX} + Z_{2MAX} + Z_{0MAX})} = 4.17 \text{ kA}$$

$$I_{k1MAXve1} := \frac{\sqrt{3} \cdot c_{max} \cdot U}{(Z_{1MIN} + Z_{2MIN} + Z_{0MIN})} = 4.459 \text{ kA}$$

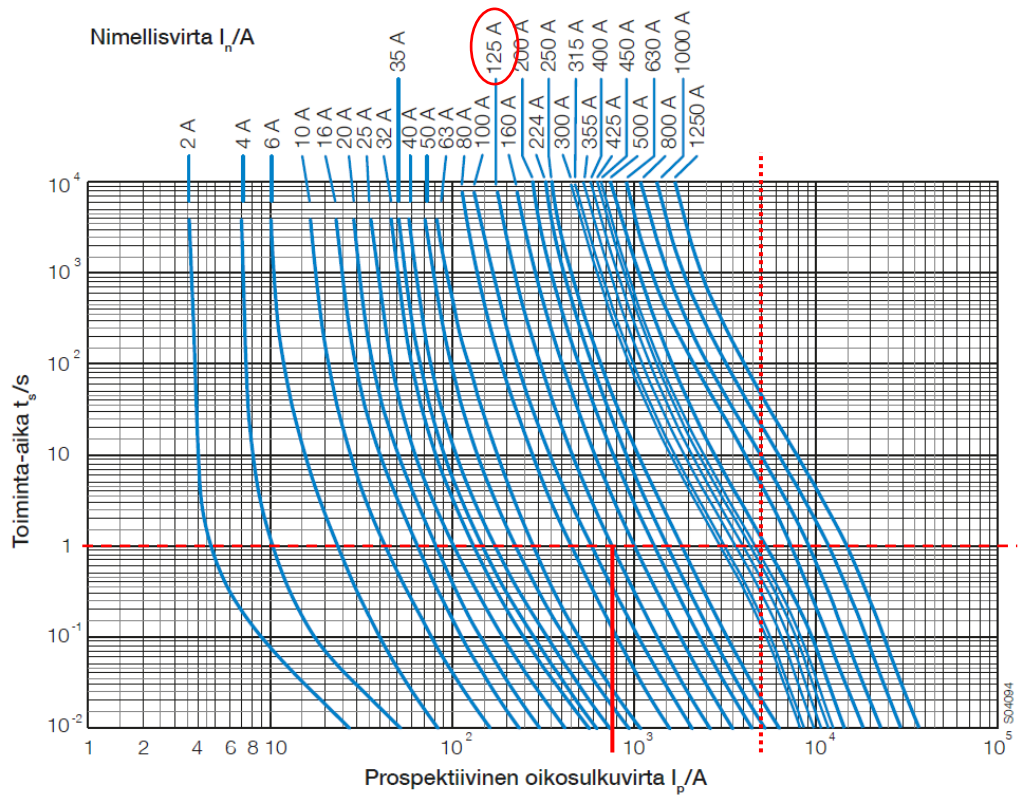
$$I_{k1MINve2} := \frac{3}{1 + \frac{Z_{2MIN}}{Z_{1MIN}} + \frac{Z_{0MIN}}{Z_{1MIN}}} \cdot I_{k3MIN} = 4.185 \text{ kA}$$

$$I_{k1MAXve2} := \frac{3}{1 + \frac{Z_{2MIN}}{Z_{1MIN}} + \frac{Z_{0MIN}}{Z_{1MIN}}} \cdot I_{k3MAX} = 4.459 \text{ kA}$$

Liite 4: Suojaukseen liittyviä ominaistietoja.

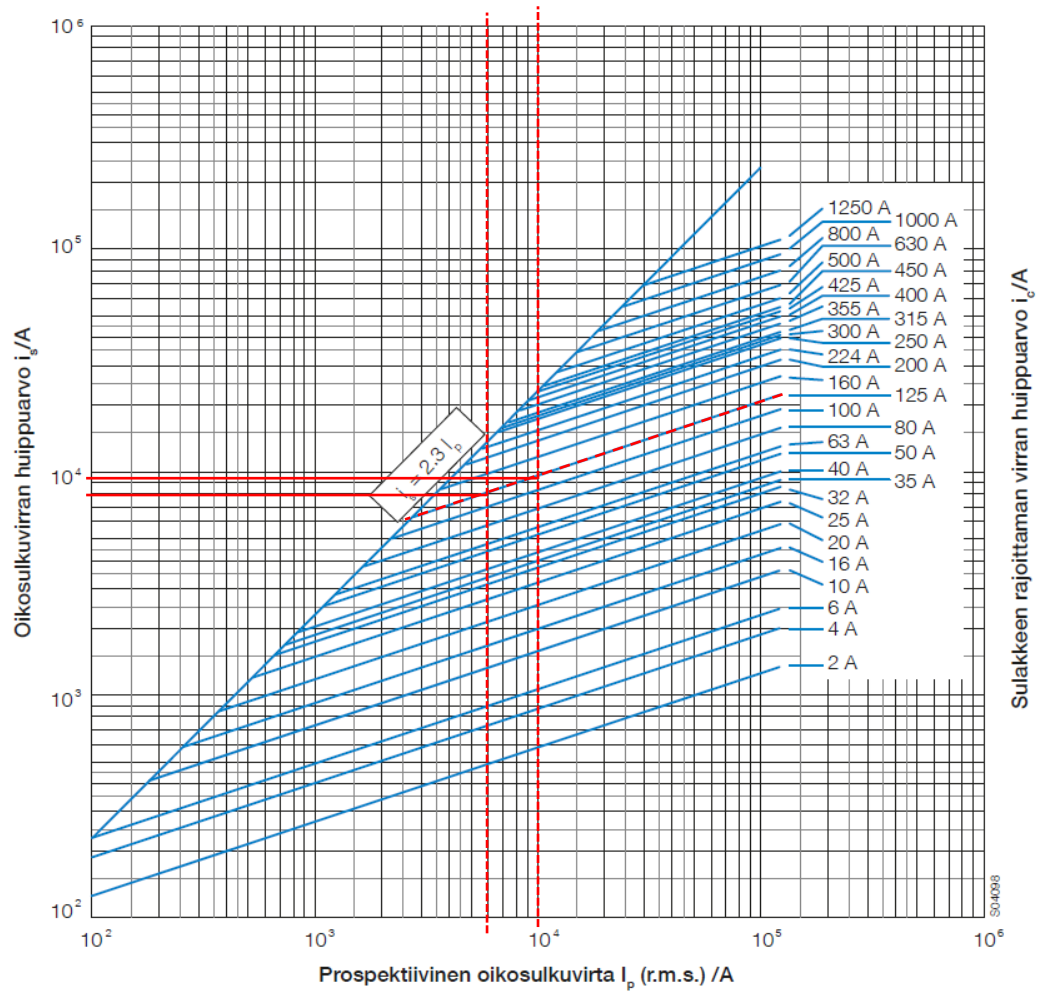
Taulukko 1. gG-kahvasulakkeiden toiminta-ajat (ABB 2022c).

Toiminta-ajat, 500 V, gG- sulakkeet OFAF_H_, koot 000...4/4a



Taulukko 2. gG-kahvasulakkeiden virranrajoituskyky (ABB 2022c).

Virranrajoitus, 500 V, gG- sulakkeet OFAF_H_, koot 000...4/4a



Taulukko 3. Sulakesuojauksen tarkasteltavat arvot.

Kohde	Tyyppi	Sulake	I_{kMIN}	I_{kMAX}	I_{kMAX}
		[A]	[A]	Alkupää [kA]	Loppupää [kA]
Sähköautonlataus 1	AMCMK 4x50+16Cu	125	750	9,5	8,0
Sähköautonlataus 2	AMCMK 4x50+16Cu	125	750	9,5	8,0
Alakeskus AK1 syöttö	MMJ 5x10S	25	100	3,2	1,25
Sähkökattila	MMJ 5x16S	35	150	4,0	1,5

Taulukko 4. UPSG:n invertterin suojausarvot (Eaton 2022c).

UPSG				
P	50 kW			
S	50 kVA			
I_N	72 A			
	t	[t]	ylitys	I
I _{OL1}	10	min	102 - 110 %	73 - 80 A
I _{OL2}	60	s	111 - 125 %	80 - 91 A
I _{OL3}	10	s	126 - 150 %	91 - 108 A
I _{OL4}	300	ms	> 150 %	108 A ->
I _{SC}	400	ms	2,5 x I _N	170 A

Taulukossa Eatonin UPSG:n invertterin ylikuormitussuojauksen I_{OLX} ja oikosulkusuojauksen I_{SC} mukaiset arvot aika- sekä virta-alueilla.

