



ERÄÄN KOHTEEN SÄHKÖNJAKELUVERKOSTON POIKKEUSOLOJEN RESILIENSSIN PARANTAMINEN

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan diplomityö

2022

Kimmo Lindholm

Tarkastajat: Apulaisprofessori Pasi Peltoniemi

Tutkijatohtori Janne Karppanen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Kimmo Lindholm

Erään kohteen sähköjakeluverkoston poikkeusolojen resilienssin parantaminen

Diplomityö

2022

135 sivua, 45 kuvaa, 21 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastajat: Apulaisprofessori Pasi Peltoniemi ja Tutkijatohtori Janne Karppanen

Avainsanat: pientuotanto, varavoimakone, aurinkosähkövoimala, akkuenergiavarasto

Sähköjakeluverkon haltijan pitää varautua normaaliolojen häiriötilanteisiin sekä valmiuslaissa tarkoitettuihin poikkeusoloihin. Normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa, kun yleinen sähköjakelu on keskeytynyt, tarvitaan varatuotantojärjestelmiä, jotta keskeytyskriittistä toimintaa voidaan jatkaa yleisestä sähköverkosta erotetussa saarekkeessa. Normaalioloissa osaa sähköenergian varatuotantolaitteistoista voidaan käyttää uusiutuvan sähköenergian lähteinä. Sähköjakeluverkon haltijan on huolehdittava jakeluverkon sähköturvallisuudesta ja suojausten toimivuudesta kaikissa käyttötilanteissa ja olosuhteissa.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan varatuotantojärjestelmiä, jotka liitetään valmiiseen olemassa olevaan sähköjakeluverkkoon. Tällöin erityisesti saarekekäyttö asettaa tuotantolaitteistolle tiettyjä vaatimuksia, jotta sähköturvallisuus ja suojaukset pysyvät vaaditulla tasolla. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan sähköenergian tuotantolaitteistojen ominaisuuksia, jotka pitää ottaa huomioon suunnittelussa ja tuotantolaitteistojen valinnassa. Tarkasteltavat tuotantolaitteistot ovat diesel-varavoimakone, aurinkosähkövoimala ja akkuenergiavarasto.

Opinnäytetyössä havaitaan, että ylivirta- ja vikasuojauksen toimivuuden kannalta olennaisin ominaisuus on tuotantolaitteiston virransyöttökyky erityisesti oikosulussa. Virransyöttökykyä vaaditaan vikatilanteessa oikosulussa olevan sähköjakeluverkon osan suojalaitteen toimimiseksi. Tuotantolaitteiston on pystyttävä tuottamaan riittävä oikosulkuvirta myös sähköjakelujärjestelmän kauimmaisiin ja epäedullisimpiin kohtiin. Tarkasteltujen sähköenergian tuotantolaitteistojen virransyöttökyky poikkeaa olennaisesti toisistaan. Tuotantolaitteiston keskijänniteverkon yli syöttämää vikavirtaa ei voida pienjänniteverkossa sähköasennustesterillä mittaamalla todentaa, kuten yleisen sähköverkon syöttäessä vikavirtaa, vaan siihen tarvitaan verkostolaskentaa. Opinnäytetyössä esitellään laskentamenetelmät ja tarkastellaan ylivirta- ja vikasuojauksen toteutuminen erään kohteen osalta.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Kimmo Lindholm

Improving the resilience of the site's electricity distribution network to exceptional conditions

Master's thesis

2022

135 pages, 45 figures, 21 tables and 2 appendices

Examiners: Associate Professor Pasi Peltoniemi and Post Doctoral Researcher Janne Karpunen

Keywords: small-scale production, backup generator, solar power plant, energy storage

The operator of the electricity distribution system must be prepared for disruptions to normal conditions as well as exceptional conditions referred to in the emergency act. In the event of disruptions to normal conditions and exceptional conditions, when the general electricity distribution has been interrupted, backup production systems are needed so that interruption-critical operations can be continued in an island separated from the general electricity grid. Under normal conditions, part of the backup electricity production system can be used as sources of renewable electrical energy, in which case the production corresponds to small-scale production according to the definition of the electricity market act, if it falls below the specified power limit. The owner of the electricity distribution network must take care of the electrical safety of the distribution network and the functionality of the protections in all operating situations and conditions.

This thesis examines back-up production systems that are connected to a ready-made existing electricity distribution network. In this case, island operation in particular places certain requirements on production systems, so that electrical safety and protections remain at the required level. The thesis examines the characteristics of electrical energy production systems, which must be taken into account in the design and selection of production systems. The production systems under consideration are a diesel back-up generator, a solar power plant and a battery energy storage. In the thesis, it is found that the most essential feature in terms of the functionality of overcurrent and fault protection is the current supply capability of the production system, especially in the event of a short circuit. The production system must be able to produce sufficient short-circuit current even to the farthest and most unfavorable parts of the electricity distribution system. The current supply capacity of the examined electrical energy production systems differs substantially from one another.

KIITOKSET

Tämä diplomityö on tehty työnantajalleni Puolustuskiinteistöille kesän ja syksyn 2022 aikana. Työ oli laaja ja monin tavoin opettavainen. Haluan kiittää suuresti Puolustuskiinteistöjen Ari Lehtovirtaa haastavan ja mielenkiintoisen työn mahdollistamisesta sekä erittäin asiantuntevasta opastuksesta, neuvoista ja kannustuksesta.

Suuret kiitokset myös tarkastajina toimineille LUT-yliopiston Pasi Peltoniemelle ja Janne Karppaselle yhteistyöstä. Palautteenne oli erittäin rakentavaa ja sopivasti kyseenalaistavaa, varmistaen laadukkaan lopputuloksen. Teidän kaikkien kanssa pidetyt ohjauspalaverit keskusteluineen olivat työn parasta antia.

Nousiaisissa 13.10.2022

Kimmo Lindholm

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

<i>A</i>	pinta-ala	[m ²]
<i>C</i>	kapasitanssi	[F]
<i>C</i>	akun kapasiteetti	[Ah]
<i>E</i>	akun energiakapasiteetti	[Wh]
<i>E</i>	lähdejännite	[V]
<i>f</i>	taajuus	[Hz]
<i>I</i>	virta	[A]
<i>L</i>	induktanssi	[H]
<i>l</i>	pituus	[m]
<i>M</i>	keskinäisinduktanssi	[H]
<i>n</i>	kierrosnopeus	[1/s]
<i>P</i>	teho	[W]
<i>R</i>	resistanssi	[Ω]
<i>S</i>	nimellisteho	[VA]
<i>T</i>	lämpötila	[°C]
<i>t</i>	aika	[s]
<i>U</i>	jännite	[V]
<i>V</i>	tilavuus	[m ³]
<i>X</i>	reaktanssi	[Ω]
<i>Z</i>	impedanssi	[Ω]

Kreikkalaiset

δ	napakulma	[°]
η	hyötysuhde	[%]
ρ	ominaisresistanssi	[Ωm]
τ	aikavakio	[1/s]
φ	vaihesiirtokulma	[°]
Ψ	käämivuo	[Wb]
ω	sähköinen kulmanopeus	[rad/s]

Alaindeksit

a	tasakomponentti
d	roottorikoordinaatiston d-akseli
d	tahti- (reaktanssi)
k	oikosulku
m	magnetointi
n	nimellinen
s	staattori
q	roottorikoordinaatiston q-akseli
σ	haja- (induktanssi)

Yläindeksit

'	muutostilassa
"	alkuhetkellä

Lyhenteet

AC	Vaihtosähkö (Alternating Current)
BESS	Akkuenergiavarasto (Battery Energy Storage Systems)
BMS	Akkujen hallintajärjestelmä (Battery Management System)
CAES	Paineilmaenergiavarasto (Compressed Air Energy Storage)
DC	Tasasähkö (Direct Current)
DoD	Akun purkaussyvyys (Depth of Discharge)
IGBT	Eristyshilainen bipolaaritransistori (Insulated Gate Bipolar Transistor)
LCO	Litium-kobolttioksidiakku (Lithium Cobalt Oxide battery)
LFP	Litium-rautafosfaattiakku (Lithium Iron Phosphate battery)
LMO	Litium-mangaanioksidiakku (Lithium Manganese Oxide battery)
MPPT	Maksimitehopisteen seuranta (Maximum Power Point Tracking)
NCA	Litium-nikkeli-koboltti-alumiinioksidiakku (Lithium Nickel Cobalt Aluminium Oxide battery)
NMC	Litium-nikkeli-mangaani-kobolttioksidiakku (Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide battery)
OC	Avoin piiri (Open Circuit)
PHS	Pumppuvoimalaitos (Pumped Hydroelectric Storage)
SC	Oikosulku (Short Circuit)
SMES	Suprajohtava magneettinen energiavarasto (Superconducting Magnetic Energy Storage)
SNG	Synteettinen maakaasu (Synthetic Natural Gas)
SoC	Akun varaustila (State of Charge)
STC	Standardi testiolosuhteissa (Standard Test Conditions)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	9
2	Poikkeusolojen sähköenergian tuotantomenetelmät.....	11
2.1	Varavoimalaitteisto	11
2.1.1	Dieselgeneraattorin rakenne	14
2.1.2	Dieselmoottori	17
2.1.3	Generaattori	18
2.2	Aurinkosähkövoimala	24
2.2.1	Rakenne	26
2.2.2	Aurinkopaneelit	27
2.2.3	Aurinkosähköinvertteri	30
2.3	Energiavarasto.....	34
2.3.1	Akkuenergiavarastoinnin sovellukset ja hyödyt.....	35
2.3.2	Akkuenergiavaraston rakenne.....	36
2.3.3	Verkkosuuntaaja	37
2.3.4	Akusto	40
3	Erään kohteen tuotantolaitteistojen valinnan pääkohdat	49
3.1	Tuotantolaitteiston virransyöttökyky oikosulussa.....	49
3.2	Tuotantolaitteistojen valinnan pääkohdat	50
4	Suojaus ja sähköturvallisuus.....	53
4.1	Ylivirtasuojaus	53
4.1.1	Ylikuormitussuojaus	54
4.1.2	Oikosulkusuojaus.....	56
4.2	Suojaus sähköiskulta	58
4.2.1	Perussuojaus.....	58
4.2.2	Vikasuojaus.....	59

4.2.3	Lisäsuojaus.....	61
4.3	Keskijänniteverkon ylivirta- maasulkusuojaus	61
4.3.1	Keskijänniteverkon ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus.....	62
4.3.2	Keskijänniteverkon maasulkusuojaus.....	63
4.4	Selektiivisyys	66
5	Sähkönjakeluverkon ominaisuudet ja oikosulkuvirrat	68
5.1	Muuntajan oikosulkuimpedanssi.....	68
5.2	Kaapelien impedanssi.....	69
5.3	Redusointi	70
5.4	Kolmivaiheinen oikosulku	71
5.5	Kaksivaiheinen oikosulku	74
5.6	Yksivaiheinen oikosulku.....	74
6	Kohteen ylivirta- ja vikasuojauksen tarkastelu.....	76
6.1	1. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu	78
6.2	2. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu	89
6.3	3. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu.	97
6.4	4. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu.	106
6.5	Havaintojen vaikutus kaapeleiden, kojeistojen ja suojalaitteiden valintaan	116
7	Johtopäätökset	126
	Lähteet	131

Liitteet

Liite 1. Varavoimakoneen generaattori Stamford HCI544

Liite 2. Akkuenergiavaraston verkkosuuntaaja Danfoss NXA03256

1 Johdanto

Epävakaa tilanne Euroopassa vuonna 2022 heijastuu myös energiamarkkinoille aiheuttaen epävarmuutta. Sähkönjakelun- ja tuotannon osalta se lisää tarvetta huomioida valmiutta ja varautumista. Sähkönjakeluverkon haltijan pitää varautua normaaliolojen häiriötilanteisiin sekä valmiuslaissa tarkoitettuihin poikkeusoloihin. Puolustuskiinteistöt on valtion liikelaitos, joka omistaa lähes kaikki Suomen Puolustusvoimien käyttämät kiinteistöt ja energiaverkostot. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan toimenpiteitä sähkönjakeluverkon resilienssin parantamiseksi Puolustuskiinteistöissä. Eräs keino parantaa sähkönjakeluverkon poikkeusolojen resilienssiä on sähköenergian varatuotantolaitteistojen lisääminen alueelliseen sähköverkkoon. Sähkönjakeluverkon haltijan on huolehdittava jakeluverkoston sähköturvallisuudesta ja suojausten toimivuudesta kaikissa käyttötilanteissa ja olosuhteissa.

Alueellisessa sähkönjakeluverkossa varatuotantojärjestelmillä tuotettua sähköenergiaa kannattaa siirtää keskijänniteverkon kautta, jos se on alueellisen sähköjakeluverkon kannalta mahdollista. Etuna on pienemmät virrat kaapeleissa ja siten pienemmät häviöt sekä jännitteenalenemat. Sähkömarkkinalain mukaan sähkönjakelu on tuotannosta eriytettyä liiketoimintaa. Puolustuskiinteistöjen tuottama sähköenergia kulutetaan sen omistamissa kiinteistöissä jakeluverkon alueella. Käytännössä keskijänniteverkon käyttö poikkeusoloissa varatuotantojärjestelmillä tuotetun sähkön siirtoon edellyttää, että keskijännitejakeluverkko on tuottajan hallinnassa. Tällöin voidaan tehdä tarkoituksen mukaiset katkaisijoiden ohjaukset saarekekäytön vaatimalla tavalla. Keskijänniteverkon hallinta antaa myös mahdollisuuden vastata siihen mahdollisesti kohdistuvista vikakorjauksista kaikissa olosuhteissa. Puolustuskiinteistöjen varatuotantolaitteistoja voidaan käyttää myös normaalioloissa yleisen sähköverkon rinnalla. Tällöin osa varatuotantolaitteistoista toimii uusiutuvan sähköenergian lähteinä ja pienentää näin kasvihuonekaasupäästöjä. Normaalioloissa energian tuotanto on sähkömarkkinalain määritelmän mukaista pientuotantoa, kun tuotanto alittaa 2 MVA.

Opinnäytetyössä tarkastellaan erään kohteen alueellista sähkönjakeluverkkoa. Kohteen aurinkosähkövoimalan ja akkuenergiavaraston hankinta oli käynnistetty ennen opinnäytetyön aloittamista energiatehokkuustoimenpiteenä. Diesel-varavoimakoneen hankinta käynnistyi opinnäytetyön edetessä. Hankittavat tuotantolaitteistot tullaan liittämään uuden puistomuuntamon ja keskijännitekaapelin kautta kohteen olemassa olevaan alueelliseen

sähkönjakeluverkkoon. Yleisen sähkönjakelun keskeytyessä, alueellinen sähköverkko erotetaan yleisestä sähköverkosta erilliseksi saarekkeeksi. Tässä kytkentätilanteessa varatuotantolaitteistot tuottavat saarekkeeksi erotetun alueellisen sähköverkon kuluttaman sähköenergian.

Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa spesifistä tietoa suunnittelun tueksi sähköenergian tuotantolaitteistojen liittämistä ja yhteensovittamisesta valmiiseen olemassa olevaan sähkönjakeluverkkoon sekä varmistaa kohteen sähköverkon suojausten vaatimusten mukainen toimiminen. Opinnäytetyön alussa tarkastellaan sähköenergian tuotantolaitteistojen ominaisuuksia, jotka tulee ottaa huomioon hankinnassa ja suunnittelussa. Tuotantolaitteistojen ominaisuuksien tarkastelussa käydään läpi laitteistojen rakenteen, sijoituksen, toiminnan ja mitoitusperiaatteiden tekniset yksityiskohdat. Lisäksi tarkastellaan tähän työhön olennaisimpana niiden kyvykkyys jakeluverkossa mahdollisesti tapahtuvien vikatilanteiden aikana.

Seuraavaksi käsitellään tiivistetysti kohteen tuotantolaitteistojen valintojen pääkohdat ja niihin vaikuttaneet havainnot. Säästöstausta käydään läpi siltä osin kuin se on opinnäytetyön tavoitteen asettelun kannalta tarpeellista. Sähkönjakeluverkon komponentit, vikatyypit ja laskentamenetelmät esitellään. Vikatyypeistä olennaisimmat tässä työssä ovat yksi-, kaksi- ja kolmivaiheinen oikosulku.

Opinnäytetyön loppuosassa tarkastellaan ylivirta- ja vikasuojauksen toteutuminen kohteessa. Tarkastelu rajataan käsittämään uusien tuotantolaitteistojen ja puistomuuntamon osuus sähkölaitteistosta. Nykyinen aikaisemmin rakennettu sähkölaitteiston osa on aikanaan suunniteltu ja tarkastusten perusteella todettu vaatimusten mukaiseksi. Kuitenkin vanha olemassa oleva sähköverkosto ja uudet tuotantolaitteistot muodostavat kokonaisuuden, joten myös vanhaa jakeluverkon osaa pitää joiltain osin tarkastella. Varatuotantolaitteistojen kyvykkyyttä toimia saarekekäytössä vikatilanteessa arvioidaan. Tätä varten tehdään verkoston oikosulkuvirtojen laskenta valituissa pisteissä eri puolilla sähkölaitteistoa. Tulosten perusteella selvitetään, voidaanko saarekekäyttö varatuotantojärjestelmillä toteuttaa niin, että ylivirta- ja vikasuojaus toimii vaaditusti ja selektiivisesti.

2 Poikkeusolojen sähköenergian tuotantomenetelmät

Normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa, kun yleinen sähkönjakelu on keskeytynyt, tarvitaan varatuotantojärjestelmiä, jotta keskeytyskriittistä toimintaa voidaan jatkaa. Valmiiseen alueelliseen sähkönjakeluverkkoon voidaan lisätä diesel-varavoimakone, aurinkosähkövoimala tai energiavarasto turvaamaan sähköenergian saantia poikkeusoloissa. Tällöin voidaan yleisestä sähköverkosta erotettua sähköverkon saarekettä syöttää varatuotantolaitteistolla. Sähköverkon suojausten on toimittava myös saarekekäytössä.

Tässä luvussa tarkastellaan kolmen tuotantolaitteiston olennaisimmat ominaisuudet, jotka tulee ottaa huomioon ennen hankintaa ja olemassa olevaan sähköverkkoon liittämistä. Jakeluverkon ylivirta- ja vikasuojauksen toimivuuden kannalta olennaisimpia ominaisuuksia ovat tuotantolaitteiston nimellisteho ja virransyöttökyky erityisesti oikosulussa.

2.1 Varavoimalaitteisto

Varavoimalaitteisto muodostuu Puolustuskiinteistöillä yhdestä tai useammasta dieselgeneraattorista ja apujärjestelmistä. Varavoimalaitteiston on oltava suorituskykyinen ja turvallinen. Sen on täytettävä Suomen ja EU:n viranomaisten määräykset. Varavoimalaitteisto sijoitetaan yleensä varavoimahuoneeseen tai siirrettävään konttiin. Dieselgeneraattori synnyttää käydessään melua, pakokaasua, tärinää ja lämpöä, jotka pitää ottaa huomioon varavoimahuoneen kokoa ja sijoituspaikkaa valittaessa.

Konttiasenteinen varavoimakone voidaan toimittaa kohteeseen valmiina, koekäytettynä kokonaisuutena. Konttiasenteiseen varavoimakokonaisuuteen sisältyy myös polttoaineen päiväsäiliö. Päiväsäiliö voi olla integroituna varavoimakoneen alustarakenteeseen tai se voi olla erillinen säiliö. Molemmissa tapauksissa säiliöstä tuodaan varavoimakontin ulkopuolelle polttoaineen täyttö- ja huohotusputki sekä ylitäytönestini. Päiväsäiliön mitoituksessa voidaan käyttää nyrkkisääntöä, jonka mukaan dieselgeneraattorin kulutus nimellisteholla on 0,3 litraa per kilowattitunti (Hakanen et al. 2019, 109).

Diesel-varavoimalaitteisto tuottaa sähkötehon polttoöljyn sisältämästä energiasta. Dieselmoottori pyörittää generaattoria, jossa liike-energia muuttuu sähköksi. Polttoöljyn

energiasisältö on noin 10 kWh/litra (Bioenergianeuvoja. 2022). Varavoimalaitteiston tyypillinen energiatase on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Varavoimalaitteiston tyypillinen energiatase (Hakanen et al. 2019, 51).

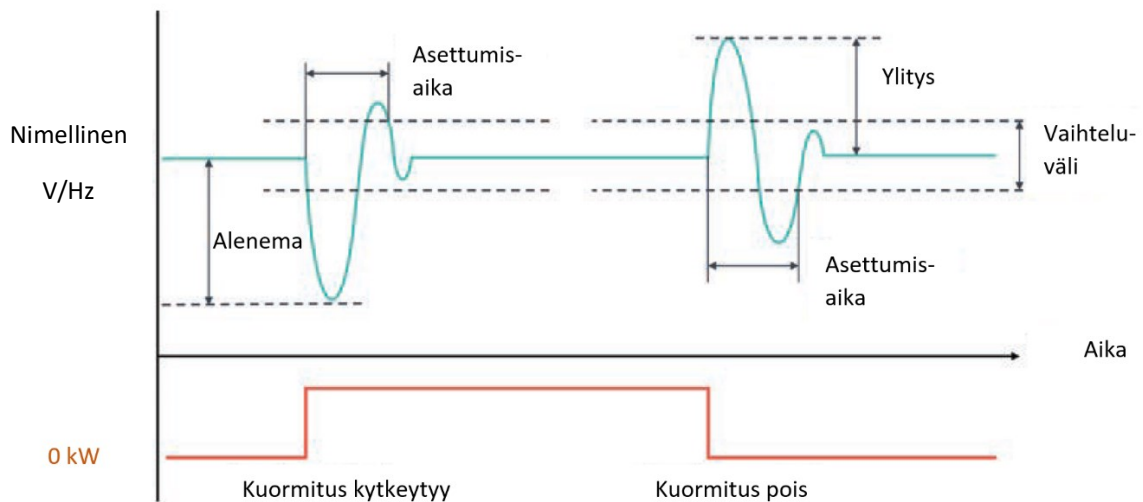
Polttoaineen energia	100 %
Lämpönä pakokaasuun siirtyvä energia	29–32 %
Lämpönä huoneilmaan siirtyvä energia	6–10 %
Lämpönä vaippaveteen ja ahtoilmaan siirtyvä energia	22–30 %
Sähköenergia generaattorin navoista	38–42 %

Taulukon 1 energiataseen mukaan polttoöljyn sisältämästä energiasta saadaan muutettua sähköenergiaksi noin kolmasosa. Loput energiasisällöstä muuttuu lämmöksi, joka on poistettava tai mahdollisuuksien mukaan hyödynnettävä esimerkiksi rakennuksen lämmitykseen. Varavoimalaitteiston LVI- ja rakennusteknisen suunnittelun pitää lisäksi huomioida ääneristyksen, tärinän, polttoainesäiliöiden- ja putkiston, pakoputkiston ja mahdollisen palamisilman putkistojen erityisvaatimukset, joita ei tässä tarkastelussa käydä läpi. Varavoimalaitteiston huone rakennuksessa muodostetaan omaksi palotekniseksi osastokseen.

Varavoimalaitteisto mitoitetaan niin, että se riittää kattamaan syötettävän sähköverkon huipukuorma käyttöjakson aikana (Kaderbhai 2017, 3). Sähköteho mitoitetaan tehokertoimella 0,8. Mitoituksessa huomioidaan varavoimalaitteiston kuormanottokyky. Lisäksi mitoituksessa huomioidaan mahdollinen redundanssi, laitteiston kasvuvара ja varavoimalaitteiston oma käyttöteho. (Hakanen et al. 2019, 79.)

Varavoimalaitteiston on pystyttävä antamaan nimellistehonsa jatkuvasti standardin ISO 8528-1:2018 määrittelemissä standardiolosuhteissa. ISO-8528 on standardisarja polttomootorikäyttöisille generaattoreille (Kaderbhai 2017, 1). Standardiolosuhteissa palamislämpötila on +25°C, ilmanpaine 100 kPa ja ilman suhteellinen kosteus 30 %. Standardiolosuhteissa varavoimalaitteistoa on voitava ylikuormittaa 10 % nimellistehosta 1 tunnin ajan 12 tunnin käyttöjakson aikana (Kaderbhai 2017, 6). Varavoimalaitteiston polttoainesäiliön tilavuus pitää riittää vähintään 8 tunnin toimintaan nimellisteholla. (Hakanen et al. 2019, 80.)

Standardi ISO 8528-5:2018 määrittelee varavoimalaitteiston suorituskykyluokat G1-G4 ja niiden hyväksyttävät rajat (Ponte 2019, 14). Suorituskykyluokka kuvaa varavoimakoneen kykyä vastata kuormituksen muutoksiin (kuva 1).



Kuva 1. Varavoimakoneen jännitteen ja taajuuden käyttäytyminen kuormituksen muuttuessa (Muokattu lähteestä: Ponte 2019, 3).

Kuvasta nähdään, että kuormituksen kytkeytyminen generaattoriin voi johtaa sekä jännitteen että taajuuden hetkelliseen laskuun. Dieselgeneraattori, joka on suunniteltu toimimaan vakionopeudella ja antamaan tehoa tietyllä jännitteellä, reagoi mahdollisimman nopeasti normalisoidakseen sekä jännitteen että taajuuden takaisin nimellisarvoihin. Samanlainen käyttäytyminen havaitaan, jos generaattorin syöttö kuormalle katkaistaan. Erona on se, että tällä kertaa aleneman sijaan nähdään sekä nimellisjännitteen että -taajuuden ylitys. Sinä aikana, jolloin kaikki tämä tapahtuu, voidaan seurata useita parametrejä. Näitä ovat poikkeama prosentteina nimellisarvoista sekä aika sekunteina, joka kuluu sekä jännitteen että taajuuden palautumiseen nimellisarvoon.

Varavoimalaitteisto on valittava niin, että sen suorituskykyluokka vastaa sähköverkon kuormien vaatimuksia. Taulukkoon 2 on koottu yhteenveto tärkeimmistä käyttöraja-arvoista standardin ISO 8528-5:2018 luvussa 16 määriteltyjen parametrien pohjalta (Ponte 2019, 9). (Hakanen et al. 2019, 79.)

Taulukko 2. Yhteenvedo suorituskykyluokkien G1-G3 vaatimuksista (Hakanen et al. 2019, 79).

Ominaisuus	G1	G2	G3
Taajuuden alenema, kun teho 0 % => 100 %	8 %	5 %	3 %
Taajuuden sallittu vaihteluväli vakiintuneessa syöttötilanteessa	±2,5 %	±1,5 %	±0,5 %
Taajuuden sallittu alenema äkillisessä kuorman lisäyksessä	-15 %	-10 %	-7 %
Taajuuden asettumisaika	< 10 s	< 5 s	< 3 s
Jännitteen sallittu vaihteluväli vakiintuneessa syöttötilanteessa	±5 %	±2,5 %	±1,0 %
Jännitteen sallittu alenema äkillisessä kuorman lisäyksessä	-25 %	-20 %	-15 %
Jännitteen asettumisaika	< 10 s	< 6 s	< 4 s

Luokan G1 varavoimalaitteisto soveltuu yleiskäyttöiset kuormille, kuten valaistus ja muut yksinkertaiset sähkökuormat. Luokan G2 varavoimalaitteisto soveltuu yleiseen sähköverkkoon normaalisti kytketyille kuormille, kuten valaistusjärjestelmät, pumput, puhaltimet ja nostimet (Ponte 2019, 3). Taulukon 2 mukaan G3 suorituskykyluokan varavoimalaitteistoon kytkettyä kuorma saa pienentää taajuutta enintään 7 % ja jännitettä 15 %, jonka jälkeen taajuuden on asetettava nimelliseen arvoon kolmen sekunnin kuluessa ja vastaavasti jännitteen neljän sekunnin kuluessa. Suorituskykyluokan G3 varavoimalaitteisto sopii tarkoituksiin, jossa taajuuden ja jännitteen tason ja vakavuuden sekä aaltomuodon vaatimukset ovat korkeat (Hakanen et al. 2019, 80). Jos G3 suorituskykyluokka ei riitä ja kuorman vaatimukset edellyttävät luokan G4 käyttöä tulee suorituskykyvaatimukset määrittää tapauskohtaisesti, koska standardissa ei niitä määritellä. Tällöin varavoimalaitteiston suorituskyky määritellään yleensä valmistajan ja asiakkaan välisellä sopimuksella (Ponte 2019, 3).

2.1.1 Dieselgeneraattorin rakenne

Dieselgeneraattorin kokonaisuuden pääosat muodostavat dieselmoottori, generaattori ja niiden välinen voimansiirto sekä runko ja alustarakenteet käyntitärinän eristämiseen. Mekaanista liitääntä moottorin ja generaattorin välillä kutsutaan yksi- tai kaksilaakeriseksi. Yksilaakerisessa ratkaisussa generaattorin roottorin akseli on liitetty laipalla jäykästi moottorin kampiakselin jatkoksi ja vain generaattorin roottorin vapaassa päässä on laakeri (Kauppinen

et al. 2020, 178). Kaksilaakerisessa ratkaisussa generaattorin akselin molemmissa päissä on laakerit ja kytkentä moottoriin on toteutettu joustavalla kytkimellä. Dieselgeneraattori on yleensä koottu yhtenäisen teräsalustan päälle. Teräsalustan alle asennetaan käyntitärinän eristimet. (Hakanen et al. 2019, 90.)

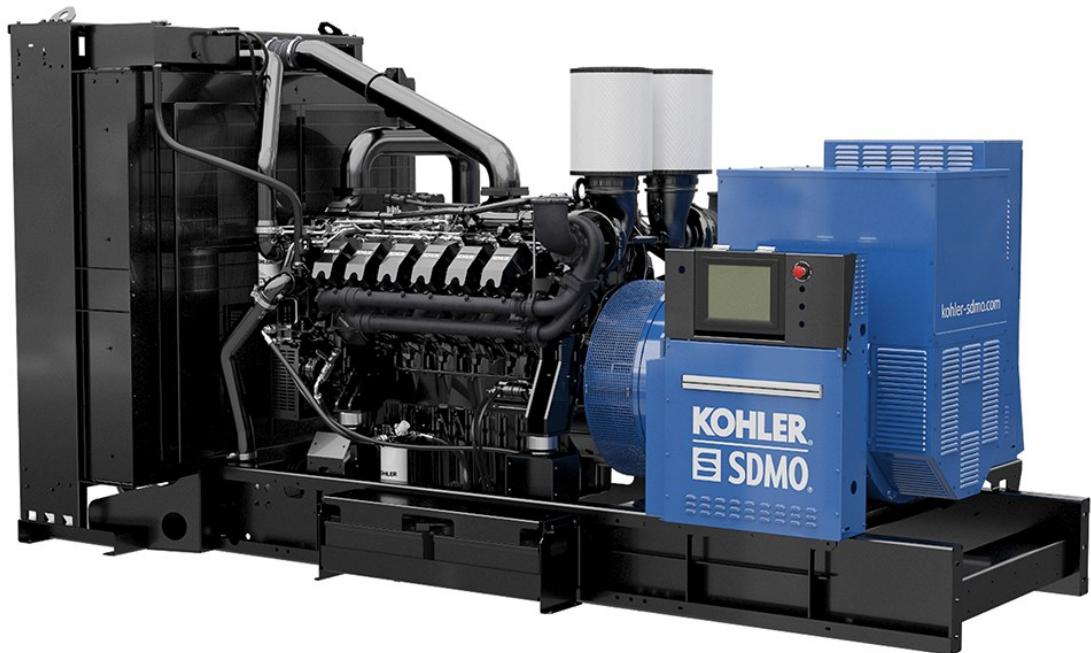
Dieselmoottori tarvitsee toimiakseen apujärjestelmiä. Apujärjestelmiä ovat dieselgeneraattorin yhteyteen asennetut käynnistysmoottori, latausgeneraattori käynnistysakustolle, suodattimet voiteluöljylle, polttoaineelle ja palamisilmalle sekä erilaiset mittarit, mittalaitteet ja anturit (Hakanen et al. 2019, 92–93).

Dieselgeneraattorin ohjausta ja valvontaa varten tarvitaan järjestelmä, jonka on oltava standardien ja määräysten mukainen. Tärkeimmät ovat konedirektiivi SFS-EN 60204-1, standardisarja pienjännitesähköasennukset SFS 6000, sähkötyöturvallisuus SFS 6002 ja standardisarja EN 60439 (Hakanen et al. 2019, 96).

Ohjaus- ja valvontakojeiston automatiikka voi sisältää verkkoon tahdistustoiminnan, jota tarvitaan yleisen sähköverkon palautuessa katkon jälkeen. Varavoimakoneen automatiikka valvoo verkkojännitettä ja ohjaa varavoimakonetta sekä verkkokatkaisijaa. Verkkokatkon tai häiriön aikana yleinen verkko erotetaan automaattisesti verkkokatkaisijalla ja varavoimakone käynnistyy, jonka jälkeen generaattorikatkaisijan sulkeuduttua varavoimakone siirtyy syöttämään kuormia. Kuormien kytkeytymistä voidaan porrastaa automatiikan ohjaamina. Yleisen sähköverkon palautuessa katkon jälkeen varavoimakone tahdistuu verkon kanssa ja varavoimakoneen automatiikka sulkee verkkokatkaisijan, jolloin kuomat siirtyvät pehmeästi yleisen sähköverkon syötettäväksi (Kauppinen et al. 2020, 182). Jälkikäyntiajan jälkeen varavoimakoneen ohjausautomatiikka pysäyttää varavoimakoneen. Verkkoon tahdistusta tarvitaan myös, jos halutaan käyttää varavoimakonetta yleisen sähköverkon rinnalla. Tällainen tarve tulee ainakin sähkölaitteiston käyttö- ja huoltosuunnitelman mukaisten kuukausikokeilujen yhteydessä. Tällöin varavoimakonetta ohjataan manuaalisesti ohjaus- ja valvontakojeiston painikkeista.

Ohjaus- ja valvontakojeisto kootaan pääosin yhteen kojeakaappiin, joka sijoitetaan dieselgeneraattorin yhteyteen, kuten kuvassa 2 tai erilleen siitä, esimerkiksi varavoimahuoneen seinään. Kojestokaapin sijoittelussa tulee huomioida riittävä hoitokäytävän leveys kaapin edessä (SFS 6000-7-729:2017, 9). Ohjaus- ja valvontakojeisto sisältää ohjauskojeet, suojaus- ja hälytyskojeet, mittaus- ja valvontakojeet ja pääpiirin kojeet, kuten

generaattorikatkaisijan. Verkkokatkaisija on yleensä sijoitettu pääkeskukseen tai erilliseen varavoimakeskukseen. Ohjaus- ja valvontakojeiston ohjausjännite on verkkojännitteen suuruinen, mutta akkujännitteellä toimivien kojeiden käyttöjännite on yleensä 24 VDC, jolloin se voidaan ottaa käynnistysakustosta. (Hakanen et al. 2019, 95–96.)



Kuva 2. Kohler SDMO KD-sarjan varavoimakone (Machinery 2022)

Kuvassa nähdään erään valmistajan runko- ja alustarakenteen päälle koottu dieselgeneraattori. Generaattorin edessä on kojekaappi, johon on sijoitettu varavoimakoneen ohjaus- ja valvontakojeisto. Kojeistokaapin kanteen on sijoitettu varavoimakoneen paikallisautomaation näyttöpaneeli, josta voi seurata reaaliaikaisesti varavoimakoneen parametreja, kuten sen syöttämää tehoa.

Kuvassa vasemmalla on dieselmoottorin jäähdytintä. Jäähdytintä voidaan lauhduttaa suoraan puhaltimella, kuten yleisesti autoissa tai siitä voidaan viedä putkistot erillisille ulkoisille lauhduttimille. Jos jäähdytintä lauhdutetaan suoraan puhaltimilla ulos, se pitää ottaa huomioon varavoimakoneen sijoittelussa varavoimakonehuoneessa. Tällöin varavoimakone

sijoitetaan niin, että lauhdutusilma voidaan suoraan puhaltaa poistoilmasäleikön kautta ulos. Poistoilmasäleikön avaamisesta ja sulkemisesta huolehtii varavoimakoneen automatiikan ohjaama peltimoottori. Poistoilmasäleikkö pidetään normaalisti suljettuna, ettei kylmää ilmaa virtaa sitä kautta varavoimahuoneeseen. Peltimoottori ajaa säleikön auki varavoimakoneen käynnistyessä. Myös korvausilman saanti varavoimahuoneeseen pitää huomioida suunnittelussa.

2.1.2 Dieselmoottori

Dieselmoottorin tehtävä on tuottaa generaattorin akselille riittävä teho ja vääntö oikealla kierrosnopeudella. Generaattorin lähdejännitteen taajuus f määräytyy dieselmoottorin pyörimisnopeuden perusteella yhtälön 1 mukaisesti. Dieselmoottorit ovat suoraruiskutteisia. Polttoaineen syöttöjärjestelmän ja sen säätimen avulla moottorin kierroslukua pyritään pitämään vakiona generaattorin eri kuormitustilanteissa ja kuormituksen muuttuessa. Puolustuskiinteistöissä yleisesti käytössä olevissa dieselgeneraattoreissa kierrosnopeus on 1500 rpm eli generaattorit ovat nelinapaisia.

$$f = n \cdot p \quad (1)$$

jossa n kierrosnopeus [1/s] ja p on napaparien määrä.

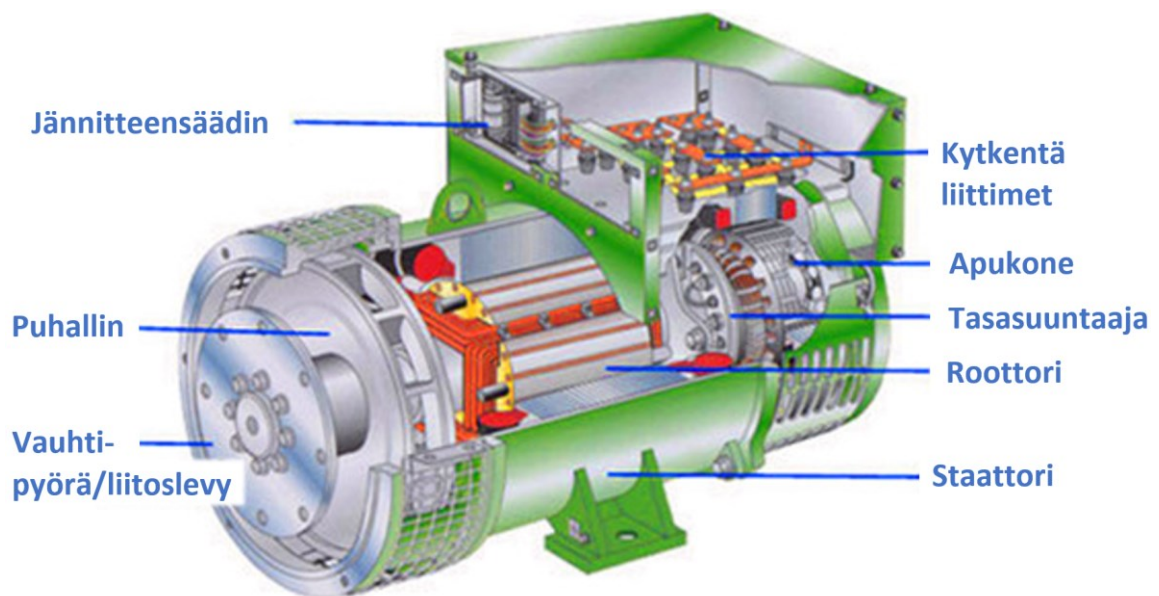
Polttoaineen syöttöjärjestelmän säädinvaihtoehtoina ovat mekaaninen moottorinohjaussäädin tai moottorinohjausyksikkö, joka sisältää runsaasti anturointeja ja säädettäviä parametreja. Mekaanisen moottorinohjaussäätimen käytöllä menetetään hieman suorituskykyä, mutta saavutetaan parempi varautumisvarmuus elektromagneettisille häiriöille.

Dieselmoottorit ovat nykyisin tyypillisesti turboahdettuja ja usein myös välijäähdytettyjä. Kuormanottokyvyn varmistamiseksi dieselgeneraattori käynnistetään vähitellen kuormitusportaita lisäten (Ponte 2019, 15). Voimakkaasti ahdettu dieselmoottori omaa huomattavasti huonomman kuormanottokyvyn kuin saman tehoinen ahtamaton, vapaasti hengittävä moottori. Tämän takia, jossain tapauksissa dieselmoottorin teho on ylimitoitettava. Myös moottorin lämpötila käynnistettäessä vaikuttaa kuormanottokykyyn. Pysähdyksissä oleva dieselmoottori pidetään esilämmityslämpötilassa, jolloin sen käynnistyminen on varmaa ja kuormanottokyky nopeaa. Lämmitys toteutetaan moottorilohkon vesitilassa olevan lohkolämmittimen ja

termostaatin avulla. Pysähdyksissä oleva dieselmoottorin lämpötila on tyypillisesti 30–40 °C. (Hakanen et al. 2019, 79.)

2.1.3 Generaattori

Generaattori on kone, joka muuttaa dieselmoottorin mekaanista energiaa sähköenergiaksi. Generaattorin tuottaman sähkövirran taajuutta säädetään dieselmoottorin kierrosnopeudella ja jännitettä säädetään roottorin magnetointia muuttamalla. Generaattorin antaman pätötehon määrää sitä pyörittävä dieselmoottori, koska generaattori voi siirtää enintään sen tehon mitä siihen syötetään. Kuvassa 3 on esitetty Puolustuskiinteistöissä yleisesti käytössä olevan tahtigeneraattorin rakenne. Generaattorin roottorin kanssa samalle akselille on liitetty apukone, joka on käytännössä kestopagnetoitu vaihtovirtageneraattori. Apukoneen syöttämä vaihtojännite tasasuunnataan roottorin magnetointia varten.

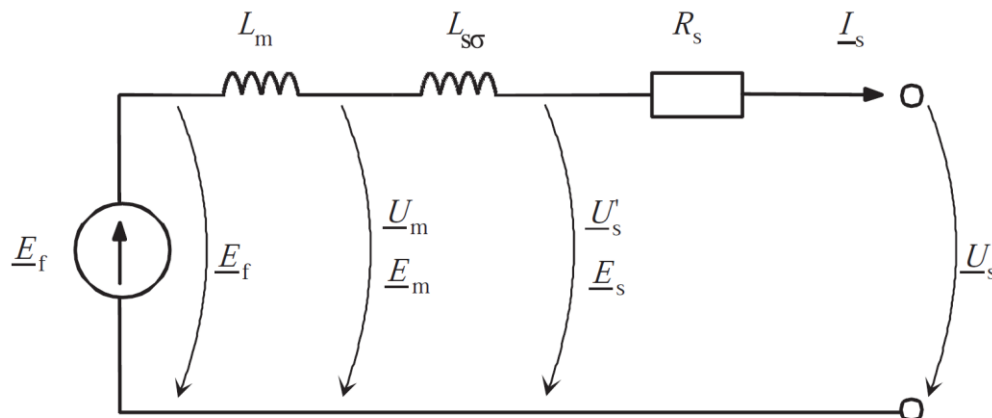


Kuva 3. Tahtigeneraattorin rakenne (Muokattu lähteestä: Starlight Power 2018).

Tahtigeneraattorin staattorikämmityksiin indusoituu lähdejännite, kun sen sisällä pyöritetään magnetoitua roottoria. Roottoriin synnytetään vakioagneettivuo magnetoimalla roottorin magneettinavat tasavirralla. Tasavirralla magnetoitu roottori ja 3-vaiheisen staattorikämmityksen muodostama magneettikenttä pyörivät keskenään samalla nopeudella eli tahdissa.

Ylimagnetoituna tahtigeneraattori syöttää induktiivisten kuormien vaatimaa virtaa verkkoon. Ylimagnetoituna tahtigeneraattori toimii verkon kannalta kondensaattorina, ja vastavasti alimagnetoituna se ottaa tarvittavan lisämagnetoinnin verkosta toimien verkon kannalta kelana (Hietalahti 2011, 97). Normaalisti synkroniset koneet käyvät verkossa ylimagnetoituna, tehokertoimen ollessa 0,7–0,8. Tahtikoneet toimivat harvoin alimagnetoituna, mutta tilanteessa, jossa iso generaattori syöttää pitkää siirtojohtoa luonnollisen tehon alapuolella, jännitteellä on taipumus nousta johdon loppua kohti, jolloin kone itse saattaa käydä alimagnetoituna. (Pyrhönen et al. 2008, 370.)

Tahtikonetta kuvaava sijaiskytkentä (kuva 4) sisältää magnetointi- ja hajainduktanssikomponentit sekä käämityksen resistiiviset häviöt R_s . Magnetointi-induktanssin L_m suuruus riippuu magnetoinnin tilasta. Hajainduktanssien $L_{\sigma s}$ suuruus ei muutu paitsi erittäin suurilla staattorivirran arvoilla kuten oikosulkutilanteessa (Hietalahti 2011, 93).

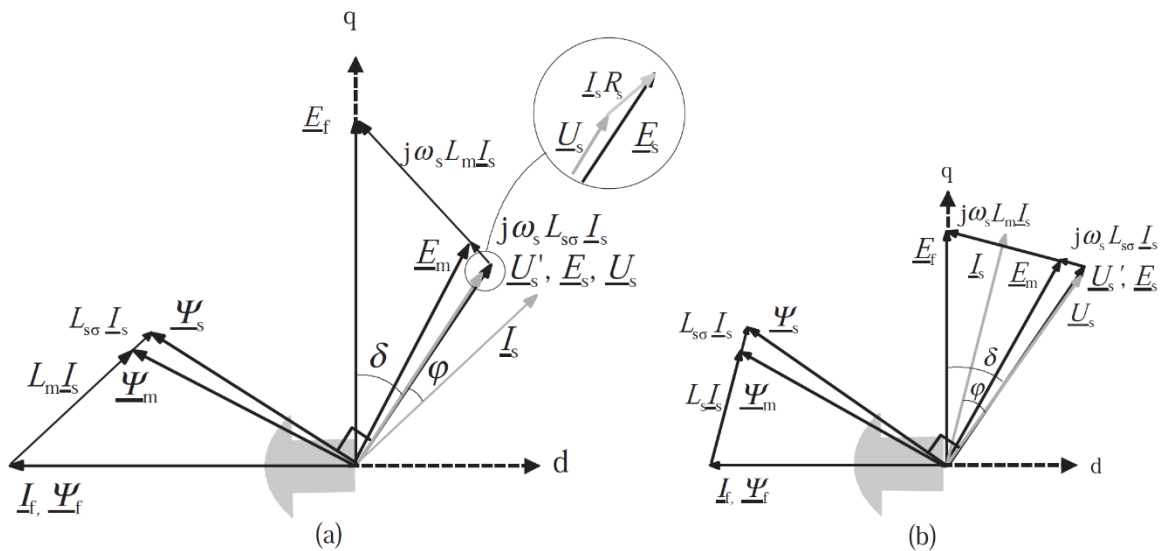


Kuva 4. Tahtikoneen sijaiskytkentä (Pyrhönen et al. 2008, 377).

Tahtigeneraattori voidaan kytkeä joko aktiiviseen verkkoon, joka sisältää muita verkkojännitettä ylläpitäviä koneita, tai passiiviseen saarekekuormaan, jossa generaattori yksin vastaa jännitteestä. Yleiseen jakeluverkkoon kytkeydyttyessä oletetaan, että verkko määrittää generaattorin napajännitteen ja generaattorin kenttäkäämin virta määrää generaattorin loistehotasapainon. Saarekekäytössä kuorma määrää generaattorin tehokertoimen ja kenttäkäämin virralla säädetään generaattorin liitinjännitettä. Tahtigeneraattorin käyttäytymistä kuvaava

osoitinkuvaajarakenne on riippumaton generaattorin toimintatavasta eli toimiiko se jakeluverkon rinnalla vai saarekekäytössä. (Pyrhönen et al. 2008, 378.)

Koska tahtikone toimii generaattorina lähdejännite \bar{E}_f tuottaa virran \bar{I}_s . Siksi tahtigeneraattorin osoitinkuvaajassa jännitteen \bar{U}_s ja virran \bar{I}_s aktiiviset komponentit on kuvattu suunnilleen rinnakkaisina. Osoitinpiirroksessa on myös jännite \bar{U}'_s , joka on staattorin resistiivisellä jännitehäviöllä $\bar{I}_s R_s$ vähennetty napajännite. Jännitettä \bar{U}'_s käytetään staattorikäämivuon $\bar{\Psi}_s$ suunnan määrittämisessä. Kenttäkäämin luoma käämivuo $\bar{\Psi}_f$ on kuvattu 90° edellä lähdejännitettä \bar{E}_f ja ankkurireaktion aiheuttamaa käämivuota $\bar{\Psi}_a = L_m \bar{I}_s + L_{\sigma s} \bar{I}_s$ staattorivirran rinnalla. Magnetointikäämivuon $\bar{\Psi}_f$ ja ankkurireaktion aiheuttaman käämivuon ($\Psi_a = L_m \bar{I}_s + L_{\sigma s} \bar{I}_s$) geometriselle summalle saadaan kokonaisvuo $\bar{\Psi}_s$, joka on 90° jännitettä \bar{U}'_s edellä. Kuvien 5a ja 5b osoitinkuvaajat havainnollistavat umpinapatahtigeneraattorin käyttäytymistä yli- ja alimagnetoituna. (Pyrhönen et al. 2008, 378.)

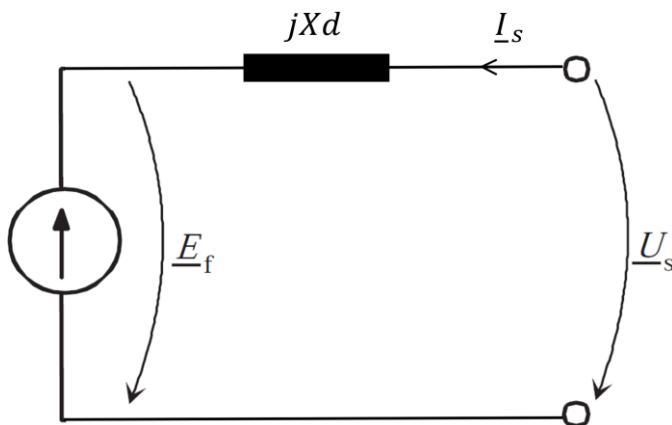


Kuva 5. Umpinapatahtigeneraattorin osoitinkuvaajat yli- ali magnetoituna (Pyrhönen et al. 2008, 378).

Kuvassa 5a generaattori on ylimagnetoitu ja kuvassa 5b alimagnetoitu. Kuvassa 5a tahtigeneraattorin virta on jäljessä jännitteestä ja siksi kone toimii ylimagnetoituna syöttäen verkkoon induktiivista loistehoa eli kuorman vaihesiirto on induktiivinen. Ylimagnetoitu tahtigeneraattori on helposti tunnistettavissa lähdejännitteen E_f suuruudesta, jonka itseisarvo

ylimagnetoidulle generaattorille on merkittävästi suurempi kuin napajännite U_s . Napakulma δ jää huomattavasti pienemmäksi ylimagnetoidussa generaattorissa verrattuna alimagnetoi- tuun generaattoriin. Ylimagnetoituja tahtikoneita käytetään monissa teollisuuslaitoksissa tuottamaan magnetointitehoa eli induktiivista loistehoa epätahtikoneille ja muille laitoksen induktiivisille kuormille. Kuvasta 5b näkyy, että alimagnetoidun tahtigeneraattorin vaihe- siirtokulma φ on alle 90° ja kapasitiivinen. (Pyrhönen et al. 2008, 378.)

Tahtigeneraattori voidaan yksinkertaisimmillaan mallintaa Theveninin lähteellä (kuva 6), joka riittävä verkostolaskennan tarpeisiin. Sarjaimpedanssina on tahtireaktanssi X_d ja jän- nitelähde on säädettävä magnetoinnista riippuva indusoituva sisäjännite (Hietalahti 2011, 89). Sarjaimpedanssina on tahtireaktanssi X_d . Jännitteet ovat vaihejännitteitä.

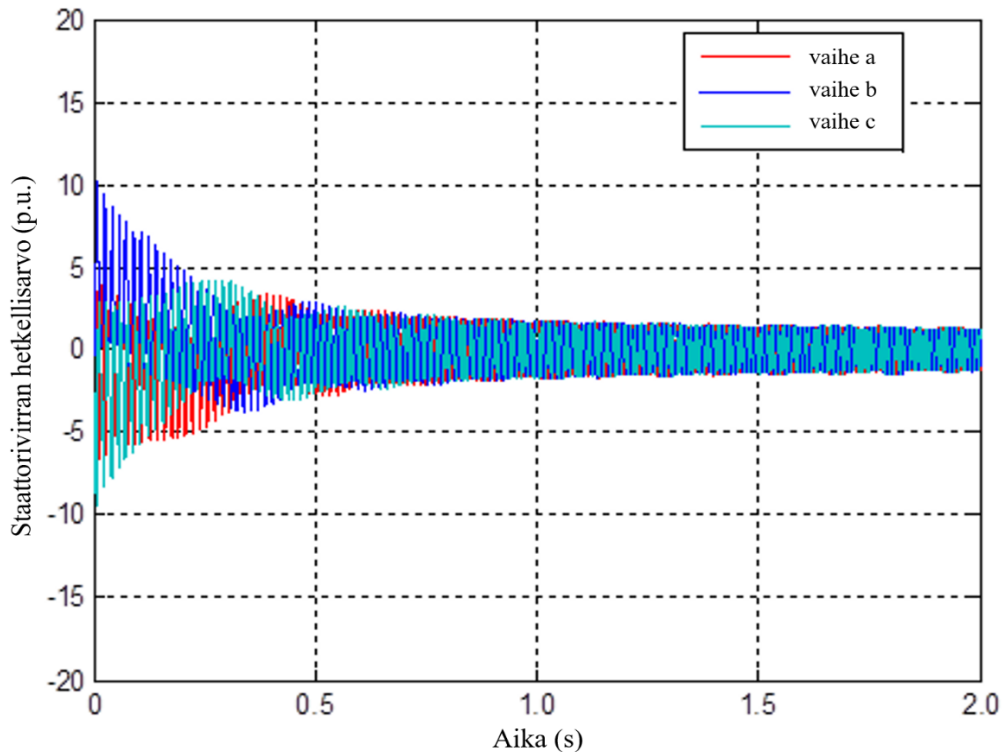


Kuva 6. Tahtigeneraattorin mallintaminen Theveninin lähteellä (Hietalahti 2011, 90).

Thevenin malli pätee sellaisenaan pysyvän kuormitustilanteen mallintamiseen, jolloin tahti- generaattorin sisäinen reaktanssi $X = X_d$ eli pitkittäinen tahtireaktanssi. Kuorman kytkeyty- essä generaattorin liittimiin tai verkon oikosulussa ollaan muutostilassa, jolloin sisäinen reaktanssi on pienempi. Muutoksen alkuhetkellä sisäinen reaktanssi on pitkittäinen alkureak- tanssi jolloin $X = X''_d$. Alkuhetken jälkeen muutostilassa sisäinen reaktanssi on pitkittäinen muutosreaktanssi jolloin $X = X'_d$. Muutostilanteet eivät tapahdu askelmaisesti, vaan siirty- minen tilasta toiseen vie aikaa, ja suureet muuttuvat jatkuvasti ajan funktiona. Tahtigeneraat- torin muutostilanteiden käyttäytymistä mallinnetaan määriteltyjen aikavakioiden (taulukko 3) avulla, jotka pätevät koneen nimellisellä nopeudella. Esimerkki tahtigeneraattorin oiko- sulkuvirran käyttäytymisestä muutostilanteesta nähdään kuvasta 7. (Hietalahti 2011, 96.)

Taulukko 3. Tahtigeneraattorin aikavakiot (Hietalahti 2011, 97)

Aikavakio	Kuvaus
τ'_{do}	on pitkittäisen avoimen piirin aikavakio, joka mallintaa vaihejännitteen muuttumista tyhjäkäynnissä, kun magnetointipiiri oikosuljetaan äkillisesti.
τ''_{do}	on pitkittäisen avoimen piirin alkuaikavakio, joka mallintaa vaihejännitteen muuttumista tyhjäkäynnissä, kun käyntiolosuhteissa tapahtuu äkillinen muutos.
τ'_{qo}	on poikittaisen avoimen piirin alkuaikavakio, joka mallintaa vaihejännitteen muuttumista tyhjäkäynnissä, kun käyntiolosuhteissa tapahtuu äkillinen muutos.
τ'_d	on pitkittäisen suljetun piirin aikavakio, joka mallintaa vaihevirran muuttumista, kun kone oikosuljetaan äkillisesti.
τ''_d	on pitkittäisen suljetun piirin alkuaikavakio, joka mallintaa vaihevirran muuttumista, kun kone oikosuljetaan äkillisesti.
τ''_q	on poikittaisen suljetun piirin alkuaikavakio, joka mallintaa vaihevirran muuttumista, kun kone oikosuljetaan äkillisesti.
τ_a	on poikittaisen suljetun piirin alkuaikavakio, joka mallintaa vaihevirran tasakomponentin muuttumista tyhjäkäynnissä, kun kone oikosuljetaan äkillisesti.



Kuva 7. Tahtigeneraattorin virran käyttäytyminen oikosulussa (Muokattu lähteestä: Lale Zeynelgil 2016).

Kuvassa tahtigeneraattorin syöttämä verkko on 3-vaiheisessa oikosulussa. Alkuhetken (0 s) jälkeen siirrytään muutostilan kautta jatkuvuustilaan.

Käytännön tarkastelua varten tahtireaktanssien arvot ja aikavakiot saadaan generaattorin valmistajalta. Tahtireaktanssien arvot ilmoitetaan generaattorin teknisessä datatiedostossa yleensä suhteellisessa muodossa (per unit value). Muunnos todelliseen arvoon voidaan laskea

$$X''_d = x''_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (2)$$

jossa X''_d on pitkittäinen tahtireaktanssi muutoksen alkuhetkellä, x''_d on pitkittäisen tahtireaktanssin suhteellinen arvo muutoksen alkuhetkellä, U_n on generaattorin nimellisjännite ja S_n on generaattorin nimellinen näennäisteho. Kuvan 4 Theveninin mallin yleistä muotoa soveltaen voidaan ratkaista alkuoikosulkuvirta $\bar{I}_{k''}$ generaattorin liittimissä

$$\bar{I}_{k''} = \frac{c \cdot \bar{U}_n}{\sqrt{3} \cdot jX''_d} \quad (3)$$

jossa c on taulukon 4 mukainen jännitekerroin, \bar{U}_n on generaattorin nimellisjännite ja X''_d on pitkittäinen tahtireaktanssi muutoksen alkuhetkellä.

Taulukko 4. IEC 60909 mukainen jännitekerroin c (ABB 2000, 198).

Nimellisjännite U_n	Maksimioikosulkuvirta c_{\max}	Minimioikosulkuvirta c_{\min}
Pienjännite 100 V – 1000 V		
a) 230 / 400 V	1.00	0.95
b) muut jännitteet	1.05	1.00
Keskijännite 1 kV – 35 kV	1.10	1.00
Suurjännite 35 kV – 230 kV	1.10	1.00

Jos oikosulkusuojaus ei toimi nopeasti generaattorin syöttämä virta pienenee. Oikosulun jatkuvuustilassa tahtigeneraattorin oikosulkuvirran tarkka laskeminen on vaikeaa.

Magnetoinnin säätäjä yrittää ylläpitää napajännitettä lisäämällä magnetointijännitettä ja samalla pyrkii kasvattamaan oikosulkuvirtaa. Oikosulkuvirran suuruus jatkuvuustilassa saadaan generaattorin valmistajalta. IEC 60909 mukaan, jos generaattorin rinnalla on oikosulun jatkuvuustilassa muita oikosulkuvirtaa syöttäviä lähteitä, generaattori putoaa tahdistista ja sen syöttämä oikosulkuvirta on katkaisuvirran suuruinen. (ABB 2000, 203.)

Tahtigeneraattorin reaktanssi X_d oikosulun jatkuvuustilassa voidaan laskea

$$X_d = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} \quad (4)$$

jossa on U_n on generaattorin nimellijännite ja I_k generaattorin syöttämä jatkuvuustilan oikosulkuvirta.

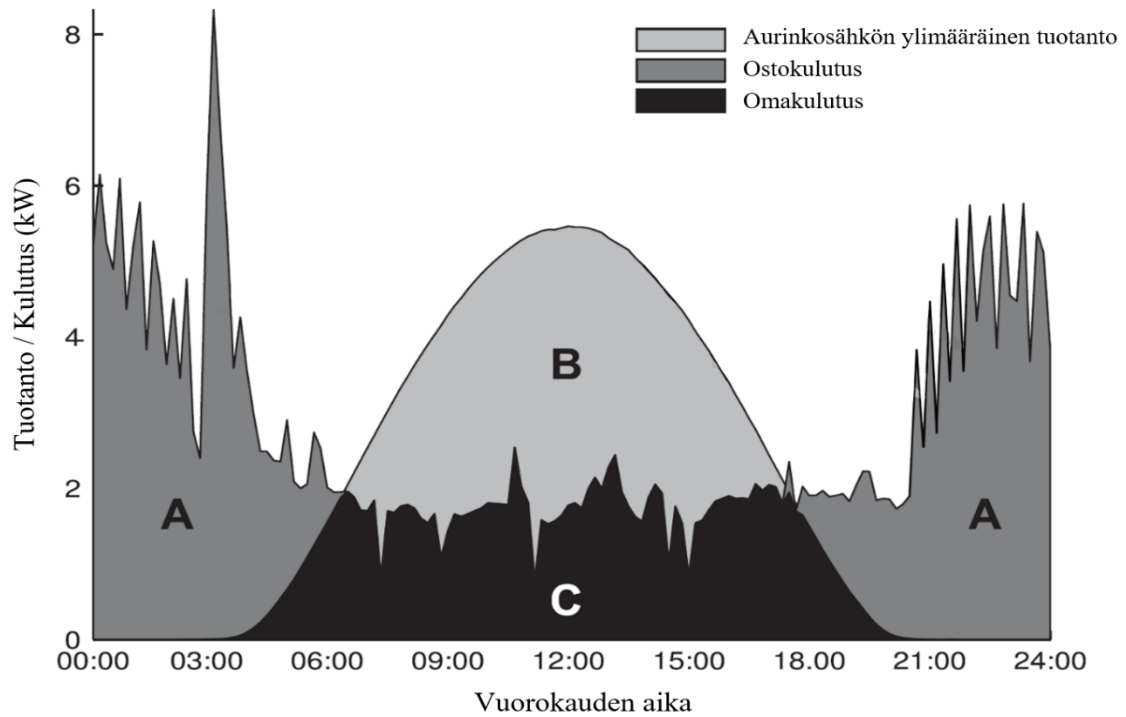
2.2 Aurinkosähkövoimala

Aurinkosähkövoimala toimii normaalioloissa sähköverkon rinnalla uusiutuvan sähköenergian lähteenä pienentäen kasvihuonekaasupäästöjä. Tuotettu sähköenergia kulutetaan Puolustuskiinteistöjen omistamissa kiinteistöissä jakeluverkon alueella. Normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa aurinkosähkövoimala voi toimia diesel-varavoimakoneen rinnalla, jolloin se pienentää polttoaineen kulutusta. Kun aurinkosähkön tuotantolaitteiston teho on alle 2 MVA on sähköntuotanto sähkömarkkinalain määritelmän mukaista pientuotantoa.

Sähkön pientuotannon liittämiseen osaksi valtakunnallista sähköverkkoa kohdistuu teknisiä vaatimuksia, jotka on tehty sähköverkon turvallisen ja luotettavan toiminnan takaamiseksi. Keskeisimmät pientuotannon tekniset vaatimukset on esitetty standardissa SFS-EN 50549-1:2019 sekä Fingridin VJV2018 -vaatimusdokumentissa. Näiden lisäksi Energiateollisuus ry on julkaissut suosituksen Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset, jonka liitteenä on taulukko tuotantolaitteistojen suositelluille oletusasetuksille. (Energiateollisuus 2022.)

Aurinkosähkövoimalan mitoituksen perusteena käytetään liittymän ostopisteen vuosikulutusprofiilia. Tässä tarkastelussa mitoituksen periaatteena on, että kaikki tuotettu sähkö saadaan itse kulutettua. Aurinkovoimalan tehontarpeen määrittelyssä on hyvä asettaa tavoitteet tuotto-odotuksille. Hyviä mittareita ovat omavaraisuusaste ja omakulutusaste. Simuloimalla suunniteltua aurinkosähkövoimalan tuntipohjaista tuotantoa, voidaan varmentaa tuotto-

odotusten toteutuminen (kuva 8). Simulointiohjelmisto ottaa huomioon vuosituotantoarviossa aurinkosähkövoimalan sijainnin, tuotannon vaihtelut vuoden- ja vuorokaudenaikojen mukaan, paneelien sijoittelun sekä järjestelmän häviöt.



Kuva 8. Vuorokauden kulutus- ja tuotantoprofiili kohteesta, johon on asennettu aurinkosähkövoimala. Sähköenergian kulutus (A + C), tuotanto (B + C) ja omakulutus (C) (Muokattu lähteestä: Luthander et al., 2015).

Aurinkosähköjärjestelmän omavaraisuusaste kuvaa kuinka suuren osan aurinkosähköjärjestelmän tuottama sähkö kattaa sähkönkulutuksesta. Omavaraisuusaste voidaan laskea

$$\text{Omavaraisuusaste} = \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} M(t)dt}{\int_{t=t_1}^{t_2} L(t)dt} \quad (5)$$

jossa $M(t)$ on tuotanto- ja kulutusprofiilien hetkellisesti päällekkäinen osa. Integroitaessa se ajan suhteen saadaan vastaava pinta-ala kuin alue C kuvassa 8. $L(t)$ on hetkellinen rakennuksen sähköenergian kulutus, joten integroitaessa se ajan suhteen saadaan vastaava kuin alue A+C kuvassa 8.

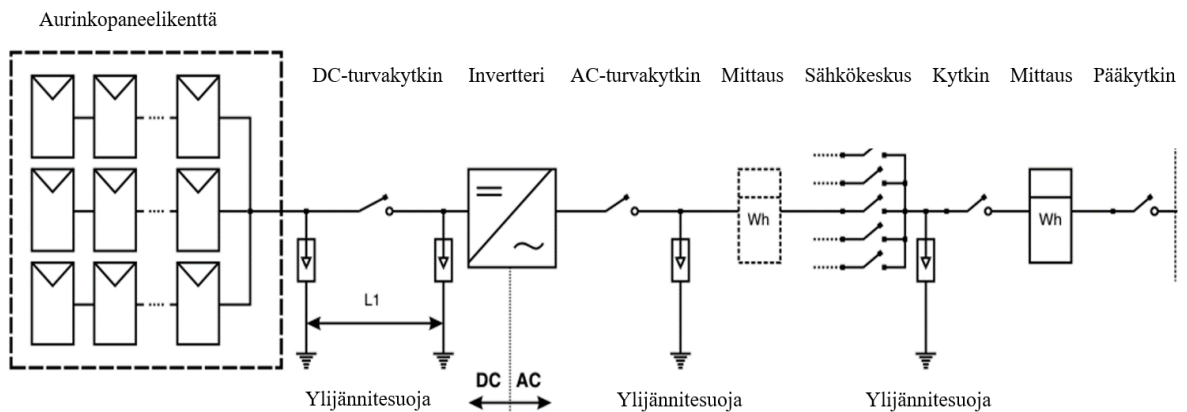
Aurinkosähköjärjestelmän omakulutusasteella tarkoitetaan sitä määrää, joka aurinkosähköstä saadaan kulutettua suhteessa tuotantoon. Tuotannosta ylimenevä osa myydään verkkoon. Omakulutusaste voidaan laskea

$$\text{Omakulutusaste} = \frac{\int_{t=t_1}^{t_2} M(t)dt}{\int_{t=t_1}^{t_2} P(t)dt} \quad (6)$$

jossa $M(t)$ on tuotanto- ja kulutusprofiilien hetkellisesti päällekkäinen osa eli integroitaessa se ajan suhteen saadaan vastaava kuin alue C kuvassa 8. $P(t)$ on hetkellinen aurinkosähköntuotanto, joten integroitaessa se ajan suhteen saadaan vastaava kuin alue B+C kuvassa 8.

2.2.1 Rakenne

Aurinkovoimalan tärkeimmät osat ovat aurinkopaneelit telineineen, vaihtosuuntaaja, kaapelit, suojalaitteet ja maadoituksen osat (kuva 9). Lisäksi tarvitaan apulaitteita, kuten turvakytkimet sekä tasasähkö että vaihtosähkö puolelle. Mahdollisesti tarvitaan myös energian mittarointi aurinkovoimalan syöttämään keskukseen.



Kuva 9. Verkkoon kytketty aurinkosähkölaitteisto (Muokattu lähteestä: PVshop.eu 2022).

DC-kaapelien liittämässä tulee huomioida liitinparien yhteensopivuus eli käytetään saman valmistaja liittimiä (uros/naaras). DC-kaapeloinnissa tulee välttää silmukoiden muodostumista eli paneeliketjujen paluujohdin (-) pitää tuoda samaa johtotietä menojohtimen (+)

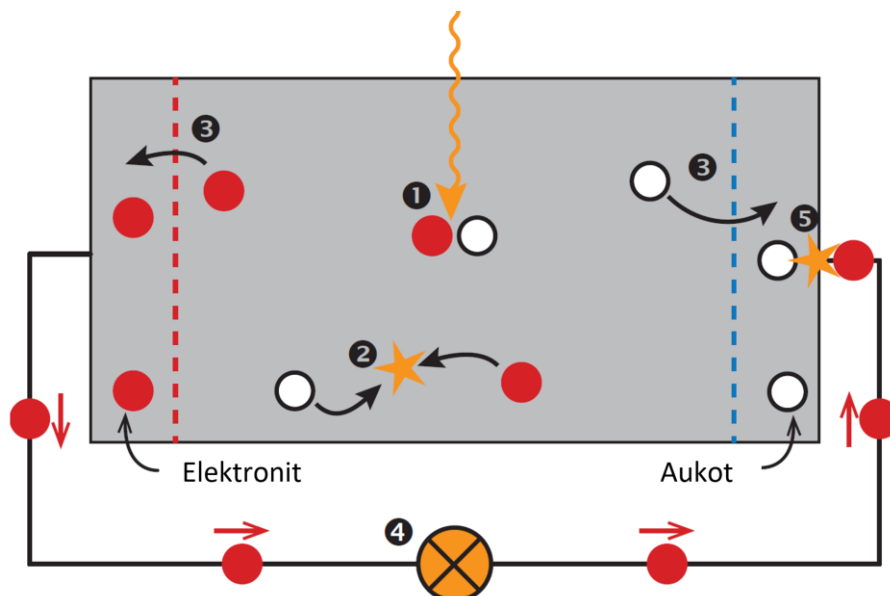
kanssa. Kaapeleiden mekaaninen suojaus varsinkin DC-puolella parantaa laitteiston paloturvallisuutta merkittävästi.

Ylijännitesuojauksen tarpeellisuus arvioidaan riskien perusteella. Perusteena on salamaisku-tiheys (salama/km²/vuosi) tarkasteltavan sijainnin sähkölinjojen ja rakenteiden ympäristössä. Jos ylijännitesuojien käyttö arvioidaan tarpeelliseksi, transienttiylijännitesuojaus on toteutettava aurinkosähkölaitteiston tasasähköosassa. Asennuksen liitännäkohdan ja vaihtosuuntaajan välisen pitkän etäisyyden takia, voi olla tarpeen asentaa ylijännitesuojat myös vaihtosähköosaan. (Sesko 2022, 525.)

Tasasähköosan eristystila on oltava valvottavissa. Yleisesti valvonta on integroitu aurinkosähköinvertertiin. Kaikki aurinkopaneelitelineiden johtavat rakenteet maadoitetaan katkeamattomasti, myös mahdolliset kaapelihyllyt. Maadoitus liitetään syötettävän rakennuksen pääpotentiaalintasaukseen.

2.2.2 Aurinkopaneelit

Aurinkokennossa auringon säteily muunnetaan sähköenergiaksi. Muunnoksen mahdollistaa valosähköinen ilmiö, jossa fotonin absorptio johtaa elektroni-aukkoparin muodostumiseen (kuva 10).



Kuva 10. Aurinkokennon toimintaperiaate (Muokattu lähteestä: Jäger et al. 2014, 25).

Elektronit ja aukot voidaan erottaa toisistaan puoliläpäisevillä kalvoilla. Kuvassa nähdään, että elektronit pääsevät vapaasti virtaamaan puolijohdemateriaalissa, muodostaen sähkövirtaa aurinkokennojen virtajohtimiin. Kun elektronit ovat kulkeneet piirin läpi, ne yhdistyvät uudelleen aukkoihin.

Yksi aurinkokenno tuottaa vain pienen jännitteen, joten kennoja kytketään sarjaan. Sarjaan kytketyt aurinkokennot kehikoon asennettuna muodostavat aurinkopaneelin. Tyypillisessä aurinkopaneelissa on 120 kennoa ja sen avoimen piirin jännite on noin 40 V. Aurinkopaneelin valmistaja ilmoittaa paneelin tekniset tiedot standardi testiolosuhteissa (STC), jolloin lämpötila on +25 °C ja säteily 1000 W/m² AM 1,5 mukaisella spektrillä. Lämpötilan muutos verrattuna standardi testiolosuhteisiin muuttaa paneelista saatavaa jännitettä, virtaa ja tehoa. Lämpötilan nousu pienentää jännitettä ja kasvattaa virtaa. Koska jännite laskee enemmän kuin virta kasvaa, aurinkopaneelin teho pienenee lämpötilan noustessa. Aurinkopaneelin valmistaja ilmoittaa lämpötilan korjauskertoimet paneelista saatavalle jännitteelle, virralle ja teholle. Paneelikentän suunnittelussa otetaan lämpötila huomioon vaativimman olosuhteen mukaan.

Aurinkovoimalan tehontarpeen määrittelyn ja simuloinnin perusteella voidaan suunnitella paneelikenttä. Kun tavoiteltu aurinkosähkövoimalan kokonaisteho P on päätetty ja käytettävät aurinkopaneelit on valittu, voidaan laskea paneelimäärä n_{total}

$$n_{\text{total}} = \frac{P}{P_{STC}} \quad (7)$$

jossa P_{STC} on yhden aurinkopaneelin teho standardi testiolosuhteissa.

Parhaan hyötysuhteen saavuttamiseksi aurinkopaneeleita pyritään asentamaan sarjaan eli ketjuun mahdollisimman monta. Kuitenkin on otettava huomioon, ettei järjestelmän maksimi jännitettä U_{DC_MAX} ylitetä. Järjestelmän maksimi jännite voi olla esimerkiksi 1000 VDC, mutta se riippuu sekä invertterin suurimmasta sallitusta tulojännitteestä, että paneelin suurimmasta sallitusta jännitteestä. Järjestelmän maksimi jännite on pienempi edellä mainituista.

Tarkastelussa pitää ottaa huomioon alhaisin käyttölämpötila, koska jännite on silloin suurimmillaan. Esimerkiksi Suomessa voi kevättalvella olla tilanteita, jolloin auringon säteily on jo voimakasta, mutta lämpötila saattaa esimerkiksi aamuisin olla reilusti pakkasella.

Aurinkopaneelin avoimen piirin jännite eli kuormittamaton jännite -20°C lämpötilassa voidaan laskea

$$U_{\text{OC},-20\text{C}} = \left(1 + \frac{\Delta T \cdot \alpha_{U,\text{OC}}}{100\%}\right) \cdot U_{\text{OC},\text{STC}} \quad (8)$$

jossa $U_{\text{OC},\text{STC}}$ on aurinkopaneelin avoimen piirin jännite standardi olosuhteissa, $\alpha_{U,\text{OC}}$ on lämpötilan korjauskerroin jännitteelle ja ΔT on lämpötilan muutos standardi olosuhteisiin verrattuna (-45 K). Yhteen ketjuun sarjaan asennettavien aurinkopaneelien määrä n_{series} voidaan laskea

$$n_{\text{series}} = \frac{U_{\text{DC},\text{MAX}}}{U_{\text{OC},-20\text{C}}} \quad (9)$$

Aurinkopaneeliketjujen määrä n_{string} voidaan laskea

$$n_{\text{string}} = \frac{n_{\text{total}}}{n_{\text{series}}} \quad (10)$$

Aurinkopaneeliketjut kytkeytyvät invertterissä rinnan. Kirchhoffin virtalain mukaisesti solmupisteeseen kytkeytyvät virrat voidaan laskea yhteen, joten pitää varmistaa, ettei invertterin maksimivirta $I_{\text{DC},\text{MAX}}$ ylitä. Invertterin valmistaja ilmoittaa maksimivirran arvon. Aurinkopaneelin virta on suurimmillaan oikosulussa, suurimmassa käyttölämpötilassa. Aurinkopaneelin oikosulkuvirta lämpötilassa 50°C $I_{\text{SC},50\text{C}}$ voidaan laskea

$$I_{\text{SC},50\text{C}} = \left(1 + \frac{\Delta T \cdot \alpha_{I,\text{SC}}}{100\%}\right) \cdot I_{\text{SC},\text{STC}} \quad (11)$$

jossa $I_{\text{SC},\text{STC}}$ on aurinkopaneelin oikosulkuvirta standardi olosuhteissa, $\alpha_{I,\text{SC}}$ on lämpötilan korjauskerroin virralle ja ΔT on lämpötilan muutos standardi olosuhteisiin verrattuna (25 K).

Invertteriin rinnankytkettävien paneeliketjujen virta yhteensä voidaan laskea

$$I_{\text{DC}} = I_{\text{SC},50\text{C}} \cdot n_{\text{string}} \quad (12)$$

Tarvittaessa suurissa järjestelmissä paneeliketjuja voidaan jakaa usealle invertterille ja niiden tuloliittimille. Jos rinnankytkettyjen paneeliketjujen määrä on suurempi kuin kaksi pitää huolehtia ylivirtasuojauksesta. Sulakesuojaus tehdään gPV-sulakkeilla. Kaikilla rinnakkain kytketyillä paneeliketjuilla on oltava sama mitoitusjännite tai jännite saa poiketa korkeintaan 5 % (Sesko 2022, 522). Käytännössä tämä tarkoittaa, että jokaisessa paneeliketjussa on sama lukumäärä samanlaisia sarjaan kytkettyjä aurinkosähköpaneeleita.

Aurinkopaneelien oikea asennus on tärkeää sekä maksimaalinen energiantuotannon että turvallisuuden takia. Aurinkopaneeli voidaan kiinnittää useilla erilaisilla tavoilla. Kiinnitystavan valinta riippuu monesta eri seikasta, kuten asennuspaikasta, paneelityypistä ja niiden lukumäärästä. Aurinkopaneelit ovat pitkäikäisiä ja asennuksen on pystyttävä kestämään pitkän käyttöikänsä aikana paljon erilaisia ulkoisia rasituksia.

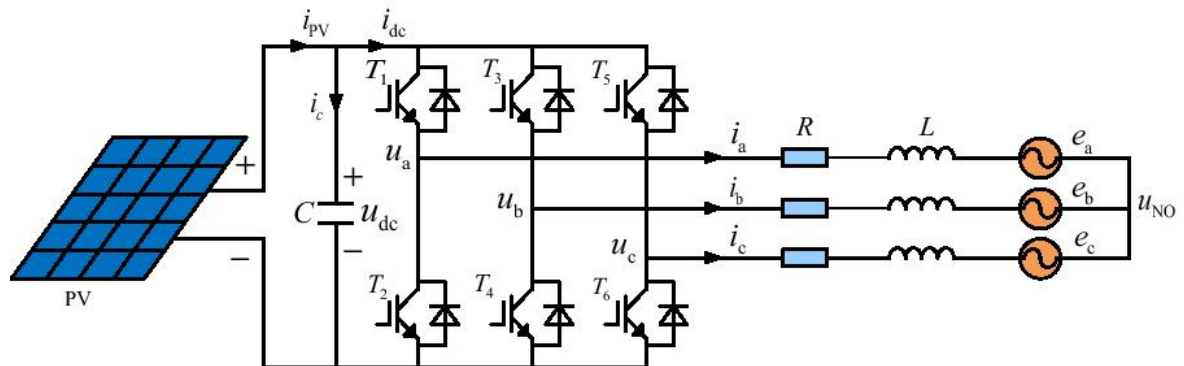
Aurinkopaneelien kiinnitysteline voidaan asentaa esimerkiksi katolle tai maanpinnalle. Aurinkopaneeleille tärkeintä on, että ne ovat auringossa sopivassa kulmassa, eivätkä altistu varjoille. Suomessa sijaitsevan aurinkosähkövoimalan energiantuotannon kannalta parhainta on, jos aurinkopaneeli saadaan suunnattua etelään noin 32° kulmaan.

2.2.3 Aurinkosähköinvertteri

Aurinkosähkövoimalan verkkovaihtosuuntaajan eli invertterin tehtävä on muuttaa aurinkopaneelientuotannasta tasasähkövirrasta sinimuotoista vaihtojännitettä verkkoon. Kuvassa 11 nähdään koko muunnosketju. Ensin aurinkopaneeli muuntaa absorboitua aurinkoenergian tasavirraksi, jonka verkkovaihtosuuntaaja säätimensä ohjauksessa muuntaa vaihtosähköksi sähköverkkoon suodatuksen jälkeen.

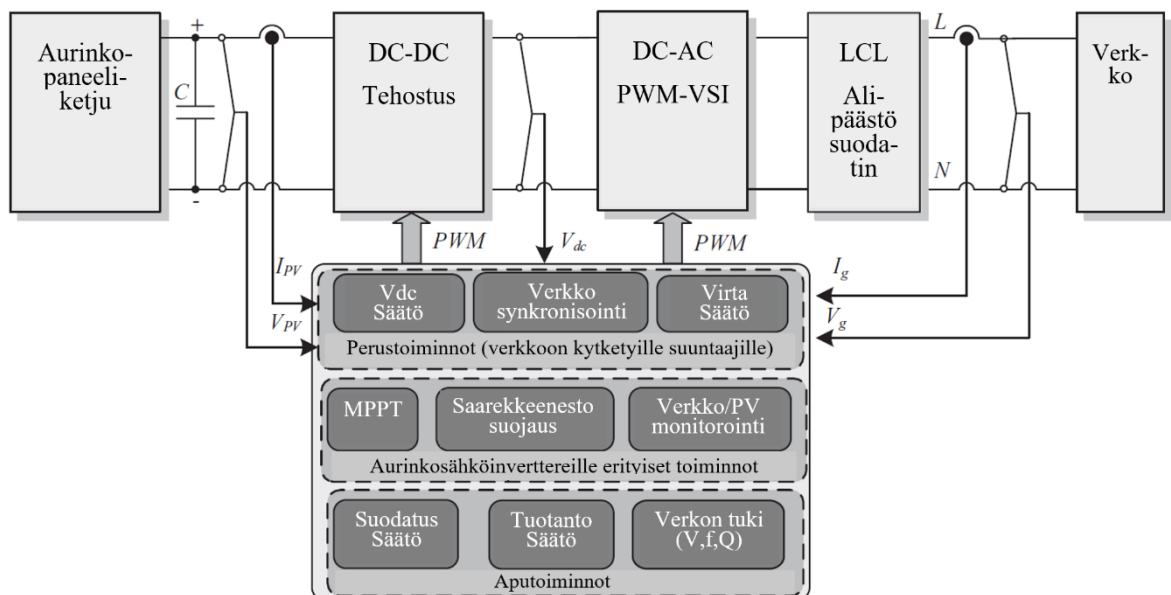
Kuvan invertterin rakenne on kaksitasoinen, kolmivaiheinen. Muita kehittyneempiä kolmivaiheisia topologioita ovat esimerkiksi 3-tasoinen ja 3-tasoinen NPC (Neutral Point Clamped), joissa on enemmän kytkimiä ja siten myös monimutkaisempi ohjaus. Etuina niissä on tasaisempi jännite, joten suodatusta tarvitaan vähemmän, mikä taas parantaa hyötysuhdetta. Kuvan DC-välipiiristä puuttuu jännitteen tehostus eli DC-DC-konvertteri. Joissain invertteereissä jännitteen nosto DC-välipiirissä on toteutettu muuntajalla. Jännitteen nostoa tarvitaan, kun aurinkopaneelientuotannan jännite on alhaisempi kuin 565 VDC 3-vaiheisessa invertterissä 400 V verkkojännitteellä. Paneeliketjujen mitoitus lähelle järjestelmän maksimijännitettä on

tärkeää ottaa huomioon, koska jännitteen nostaminen välipiirissä aiheuttaa häviöitä ja siten heikentää aurinkosähköinvertterin hyötysuhdetta.



Kuva 11. Aurinkosähköinvertteri (Zhao 2021, 1).

Koska invertteritopologioita on useita, myös ohjausrakenteet vaihtelevat. Modulaatioalgoritmien on oltava erityinen kullekin topologialle. Kuvassa 12 esitetään yleinen ohjausrakenne tyypilliselle topologialle ilman muuntajaa, jossa on DC-välipiirin jännitteen tehostus. (Teodorescu et al. 2011, 27.)



Kuva 12. Aurinkosähköinvertterin yleinen ohjausrakenne (Muokattu lähteestä: Teodorescu et al. 2011, 27).

Kuvasta nähdään kolme erilaista ohjaustoimintojen luokkaa. Verkkovaihtosuuntaajan perustoiminnot, aurinkosähköinvertterille erityiset toiminnot ja apustoiminnot.

Perustoimintoihin kuuluu tasajännitteen ohjaus, verkkosynkronointi ja verkkoon syötettävän jännitteen muodostaminen tietyn kytkentätekniiikan mukaan ohjaamalla puolijohdekatkoja. Puolijohdekatkojat, joita ovat esimerkiksi IGBT-transistorit, kytkevät tasajännitteen positiivisen navan ja negatiivisen navan jakeluverkon liittimiin sopivassa tahdissa muodostaen ulostulevan vaihtojännitteen. Tasajännitteen ohjausosan tehtävänä on pitää DC-välipiirin jännite oikeassa arvossa ja vakaana, verkon ja paneelientän muutoksista riippumatta. Verkkosynkronointiosan tehtävänä on ensin mitata sähköverkon suureita. Suureiden avulla, jos tietyt oletusasetusten kriteerit täyttyvät, se tahdistaa suuntaajan verkon rinnalle.

Aurinkosähköinvertterille erityisiin toimintoihin kuuluvat MPPT, saarekekäytönesto ja monitorointi. MPPT eli Maximum power point tracking tarkoittaa nimensä mukaisesti, että mitaamalla ja säätämällä haetaan jatkuvasti toimipistettä, jolla saadaan maksimaalinen tehonsyöttö, auringon säteilyn intensiteetin muutoksista huolimatta. Kun säteily pienenee, niin paneelientän jännite laskee. Tällöin MPPT muuttaa toimipistettään pienentämällä paneelientän kuormitusvirtaa. Saarekekäytön estolla tarkoitetaan suojausta, joka estää tuotantolaitosta syöttämästä sähköä jännitteettömään verkkoon. Pientuotantolaitteistojen oletusasetukset määräävät reunaehdot saarekekäytön eston toiminnalle. Monitorointiin sisältyy nopeaa jännitteen, virran ja taajuuden mittausta sekä paneelientän diagnostiikka, kuten osittaisen varjostuksen tunnistus (Teodorescu et al. 2011, 28).

Aurinkosähköinvertterin apustoimintoihin tarkoitettulla osalla voidaan vaikuttaa verkkoa tukeviin toimintoihin. Näitä voivat olla aktiivisen suodatuksen ohjaus, jännitteen-, taajuuden- ja loistehon säätö.

Pientuotannonlaitteistojen oletusasetukset ovat kokoelma useita eri parametreja, joiden mukaan määritellään milloin aurinkosähkölaitteisto saa kytkeytyä jakeluverkkoon (Energiateollisuus 2021, 4–6). Tuotantolaitteistojen oletusasetukset määrittävät jännitteen ja taajuuden rajat, joiden sisällä aurinkosähköinvertterin tulee pysyä kytkettynä verkkoon. Aurinkosähköinvertterin tulee hallitusti ajaa tuotanto alas, jos jännite tai taajuus yhteisen kytkentäpisteen kohdalla, poikkeaa tuotantolaitteistojen oletusasetusten asettamista raja-arvoista, jolloin toteutuu myös saarekekäytön esto. Aurinkosähköinvertterin verkonvalvonta tarkastelee verkon tilaa nopeasti ja tarkasti, jolloin tuotantolaitteistojen oletusasetusten vaatima tarkkuus-

ja aikavastevaatimukset täyttyvät. Yleisen sähköverkon tai dieselgeneraattorin rinnalla käytön kannalta keskeisimmät pientuotantolaitteistojen oletusasetukset on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Pientuotannonlaitteistojen oletusasetuksia (Energiateollisuus 2022, 4-5).

Parametri	Katkaisuaika	Raja-arvo
Ylijännite	1 s	$110 \% \cdot U_n$
Alijännite	1,5 s	$85 \% \cdot U_n$
Alitaajuus	0 s	47,0–47,5 Hz
Alitaajuus	30 min	47,5–49,0 Hz
Toimintataajuus	Rajoittamaton	49,0–51,0 Hz
Ylitaajuus	30 min	51,0–51,5 Hz
Ylitaajuus	0 s	51,5–52,0 Hz
Taajuuden muutosnopeuden sieto	0 s	2 Hz/s

Aurinkosähköinvertterin mitoituksessa tulee ottaa huomioon, että yleensä invertteri kannattaa optimoida eli alimitoitaa verrattuna paneelikentän tehoon. Optimointi on kannattavaa, koska paneelit tuottavat harvoin nimellistä tehoa. Tämä johtuu muun muassa paneelien lämpenemisestä. Kesäpäivien tuotantohuippuaikoina paneelit ylittävät standardi testiolosuhteiden lämpötilan 25°C . Standardi testiolosuhteet ylittävä lämpötila laskee tuotantotehoa noin $0,4 \%/^\circ\text{C}$, mikä tarkoittaa, että huipputehot leikataan jo tasasähköpuolella, eikä invertteri leikkaa energiaa yhtä paljon. Tämän lisäksi auringon säteily standardi testiolosuhteissa on 1000 W/m^2 , mikä on Ilmatieteen laitoksen mukaan itse asiassa erittäin korkea intensiteetti. Suomen olosuhteissa 1000 W/m^2 säteilyn intensiteetti saavutetaan harvoin. Optimointia puoltaa myös se seikka, että invertterin paras hyötysuhde saavutetaan sen nimellisteholla (Fronius 2022). Alimitoitettu aurinkosähköinvertteri leikkaa vain tuotannon yli nimellistehon, ei siis koko tuotantoa. Tämä on myös syy siihen, miksi invertteri ei voi ylikuormittua. Siten invertterin virrankäsittelykyky ei aiheuta ongelmia. (Väisänen et al. 2019, 25.)

Aurinkosähköinvertteri syöttää verkkoa enintään nimellistehollaan. Siten sen kyky syöttää oikosulkuvirtaa sähköjakeluverkkoon rajoittuu sen nimellisvirtaan I_n . Aurinkosähkövoimalan oikosulkuimpedanssi $Z_{k,pv}$ voidaan laskea

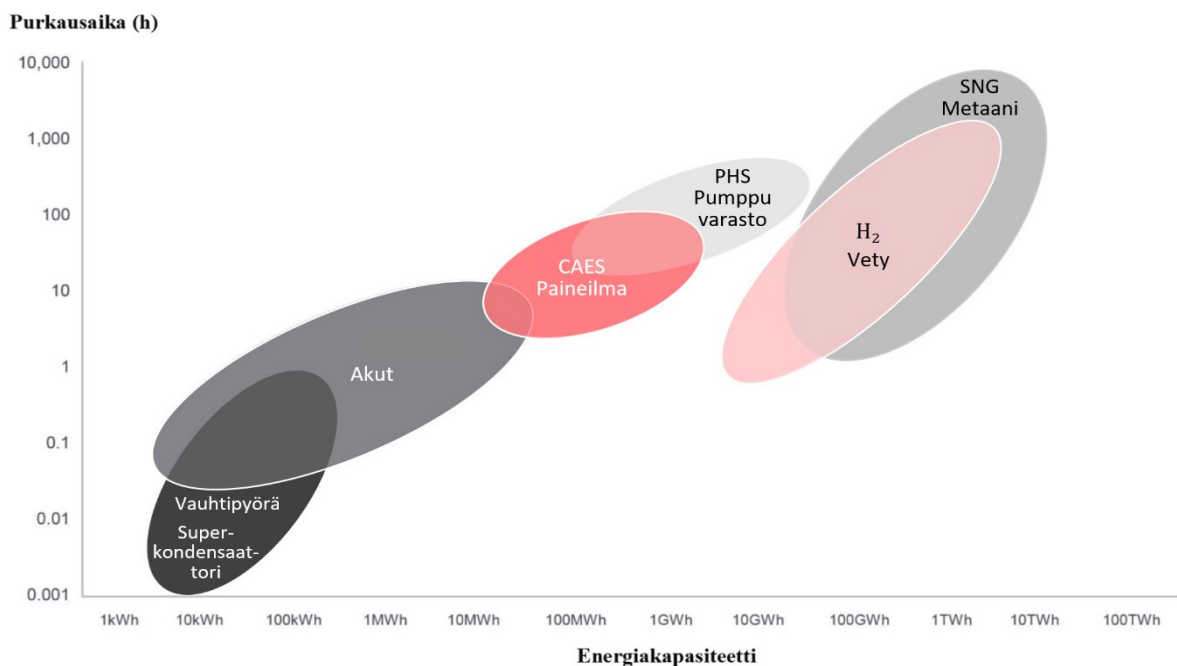
$$Z_{k_{pv}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (13)$$

jossa on U_n on aurinkosähköinvertterin nimellisjännite.

2.3 Energiavarasto

Energiavarastoa käytetään normaalioloissa aurinkosähkön tuotantolaitteiston ja yleisen sähkönjakeluverkon rinnalla pientuotannon tasaukseen. Aurinkosähköjärjestelmä ja energiavarasto muodostavat näin kokonaisuuden, jonka sähköntuotanto on sähkömarkkinalain määritelmän mukaan pientuotantoa, kun tuotantolaitteiston teho on alle 2 MVA. Fingrid on julkaissut sähkövarastoille omat järjestelmätekniset vaatimukset SJV2019. Järjestelmätekniset vaatimukset koskevat suuntaajakytkettyjä sähkövarastoja, joiden mitoitusteho tuotantotilassa on vähintään 0,8 kW ja jotka tuottavat järjestelmäpalveluita (Fingrid 2020).

Sähköenergian varastointi kattaa laajan valikoiman teknologioita. Eri varastointiteknologioilla on omat käyttötarkoituksensa mukaiset erityispiirteensä, joita on vertailtu kuvassa 13.



Kuva 13. Energiavarastointitekniikoiden vertailu (Muokattu lähteestä: FutureBridge 2021).

Kuvassa esitetyt sähköenergianvarastoinnin teknologiat ovat sähkökemiallinen akkuenergiavarastointi (BESS), vauhtipyörät (flywheels), superkondensaattori, pumppuvarasto (PHS) ja paineilma (CAES). Uusiutuvalla energialla tuotettua sähköä voidaan muuttaa vedyksi (H₂) tai metaaniksi (SNG). Kuvasta voidaan havaita esimerkiksi, että vauhtipyörään varastoitu liike-energia purkautuu melko nopeasti, koska sen energiakapasiteetti on melko pieni muihin teknologioihin verrattuna. Vauhtipyörän etuna on sen käytännössä heti, ilman vasteaikaa, käyttöön saatavissa oleva teho. Vauhtipyörät voidaan luokitella lyhyen purkausajan varastoihin, joiden purkaus aika nimellisteholla on sekunneista minuutteihin (Blomqvist et al. 2018, 3). Muita lyhyen purkausajan sähköenergiavarastoja ovat superkondensaattori ja suprajohtava magneettinen energiavarasto (SMES). Sähkökemiallisilla akuilla, purkaus aika on yleensä minuuteista tunteihin. Pitkän purkausajan sähköenergiavarastoja ovat pumppuvoimalaitokset, paineilma varastot, vetyvarastot ja metaanivarastot, joiden purkaus aika voi olla tunneista päiviin (Blomqvist et al. 2018, 3).

Tässä tarkastelussa keskitytään akkuenergiavarastoihin eli sähkökemialliseen teknologiaan perustuviin energiavarastoihin. Akkuenergiavarastoja ja muuta energian varastointia tarvitaan yhä enemmän, koska tuuli- ja aurinkovoiman rakentaminen on lisääntynyt. Aina ei aurinko tuota säteilyä ja siksi energiaa pitää varastoida myöhempää käyttöä varten.

2.3.1 Akkuenergiavarastoinnin sovellukset ja hyödyt

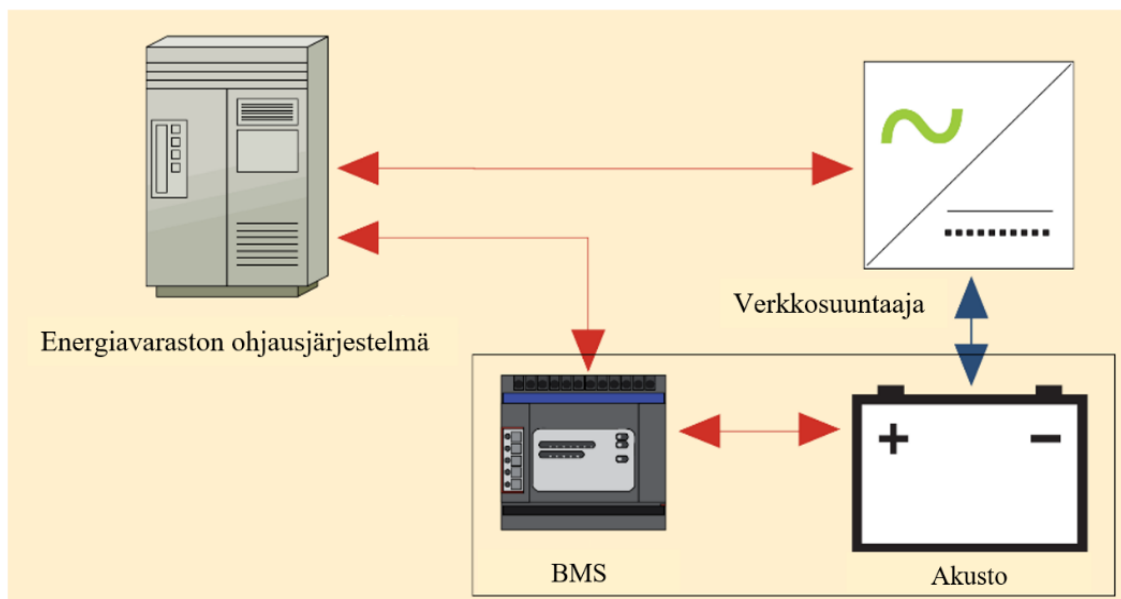
Akkuenergiavarastoa käytetään normaalioloissa aurinkovoimalan rinnalla pientuotannon tasaukseen. Poikkeusoloissa, kun yleinen sähköverkko ei ole käytettävissä, energiavarasto toimii dieselgeneraattorin ja aurinkosähkövoimalaitoksen rinnalla. Rinnankäyttö on kannattavaa polttoaineen kulutuksen kannalta (Trevizan et al. 2021, 73; Mbali et al. 2021, 6). Energiavarastoa kokonaisvaltaisesti hyödynnettäessä on saatavissa muitakin etuja. Energiavarastoa voidaan hyödyntää ainakin taajuussäätöön sekä tehonlähteenä huippukuorman aikana. Matalan tehon tarpeen aikana energiavarastoa ladataan ja suuren tehon tarpeen aikana puretaan. Näin tasataan aurinkosähkövoimalan ja dieselgeneraattorin kuormitusta.

Akkuenergiavarastolla on lyhyt vasteaika (Chatzivasileiadi et al. 2013, 818; World Energy Council 2016, 33-34). Lyhyttä vasteaikaa voidaan hyödyntää taajuuden säätösovelluksissa, joissa energiavarasto ladataan tai puretaan vastauksena verkon taajuuden kasvuun tai laskuun, joka johtuu energian tarjonnan ja kysynnän äkillisestä muutoksesta.

Valtakunnan sähköverkon häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa energiavarasto voi mahdollistaa katkottoman sähköverkon, mutta se asettaa energiavarastolle erityisiä vaatimuksia. Saarekekäytössä energiavaraston on pystyttävä kattamaan koko saarekkeen huipputehontarve ja lisäksi sen on pystyttävä syöttämään jakeluverkon vaatima oikosulkuvirta vikatapauksessa. Jos nämä vaatimukset saavutetaan järjestelmä voi reagoida millisekunneissa virran syöttämiseen verkon jatkuvuuden ylläpitämiseksi, ennen kuin dieselgeneraattori käynnistetään ja tuodaan verkkoon (Hayes et al. 2017).

2.3.2 Akkuenergiavaraston rakenne

Akkuteknologialla toteutetun energiavaraston pääkomponentit ovat akusto, verkkosuuntaaja, akuston hallintajärjestelmä eli BMS (battery management system) ja energiavaraston ohjauslogiikka (kuva 14). Energiavaraston ohjauslogiikkaan voidaan liittyä ulkopuolisilla ohjausjärjestelmillä väyläliitynnän kautta (M-bus). Väyläliitynnän avulla energiavarasto voidaan liittää jakeluverkon käytönvalvontajärjestelmään.



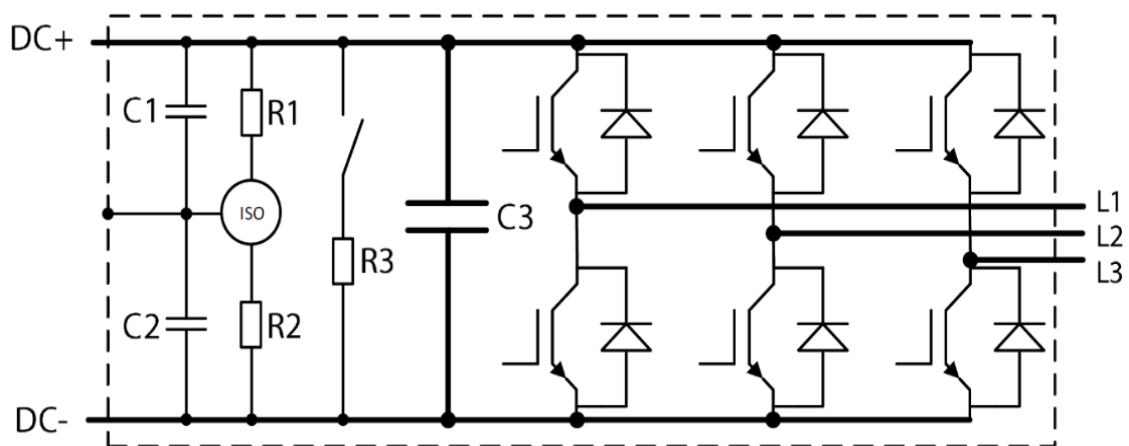
Kuva 14. Akkuenergiavaraston rakenne (Muokattu lähteestä: International Electrotechnical Commission 2011, 49).

Kuvassa on esitetty tietoliikenne- ja sähkövoimayhteyksien periaatteet eri värisillä viivoilla. Tietoliikenneyhteydet punaisella ja sähkövoima sinisellä.

Akuston hallintajärjestelmän tehtävänä on hallita akuston toimintaa, sekä rajoittaa akkujen liiallinen käyttö. Akuston hallintajärjestelmä tarkkailee akuilla syötettävää virtaa, akuston jännitettä ja lämpötilaa. Mitattujen suureiden perusteella rajoitetaan tarvittaessa latausvirtaa akkujen liiallisen lämpenemisen estämiseksi tai rajoitetaan akkuja purkautumasta liikaa. Mitattujen suureiden avulla akuston hallintajärjestelmä pystyy arvioimaan akkujen kuntoa. (Blomqvist et al. 2018, 10.)

2.3.3 Verkkosuuntaaja

Energiavaranon verkkosuuntaajan tehtävänä on huolehtia sähköenergian syötöstä akustolta jakeluverkkoon tai akustoa ladattaessa jakeluverkosta akustoon. Aktiivinen suuntaajalaite (kuva 15) pystyy hoitamaan nämä molemmat tehtävät. Kuvassa on esitetty kaksitasoinen, kolmivaiheinen verkkosuuntaajatopologia. Rakenteellisesti siitä on erotettavissa DC-jännitevälipiiri ja kolmivaiheinen ohjattava suuntaussilta.



Kuva 15. Verkkosuuntaajan rakenne (Danfoss 2021).

DC-välipiirin komponentteja ovat vasemmalta oikealle: C1 ja C2 häiriönpoistokondensaattorit eli Y-kondensaattorit, R1 ja R2 eristysvastusmittaus, R3 purkausvastus, jolla rajoitetaan välipiiriin virtaa tarvittaessa ja C3 jännitevälipiirin kondensaattori, jolla suodatetaan

tasajännitettä. Kolmivaiheisen ohjattavan suuntaussillan muodostavat tehotransistorit sekä niiden rinnalla olevat nolladiodit. Tehotransistorit ja nolladiodit muodostavat kuusi puoli-johdekatkoojaa, jotka tietyn kytkentäteknikan mukaan ohjattuna, sopivassa tahdissa kytkevät tasajännitteen positiivisen navan ja negatiivisen navan jakeluverkon liittimiin muodostaen ulostulevan vaihtojännitteen. Sama vaihtosuuntaussilta pystyy siirtämään tehon myös jakeluverkosta akustoon päin, jolloin silta toimii tasasuuntaajana.

Verkkosuuntaajan tehotransistoreiden kytkentätaajuus voi olla kymmeniä kilohertsejä (Acosta-Cambranis et al. 2020, 12). Suuri kytkentätaajuus parantaa virran sinimuotoisuutta. Verkkosuuntaajalla tuotettu vaihtojännite ei silti täysin vastaa haluttua sinimuotoista ja verkko-taajuuksista jännitettä. Jännitteen laadun kriteerit on määritelty standardissa SFS-EN 50160. Myös energiavaraston verkkosuuntaajalla tuotetun sähkön tulee olla vaatimusten mukaista. Jännitteen laadulla tarkoitetaan tässä yhteydessä jännitteen suuruutta ja muotoa, taajuutta ja yliaaltopitoisuutta. Jännitteen laadun kriteerien täyttämiseksi energiavaraston verkkosuun-taajalla tuotettu sähkö suodatetaan. Verkkosuuntaajan ja jakeluverkon väliin asennetaan kol-mivaiheinen LC- tai LCL-suodin. Suodin voi olla verkkosuuntaajaan integroitu.

Verkkosuuntaajan tehotransistoreiden suuret kytkentätaajuudet aiheuttavat myös sähkömag-neettisia häiriöitä. Tehoelektroniikansovellusten yhteydessä on tärkeää ottaa huomioon sähkömagneettinen yhteensopivuus, EMC (Electro Magnetic Compatibility). Sähkömagneetti-set häiriöt voivat syntyä ja kytkeytyä järjestelmien välille induktiivisesti, kapasitiivisesti tai johtamalla. Johtuminen tapahtuu galvaanisen yhteyden avulla. Induktiivinen kytkeytyminen tapahtuu magneettikentän välityksellä esimerkiksi kahden johtimen välillä niiden ollessa lähellä toisiaan. Kytkeytyminen voidaan johtaa induktiolaista

$$e = M \frac{di}{dt} \quad (14)$$

jossa e on indusoitunut lähdejännite, M on keskinäisinduktanssi ja di/dt on virran muutos-nopeus. Kapasitiivinen kytkeytyminen syntyy hajakapasitanssien vaikutuksesta. Kytkeyty-mistä kuvaa yhtälö

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (15)$$

jossa i on häiriösignaali, C on järjestelmien välinen kapasitiivinen kytkeytyminen ja dv/dt on muutosnopeus. Hajakapasitanssit ovat usein pieniä mutta merkittäviä jos kytkentätaajuu-
det ovat korkeita. (Hietalahti 2011, 103.)

Ladatessaan akustoa suuntaussilta siirtää tehoa jakeluverkosta akustoon päin eli toimii tasa-
suuntaaja. Tasasuuntaajana se voi aiheuttaa varausvirtaan vaihtovirtakomponentin, joka on
pidettävä mahdollisimman pienenä (SFS-EN 62485-2 2018, 27). Standardissa annetaan syk-
keiselle varausvirran vaihtovirtakomponentille raja-arvoja akkukemiatyypeittäin. Raja-ar-
vojen ylittäminen aiheuttaa akkukemioissa lämpenemistä. Lämpeneminen taas lyhentää
akun käyttöikää. Lataustasavirran vaihtovirtakomponentin tehollinen arvo I_{eff} lasketaan

$$I_{\text{eff}} = \sqrt{\sum_{n=1}^k I_n^2} \quad (16)$$

jossa n on kokonaisluku, k on harmonisten lukumäärä ja I_n on tehollinen vaihtovirta jokai-
sella harmonisella taajuudella. Tehollinen virta I_{eff} voidaan myös mitata vaihtosähköpihti-
virtamittarilla.

Akkuenergiavaraston toimiessa yleisen jakeluverkon tai dieselgeneraattorin rinnalla pien-
tuotantolaitteistojen oletusasetukset määrittävät jännitteen ja taajuuden rajat, joiden sisällä
verkkosuuntaajan tulee pysyä kytkettynä verkkoon (Energiateollisuus 2021, 4–6). Pientuo-
tannon verkkosuuntaajan tulee hallitusti ajaa tuotanto alas, jos jännite tai taajuus yhteisen
kytkentäpisteen kohdalla poikkeaa tuotantolaitteistojen oletusasetusten asettamista raja-ar-
voista. Pientuotannosta poiketen Fingridin julkaisemassa Voimalaitosten järjestelmätekniiset
vaatimukset VJV2018:ssa on isoille B-, C- ja D-tyyppin laitteistolle on määritelty ns. lähi-
vikakestoisuus, jonka tarkoituksena on tukea verkkoa. Ison voimalaitoksen tulee pystyä jat-
kamaan toimintaansa lyhytaikaisesta liittymispisteessä tapahtuvasta jännitteen vaihtelusta
huolimatta irtoamatta verkosta (Fingrid. 2018, 36,44). Pientuotannon verkkosuuntaajan ver-
konvalvonta-algoritmien tulee havaita verkon tila nopeasti ja tarkasti, jotta tuotantolaitteis-
tojen oletusasetusten vaatima tarkkuus- ja aikavastevaatimukset täyttyvät. Suuntaajan ver-
konvalvonta ja verkkoon tahdistus ovat läheisesti toisiinsa liittyviä käsitteitä. Suuntaajan on
pystyttävä havainnoimaan jakeluverkkoa ja sen tulee pystyä toimimaan samassa tahdissa
sähköverkon kanssa. Suuntaajan verkon tahdistuksesta vastaava ohjausalgoritmin osa mittaa

verkon jännitteen amplitudin, taajuuden ja vaihekulman. Suureiden avulla se tahdistaa suuntaajan verkon rinnalle. (Teodorescu et al. 2011, 44.)

Verkkosuuntaajan komponenttien tehohäviöt muodostuvat pääosin tehotransistorien kytkentä- ja johtavan tilan häviöistä sekä diodin päästöhäviöistä. Komponenttien jäähtytys pitää ottaa huomioon ja suuritehoisiin verkkosuuntaajiin voidaan tarvita nestejäähdytys. Verkkosuuntaaja kokonaisuutena toimii parhaalla hyötysuhteella, kun sitä kuormitetaan sen nimellisteholla (Fronius 2022).

2.3.4 Akusto

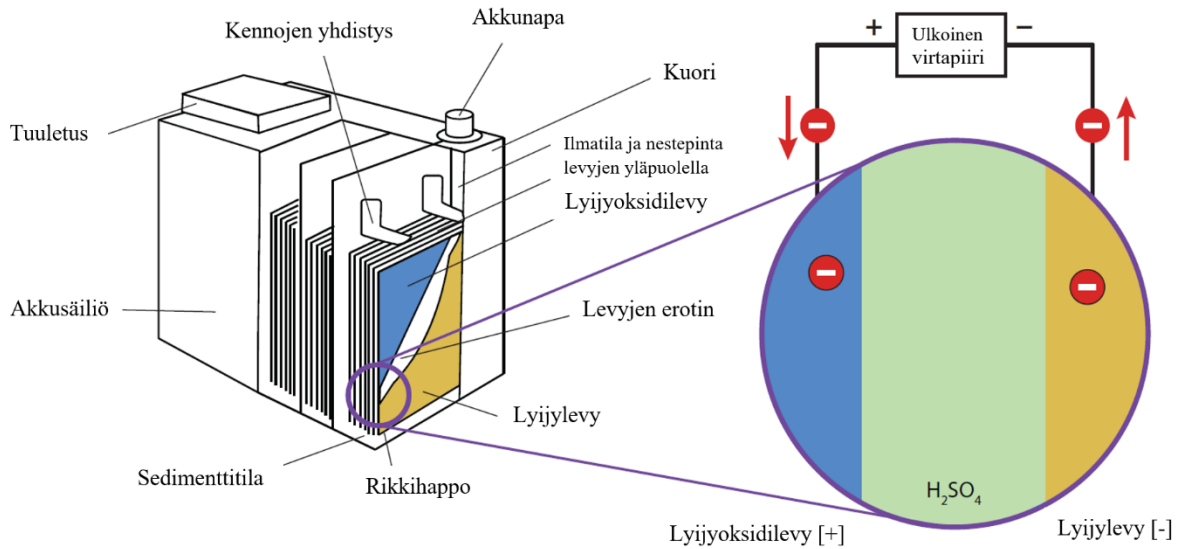
Akkuenergiavarastoon ladataan ylimääräinen energia verkon alhaisen tehontarpeen aikana ja puretaan varastoitunutta energiaa huippukysynnän aikana tai kun sähköä ei saada riittävästi aurinkosähkövoimalasta esimerkiksi auringon mennessä hetkellisesti pilveen. Ladattaessa sähköenergiaa muutetaan akustoon kemialliseksi energiaksi ja purettaessa takaisin sähköenergiaksi.

Akku on kokonaisuus, joka muodostuu useasta sarjaan kytketystä kennosta. Akusto muodostuu vastaavasti monesta sarjaan tai rinnan kytketyistä akusta. Kuvassa 16 on esitetty lyijyakun rakenne. Tyypillinen lyijyakku koostuu useista yksittäisistä kennoista, joista jokaisen nimellinen kennojännite on noin 2 V. Kokoonpanossa käytetään erilaisia menetelmiä. Lohkokokoonpanossa yksittäiset kennot jakavat kotelon ja ovat kytketty sisäisesti toisiinsa. Esimerkiksi tyypillisen 12 V akun jännitteen saamiseksi kuusi kennoa kytketään sarjaan.

Lyijyakkujen kennot sisältävät hapanta elektrolyyttiä. Tarkemmin sanottuna laimennettua rikkihappoa H_2SO_4 . Elektrolyyttiliuokseen asetetaan kaksi vastakkaista napaisuutta olevaa levyä, jotka toimivat elektrodeina. Elektrodit sisältävät ristikon muotoisia lyijylevyjä, joiden pinnalla on huokoista aktiivista materiaalia. Tällä huokoisella aktiivisella materiaalilla on sienimäinen rakenne, joka tarjoaa riittävän pinta-alan sähkökemialliseen reaktioon. Negatiivisen elektrodin eli anodin aktiivinen materiaali on lyijyä, kun taas positiivisessa elektrodissa eli katodissa käytetään lyijydioksidia PbO_2 . (Jäger et al. 2014, 291.)

Kun akku purkautuu, elektronit virtaavat negatiivisesta elektrodista positiiviselle elektrodille ulkoisen virtapiirin kuorman kautta aiheuttaen kemiallisen reaktion levyjen ja elektrolyytin välillä. Kun akku ladataan, elektronien virtaus kääntyy päinvastaiseksi, koska ulkoisessa

virtapiirissä ei ole kuormaa vaan lähde, jonka jännite on korkeampi kuin akun jännite mahdollistaen käänteisen reaktion.



Kuva 16. Lyijyakun rakenne (Muokattu lähteestä: Jäger et al. 2014, 292).

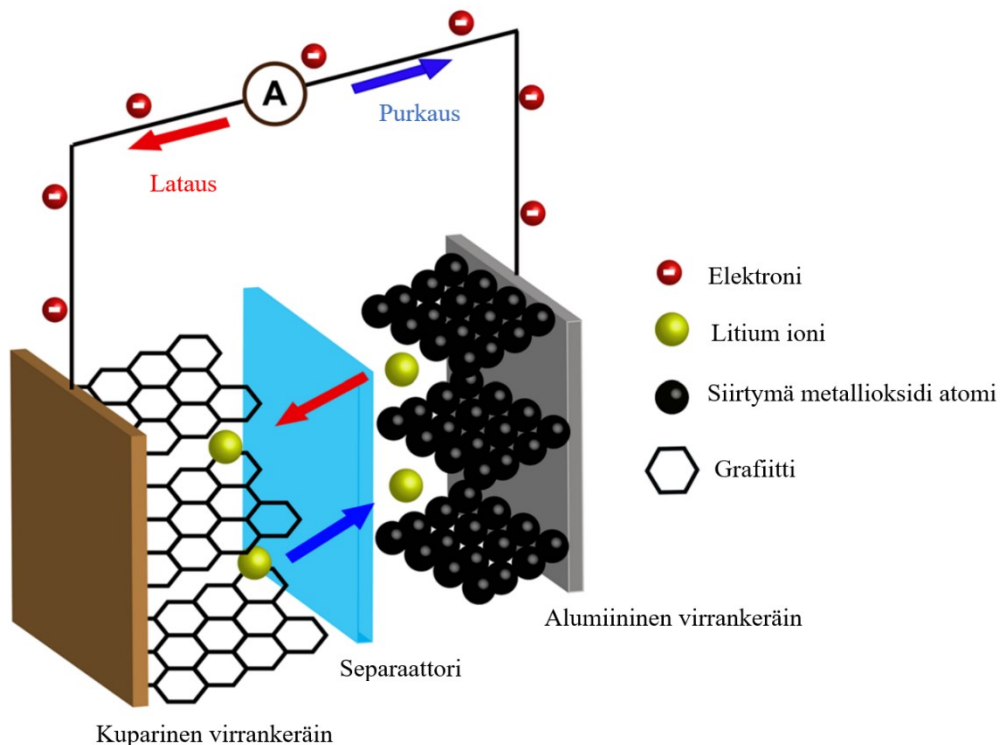
Energiavarastoissa käytettävistä akuista lyijyakku on ollut perinteisesti yleisimmin käytetty. Lyijyakut tunnetaan hyvin sekä auto että teollisuussovelluksista. Lyijyakku on 150 vuotta vanha keksintö, josta on kehitetty valmis ja taloudellinen energian varastointilaitte, mutta sen käyttöikä on lyhyt. Lyijyakku on yleensä vaihdettava 4–5 vuoden välein, mikä muodostaa suuren osan energiavaraston elinkaaren kustannuksista. (Dhundhara et al. 2018, 122.)

Lyijyakun rinnalle on noussut litiumioniakku. Litiumioni (Li-ion) -akkuja käytetään nykyään yhä enemmän energiavarastoissa niiden vähäisemmän huollon tarpeen sekä korkean energia- ja tehoteheyden vuoksi. Litiumioniakulla on vähemmän painoa ja kokoa kuin lyijyakulla, mutta sen hinta on kalliimpi (Dhundhara et al. 2018, 123). Muita litiumioniakun hyviä ominaisuuksia ovat pieni itsepurkautumisaste, nopea latautuminen ja hyvä jännitteen ylläpito purkausjakson aikana.

Litiumioni -akkukennon pääkomponentit ovat negatiivinen ja positiivinen elektrodi, elektrolyytti ja separaattori (kuva 17). Separattori on eristävä kalvo, joka estää oikosulun elektrodien välillä, mutta on ionidiffuusiota läpäisevä. Elektrolyytti on tyypillisesti litiumsuola esimerkiksi LiPF_6 ja LiClO_4 liuotettuna seokseen eteenikarbonaattia (Or et al. 2019, 7).

Elektrolyytti olomuodoltaan joko geelimäistä tai nestemäistä (Valio 2019, 11). Elektrolyytti mahdollistaa litiumionien liikkumisen elektrodien välillä. Akkujen negatiivisen elektrodin eli anodin aktiivinen materiaali on yleisimmin grafiitti (SKS 2020). Positiivisessa elektrodissa eli katodissa käytettäviä aktiivisia litiummetallioksiedeja on useita. Markkinoilla olevat litiumioniakut nimetään katodin mukaan, kuten LiCoO_2 (LCO), LiFePO_4 (LFP), LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ (NMC-111, lyhennettynä NMC), ja $\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$ (NCA).

Litiumioni -akkukennossa anodin ja katodin aktiivinen materiaali on ohuena kerroksena virrankeräimien päällä. Materiaalina virrankeräimissä käytetään anodilla kuparia ja katodilla alumiinia (Valio 2019, 11). Virrankeräimien avulla akkukennot voidaan kytkeä akussa toisiinsa tai akun napoihin. Akkukennon kuoren materiaalina voidaan käyttää esimerkiksi jotain polymeria tai terästä.



Kuva 17. Litiumioni akkukenno (Muokattu lähteestä: Or et al. 2019, 7).

Litiumioni -akkukennon toimintaperiaate perustuu litiumionin interkalaatioon ja deinterkalaatioon elektrodien välillä. Latauksen aikana positiivinen elektrodi eli katodi toimii

litiumionin "lähteenä". Tällöin akkukennoa syötetään virtalähteestä siirtymämetallioksidin hapettamiseksi, joka aiheuttaa litiumionien vapautumisen elektrolyyttiin eli deinterkalaation ja samalla vapauttaa elektroneja. Elektronit yhdistyvät interkaloituneen litiumionin kanssa grafiittipohjaisessa negatiivisessa elektrodissa eli anodissa. Purkauksen aikana tapahtuu käänteinen reaktio, jolloin negatiivisesta elektrodista vapautuu samanaikaisesti sekä elektroneja että litiumioneja. Vapautuneista elektroneista muodostuva sähkövirta antaa tehon kuormitukselle. (Or et al. 2019, 7.)

Litiumioni- ja lyijyakun vertailu on esitetty taulukossa 6, johon on kerätty akkujen ominaisuuksia. Taulukosta nähdään litiumioniakkujen hyvä energiatiheys ja hyötysuhde sekä selvästi lyijyakkua pidempi syklinen käyttöikä.

Taulukko 6. Litiumionia- ja lyijyakkujen ominaisuuksien vertailu (Battery University 2021; Lassila 2021, 38; Dhundhara et al. 2018, 126).

Ominaisuus	LiCoO ₂ LCO	LiMn ₂ O ₄ LMO	LiFePO ₄ LFP	LiNi _{1/3} Mn _{1/3} Co _{1/3} O ₂ NMC	Lyijy- akku
Energiatiheys [Wh/kg]	150–250	100–150	90–120	150–220	30–50
Kennon jännite [V]	3,6	3,7	3,2–3,3	3,7	2
Hyötysuhde [%]	98	98	98	98	80
Syklinen ikä [80% DoD]	500–1000	300–700	2000–3000	1000–2000	200–300
Käyttöikä [a]	>10	>10	>10	>10	4

Energiavarastoissa käytettäviä litiumioniakkuja valmistetaan eri akkukemioilla. Tähän opinäytetyöhön liittyvän kohteen energiavaraston valinnassa esille nousi NMC-akkuteknologia (Lithium nickel manganese cobalt oxide) eli litium-nikkeli-mangaani-koboltti-oksidi-akut. NMC-akkuteknologialla toteutetussa energiavarastossa käytetyt NMC-akut muodostuvat NMC-kennoista ja BMS-yksiköstä. Kuvassa 18 esitetystä erään valmistajan NMC-akkumoduulissa on 32 kpl 3,7 V ja 55 Ah kennoja. Akkumoduulissa on kaksi rinnakkaista 16 kennon sarjaan kytkettyä ketjua. Sen energiakapasiteetti on 110 Ah eli 6,5 kWh nimellisjännitteellä 59,6 V. Yksi akkumoduuli painaa 41 kg. Sen mitat ovat 445 mm x 577 mm x 115 mm (leveys x pituus x korkeus). (Kore Power 2022.)



Kuva 18. NMC-kenno ja akkumoduuli, johon sisältyy 32 kennoa ja BMS (Kore Power 2022).

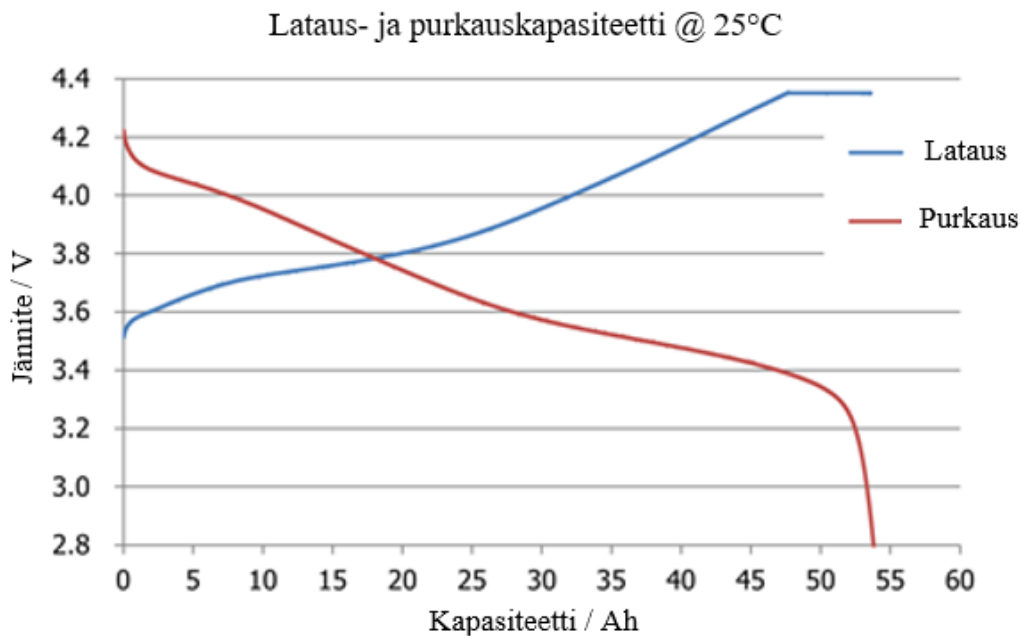
NMC-akkuteknologialla toteutetussa energiavaraostossa akkumoduulit voidaan koota räkki-kehikkoon päällekkäin, jossa ne kytketään sarjaan sopivan jännitetason saavuttamiseksi. Ku-
vassa 19 nähdään kuusi rinnakkaista räkkikehikkoa.



Kuva 19. Merikonttiin asennettu NMC-akusto (Kore Power 2022).

Yksi rakkikehikko sisältää 17 päällekkäistä akkumoduulia ja painaa 900 kg. Sen nimellisjännite on 1014 V ja energiakapasiteetti on 110 kWh ja suurin purkausteho 110 kW. Kuvan kokoonpanolla energiakapasiteetti on täten 660 kWh, nimellisjännite on 1014 V ja paino noin 5400 kg. Kuvan 19 energiavarastossa akusto on asennettu merikonttiin. Valmistaja ilmoittaa, että NMC-akkujen suositeltu käyttölämpötila on $23\pm 4^{\circ}\text{C}$, joten jäädytyksestä tulee huolehtia (Kore Power 2022).

Käyttösykliä ja ajan myötä akun energia- ja tehokapasiteetin heikentyy käyttöiän loppua kohden. Lämpötilan vaikutukset voivat nopeuttaa vanhenemista. Kuvassa 20 nähdään erään valmistajan 55 Ah NMC-kennon lataus- ja purkauskäyryjä uudelle kennolle 25°C lämpötilassa.



Kuva 20. NMC-kennon lataus- ja purkauskapasiteetti (Kore Power 2022).

Kuvan NMC-kennon nimellisjännite on 3,73 V. Sen jännitealue on 2,8–4,35 V. (Kore Power 2022.)

Akuissa termi kapasiteetti tarkoittaa varauksen määrään, jonka akku pystyy toimittamaan nimellisjännitteellä. Kapasiteetti on suoraan verrannollinen akussa olevan elektrodimateriaalin määrään. Tämä selittää, miksi pienellä kennolla on pienempi kapasiteetti kuin suurella

kennolla, joka perustuu samaan kemiaan. Kennon napajännite voi olla silti sama molemmille kennoille. Siten kennon jännite perustuu enemmän kemiaan, kun taas kapasiteetti perustuu enemmän käytettyjen aktiivisten materiaalien määrään. Akun kapasiteetti C_{bat} ilmaistaan ampeeritunteina [Ah] vaikka varaus yleensä ilmaistaankin Coulombina C , jonka yksikkö on ampeerisekunti [As]. Akuille ampeeritunti on kätevämpi yksikkö, koska sähköalalla energian määrä mitataan yleensä wattitunteina. Akun energiakapasiteetti E_{bat} [Wh] voidaan laskea, kun akun jännite on V_b

$$E_{bat} = C_{bat} \cdot V_b \quad (17)$$

Täysin uusi akku, jonka kapasiteetti on 10 Ah, voi teoriassa tuottaa 1 A virran 10 tuntia. Käytännössä tämä ei toteudu useiden tekijöiden vuoksi. Siksi käytetään C-arvoa, joka mittaa akun purkautumisnopeutta suhteessa sen kapasiteettiin. Esimerkiksi 10 Ah akun C-arvo 1 vastaa 10 A purkausvirtaa 1 tunnin aikana. Saman akun C-arvo 2 vastaisi 20 A purkausvirtaa puolen tunnin aikana. Vastaavasti C-arvo 0,5 tarkoittaa 5 A purkausvirtaa 2 tunnin aikana. Yleisesti C-arvo tarkoittaa sitä, kuinka paljon akusta voidaan ottaa jatkuvasti virtaa turvallisesti ilman, että akku ylikuormittuu. C-arvon ja akun kapasiteetin avulla voidaan laskea akun turvallinen jatkuva purkausvirta I_{max} . (Jäger et al. 2014, 293.)

$$I_{max} = C_{bat} \cdot n \quad (18)$$

jossa n on C-arvo [1/h]. Akuston valmistaja määrittelee C-arvon erikseen purkaukselle ja lataukselle. Akustoa ei tule purkaa tai ladata suuremmalla virralla, kuin mitä akuston valmistaja ilmoittaa. Kaavojen 17 ja 18 perusteella

$$C \text{ arvo} = \frac{P_{bat} [W]}{E_{bat} [Wh]} \quad (19)$$

Akuston määrittelyssä on tärkeää tietää akkujärjestelmän kokonaishyötysuhde. Kokonaishyötysuhde muodostuu kahdesta osasta. Ensinnäkin jännitteen hyötysuhteesta, joka on keskimääräisen purkausjännitteen ja keskimääräisen latausjännitteen suhde

$$\eta_V = \frac{V_{discharge}}{V_{charge}} \cdot 100 \% \quad (20)$$

jossa huomioidaan, että latausjännite on hieman nimellisjännitteen yläpuolella. Toiseksi Coulombin hyötysuhteesta, joka määritellään akustosta saadun purkauskapasiteetin ja akustoon täyden latausjakson aikana asetetun latauskapasiteetin suhteena

$$\eta_C = \frac{Q_{\text{discharge}}}{Q_{\text{charge}}} \cdot 100 \% \quad (21)$$

Akuston hyötysuhde määritellään sitten näiden kahden hyötysuhteen tulona

$$\eta_{bat} = \eta_V \cdot \eta_C = \frac{V_{\text{discharge}} \cdot Q_{\text{discharge}}}{V_{\text{charge}} \cdot Q_{\text{charge}}} \cdot 100 \% \quad (22)$$

Akun varaustila SoC (State of Charge) määritellään prosenttiosuutena purkamiseen käytettävissä olevasta akun kapasiteetista. SoC [%] voidaan laskea

$$\text{SoC} = \frac{E_{bat}}{C_{bat} \cdot V_b} \cdot 100 \% \quad (23)$$

Myös purkaussyvyys DoD (Depth of Discharge) on tärkeä parametri. Se määritellään prosenttiosuutena akun kapasiteetista, joka on purettu. Purkaussyvyys DoD [%] voidaan laskea

$$\text{DoD} = \frac{C_{bat} \cdot V_b - E_{bat}}{C_{bat} \cdot V_b} \cdot 100 \% \quad (24)$$

Kaavan 10 ja 11 mukaan esimerkiksi 10 Ah akun, jota on purettu 2 Ah, SoC on 80 % ja DoD on 20 %. Akun varaustila ja purkaussyvyys ovat siten toisiaan täydentäviä. (Jäger et al. 2014, 295.)

Edellä todetun perusteella, energiavaraston akustoa ei voida purkaa nopeammin, kuin mihin sen ominaisuudet on tarkoitettu. C-arvo rajoittaa sen hetkellistä tehokapasiteettiä. Huomion arvoista on myös että, teho- ja energiakapasiteetista riippumatta akusto pystyy syöttämään korkeintaan sen purkausvirran, jonka energiavaraston verkkosuuntaaja pystyy syöttämään jakeluverkkoon. Verkkosuuntaajan tapauksessa tämä tarkoittaa pääsääntöisesti sen nimellisvirtaa I_n . Verkkosuuntaajan mahdollinen ylityö huonontaa sen ja koko laitteiston hyötysuhdetta ja nostaa laitteiston hintaa merkittävästi, koska se johtaa myös muiden

laitteiston komponenttien uudelleen tarkasteluun. Akkuenergiavarasto ei kykene syöttämään kapasiteettiinsä nähden merkittävää oikosulkuvirtaa, koska verkkosuuntaaja erottaa akuston verkon ilmiöistä.

Akkuenergiavaraston oikosulkuimpedanssi Z_{k_BESS} voidaan laskea

$$Z_{k_BESS} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} \quad (24)$$

jossa on U_n on akkuenergiavaraston nimellisjännite ja I_n on akkuenergiavaraston nimellisvirta.

Akusto sijoitetaan konttiin, akkuhuoneeseen tai akkukaappeihin. Akkutilan olosuhteiden tulee olla akuille soveltuvat ja akkuja pitää voida vaihtaa ja huoltaa. Tämä pitää ottaa huomioon tilaa suunniteltaessa, jotta huoltotoimenpiteet onnistuvat sujuvasti ja turvallisesti. Lisäksi on varmistettava käyttölämpötilan vaatimukset, riittävä ilmanvaihto ja paloturvallisuus.

3 Erään kohteen tuotantolaitteistojen valinnan pääkohdat

Edellisessä luvussa tarkasteltiin sähköenergian tuotantolaitteistojen teknisiä ominaisuuksia. Kohteen tuotantolaitteistojen valintaa pitää tarkastella myös teknistaloudellisin perustein. Kohteen aurinkosähkövoimalan ja akkuenergiavaraston hankinta oli käynnistetty ennen opinnäytetyön aloittamista energiatehokkuustoimenpiteenä. Energiavaraston avulla toivottiin saatavan myös katkoton sähköverkko kohteeseen. Diesel-varavoimakoneen hankinta käynnistyi opinnäytetyön edetessä.

Hankittavat tuotantolaitteistot tullaan liittämään kohteen olemassa olevaan alueelliseen sähkönjakeluverkkoon, jonka sähköturvallisuus pitää säilyä nykyisellä tasolla. Tässä luvussa tarkastellaan tiivistetysti olennaisimmat tuotantolaitteistojen valintaan vaikuttaneet havainnot.

3.1 Tuotantolaitteiston virransyöttökyky oikosulussa

Jakeluverkon ylivirta- ja vikasuojauksen sekä selektiivisyyden toteutumisen kannalta oleellisin tuotantolaitteiston ominaisuus on sen virransyöttökyky oikosulussa. Virransyöttökykyä vaaditaan vikatilanteessa oikosulussa olevan sähkönjakeluverkon osan suojalaitteen toimimiseksi. Tuotantolaitteiston on pystyttävä tuottamaan riittävä oikosulkuvirta myös sähkönjakelujärjestelmän kauimmaisiin ja epäedullisimpiin kohtiin, jotta suojauksen toteutuminen vaatimusten mukaan on mahdollista. Edellä tarkasteltujen sähköenergian tuotantolaitteistojen virransyöttökyky poikkeaa olennaisesti toisistaan.

Tahtigeneraattori pystyy syöttämään nimellisvirtaansa nähden huomattavasti suuremman oikosulkuvirran. Sen oikosulkuvirran arvo ei ole vakio, vaan se muuttuu ajan funktiona. Tahtigeneraattorin oikosulkuvirta on suurimmillaan alkuhetkellä, jonka jälkeen se pienenee muutostilan kautta jatkuvuustilan arvoon. Puolustuskiinteistöissä yleisesti käytössä olevan tahtigeneraattorin kyky syöttää jatkuvaa kolmivaiheista oikosulkuvirtaa on vähintään 3-kertaisen nimellisvirran suuruinen 10 sekunnin ajan napaoikosulussa (Hakanen et al. 2019, 94). Suurempaa 1,1-kertaista oikosulkuvirtaa voidaan hetkellisesti syöttää magnetointia lisäämällä.

Aurinkosähkövoimala pystyy syöttämään oikosulkuvirtaa enintään aurinkosähköinvertterin nimellisvirran verran. Kuitenkin joidenkin valmistajien aurinkosähköinverttereissä on mahdollista syöttää hetkellisesti noin 1,1-kertaista virtaa, jos paneelientää on mahdollista kuormittaa vastaavasti. Auringon säteilyn intensiteetti vaihtelee. Kun säteily pienenee, niin paneelientän jännite laskee. Tällöin invertterin MPPT muuttaa toimipistettään pienentämällä paneelientän kuormitusvirtaa. Samalla pienenee aurinkosähköinvertterin virransyöttökyky. Kun paneelientän jännite putoaa alle invertterin toimintarajan, ei saada virtaa ollenkaan. Tämän perusteella jakeluverkon ylivirta- ja vikasuojauksen sekä selektiivisyyden toteutuminen ei voi olla aurinkosähkövoimalan varassa.

Akkuenergiavarasto pystyy syöttämään oikosulkuvirtaa enintään verkkosuuntaajansa nimellisvirran verran. Tämä edellyttää, että akkuja voidaan kuormittaa vastaavasti. Jos energiavarasto yksinään syöttää jakeluverkon osaa saarekkeessa, niin se on kokonaisuutena mitoitettava niin, että se pystyy syöttämään jakeluverkon suojauksen toteutumisen vaativan oikosulkuvirran. Tällöin käytännössä akkuenergiavarastoa ei mitoiteta kohteen tehontarpeen, vaan oikosulkuvirtavaatimuksen mukaan. Tämä vaikuttaa merkittävästi energiavaraston hankintakustannukseen.

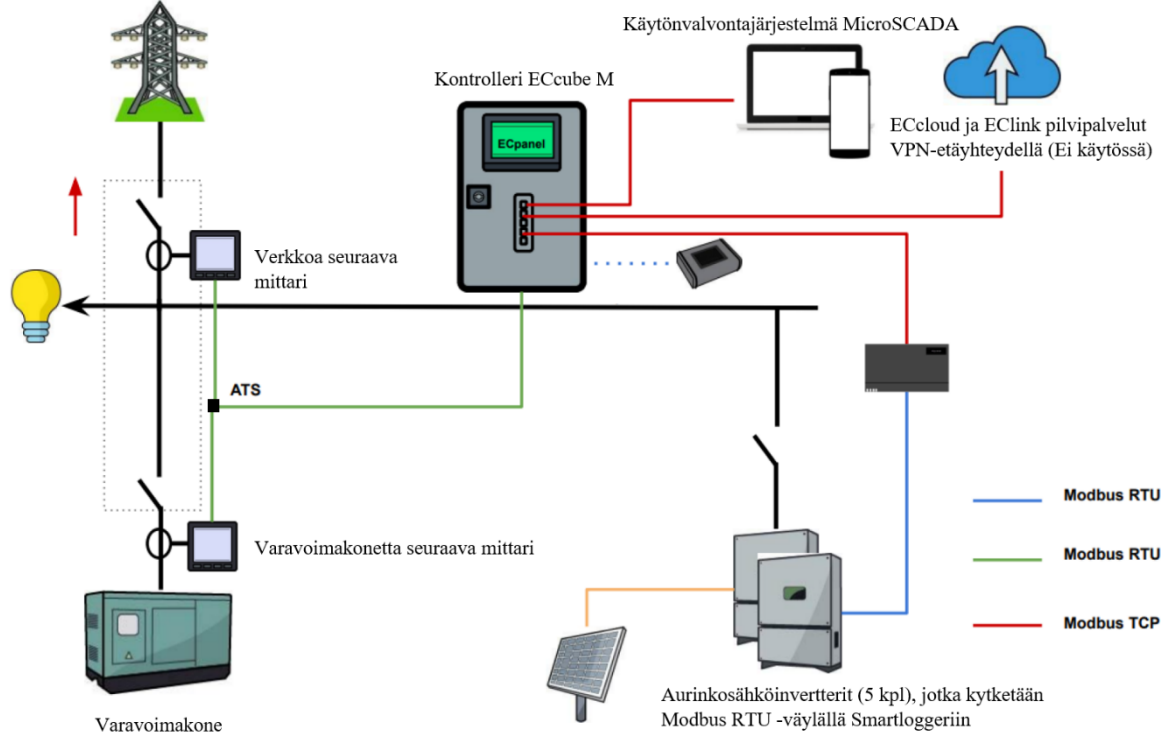
Kun aurinkosähkövoimalaa ja akkuenergiavarastoa käytetään yleisen jakeluverkon tai varavoimakoneen rinnalla niiden alhainen virransyöttökyky ei aiheuta ongelmia. Silloin ne voivat vikatilanteessa hetkellisesti nostaa oikosulkuvirtaa, koska Kirchhoffin virtalain mukaisesti solmupisteeseen kytkeytyvät virrat voidaan laskea yhteen. Vikatilanteen jatkuessa aurinkosähkövoimala ja energiavarasto voivat irrota sähköverkosta, jos esimerkiksi jännite laskee alle pientuotantolaitteistojen oletusasetusten raja-arvon.

3.2 Tuotantolaitteistojen valinnan pääkohdat

Kohteessa on olemassa oleva kiinteä varavoimalaitteisto. Kuitenkin, jos kiinteitä varavoimakoneita ei jostain syystä voida käyttää, paikalle tuodaan siirrettävä varavoimalaitteisto. Kohteeseen hankittava siirrettävä varavoimalaitteisto muodostuu yhdestä 20 jalan merikonttiin asennetusta dieselgeneraattorista. Dieselgeneraattori mitoitetaan kohteen huipputehon mukaan, niin että se pystyy yksinään huolehtimaan kohteen sähköenergian tuotannosta. Luvussa 6 tarkastellaan jakeluverkon suojauksen ja selektiivisyyden toteutuminen valitulla dieselgeneraattorin nimellisteholla. Dieselgeneraattoria käytetään normaaliolojen

häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa kohteen sähkön tuotantoon saarekekäytössä. Sitä ei yleensä käytetä normaalioloissa yleisen sähköverkon rinnalla, paitsi kuukausikokeilujen aikana.

Kohteen aurinkosähkövoimalan pääkomponentit muodostuvat maa-asenteisesta paneeliken-
tystä ja viidestä rinnakkaisesta aurinkosähköinvertteristä. Aurinkosähkövoimala mitoitetaan kohteen kulutusprofiilin mukaan niin, että kaikki tuotettu sähkö saadaan kulutettua kohteessa. Tuotannon huipputeho riittää vastaamaan kohteen sähköenergian kulutukseen. Aurinkosähkövoimala toimii normaalioloissa yleisen sähköverkon rinnalla. Normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa aurinkosähkövoimala toimii varavoimakoneen rinnalla. Varavoimakoneen ja aurinkosähkövoimalan liittymisen periaate esitetään kuvassa 21.



Kuva 21. Aurinkosähkövoimalan ohjauksen periaatekuva (Solnet 2022).

Kuvassa esitetyt väylät toteutetaan Modbus RTU- ja TCP-väylätopologioilla. Sähköverkon tehoa ja generaattorintehoa valvovat mittarit yhdistetään väylällä ATS-reitittimen kautta kontrolleriin.

Kohteen sähköenergiavarasto muodostuu konttiin asennetusta kokonaisuudesta, jonka pääkomponentit ovat NMC-akut, akustonvalvontajärjestelmä, ohjauslogiikka ja verkkosuuntaaja (liite 2). Akusto- ja invertteritekniikalle asennetaan suljettuun ilmankiertoon perustuva jäähdytysjärjestelmä. Energiavarastoa ei mitoiteta kohteen huipputehon mukaan, vaan se toimii aurinkosähkövoimalan tuotantoa tasaavana laitteistona.

Valitulla kokoonpanolla ei päästä katkottomaan sähkönjakelujärjestelmään. Kuitenkin kohteen kriittiset laitteistot on jo aikaisemmin UPS-varmennettu. Katkoton sähkönjakelujärjestelmä olisi mahdollista saavuttaa energiavaraston avulla. Tällöin olisi pitänyt valita kohteen tehontarpeen huomattavasti ylittävä energiavarasto, koska energiavarasto ei pysty syöttämään nimellistehoonsa nähden merkittävää oikosulkuvirtaa. Energiavaraston kyky syöttää oikosulkuvirtaa pitäisi olla samaa suuruusluokkaa kuin kohteeseen valitun dieselgeneraattorin. Tämä vaatimus olisi johtanut energiavaraston nimellistehon monikertaiseen ylimitoittamiseen kohteen tehontarpeeseen verrattuna. Samalla energiavaraston hankintakustannus olisi moninkertaistunut. Tämä ei ollut teknistaloudellisesti perusteltavissa.

Valitulla kokoonpanolla normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa varatuotantojärjestelmät voivat syöttää keskijänniteverkon kautta saarekettä, joka koostuu olomassa olevasta sähköverkon osasta. Yleisen sähköverkon katketessa seuraa puolen minuutin viive, jonka jälkeen dieselgeneraattori käynnistyy. Tällöin verkostoautomaatio on tehnyt tarkoituksen mukaiset katkaisijoiden ohjaukset saarekekäytön vaatimalla tavalla. Kuormat lisätään portaittain generaattorin syöttämään saarekkeeseen. Seuraavaksi aurinkosähkövoimala ja energiavarasto kytketään dieselgeneraattorin rinnalle. Yleisen sähköverkon palauduttua dieselgeneraattori tahdistuu ensin verkkoon, jonka jälkeen yleinen sähköverkko kytkeytyy saarekkeen rinnalle. Diesel-varavoimakone pysäytetään viiveen jälkeen ja yleinen sähköverkko jatkaa kohteen syöttämistä. Normaalioloissa aurinkosähkövoimala toimii yleisen sähköverkon rinnalla uusiutuvan sähköenergian lähteenä ja energiavarasto sen rinnalla tuotantoa tasaavana laitteistona.

4 Suojaus ja sähköturvallisuus

Suomessa noudatetaan säädettyjä lakeja ja asetuksia, joiden avulla turvallinen sähkön käyttö ja sähköturvallisuuden toteutuminen sähkölaitteistoissa varmistetaan. Ylintä säädöstaustaa edustavat sähköturvallisuuslaki ja sähkömarkkinalaki. Seuraavina tulevat valtioneuvoston asetus sähkölaitteistoista ja valtioneuvoston asetus sähkötyöstä ja käyttötyöstä.

”Sähköturvallisuuslain (1135/2016) 33§ ja 84§ mukaan Turvallisuus- ja kemikaalivirasto julkaisee luettelon niistä standardeista, joita noudattaen katsotaan lain vaatimusten täyttyvän sähkölaitteiston rakenteelle ja sähkötyöturvallisuudelle” (Tukes 2019). Tässä tarkastelussa käytettävät olennaisimmat julkaisut ovat standardisarja Pienjännitesähköasennukset SFS 6000:2017 ja standardi Suurjännitesähköasennukset SFS 6001:2018.

Standardeja täydentäviä ja havainnollistavia julkaisuja ovat esimerkiksi Sähkö- ja teleura-koitsijaliiton julkaisema Käsikirja rakennusten sähköasennuksista D1-2017, Energiateollisuus ry:n julkaisema Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen SA 2:08 ja Sähköenergialiitto ry:n julkaisema Verkostosuositus, keskijänniteverkon sähköinen mitoittaminen SA 5:94.

Tässä luvussa tarkastellaan standardien mukaisia suojausmenetelmiä ja suojalaitteiden valintaa. Tarkastelussa keskitytään pienjänniteverkon ylivirta- ja vikasuojaukseen TN-järjestelmässä sekä keskijänniteverkon ylivirta- ja maasulkusuojauksen perusteisiin.

4.1 Ylivirtasuojaus

Ylivirtasuojauksessa suojaudutaan johtimissa kulkevan ylivirran synnyttämän lämpötilan ja mekaanisen rasituksen aiheuttamilta vahingoilta. Ylivirtasuojaus sisältää ylikuormitussuojauksen ja oikosulkusuojauksen. Standardisarjan SFS 6000 4-43 luvussa esitetään menetelmät, joilla suojaus toteutetaan. Menetelmät perustuvat ylivirran suuruuden ja kestoajan rajoittamiseen. Sama suojalaite voi toimia ylikuormitus- ja oikosulkusuojana sekä myös vikasuojauksessa (STUL 2017). Vikasuojauksen osalta noudatetaan standardisarjan SFS 6000 4-41 luvun mukaisia vaatimuksia.

Kun suojalaite toimii ylikuormitus- ja oikosulkusuojana pitää suojalaitteen nimellisvirta valita siten, että johto suojataan ylikuormitukselta. Kun ylikuormitus- ja oikosulkusuojana toimivan suojalaitteen katkaisukyky on riittävä, toteutuu myös oikosulkusuojaus. Suojalaitteen katkaisukyky on riittävä, kun se on vähintään prospektiivisen oikosulkuvirran suuruinen (SFS 6000-4-43 2017, 7). Suojalaitteet voivat olla esimerkiksi gG-tyyppisiä sulakkeita, johdonsuojakatkaisijoita tai ylikuormituslaukaisijalla varustettuja katkaisijoita. ”Prospektiivinen oikosulkuvirta tarkoittaa virtaa, joka kulkisi piirissä, jos kytkinlaitteen ja mahdollisen ylivirtasuojan jokainen päävirtatie on korvattu johtimella, jolla on mitättömän pieni impedanssi” (Sesko 2022,12).

Suojalaitetta voidaan käyttää myös pelkästään ylikuormitussuojana tai pelkästään oikosulkusuojana. Suojalaite, jota käytetään pelkästään ylikuormitussuojana, on esimerkiksi moottorinsuojakytkin. Tällöin voidaan käyttää nimellisvirraltaan johtimen kuormitettavuutta suurempaa oikosulkusuojaa (STUL 2017). Moottorilähtö keskuksessa on hyvä esimerkki tapauksesta. Tällöin keskuksessa voi olla kaapelin kuormitettavuutta suurempi gG- tai aM-tyyppinen sulake oikosulkusuojana. Lämpörele huolehtii ylikuormitussuojauksesta ohjaten moottorin kontaktoria. Nykyisin useissa tapauksessa kontaktorin ja lämpöreleen korvaa taajuusmuuttaja, jossa on sisäinen ylikuormitussuoja. Toinen esimerkki, jossa suojalaitetta käytetään pelkästään oikosulkusuojana, on kiinteistön liittymiskaapelia suojaava esimerkiksi gG-tyyppinen sulake sähkönjakeluverkon puolella. Tällöin ylikuormitussuojana toimivat pääsulakkeet liittymiskaapelin kiinteistön puoleisessa päässä olevassa pääkeskuksessa tai erillisessä kotelossa.

4.1.1 Ylikuormitussuojaus

Ylikuormitussuojauksen tehtävänä katkaista virtapiiri, kun virta vähintään yhdessä johtimessa ylittää sen jatkuvan kuormitettavuuden I_z ja siten estää johtimien, liitosten, eristyksen ja ympäristön lämpeneminen. Ylivirta virtapiirissä aiheutuu ilman sähköistä vikaa esimerkiksi moottorin liiallisen mekaanisen kuormittamisen takia.

Ylikuormitussuojan valintaa varten tulee suojattavan laitteen nimellistehon P_n perusteella laskea johtoa suojaavan suojalaitteen mitoitusvirta I_B .

$$I_B = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} \quad (25)$$

jossa U_n on laitteen nimellisjännite. Yhtälöä 25 käytetään 3-vaiheisen laitteen tapauksessa. Yksivaiheisen laitteen tapauksessa voidaan juurilauseke $\sqrt{3}$ jättää yhtälöstä pois. Mitoitusvirran perusteella valitaan johtoa suojaava suojalaite. Lisäksi pitää ottaa huomioon suojalaitteiden erilaiset toiminta-arvot.

Jos ylikuormitussuojaukseen käytetään B-, C-, D- tai K-tyypin johdonsuojakatkaisijaa on valinta suoraviivaista $I_B \leq I_n$ eli valitaan nimellisvirraltaan I_n yhtä suuri tai seuraava va-kiokoko johdonsuojakatkaisija (STUL 2017).

Käytettäessä katkaisijaa, jossa toimintavirran voi asetella, tulee huomioida releasettelussa virran lisäksi myös aikaviive. Virta-asettelun tulee olla enintään johdon jatkuvan kuormitettavuuden suuruinen (STUL 2017, 137). Aikaviive pitää asetella riittävän suureksi, että virhelaukaisuilta vältytään, esimerkiksi kytkentävirtasäykset ja kuormituksen muutokset huomioiden. Johdonsuojakytkimen ja aseteltavan katkaisijan tapausta kuvaa yhtälö

$$I_B \leq I_n \leq I_z \quad (26)$$

Johdon jatkuva kuormitettavuus I_z määritetään standardisarjan SFS 6000 5-52 luvussa liitteen 52B mukaisesti. Liitteessä on esitetty kuormitustaulukot eri referenssiasennustavoilla ja tarvittavat korjauskertoimet taulukoissa B.52.1–21 (SFS 6000-5-52, 31-59).

Käytettäessä gG-tyyppistä sulaketta ylikuormitussuojaukseen tilanne poikkeaa johdonsuojakytkimen ja aseteltava katkaisijan tapauksesta. Sulakkeilla ylempi sulamisrajavirta on suurempi kuin sulakkeen nimellisvirta (STUL 2017, 137). Johdon jatkuvan kuormitettavuuden pienimmät sallitut arvot käytettäessä gG-tyyppistä sulaketta voidaan valita taulukosta 7 tai ratkaista yhtälöstä

$$k \cdot I_n \leq 1,45 \cdot I_z \quad (27)$$

jossa k on sulakkeen ylemmän sulamisrajavirran ja sulakkeen nimellisvirran suhde, I_n on sulakkeen nimellisvirrat ja I_z on johdon jatkuvan kuormitettavuus (STUL 2017, 137).

Taulukko 7. Johdon pienimmät kuormitettavuudet käytettäessä gG-sulaketta ylikuormitus-suojana (STUL 2017, 138).

gG-tyyppisen sulakkeen suurin sallittu nimellisvirta	Johdon sallittu jatkuva kuormitus vähintään
6 A	8 A
10 A	13,5 A
16 A	18 A
20 A	22 A
25 A	28 A
32 A	35 A
35 A	39 A
40 A	44 A
50 A	55 A
63 A	70 A
80 A	88 A
100 A	110 A
125 A	138 A
160 A	177 A
200 A	221 A
250 A	276 A
315 A	348 A

4.1.2 Oikosulkusuojaus

Oikosulkusuojauksen tehtävänä on katkaista virtapiirin oikosulkuvirta nopeasti, ennen kuin se aiheuttaa vaaraa. Vaaratilanne voi syntyä lämpenemisestä tai mekaanisista voimavaikutuksista.

Jokainen virtapiiri on yleensä varustettava oikosulkusuojalla. Oikosulkusuojaus on osa ylivirtasuojauksista ja voidaan toteuttaa samoilla tai eri suojalaitteilla ylikuormitussuojauksen kanssa. Ylikuormitussuojaa voidaan käyttää oikosulkusuojaukseen, jos sen katkaisukyky on riittävä. Suojalaitteen katkaisukyky on riittävä, kun se on vähintään prospektiivisen oikosulkuvirran suuruinen (SFS 6000-4-43 2017, 14).

Oikosulun suurin sallittu kestoaika voidaan laskea yhtälöllä 28. Yhtälö on voimassa enintään 5 sekuntia kestäville vikatilanteille. Ajan t kuluessa johtimen lämpötila nousee sallittuun rajalämpötilaan, jota ei saa ylittää. Käytännössä tarkastelussa on hyvä käyttää apuna valmistajien antamia käyrästäjä ja taulukoita. Oletuksena on, että ennen oikosulkua johdin on

normaalissa suurimmassa sallitussa käyttölämpötilassa (SFS 6000-4-43 2017, 12). (STUL 2017, 142.)

$$t = (k \cdot A/I)^2 \quad (28)$$

jossa I on oikosulkuvirta, A on johtimen poikkipinta-ala [mm^2] ja k on johdinvakio, joka saadaan taulukosta 8.

Taulukko 8. Kertoimen k arvot äärijohtimille (SFS 6000-4-43 2017, 13).

Ominaisuus/olosuhde	Johtimen eristys							
	PVC		PVC 90°C		EPR PEX	Kumi 60°C	Mineraali	
							PVC Päällystetty	Paljas Päällystämätön
Johtimen poikki- pinta-ala mm^2	≤ 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
Alumiini	76	68	66	57	94	93	-	-
Kuparijohtimien tinajuotetut liitokset	115	-	-	-	-	-	-	-

Oikosulkusuojina käytetään sulakkeita, johdonsuojakatkaisijoita ja releohjattuja katkaisijoita. Käytettäessä katkaisijoita sekä ylikuormitussuojaukseen, että oikosulkusuojaukseen tehdään releasettelut molemmille erikseen. Ylikuormitussuojauksen virta-asettelun tulee olla enintään johdon jatkuvan kuormitettavuuden suuruinen. Aikaviive pitää asetella riittävän pitkäksi, että virhelaukaisuilta vältytään. Oikosulkusuojauksen virta-asettelun, joka on ylikuormitussuojauksen asettelua suurempi, on oltava pienempi kuin piirissä esiintyvä oikosulkuvirta. Aikaviive tulee olla enintään yhtälön 28 mukainen, jotta oikosulkuvirta saadaan nopeasti katkaistua.

Oikosulkusuojauksen toteutuminen tulee varmistaa suunnitteluvaiheessa. Oikosulkuvirta tarkastellaan asennuksen eri pisteissä. Tarkastelu toteutetaan laskemalla tai verkostolaskentaohjelmiston avustamana. Tarkastelussa selvitetään pienin ja suurin oikosulkuvirta

asennuksen eri pisteissä. Suurinta oikosulkuvirtaa tarvitaan, kun määritetään komponenttien virrankestoa ja katkaisukykyä. Komponenteilla tarkoitetaan tässä esimerkiksi suojalaitteita, keskuksia, kiskostoja ja kaapeleita. Käyttöönottotarkastuksessa varmistetaan aistinvaraisesti ja mittauksin, että suojalaitteet on valittu oikein suunnitelmien mukaisesti.

Sulakkeilla on oikosulkuvirtaa rajoittava ominaisuus. Oikosulussa sulakkeen sisällä syntyy valokaariresistanssi, joka kasvaa nopeasti (ABB 2000, 213). Tätä ominaisuutta hyödynnetään esimerkiksi, kun keskuksessa johdonsuojakatkaisijoilla suojattujen ryhmien syötön puolella on etukojeena kytkinvaroke, jossa gG-tyyppinen kahvasulake. Kahvasulake rajoittaa oikosulkuvirtaa ja johdonsuojakytkimet voidaan tällöin valita katkaisukyvyltään pienemmäksi tai niitä voidaan ylipäätään käyttää.

4.2 Suojaus sähköiskulta

Standardisarjan SFS 6000 4-41 luvussa esitetään menetelmät, joilla suojaus sähköiskulta toteutetaan. Perussuojauksessa, josta aiemmin on käytetty nimitystä kosketussuojaus, suojataan normaalitilassa olevan sähkölaitteen jännitteisten osien koskettamiselta.

Vikasuojauksessa, josta aikaisemmin on käytetty nimitystä kosketusjännitesuojaus, suojataan vaaralliselta jännitteeltä, joka voi eristysvian seurauksena esiintyä sähkölaitteen rungossa. Jännite tulee kytkeä pois, ennen kuin se ehtii aiheuttaa vaaraa. Standardin SFS 6000 4-41 luvun mukaan suojaukseen sähköiskulta vaaditaan molemmat menetelmät. Perussuojaus ja vikasuojaus on toteuduttava samanaikaisesti. Lisäksi standardissa määritetään useita tapauksia, joissa on edellisten lisäksi käytettävä lisäsuojauksia. (STUL 2017, 78.)

4.2.1 Perussuojaus

Perussuojauksen tehtävänä on varmistaa, että henkilöt eivät pääse kosketuksiin sähkölaitteiston jännitteisten osien kanssa. Tässä tarkoitetaan tilannetta, jolloin sähkölaitteistossa ei ole vikaa, vaan se on normaalitilassa (STUL 2017, 79).

Perussuojaus järjestetään jännitteiset osat eristämällä tai jännitteiset osat suojataan koteloinnin ja suojusten avulla (SFS 6000-4-41 2017, 15). Nämä menetelmät tarjoavat täydellisimmän suojan ja niitä voidaan käyttää kaikissa olosuhteissa (STUL 2017, 79). Suojaus toteutuu

käyttämällä standardien mukaisia hyväksytyjä asennustarvikkeita valmistajan asennusohjeita noudattaen.

Esteet ja sijoittaminen kosketusetäisyyden ulkopuolelle tulevat suojausmenetelmänä kysymykseen vain erityistilanteissa, koska ne antavat vain osittaisen suojan koskettamiselta (SFS 6000-4-41 2017, 24). Tällaisia erityistilanteita voi olla esimerkiksi sähkötilat, joihin pääsee ainoastaan sähköalan ammattihenkilöt tai opastetut henkilöt. (STUL 2017, 79.)

4.2.2 Vikasuojaus

Vikasuojauksen tehtävänä on kytkeä jännite pois, jos se eristysvian seurauksena esiintyy sähkölaitteen rungossa. Vikasuojauksella suojataan ihmisiä ja eläimiä sähköiskulta. Vikasuojauksen on toimittava nopeasti, ennen kuin se ehtii aiheuttaa vaaraa. Jännitteelle alttiit sähkölaitteiston osat suojamaadoitetaan ja muut johtavat osat yhdistetään potentiaalintasaukseen. Muiden johtavien osien potentiaalintasaus pienentää vikatapauksessa esiintyvää kosketusjännitettä (STUL 2017, 86). Kun vika kytkeytyy jännitteisen johtimen ja maadoitetun osan välille, on suojalaitteen automaattisesti katkaistava syöttö vaaditussa ajassa (SFS 6000-4-41 2017, 8). Suojalaitteina toimivat pääsääntöisesti samat suojalaitteet, jotka huolehtivat oikosulkusuojauksesta.

Pienjännitteisissä sähköjakeluverkoissa vaaditaan yleensä, että nopea poiskytketyminen tulee tapahtua enintään 5 sekunnissa. Automaattiseen nopeaan poiskytkentään käytettävän sulakkeen mitoitusvirta voidaan määrittää taulukon 9 mukaisesti. Tällöin pitää huomioida, että liittymiä koskevat vaatimukset täytyvät eli liittymän suojaus voidaan toteuttaa SFS 6000-4-41 mukaisesti (SFS 6000-8-801 2017, 6-7). Kun jakeluverkon ylivirtasuojana on katkaisija, se voidaan asetella toimimaan enintään 5 sekunnissa.

Taulukko 9. Pienin oikosulkuvirta, jonka mukaan jakeluverkon ylivirtasuojaa voidaan mitoittaa, kun sitä käytetään vikasuojaukseen (SFS 6000-8-801 2017, 7).

Ylivirtasuojaja	Pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta jakeluverkossa
gG-tyypin sulake $I_n \leq 63 \text{ A}$	$2,5 \cdot I_n$
gG-tyypin sulake $I_n > 63 \text{ A}$	$3,0 \cdot I_n$

Rakennusten sähköasennuksissa vaaditut nopean poiskytketymisen ajat pienjänniteverkon TN-järjestelmässä ovat 230 V jännitteellä 0,4 sekuntia ja 400 V jännitteellä 0,2 sekuntia. Vaadittuja poiskytketymisen enimmäisaikoja tulee soveltaa kiinteitä laitteita syöttäviin, enintään 32 A ylivirtasuojalla suojattuihin ryhmäjohtoihin. Vaadittuja poiskytkentäaikoja sovelletaan myös pistorasiaryhmiin, jotka on suojattu enintään 63 A ylivirtasuojalla. TN-järjestelmässä korkeintaan 5 sekunnin poiskytkentäaika on sallittu pääjohdoille. 5 sekunnin poiskytkentäaika on sallittu myös yli 32 A ylivirtasuojilla suojatuille kiinteitä laitteita syöttäville ryhmäjohtojen ja yli 63 A ylivirtasuojilla suojatuille pistorasiaryhmille (STUL 2017, 91). (SFS 6000-4-41, 8-9.)

Vikasuojauksen toteutuminen tulee varmistaa suunnitteluvaiheessa. Tarkastelussa selvitetään pienin oikosulkuvirta asennuksen eri pisteissä. Tarkastelu toteutetaan laskemalla tai verkostolaskentaohjelmiston avustamana. Pienimmän oikosulkuvirran arvoja verrataan suojalaitteiden vaatimiin oikosulkuvirran arvoihin, joilla ne toimivat vaaditussa ajassa. Tarkastelussa voi käyttää julkaisun D1-2017 taulukoita 41.4a, 41.4b ja 41.5, joihin on kerätty johdonsuojakatkaisijoiden ja sulakkeiden vaatimat oikosulkuvirran arvot eri toiminta-ajoissa. Käyttöönottotarkastuksessa varmistetaan aistinvaraisesti ja mittauksin, että suojalaitteet on valittu oikein suunnitelmien mukaisesti. Pienimmän yksivaiheisen oikosulkuvirran I_k laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä

$$I_k = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z} \quad (29)$$

jossa c on jännitteenaleneman huomioiva kerroin, U on pääjännite ja Z on virtapiirin silmukkaimpedanssi.

Vikasuojaus pitää toteuttaa ensisijaisesti oikosulkusuojilla. Suojalaitteen käyrää tai nimellisvirtaa voidaan muuttaa, jos kuorma sen mahdollistaa. Kuitenkin, jos se on mahdotonta, voidaan toteutukseen käyttää lisäksi vikavirtasuojaa. Tällöin vikavirta on oltava vähintään viisinkertainen vikavirtasuojan nimellisvirtaan verrattuna (STUL 2017, 104). Jos oikosulkuvirta on vaatimukseen nähden liian pieni, tilannetta voidaan myös parantaa pienentämällä silmukkaimpedanssia vikapiirissä. Tämä voidaan toteuttaa suurentamalla johdon poikkipinta-alaa tai lisäpotentiaalintasauksella. Lisäpotentiaalintasauksella pyritään ensisijaisesti rajaamaan kosketusjännitettä, kun taas poikkipinnan kasvattamisella pyritään pääsemään tilanteeseen, jossa oikosulkuvirta on riittävä poiskytkentäaikavaatimuksen toteutumiseksi.

4.2.3 Lisäsuojaus

Standardisarjan SFS 6000 4-41 luvussa esitetään vaatimuksia vikavirtasuojakytkimen käytölle lisäsuojaukseen. Näitä vaatimuksia ei pidä sekoittaa vikasuojaukseen. Lisäsuojauksen tarkoituksena on parantaa suojausta perussuojauksen ja vikasuojauksen vioissa tai kun käyttäjä on varomaton. (SFS 6000-4-41 2017, 21)

Lisäsuojaukseen pitää käyttää 30 mA vikavirtasuojakytkimiä enintään 32 A pistorasioiden ja ulkona käytettävien enintään 32 A siirrettävien laitteiden suojaukseen (SFS 6000-4-41 2017, 9). Jos pistorasia on tietylle erityiselle laitteelle tai laitetta käytetään sähköalan ammattilaisen valvonnassa, voidaan vikavirtasuojakytkin jättää pois (STUL 2017, 113). Edellä mainituissa tapauksissa, kun vikavirtasuojakytkin jätetään pois pistorasiasta, se tulee selkeästi merkitä, jos erityinen käyttötarkoitus ei muuten ole selkeästi havaittavissa (STUL 2017, 114).

Lisäsuojaus 30 mA vikavirtasuojakytkimellä vaaditaan myös valaisinryhmäjohdoissa normaaleissa asunnoissa ja niiden piha-alueilla, joissa maallikot voivat liittää valaisimia ja vaihtaa lampuja (SFS 6000-4-41 2017, 9). Lisäsuojauksia ei vaadita hotelleissa, hoivakodeissa ja vastaavissa, joissa valaisinhuollon suorittaa opastettu- tai ammattihenkilö.

Julkisissa, kaupallisissa ja teollisissa tiloissa voidaan vikavirtasuojakytkin jättää pois pistorasiaryhmästä, jos pistorasia on tietylle erityiselle laitteelle tai laitetta käytetään sähköalan ammattilaisen valvonnassa. Samoin voidaan vikavirtasuojakytkin jättää pois pistorasioista, jotka syöttävät kiinteästi asennettuja, paikalleen kiinnitettyjä teollisuuskoneita, valaisimia, sähkömoottoreita, tietoliikennelaitteita, palvelimia ja vastaavia sekä esimerkiksi hitsauslaitteita, joiden vuotovirta on niin suuri, että se voi aiheuttaa virheellisiä vikavirtasuojan toimimisia. Jos vikavirtasuojakytkin jätetään pois pistorasiasta, se tulee selkeästi merkitä, jos erityinen käyttötarkoitus ei muuten ole selkeästi havaittavissa. (SFS 6000-4-41 2017, 31.)

4.3 Keskijänniteverkon ylivirta- maasulkusuojaus

Standardissa SFS 6001 esitetään vaatimukset, jotka keskijänniteverkon suojauksessa tulee ottaa huomioon. Keskijänniteverkko poikkeaa rakenteeltaan pienjänniteverkossa yleisesti

käytetystä TN-järjestelmästä. Erityispiirteitä ovat tähtipistemaadoitusten ja nollajohtimen puuttuminen (Lakervi et al. 2009, 176).

Tähtipistemaadoitusten ja nollajohtimen puuttuminen tekee maasulusta vian, jonka suojaus ja paikallistaminen vaatii oman erikoistekniikkansa. Ylikuormitus- ja oikosulkusuojauksen tavoitteena on estää johtojen ja laitteiden vauriot ja erottaa viallinen osa verkosta. Valokaarisuojauksella voidaan pienentää tai välttää vauriot keskijännitekojeistossa tapahtuvassa valokaarioikosulun aiheuttamassa vikatilanteessa.

4.3.1 Keskijänniteverkon ylikuormitus- ja oikosulkusuojaus

Suurjännitestandardin SFS 6001 mukaan keskijännitelaitteisto ja laitteistojen väliset kaapeliyhteydet on rakennettava siten, että ne kestävät normaalikäytön virrat määritellyissä olosuhteissa (SFS 6001 2018, 29; SFS 6001 2018, 139). Ylikuormitussuojauksen tehtävänä keskijänniteverkossa on varmistaa, ettei normaalikäyttöön suunniteltua verkkoa ylikuormiteta niin pitkiä aikoja, että aiheutuu vaaratilanteita tai vaurioita. Vaurioita voi syntyä johtimiin, liitoksiin, eristyksiin, laitteisiin tai ympäristön lämpenemisen seurauksena.

Keskijännitelaitteisto ja laitteistojen väliset kaapeliyhteydet rakennetaan ja niitä käytetään niin, että ne turvallisesti kestävät oikosulkuvirtojen termiset ja mekaaniset rasitukset (SFS 6001 2018, 139). Tämä edellyttää pahimman vian vikavirran määrittämistä kaikille kyseeseen tuleville toiminnoille. Tarkasteltavat tilanteet oikosulkusuojauksen kannalta ovat kaksi- ja kolmivaiheinen oikosulku. Oikosulkusuojaukseen käytetään automaattisesti toimivia laitteita, jotka poiskytkävät kolmivaiheiset ja kaksivaiheiset oikosulut (SFS 6001 2018, 29).

Keskijänniteverkon ylivirtasuojauksessa suojalaitteina käytetään katkaisijoita ja suurjännitesulakkeita. Katkaisijat ovat pääsääntöisesti suojareiden ohjaamia ja usein niitä voidaan myös kauko-ohjata. Nykyaikaisten suojareiden etuja ovat monipuoliset ja laajat asettelualueet, mittaukset ja hälytystoiminnot. Tämä mahdollistaa suojausominaisuuksien helpon muokkauksen tarpeen mukaan. Laukaisuvirta- ja hidastusajat ovat säädeltävissä. Suojareleissä voi olla myös muita säätötoimintoja, kuten yli- ja alijännitesuojaus sekä maasulkusuojaus.

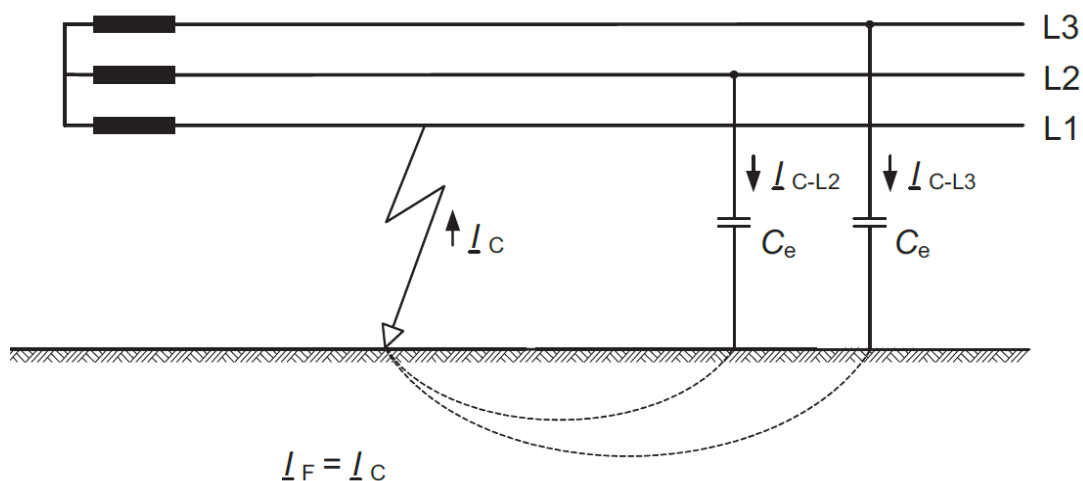
Valokaarisuojauksella voidaan parantaa henkilöturvallisuutta ja pienentää aineellisia vahinkoja kojeistossa tapahtuvassa valokaarioikosulun aiheuttamassa vikatilanteessa.

Valokaarioikosulun sattuessa suoja reagoi erittäin nopeasti ja antaa laukaisukäskyn katkaisijalle. Tällä ratkaisulla päästään 80–100 millisekunnin toiminta-aikaan (ABB 2022). Valokaarisuoja sisältää suojareleeseen liitettävän ohuen valokuidun, joka kiertää valvottavassa kojeistossa. Havaittu kirkas valo siirtyy valokuitua pitkin suojareleelle. Suojarele laukaisee katkaisijan auki, jos sekä valokaari että nouseva virta havaitaan. Näin vältetään turhilta laukaisuilta, joita voisivat aiheuttaa esimerkiksi kameran salama tms.

4.3.2 Keskijänniteverkon maasulkusuojaus

Maasulkuksi kutsutaan vikaa, joka aiheutuu jännitteisen johtimen kytkeytymisestä maahan. Maasulku voi syntyä myös jännitteisen johtimen ja maan välisen eristysresistanssin pienentymisestä alle määrätyn raja-arvon. Vastaavasti samassa järjestelmässä tapahtunutta kahden vaihejohtimen samanaikaista maasulkua eri pisteissä kutsutaan kaksoismaasulkuksi. (SFS 6001 2018, 21.)

Suurjännitstandardin SFS 6001 mukaan keskijännitelaitteisto ja laitteistojen väliset kaapeilytyhdet on suojattava automaattisesti toimivilla laitteilla, jotka poiskytkävät tai ilmaisevat maasulun. Tähtipisteen maadoitustapa vaikuttaa suojalaitteiden valintaan. Poiskytkennän ansiosta maasulkujen aiheuttamia pitkäaikaisia kosketusjännitteitä ei pääse esiintymään (SFS 60012018, 91). Kuvassa 22 on esitetty maasta erotetussa järjestelmässä esiintyvä maasulku. (SFS 6001 2018, 29.)



Kuva 22. Maasulkuvirta I_f maasta erotetussa järjestelmässä (SFS 6001 2018, 25).

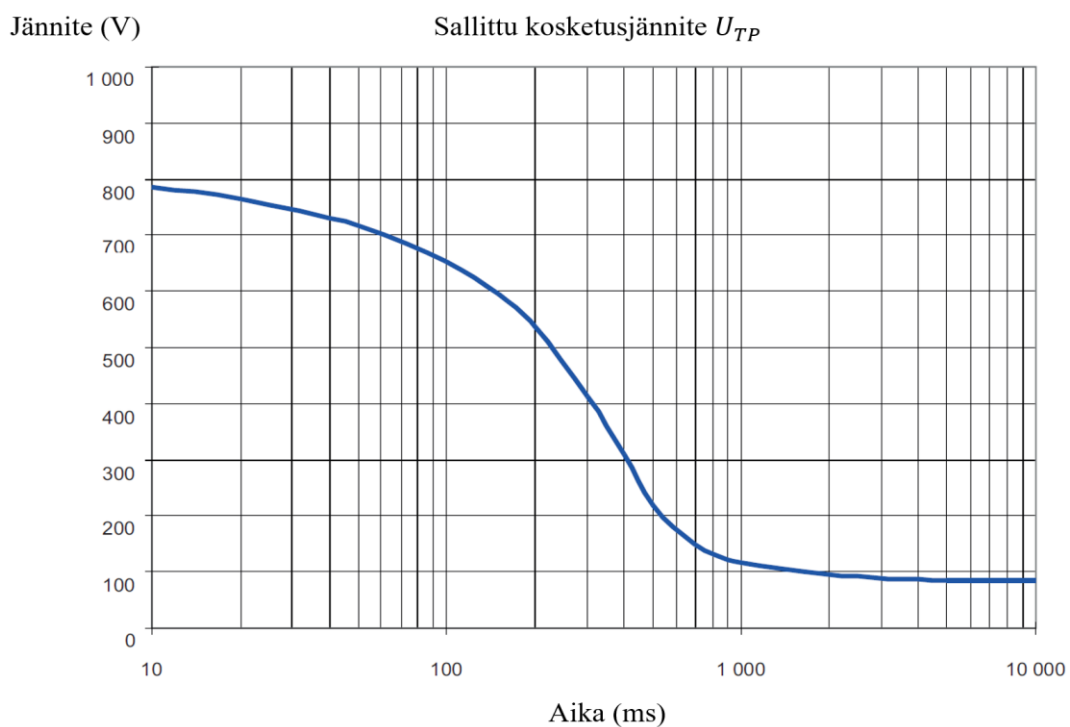
Maasta erotetun keskijänniteverkon maasulkuvirta on melko pieni. Sen suuruus riippuu galvaanisesti yhtenäisen verkon laajuudesta. Maasulkuvirta 20 kV avojohtoverkossa on keskimäärin 0,067 A/km ja maakaapeliverkossa kaapelityypistä ja sille ominaisesta maakapasitanssista riippuen 2,7–4 A/km (Lakervi et al. 2009, 186).

Kuvan 22 vikatilanteessa terveiden vaiheiden jännitteet nousevat riippuen vikaresistanssista. Vikaresistanssin arvolla nolla, terveiden vaiheiden jännitteet nousevat vaihejännitteen suuruiseksi. Viiallisen vaiheen jännite on tällöin nolla ja tähtipisteen jännite vaihejännitteen suuruinen. (Lakervi et al. 2009, 186.)

Maasulkuvirta I_f aiheuttaa maasulkupaikassa maadoitusjännitteen U_m joka voidaan laskea yhtälöllä

$$U_m = I_f \cdot R_m \quad (30)$$

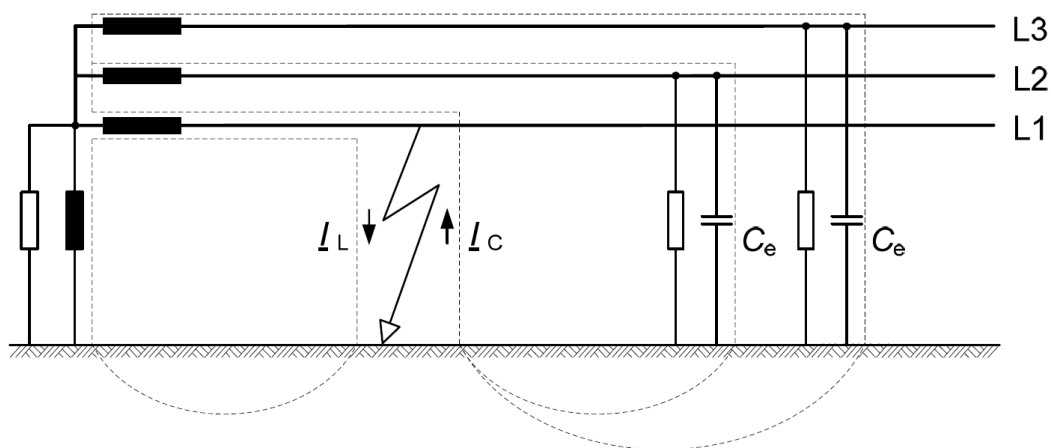
jossa R_m on maadoitusresistanssi. Maadoitusjännite U_m on ihmisen kosketeltavissa oleva kosketusjännite, jolle standardissa 6001 on määritelty suurimmat sallitut raja-arvot. Raja-arvot ovat riippuvaisia kestoajasta kuvan 23 mukaisesti.



Kuva 23. Sallittu kosketusjännite (SFS 6001 2018, 93).

Liian suurta kosketusjännitettä voidaan pienentää pienentämällä maadoitusresistanssia. Tämä on mahdollista parantamalla maadoituksia. Muita keinoja saavuttaa kosketusjännitevaatimus ovat maasulkusuojauksen toiminta-ajan lyhentäminen tai siirtyminen käyttämään sammutettua verkkoa. Sammutetun verkon avulla on mahdollista pienentää maasulkuvirtaa. Sammutetussa verkossa muuntajan tähtipiste maadoitetaan sammutuskelan kautta (SFS 6001 2018, 21).

Kuvasta 24 nähdään, että sammutetussa verkossa virrat I_L ja I_C ovat vastakkaisuuntaisia, joten maasulkuvirta I_f jää pieneksi. Sammutuskela on kuvattu kelan ja resistanssin rinnankytkennällä.



Kuva 24. Maasulkuvirta I_f sammutetussa järjestelmässä (SFS 6001 2018, 25).

Sammutetun verkon maasulkuvirta I_f voidaan laskea yhtälöllä

$$|\bar{I}_f| = |\bar{I}_{res}| = \sqrt{|\bar{I}_C + \bar{I}_L|^2 + |\bar{I}_H|^2} \quad (31)$$

jossa \bar{I}_{res} on maasulun jäännösvirta, \bar{I}_C on kapasitiivinen maasulkuvirta, \bar{I}_L on rinnakkaisten sammutuskelojen virtojen summa ja \bar{I}_H on harmoninen virta (SFS 6001 2018, 25). Pieni maasulkuvirta I_f antaa mahdollisuuden käyttää pidempää laukaisuaikaa maasulun poiskytkentään, koska mahdollista kosketusjännitettä saadaan rajoitettua. Tämä taas antaa

mahdollisuuden valokaarimaasulun itsestään sammumiseen ja siten vähentää sähkönjakelun katkosten määrää. (Lakervi et al. 2009, 189.)

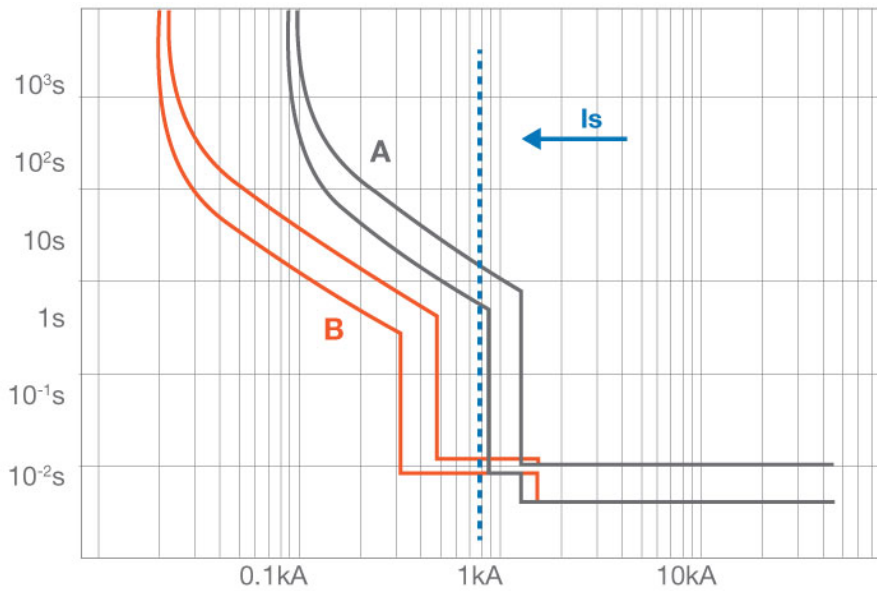
Maasulkusuojaus toteutetaan suuntareleellä, joka ohjaa johtolähdön katkaisijaa. Suojauksen toteuttamiseen tarvitaan johtolähdön vaihevirtojen ja muuntajan tähtipistejännitteen mitaukset. Vaihevirtojen osalta suuntarele tarkkailee niiden epäsymmetriaa, jota kuvaa nollavirta. Nollavirta saadaan johtolähdön vaihevirtojen osoitinsummasta, kun käytetään virtamuuntajien summakytkeä (Lakervi et al. 2009, 191). Käytettäessä kaapelivirtamuuntajaa pitää ottaa huomioon, että kaapelipäänteen johtimien maadoitusvaippaan kytketyt maadoituspalmikkosukat tuodaan kaapelivirtamuuntajan läpi. Tällöin maadoitusjohdin menee kaapelivirtamuuntajan läpi edestakaisin kumoten vaipassa mahdollisesti kulkevan virran.

Muuntajan tähtipistejännite normaalitilanteessa nolla. Vikatilanteessa se kohoaa. Tähtipistejännitteen mittausta toteutetaan jännitemuuntajien toisiokäämien avokolmiokytkennällä (Lakervi et al. 2009, 191).

Johtolähdön maasulkusuojauksen suuntarele tarvitsee havahtuakseen molemmat normaalitilanteesta poikkeavat mittaustiedot. Sekä kyseisen johtolähdön vaihevirtojen epäsymmetria että muuntajan kohonnut nollapistejännite pitää toteutua saman aikaisesti.

4.4 Selektiivisyys

Standardisarjan SFS 6000 5-53 536 luvussa esitetään menetelmät, joilla toteutetaan suojalaitteiden yhteensovittaminen vikatilanteissa. Vikatilanteita ovat esimerkiksi oikosulku, ylikuormitus ja vikavirrat (SFS 6000 5-53, 43-50). Peruseriaatteena standardin mukaisessa suojalaitteiden yhteensovittamisessa on, että suojauksen tulee olla selektiivinen. Vain vika-kohta erotetaan jakeluverkosta. Aina täydellinen selektiivisyys ei ole tarpeen ja voi johtaa ylimitoitamiseen (STUL 2017, 274). Täydellinen selektiivisyys toteutuu, kun suojalaite toimii ainoastaan sen varsinaisella suojattavalla alueella tapahtuvissa ylivirta tai vikavirta tilanteissa. Muut suojalaitteet eivät toimi. Selektiivisyyden tarkastelua varten valmistajien ohjeissa on esitetty suojalaitteiden ominaiskäyriä. Ominaiskäyriä vertailemalla varmistetaan, että ne eivät leikkaa toisiaan vaan jälkimmäisen suojalaitteen ominaiskäyrä on edellisen suojalaitteen ominaiskäyrän alapuolella, kuten kuvassa 25.



Kuva 25. Virtaselektiivisyyden tarkastelu (ABB 2022).

Kuvassa syötönpuoleinen katkaisijan A oikosulkusuojaus on aseteltu sellaiseen arvoon, että se ei laukea katkaisijan B kuormituspuolella esiintyvien vikojen vuoksi. Katkaisijan A oikosulkusuojauksen asetus on 1 kA. Kuormapuolen katkaisijan B suojaus on asetettava sellaiseen arvoon, että se laukeaa kuormituspuolella esiintyvien vikojen vuoksi. Kuvasta nähdään, että virtaselektiivisyys on voimassa oikosulkuvirroilla, jotka ovat korkeintaan oikosulkuvirran arvon I_s suuruisia. Eli korkeintaan syötönpuoleisen katkaisijan pikalaukaisijan havahdumisarvon suuruisilla oikosulkuvirroilla. Molemmille katkaisijoille on kuvassa kaksi käyrää. Pienempi on nimellinen asetusarvo ja suurempi on ylempi toimintarajavirta, jolla suojalaitteen viimeistään pitää toimia.

5 Sähkönjakeluverkon ominaisuudet ja oikosulkuvirrat

Edellisessä luvussa havaittiin, että sähköverkon suojauksen suunnittelun kannalta on tärkeää tietää suurin ja pienin oikosulkuvirran arvo sähkönjakeluverkon eri kohdissa. Suurinta oikosulkuvirran arvoa tarvitaan, kun tarkastellaan ylivirtasuojauksen kannalta, että sähköverkko kestää oikosulun aikaiset dynaamiset ja termiset rasitukset. Pienintä oikosulkuvirran arvoa tarvitaan, kun tarkastellaan vikasuojauksen kannalta, että suojalaitteet toimivat vaaditussa ajassa.

Kolmivaihejärjestelmän oikosulkuvirran tarkastelussa käytetään Theveninin menetelmää, jolloin sähköverkosta muodostetaan yksivaiheinen sijaiskytkentä. Theveninin mallissa komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitettavalla ekvivalenttisella jännitelähteellä (ABB 2000, 197.)

Edellisissä luvuissa on käsitelty tässä työssä tarkasteltavien sähköenergian tuotantolaitteistojen kykyä syöttää oikosulkuvirtaa sekä säädöstaustaa, joka määrää vaatimukset suojauksen toteuttamiseksi. Tässä luvussa tarkastellaan oikosulkuvirran käyttäytymistä ja laskemista. Lisäksi esitellään muuntajien ja kaapeleiden ominaisuudet oikosulkuvirtatarkastelun vaatimusten kannalta.

5.1 Muuntajan oikosulkuimpedanssi

Käytettäessä oikosulkuvirran tarkasteluun Theveninin mallin mukaista yksivaiheista sijaiskytkentää, sähköverkossa olevaa muuntajaa mallinnetaan sarjaan kytketyillä resistanssilla ja reaktanssilla. Muuntajan oikosulkuimpedanssi Z_M , -resistanssi R_M ja -reaktanssi X_M voidaan laskea muuntajan kilpiarvojen avulla yhtälöillä

$$Z_M = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (32)$$

$$R_M = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} \quad (33)$$

$$X_M = \sqrt{Z_M^2 - R_M^2} \quad (34)$$

joissa u_{kr} on oikosulkujännite, U_{rM} on nimellisjännite, S_{rM} on nimellisteho, u_{Rr} on resistiivinen oikosulkujännite, P_{krM} on kuormitushäviöt ja I_{rM} on nimellisvirta (ABB 2000, 200). Yhtälössä 33 esiintyvä resistiivinen oikosulkujännite u_{Rr} voidaan laskea yhtälöllä

$$u_{Rr} = 100 \% \cdot \frac{P_{krM}}{S_{rM}} \quad (35)$$

jossa P_{krM} on muuntaja kuormitushäviöt ja S_{rM} on muuntajan nimellisteho.

Yhtälöt 32–34 antavat vastusarvot muuntajan nimellisjännitteen jänniteportaassa (Lakervi et al. 2009, 27). Tarkasteltaessa jotain muuta jänniteporrasta, kuin mihin oikosulkuimpedanssin Z_T , -resistanssin R_T ja -reaktanssin X_T arvot on laskettu, pitää vastusarvot redusoida vastaamaan kyseistä jänniteporrasta.

Jännitteetön muuntaja ottaa kytketyessään sähköverkkoon induktiivisen kytkentävirtasäyksen. Kytkentävirtasäyäs pitää ottaa huomioon sulakkeiden valinnassa ja releiden asettelussa, jotta vältetään turhilta suojalaitteiden laukeamisilta (ABB 2000, 322).

5.2 Kaapelien impedanssi

Käytettäessä oikosulkuvirran tarkasteluun Theveninin mallin mukaista yksivaiheista sijaiskytkentää, sähköverkossa olevaa kaapeleita ja kiskostoja mallinnetaan sarjaan kytketyillä resistanssilla ja reaktanssilla. Kaapelivalmistajat ilmoittavat arvot teknisissä tiedostoissaan. Johdon resistanssi R_L voidaan myös laskea yhtälöillä

$$R_L = \frac{\rho}{A} \cdot l \quad (36)$$

jossa ρ on johtimen ominaisresistanssi [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$], A on johtimen pinta-ala [mm^2], l johtimen pituus [m]. Kiskostoille voidaan reaktanssin arvona yleensä käyttää 0,15 m Ω /m (ABB 2000, 201).

Jos kaapeleita kytketään kuormitettavuuden parantamiseksi useampia rinnan, voidaan rinnan kytkettyjen kaapelien resistanssi R ratkaista yhtälöstä

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_n} \quad (37)$$

jossa R_1 , R_2 ja R_n ovat yhden kaapelin resistansseja. Vastaavasti voidaan rinnan kytkettyjen kaapeleiden reaktanssi X ratkaista yhtälöstä

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2} + \frac{1}{X_n} \quad (38)$$

jossa X_1 , X_2 ja X_n ovat yhden kaapelin reaktansseja.

5.3 Redusointi

Sähköverkon laskennassa pitää ottaa huomioon, että kaikkia tarkasteltavia suureita on tarkasteltava samassa jänniteportaassa. Muiden jänniteportaiden suuret on redusoitava valittuun, tarkasteltavan jänniteportaan tasoon. Redusoitua suuretta merkitään heittomerkillä. Tehoa ei tarvitse redusoida verkostonlaskennassa vaan se siirtyy muuntajan yli. Jännitteet redusoidaan alemmasta jänniteportaasta ylempään jänniteportaaseen yhtälöllä

$$U' = \left(\frac{U_{N1}}{U_{N2}} \right) \cdot U \quad (39)$$

eli kerrotaan muuntajan muuntosuhteella. Virrat redusoidaan alemmasta jänniteportaasta ylempään jänniteportaaseen yhtälöllä

$$I' = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}} \right) \cdot I \quad (40)$$

eli kertomalla ne muuntosuhteen käänteisarvolla. Impedanssit redusoidaan alemmasta jänniteportaasta ylempään jänniteportaaseen kertomalla ne muuntosuhteen neliöllä.

$$Z' = \left(\frac{U_{N1}}{U_{N2}} \right)^2 \cdot Z \quad (41)$$

5.4 Kolmivaiheinen oikosulku

Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa yleensä sähköverkon mitoituksessa tarvittavan suurimman vikavirran. Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa symmetrisen kuormituksen syöttävään verkkoon päin. Tällöin oikosulkuimpedanssi muodostuu myötäimpedansseista ja kolmevaiheinen oikosulkuvirta I''_{k3} voidaan laskea yhtälöllä (ABB 2000, 198; Lakervi et al. 2009, 30).

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_{tot}} \quad (42)$$

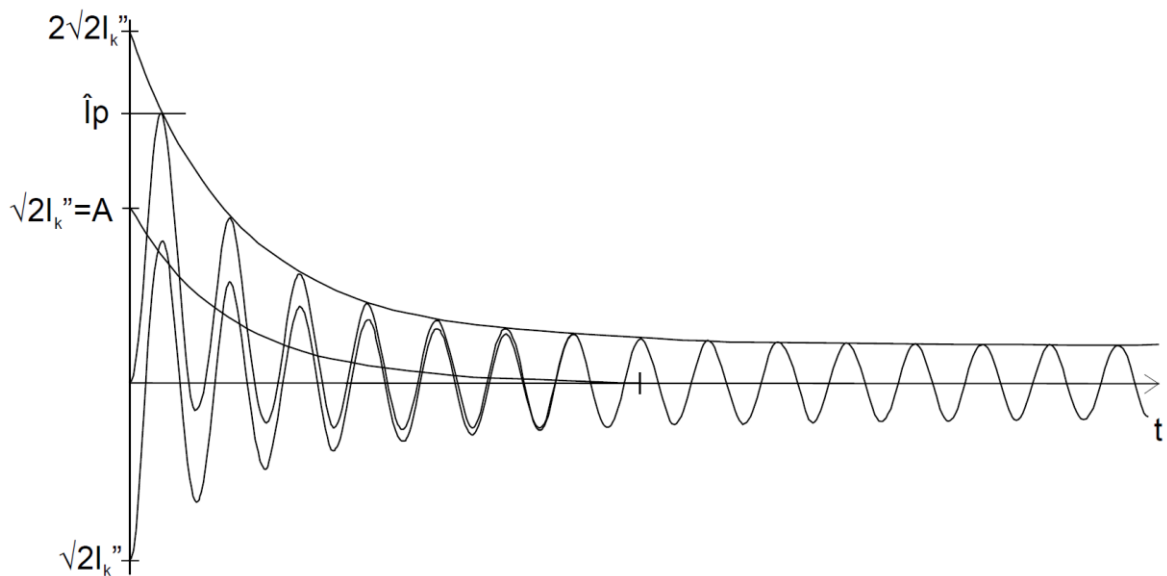
jossa U on pääjännite ja Z_{tot} on myötäkomponenttiverkon impedanssi ja c on taulukon 4 mukainen jännitekerroin, jonka avulla lasketaan kolmivaiheiselle oikosulkuvirralle jännitetasoa vastaavat minimi $I''_{k3_{min}}$ - ja maksimiarvot $I''_{k3_{max}}$.

Vikapaikan impedanssi on kokonaisimpedanssi vikapaikasta syöttävän lähteen suuntaan katsottuna, joka muodostuu jakelumuuntajaa edeltävän verkon impedanssista, muuntajan impedanssista ja johtojen impedansseista. Vikapaikan impedanssi Z_{tot} voidaan laskea yhtälöllä (Lakervi et al. 2009, 30).

$$Z_{tot} = \sqrt{(R_{verkko} + R_M + R_L)^2 + (X_{verkko} + X_M + X_L)^2} \quad (43)$$

jossa R_{verkko} ja X_{verkko} ovat muuntajaa syöttävän verkon oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi tarkasteltavalla jännitetasolla, R_M ja X_M ovat muuntajan oikosulkuresistanssi ja -reaktanssi tarkasteltavalla jännitetasolla ja R_L ja X_L ovat syöttävän lähteen ja vikapaikan välisten johtojen resistanssi ja -reaktanssi tarkasteltavalla jännitetasolla. Varavoimakoneen tahtigeneraattorilla muuntajaa syötettäessä voidaan verkon oikosulkureaktanssina käyttää generaattorin pitkittäistä tahtireaktanssia kuvan 6 mukaisesti, jolloin $X_{verkko} = X_d$. Generaattorin resistanssit oikosulussa oletetaan merkityksettömän pieniksi (Hietalahti 2011, 90).

Kuvassa 26 on esitetty oikosulkuvirran käyrämuoto, joka on vaimeneva. Tasavirtakomponentin A suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä. Sen vaimenemisnopeus riippuu virtapiirin resistanssin ja reaktanssin suhteesta (ABB 2000, 197). Kolmivaiheinen oikosulku aiheuttaa symmetrisen kuormituksen syöttävään verkkoon päin. Kuitenkin vain yhden vaiheen käyrämuoto voi olla kerrallaan symmetrinen, joka nähtiin kuvassa 7.



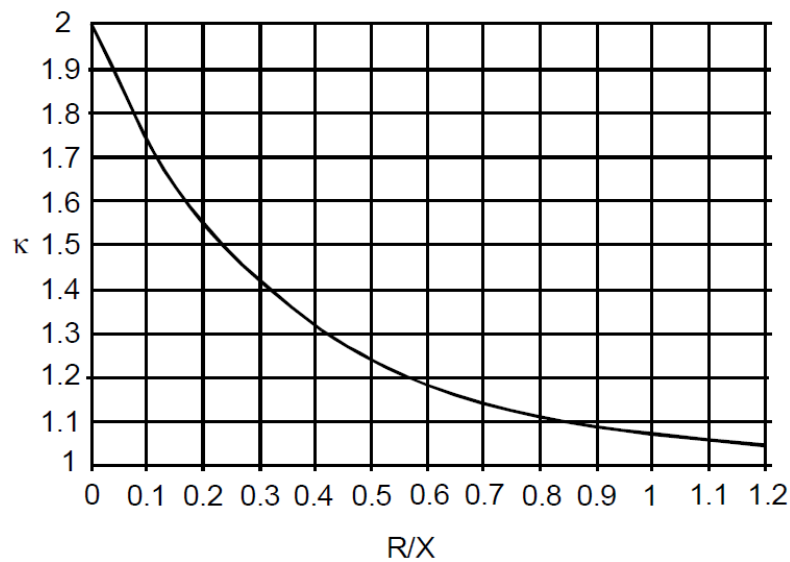
Kuva 26. Oikosulkuvirran käyrämuoto (ABB 2000, 197).

Symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo I''_{k3} vian alkuhetkellä on yhtälön 41 mukainen. Sen käyttäytyminen vastaa luvussa 2 tarkasteltua tahtigeneraattorin virran käyttäytymistä oikosulussa. Kuvasta 26 havaitaan, että vian alkuhetkellä oikosulkuvirran huippuarvo on suurempi kuin I''_{k3} . Oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvoa kutsutaan syäsoikosulkuvirraksi \hat{i}_p , jonka suuruus voi olla keskijänniteverkossa noin 2,5-kertaa I''_{k3} ja pienjänniteverkossa noin 2-kertaa I''_{k3} (ABB 2000, 197). Tarkka arvo voidaan laskea yhtälöllä 44. Sysäsoikosulkuvirran, josta käytetään myös termiä dynaaminen oikosulkuvirta I_{k_dyn} , suuruuteen vaikuttaa myös tasavirtakomponentti. Sysäsoikosulkuvirta eli dynaaminen oikosulkuvirta pitää ottaa huomioon, koska sen voimavaikutukset voivat aiheuttaa mekaanisia vaurioita esimerkiksi keskuksen kiskostoissa. Kuvasta 26 nähdään, että vian jatkuessa reaktanssit kasvavat ja alkuhetken jälkeen virta vaimenee muutostilan kautta jatkuvuustilan oikosulkuvirran arvoon I_k .

Sysäysoikosulkuvirta \hat{i}_p lasketaan yhtälöllä

$$\hat{i}_p = k \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3} \quad (44)$$

jossa I''_{k3} on kolmivaiheinen oikosulkuvirta ja k on sysäyskerroin, joka saadaan kuvasta 27 R/X suhteen funktiona. Keski-jänniteverkossa k on yleensä alle 1,8 ($R/X < 0.1$) ja pienjänniteverkoissa yleensä alle 1,44. (ABB 2000, 204.)



Kuva 27. Sysäyskerroimen riippuvuus oikosulkuvirtapiiristä R/X-suhteesta (ABB 2000, 204).

Kolmivaiheisen oikosulun seurauksena vikapaikan jännite putoaa. Jos kyseessä on vastukseton oikosulku, vikapaikan jännite putoaa arvoon nolla. Tällöin verkon jännite putoaa myös muissa osissa verkkoa, jolloin syntyy ilmiö, jota kutsutaan jännitekuopaksi. Vaikutus ja jännitekuopan syvyys muualla verkossa riippuu etäisyydestä vikapaikkaan. Lähellä sähköasemaa tapahtuvat viat ovat pahimpia ja ne aiheuttavat syvän jännitekuopan, jonka kestää viallisen lähden oikosulkusuojauksen havahtumisajan verran koko sähköaseman alueella. (Lakervi et al. 2009, 31.)

5.5 Kaksivaiheinen oikosulku

Kaksivaiheisen oikosulun tarkastelussa voidaan hyödyntää kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskettua suuruutta. Kahden vaihejohtimen välisessä oikosulussa pääjännite vaikuttaa kaksinkertaiseen impedanssiin. Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} saadaan kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta I''_{k3_min} yhtälöllä

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I''_{k3_min} \quad (45)$$

5.6 Yksivaiheinen oikosulku

Yksivaiheisen oikosulkuvirran arvoa tarvitaan, kun tarkastellaan pienjänniteverkon TN-järjestelmää vikasuojauksen kannalta. Tällöin suojalaitteiden on toimittava vaaditussa ajassa. Vaaditut nopean poiskytketymisen ajat ovat 0,4 s tai 5 s tapauksesta riippuen. Virtapiiriä suojaavan suojalaitteen toimintarajavirta määrää, paljonko oikosulkuvirta vikapaikassa vähintään pitää olla, jotta vaadittu nopea poiskytketyminen toteutuu.

Rakennusten sähköasennuksissa TN-järjestelmässä yksivaiheisen oikosulkuvirran I_{k1} laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä

$$I_{k1} = \frac{c \cdot U_v}{Z_{tot}} \quad (46)$$

jossa U_v on vaihejännite ja c on jännitekerroin taulukosta 4. Z_{tot} on kokonaisimpedanssi vikapaikasta katsottuna, joka muodostuu jakelumuuntajaa edeltävän verkon impedanssista, muuntajan impedanssista ja muuntajan jälkeisten johtimien impedansseista (STUL 2017, 95). Muuntajan jälkeisten johtimien impedanssiin pitää laskea mukaan sekä vaihejohtimen että suoja- tai PEN-johtimen resistanssi ja reaktanssi. Toisin sanoen muuntajan jälkeisten johtimien impedanssiin lasketaan silmukkaimpedanssi vikapaikasta jakelumuuntajan tähtipisteeseen ja takaisin.

Pienjännitteisessä jakeluverkossa yksivaiheisen oikosulkuvirran I_{k1} laskemiseen voidaan käyttää yhtälöä

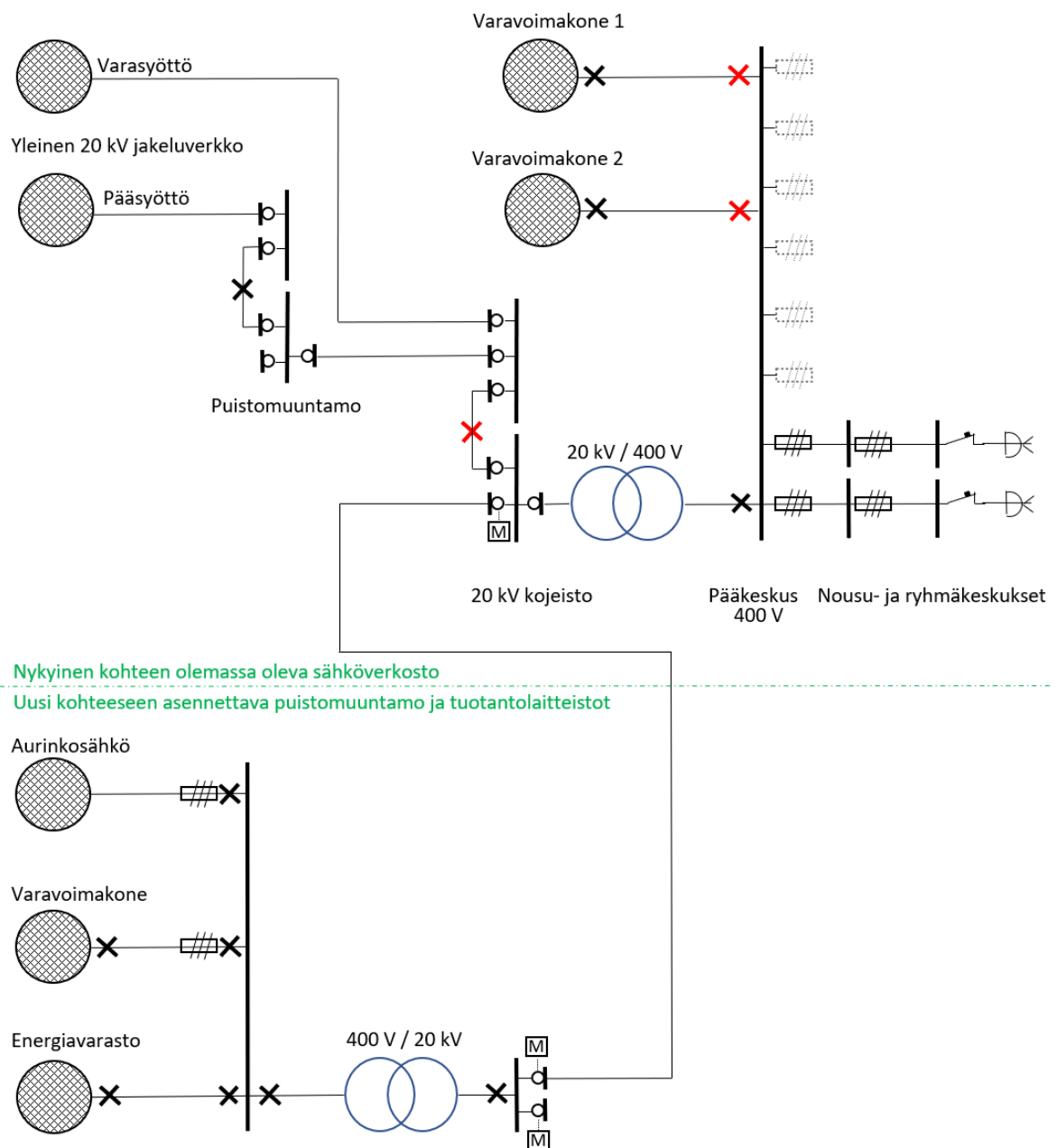
$$I_{k1} = \frac{c \cdot 3 \cdot U_v}{\sqrt{(2R_M + R_{M0} + 3l(R_v + R_0))^2 + (2X_M + X_{M0} + l(2X_v + X_{v0} + 3X_0))^2}} \quad (47)$$

jossa U_v on vaihejännite ja c on jännitekerroin taulukosta 4. Juurilausekkeessa R_M on muuntajan oikosulkuresistanssi, R_{M0} on muuntajan nolaresistanssi, R_v on vaihejohtimen resistanssi [Ω/km], R_0 on nolajohtimen resistanssi [Ω/km], X_M on muuntajan oikosulkureaktanssi, X_{M0} on muuntajan nolareaktanssi, X_v on vaihejohtimen myötäreaktanssi [Ω/km], X_{v0} on vaihejohtimen nolareaktanssi [Ω/km], X_0 on nolajohtimen reaktanssi [Ω/km] ja l on johdon pituus [km]. (Anjala 2008, 25.)

Yhtälöt 46 ja 47 ovat yksinkertaistettuja yhtälöitä. Ne perustuvat symmetristen komponenttiverkkojen sijaiskytkentään, vaikka yksivaiheinen oikosulku on epäsymmetrinen vika. Symmetrisiä komponentteja voidaan kuitenkin käyttää, kun eri vaiheiden impedanssit ovat yhtä suuret eli verkko itsessään on symmetrinen. Yhtälössä 47 ei ole huomioitu keskijänniteverkon impedanssin vaikutusta.

6 Kohteen ylivirta- ja vikasuojauksen tarkastelu

Aikaisemmissa luvuissa tarkasteltiin tuotantolaitteistojen ominaisuuksia, joiden perusteella erääseen kohteeseen on päätetty hankkia tuotantolaitteistoja. Tuotantolaitteistot liitetään kohteen vanhaan olemassa olevaan sähköverkkoon uuden puistomuuntamon kautta (kuva 28).



Kuva 28. Kohteen sähköjakeluverkon periaatekaavio.

Puistomuuntamoon liitetään aurinkosähkövoimalaitos, varavoimakone ja energiavarasto. Puistomuuntamolta syötetään sähkölaitteistoa saarekkeessa, kun yleinen sähköverkko on katkaistu ja varavoimakoneet 1 ja 2 eivät ole käytettävissä. Tämä tilanne on havainnollistettu kuvassa 28, jossa punaisella merkityt katkaisijat on ohjattu auki. Katkaisijoiden ja ohjattavien kuormaerottimien ohjaukset on liitetty verkostoautomaatiojärjestelmään.

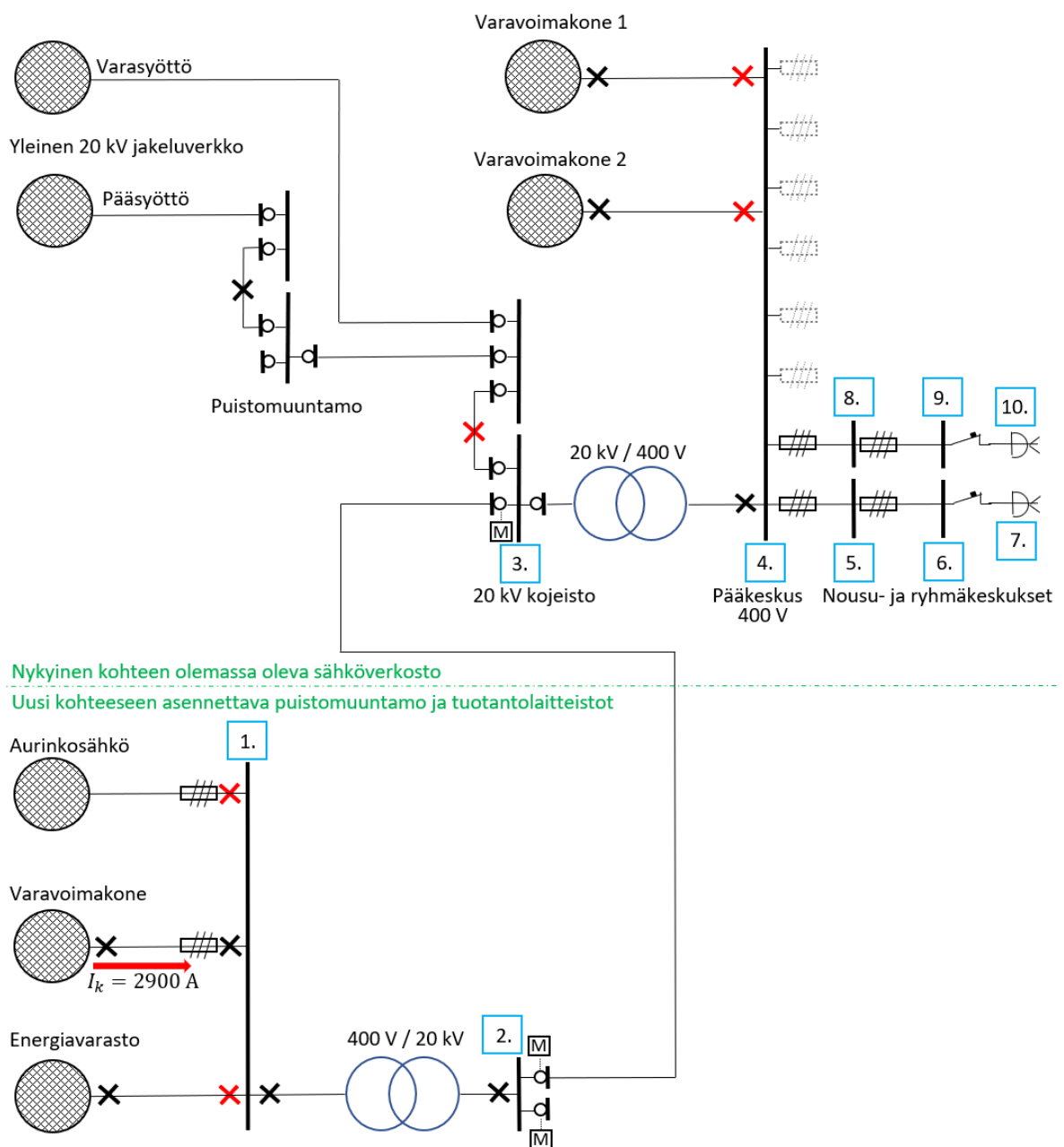
Kohteen sähkönjakelun periaatekuvasta voidaan havaita, että sähkönjakeluverkon katkaisijoiden ohjauksen avulla on mahdollista toteuttaa useita eri kytkentätilanteita. Kun kohteen sähkönjakeluverkkoon lisätään uusia tuotantolaitteistoja pitää kaikki kytkentätilanteet ja syöttösuunnat tarkastella, jotta voidaan varmistua sähköverkon suojausten toimivuudesta. Sähkölaki ja standardit antavat vaatimukset, joiden mukaan sähkölaitteiston suojaus tulee toteuttaa.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on tarkastella kohteen ylivirta- ja vikasuojauksen toteutuminen uusilla tuotantolaitteistoilla. Nykyinen aikaisemmin rakennettu sähkölaitteiston osa on aikanaan suunniteltu ja tarkastusten perusteella todettu vaatimusten mukaiseksi. Kuitenkin vanha olemassa oleva sähköverkosto ja uudet tuotantolaitteistot muodostavat kokonaisuuden, joten myös vanhaa jakeluverkon osaa pitää joiltain osin tarkastella. Tätä varten vanhan olemassa olevan pääkeskuksen jälkeen syöttösuunnassa olevasta sähkölaitteiston osasta valitaan kaksi suojauksen kannalta vaativinta nousujohdon sulakelähtöä. Edelleen molempien nousukeskusten syöttämistä ryhmäkeskuksista valitaan suojauksen kannalta vaativin. Molemmista valituista ryhmäkeskuksista valitaan pisin pistorasiaryhmää syöttävä ryhmäjohto tarkasteluun.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan neljä verkostoautomaation avulla ohjattavaa kytkentätilannetta. Jokaisessa kytkentätilanteessa lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta kymmenessä eri tarkastelupisteessä. Ensimmäisessä kytkentätilanteessa sähköenergiaa syötetään uudella puistomuuntamoon liitetyllä varavoimakoneella. Sähkölaitteisto on tällöin erotettu yleisestä sähköverkosta saarekkeeksi. Toisessa kytkentätilanteessa yleinen sähköverkko huolehtii sähköenergia syötöstä ja uudet tuotantolaitteistot on erotettu irti sähköverkosta. Kolmannessa kytkentätilanteessa yleinen sähköverkko huolehtii sähköenergian syötöstä rinnallaan aurinkosähkövoimala ja energiavarasto. Neljännessä kytkentätilanteessa Varavoimakoneet 1 ja 2 huolehtivat sähköenergian syötöstä rinnallaan aurinkosähkövoimala ja energiavarasto. Tulokset taulukoidaan, joka helpottaa suojauksen toimivuuden analysointia.

6.1 1. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu

Ensimmäisessä kytkentätilanteessa yleisestä sähköverkosta erotettua saarekkeen sähkön tuotannosta huolehtii diesel-varavoimakone yksinään (kuva 29). Tämä tilanne mallintaa hyvin alkutilannetta, kun yleisessä sähköverkossa on katko. Yleisen sähköverkon katketessa seuraa puolen minuutin viive, jonka jälkeen dieselgeneraattori käynnistyy. Tällöin verkostoautoomaatio on tehnyt tarkoituksen mukaiset katkaisijoiden ohjaukset saarekekäytön vaatimalla tavalla. Kuormat lisätään portaittain generaattorin syöttämään saarekkeeseen.

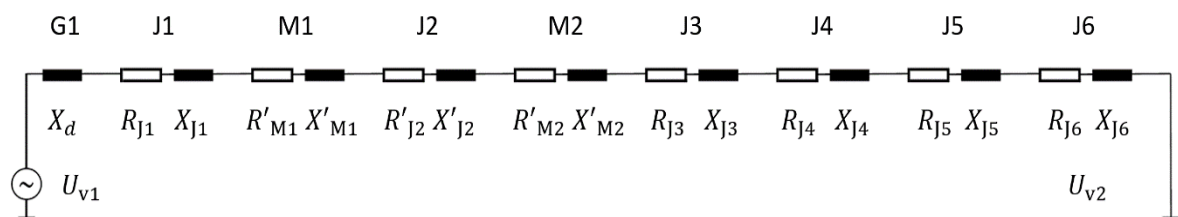


Kuva 29. Kytkentätilanne 1. ja tarkastelupisteet 1-10.

Ensimmäisessä kytkentätilanteessa aurinkosähkövoimala ja energiavarasto eivät vielä ole kytkeytyneet diesel-varavoimakoneen rinnalle, joten niitä ohjaavat katkaisijat ovat auki. Auki olevat katkaisijat on havainnollistettu kuvassa 29 punaisella värillä. Myös sähköenergian syöttö uudelta varavoimakoneelta on merkitty kuvaan punaisella nuolella. Kohteeseen valittu varavoimakoneen generaattori kykenee vikatilanteessa syöttämään 2900 A jatkuvuustilan oikosulkuvirran.

KytKentättilanne on tämän kohteen sähköverkon oikosulku- ja vikasuojauksen kannalta vaativin, koska oikosulkuvirrat ovat kohteen kytkentätilanteista pienimmät. KytKentättilanteessa lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta kymmenessä eri tarkastelupisteessä. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 29. Tarkastelupisteet on valittu niin, että tulosten perusteella voidaan analysoida kohteen ylivirta- ja vikasuojauksen toteutumista saarekekäytössä, kun sähkön tuotannosta huolehtii uusi diesel-varavoimakone yksinään.

Sähkönjakeluverkon saarekekäyttötilannetta kytkentätilanteessa mallinnetaan yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jota käytetään oikosulkuvirtojen tarkasteluun. Mallissa komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla. Kuvan 30 sijaiskytkennässä on kytkentätilanne, jossa dieselgeneraattori syöttää saarekettä yksinään.



Kuva 30. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan dieselgeneraattorin syöttämää saarekekäyttöä.

Varavoimakoneen generaattorin valmistajan tekninen tiedosto on esitetty liitteessä 1. Valmistajan tiedoista saadaan tahtigeneraattorin jatkuvuustilan oikosulkuvirta I_k , joka on 2900 A (liite 1, 7). Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön 4, jolloin saadaan tahtigeneraattorin reaktanssi X_d oikosulun jatkuvuustilassa.

$$X_d = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2\,900 \text{ A}} = 0,0796 \, \Omega$$

Puistomuuntamon muuntajan oikosulkuimpedanssi Z_{M1} , -resistanssi R_{M1} ja -reaktanssi X_{M1} voidaan laskea muuntajan kilpiarvojen avulla yhtälöillä 32, 33, 34 ja 35.

$$u_{Rr} = 100 \% \cdot \frac{P_{krM}}{S_{rM}} = 100 \% \cdot \frac{10\,200 \text{ W}}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 1,02 \%$$

$$Z_{M1} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{5,5 \%}{100 \%} \cdot \frac{(20\,500 \text{ V})^2}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 23,114 \, \Omega$$

$$R_{M1} = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1,02 \%}{100 \%} \cdot \frac{(20\,500 \text{ V})^2}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 4,287 \, \Omega$$

$$X_{M1} = \sqrt{Z_{M1}^2 - R_{M1}^2} = \sqrt{(23,1138 \, \Omega)^2 - (4,2866 \, \Omega)^2} = 22,713 \, \Omega$$

Oikosulkuresistanssi R_{M1} ja -reaktanssi X_{M1} pitää redusoida 400 V jänniteportaaseen yhtälön 38 avulla. Sulkulausekkeessa oleva muuntosuhde pitää kääntää, koska mennään alempaan jänniteportaaseen.

$$R'_{M1} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot R_{M1} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 4,2866 \, \Omega = 1,715 \text{ m}\Omega$$

$$X'_{M1} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot X_{M1} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 22,7128 \, \Omega = 9,085 \text{ m}\Omega$$

Vanhan olemassa olevan osan muuntajan oikosulkuimpedanssi Z_{M2} , -resistanssi R_{M2} ja -reaktanssi X_{M2} voidaan myös laskea muuntajan kilpiarvojen avulla yhtälöillä 32, 33, 34 ja 35.

$$u_{Rr} = 100 \% \cdot \frac{P_{krM}}{S_{rM}} = 100 \% \cdot \frac{8\,211 \text{ W}}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 0,82 \%$$

$$Z_{M2} = \frac{u_{kr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{5,5 \%}{100 \%} \cdot \frac{(21\,000 \text{ V})^2}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 24,255 \Omega$$

$$R_{M2} = \frac{u_{Rr}}{100 \%} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1,02 \%}{100 \%} \cdot \frac{(21\,000 \text{ V})^2}{1\,000\,000 \text{ VA}} = 3,621 \Omega$$

$$X_{M2} = \sqrt{Z_{M1}^2 - R_{M1}^2} = \sqrt{(24,2550 \Omega)^2 - (3,6211 \Omega)^2} = 23,983 \Omega$$

Oikosulkuresistanssi R_{M2} ja -reaktanssi X_{M2} pitää redusoida 400 V jänniteportaaseen yhtälön 38 avulla. Sulkulausekkeessa oleva muuntosuhde pitää kääntää, koska mennään alempaan jänniteportaaseen.

$$R'_{M2} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot R_{M2} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 3,6211 \Omega = 1,448 \text{ m}\Omega$$

$$X'_{M2} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot X_{M2} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 23,9832 \Omega = 9,593 \text{ m}\Omega$$

Kaapeleiden J1-J6 tyypit, pituudet, resistanssit ja reaktanssit kerätään taulukkoon 10. Keski-jännitekaapelin J2 arvot pitää redusoida 400 V jänniteportaaseen yhtälön 38 avulla. Kaapelin vastusarvot saadaan valmistajalta (Prysmian 2018, 2). Sulkulausekkeessa oleva muuntosuhde pitää kääntää, koska mennään alempaan jänniteportaaseen.

$$R'_{J2} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot R_{J2} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 0,410 \Omega/\text{km} = 0,164 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$X'_{J2} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot X_{J2} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 0,1257 \Omega/\text{km} = 0,050 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

Rinnan kytkettyjen J1 kaapelien resistanssit ja reaktanssit ratkaistaan yhtälöillä 36 ja 37.

Kaapelin vastusarvot ovat julkaisun D1-2017 taulukosta 41.6. (STUL 2017, 96).

$$\frac{1}{R_{J1_300\text{ Al}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\Rightarrow R_{J1_300\text{ Al}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,133\ \Omega/\text{km} \cdot 0,133\ \Omega/\text{km}}{0,133\ \Omega/\text{km} + 0,133\ \Omega/\text{km}} = 0,067\ \Omega/\text{km}$$

$$\frac{1}{X_{J1_300\text{ Al}}} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$$

$$\Rightarrow X_{J1_300\text{ Al}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,079\ \Omega/\text{km} \cdot 0,079\ \Omega/\text{km}}{0,079\ \Omega/\text{km} + 0,079\ \Omega/\text{km}} = 0,040\ \Omega/\text{km}$$

$$R_{J1_88\text{ Cu}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\Rightarrow R_{J1_88\text{ Cu}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,244\ \Omega/\text{km} \cdot 0,244\ \Omega/\text{km}}{0,244\ \Omega/\text{km} + 0,244\ \Omega/\text{km}} = 0,122\ \Omega/\text{km}$$

$$X_{J1_88\text{ Cu}} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$$

$$\Rightarrow X_{J1_88\text{ Cu}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,082\ \Omega/\text{km} \cdot 0,082\ \Omega/\text{km}}{0,082\ \Omega/\text{km} + 0,082\ \Omega/\text{km}} = 0,041\ \Omega/\text{km}$$

Rinnan kytkettyjen J4 kaapelien resistanssit ja reaktanssit ratkaistaan yhtälöillä 36 ja 37.

Kaapelin vastusarvot ovat julkaisun D1-2017 taulukosta 41.6. (STUL 2017, 96).

$$\frac{1}{R_{J4_185\text{ Al}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\Rightarrow R_{J4_185\text{ Al}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,207 \Omega/\text{km} \cdot 0,207 \Omega/\text{km}}{0,207 \Omega/\text{km} + 0,207 \Omega/\text{km}} = 0,104 \Omega/\text{km}$$

$$\frac{1}{X_{J4_185\text{ Al}}} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$$

$$\Rightarrow X_{J4_185\text{ Al}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,080 \Omega/\text{km} \cdot 0,080 \Omega/\text{km}}{0,080 \Omega/\text{km} + 0,080 \Omega/\text{km}} = 0,040 \Omega/\text{km}$$

$$R_{J4_57\text{ Cu}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\Rightarrow R_{J4_57\text{ Cu}} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{0,482 \Omega/\text{km} \cdot 0,482 \Omega/\text{km}}{0,482 \Omega/\text{km} + 0,482 \Omega/\text{km}} = 0,241 \Omega/\text{km}$$

$$X_{J4_57\text{ Cu}} = \frac{1}{X_1} + \frac{1}{X_2}$$

$$\Rightarrow X_{J4_57\text{ Cu}} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2} = \frac{0,083 \Omega/\text{km} \cdot 0,083 \Omega/\text{km}}{0,083 \Omega/\text{km} + 0,083 \Omega/\text{km}} = 0,042 \Omega/\text{km}$$

Pääkeskuksen ja jakelumuuntajan välissä on kiskosilta, jonka nimellisvirta on 1600 A. Kiskosilta on erään valmistajan tyyppihyväksyty ratkaisu, joka muodostuu alumiinisista lattakiskoista, jotka on asennettu kotelon sisälle.

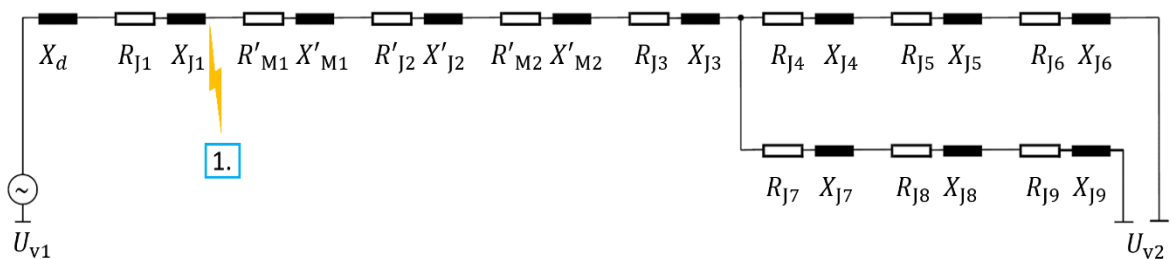
Alumiinisen lattakiskon mitat ovat leveys 120 mm ja korkeus 15 mm, joten poikkipinta-ala on 1800 mm². Kiskon resistanssi saadaan kaavalla 36. Alumiinin ominaisresistanssin ρ_{Al} arvona käytetään 0,0294 $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Reaktanssin arvona käytetään 0,15 m Ω/m (ABB 2000, 201).

$$R_{J3} = \frac{\rho_{Al}}{A} \cdot l = \frac{0,0294 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}}{1800 \text{ mm}^2} \cdot 1 \text{ m} = 16,340 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

Taulukko 10. Kaapelit J1-J6. Kaapelien vastusarvot saadaan valmistajalta ja julkaisun D1-2017 taulukosta 41.6. (Prysmian 2018, 2; STUL 2017, 96).

	Tyyppi	Resistanssi mΩ/km	Reaktanssi mΩ/km	Pituus km	Resistanssi mΩ	Reaktanssi mΩ
J1.1	2 kpl AMCMK 4x300+88	66,50	39,50	0,03	1,995	1,185
J1.2	2 kpl PE-johdin 88 mm ²	122,00	41,00	0,03	3,660	1,230
J2	AHXAMK-W 3x95+35	0,164	0,050	1,00	0,164	0,0503
J3	Kiskosilta, 120x15 mm	16,34	0,15	0,005	0,0817	0,0008
J4.1	2 kpl AMCMK 4x185+57	103,50	40,00	0,08	8,280	3,200
J4.2	PE-johdin 57 mm ²	241,00	41,50	0,08	19,280	3,320
J5.1	AMCMK 4x70+21	551,00	82,00	0,01	5,510	0,820
J5.2	PE-johdin 21 mm ²	898,00	86,00	0,01	8,980	0,860
J6	MMJ 3x2,5	8 770	110,00	0,05	438,5	5,500
J7.1	AMCMK 4x240+72	16,20	79,00	0,10	1,620	7,900
J7.2	PE-johdin 72 mm ²	336,00	82,00	0,10	33,600	8,200
J8.1	AMCMK 4x70+21	551,00	82,00	0,045	24,795	3,690
J8.2	PE-johdin 21 mm ²	898,00	86,00	0,045	40,410	3,870
J9	MMJ 3x2,5	8 770	110,00	0,05	438,5	5,500

Lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 tapahtuvassa oikosulussa, jota havainnollistetaan kuvassa 31.



Kuva 31. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteessä 1 tapahtuva oikosulku.

Oikosulkuimpedanssi tarkastelupisteessä 1 eli vikapaikasta syöttävään verkkoon päin näkyvä impedanssi Z_{tot} voidaan laskea yhtälöllä 43.

$$Z_{tot} = \sqrt{(R_{J1})^2 + (X_d + X_{J1})^2}$$

$$Z_{tot} = \sqrt{(1,9950 \text{ m}\Omega)^2 + (79,6350 \text{ m}\Omega + 1,1850 \text{ m}\Omega)^2} = 80,84 \text{ m}\Omega$$

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 lasketaan yhtälöllä 41. Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön.

$$I_{k3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{tot}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 80,84 \text{ m}\Omega} = 2\,856,61 \text{ A}$$

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran maksimi- ja minimiarvot lasketaan taulukon 4 jännitekerrointen avulla.

$$I_{k3_max} = c \cdot I_{k3} = 1,0 \cdot 2\,856,61 \text{ A} = 2\,856,61 \text{ A}$$

$$I_{k3_min} = c \cdot I_{k3} = 0,95 \cdot 2\,856,61 \text{ A} = 2\,713,78 \text{ A}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} tarkastelupisteessä 1 saadaan kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta I_{k3_min} yhtälöllä 44. Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön.

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 2\,713,78 \text{ A} = 2\,350,20 \text{ A}$$

Yksivaiheinen oikosulkuimpedanssi tarkastelupisteessä 1 eli vikapaikasta syöttävään verkkoon päin näkyvä impedanssi Z_{tot} voidaan laskea yhtälöllä 43.

$$Z_{tot} = \sqrt{(R_{J1.1} + R_{J1.2})^2 + (X_d + X_{J1.1} + X_{J1.2})^2}$$

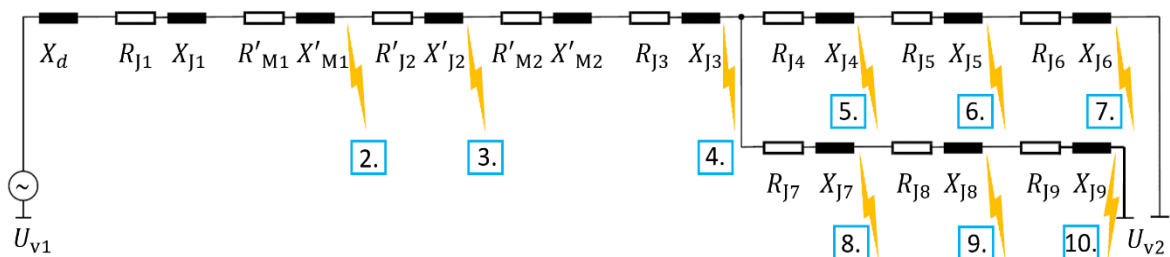
$$Z_{tot} = \sqrt{(1,995 \text{ m}\Omega + 3,660 \text{ m}\Omega)^2 + (79,635 \text{ m}\Omega + 1,185 \text{ m}\Omega + 1,230 \text{ m}\Omega)^2}$$

$$Z_{tot} = 82,08 \text{ m}\Omega$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 lasketaan yhtälöllä 45. Sijoitetaan luku-
arvot yhtälöön.

$$I_{k1} = \frac{c \cdot U_v}{Z_{tot}} = \frac{0,95 \cdot 230 \text{ V}}{82,08 \text{ m}\Omega} = 2\,661,99 \text{ A}$$

Vastaavasti kuin tarkastelupisteen 1 osalta, lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oiko-
sulkuvirta tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuvissa oikosulussa. Tarkastelupisteet on merkitty
kuvaan 32.



Kuva 32. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuva oikosulku.

Lukuarvojen sijoitus kaavoihin suoritetaan erillisessä tiedostossa. Tulokset koostetaan tau-
lukkoon 11. Taulukkoon on merkitty myös oikosulkuvirran arvo, joka vähintään vaaditaan,
että vikasuojaus toteutuu vaatimusten mukaisessa toiminta-ajassa. Oikosulkusuojaus toteu-
tuu, jos pienin kolme-, kaksi- tai yksivaiheinen oikosulkuvirran arvoista ylittää suojalaitteen
toimintarajavirran.

Kahvasulakkeiden osalta vaaditut oikosulkuvirran arvot saadaan valmistajalta ja johdonsuo-
jakatkaisijan osalta arvo saadaan julkaisun D1-2017 taulukosta 41.4a (ABB 2001, 9; STUL

2017, 93). Vaaditut toiminta-ajat vikasuojauksen vaatimuksen toteutumiselle ovat jakeluverkolle ja keskuksille 5 sekuntia ja pistorasiaryhmälle 0,4 sekuntia.

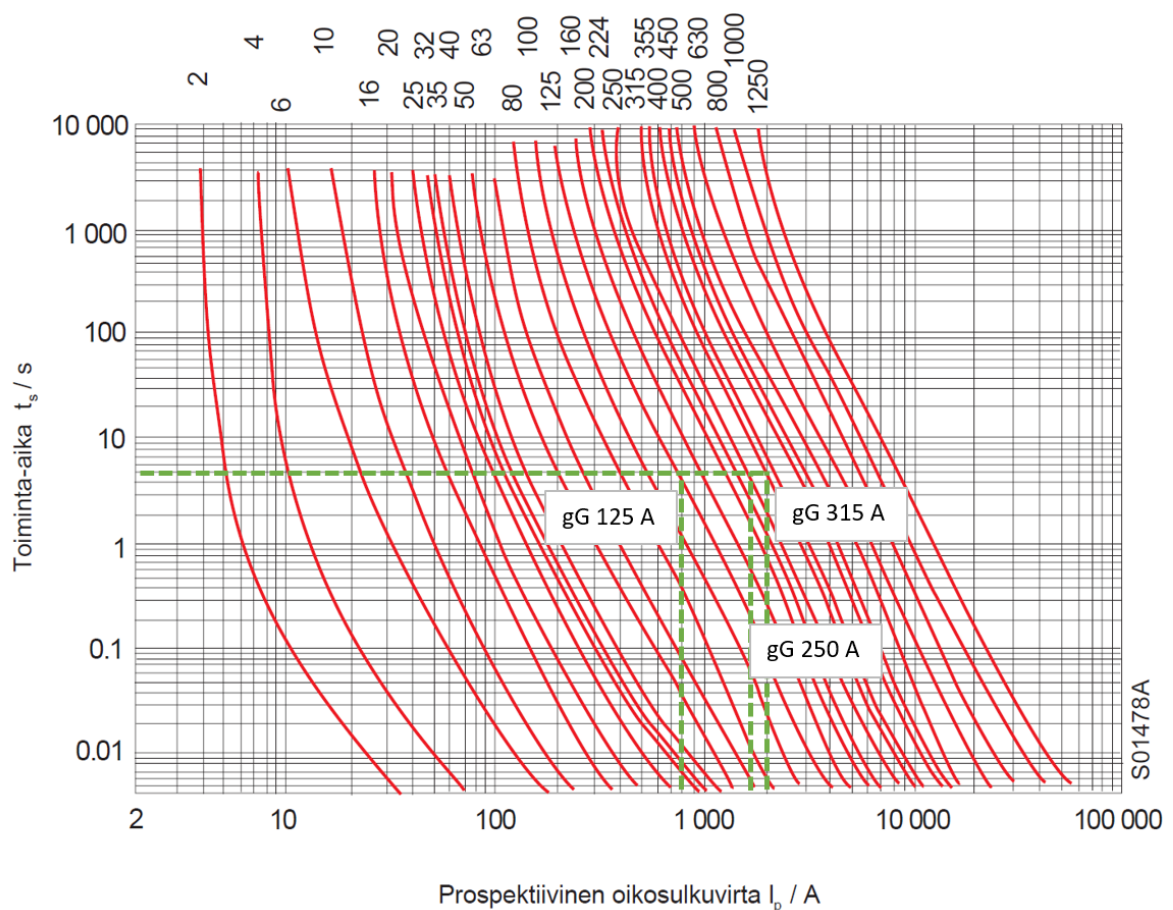
Vaadittua oikosulkuvirran arvoa verrataan laskettuun taulukossa olevaan yksivaiheisen oikosulkuvirran arvoon. Jos laskettu virran arvo on suurempi kuin vaadittu arvo eli vikasuojaus toteutuu, se merkitään taulukkoon. Jos oikosulkusuojaus toteutuu eli kolme-, kaksi- tai yksivaiheinen oikosulkuvirran arvoista pienin ylittää suojalaitteen toimintarajavirran myös se merkitään taulukkoon. Katkaisijoiden toimintavirta-arvot taulukossa ovat suosituksia, jotka tulee ottaa kohteessa käyttöön.

Taulukko 11. Kooste ensimmäisen kytkentätilanteen kolme-, kaksi- ja yksivaiheisten oikosulkuvirtojen tarkastelusta saarekekäytössä. Generaattori syöttää jatkuvuustilan oikosulkuvirtaa.

Tarkastelupiste	Oikosulkuvirta, 3-vaihe [A]	Oikosulkuvirta, 2-vaihe [A]	Oikosulkuvirta, 1-vaihe [A]	Suojalaite	Vaadittu virta [A]	Oikosulku- ja vikasuojaus
Generaattori	2 900	2 386	2 744	PJ-katkaisija	2 300	ok/ok
1.	2 857	2 350	2 662	PJ-katkaisija	2 200	ok/ok
2.	56,5	44,5		KJ-katkaisija	38	ok/ok
3.	56,4	44,4				
4.	2 316	1 906	2 192	PJ-katkaisija	1 900	ok/ok
5.	2 228	1 833	1 967	gG 315	2 000	ei/ei
6.	2 192	1 804	1 871	gG 125	800	ok/ok
7.	490,8	403,8	234,4	C 16	160	ok/ok
8.	2 145	1 765	1 782	gG 250	1700	ok/ok
9.	1 998	1 644	1 345	gG 125	800	ok/ok
10.	476,6	392,1	220,3	C 16	160	ok/ok

Taulukossa 11 tarkastelupisteet 2 ja 3 ovat keskijänniteverkossa. Niiden virta-arvot ovat 20 kV jännitetasossa. Muut virta-arvot ovat 400 V:n jännitetasossa. Taulukon 11 tuloksista havaitaan, että generaattorin syöttämä oikosulkuvirta ei riitä polttomaan sulaketta vaaditussa ajassa kohteen vanhan osan pääkeskuksen 315 A gG-kahvasulakkeella suojatun nousukaapelin päässä tapahtuvassa viassa. Pääkeskuksen 250 A gG-kahvasulakkeella suojatun nousukaapelin päässä tapahtuvassa viassa oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti. Myös nousu- ja ryhmäkeskustasolla oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti.

Katkaisijoilla tehty oikosulku- ja vikasuojaus toimii selektiivisesti. Kuitenkin kokonaisuutena oikosulku- ja vikasuojausta ei saada toimimaan selektiivisesti, koska oikosulkuvirta on liian pieni. Kahvasulakkeiden toiminta-ajat eri oikosulkuvirran arvoilla on esitetty kuvassa 33.



Kuva 33. Kahvasulakkeiden toiminta-ajat, gG- sulakkeet (ABB 2001, 9)

Kuvasta havaitaan, että nopeampaan sulakkeen toimimiseen tarvitaan suurempi oikosulkuvirta. Kuvaan on merkitty 125 A, 250 A ja 315 A kahvasulakkeiden toimintarajavirrat 5 sekuntia oikosulun alkuhetkestä.

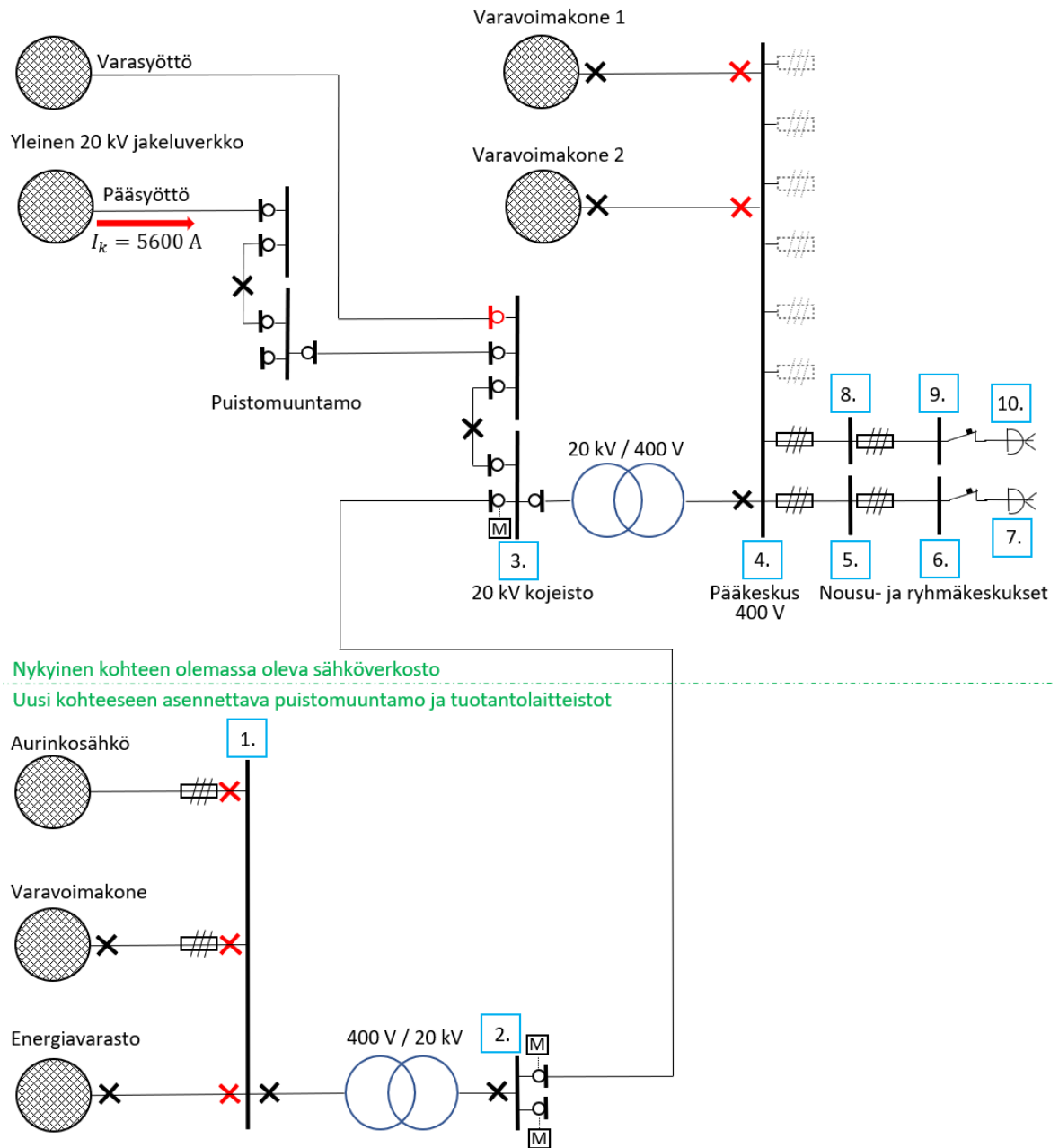
6.2 2. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu

Toisessa kytkentätilanteessa yleinen sähköverkko huolehtii sähköenergia syötöstä ja uudet tuotantolaitteistot on erotettu irti sähköverkosta. Tämä kytkentätilanne mallintaa normaalia tilannetta ennen uusien tuotantolaitteistojen käyttöönottoa. Kuitenkin uusi puistomuuntamo tulee tarkasteluun mukaan. Tämä kytkentätilanne antaa referenssitietoa opinnäytetyön tavoitteena olevaan ylivirta- ja vikasuojauksen toteutumisen tarkasteluun uusilla tuotantolaitteistoilla.

Kuvasta 34 nähdään, että verkostoautomaatiolla on tehty käyttötilannetta vastaavat katkaisijoiden ohjaukset. Uusi varavoimakone, aurinkosähkövoimala ja energiavarasto eivät ole kytkeytyneet yleisen sähköverkon rinnalle, joten niitä ohjaavat katkaisijat ovat auki. Auki olevat katkaisijat on havainnollistettu kuvassa punaisella värillä. Myös sähköenergian syöttö yleisestä jakeluverkosta on merkitty kuvaan punaisella nuolella.

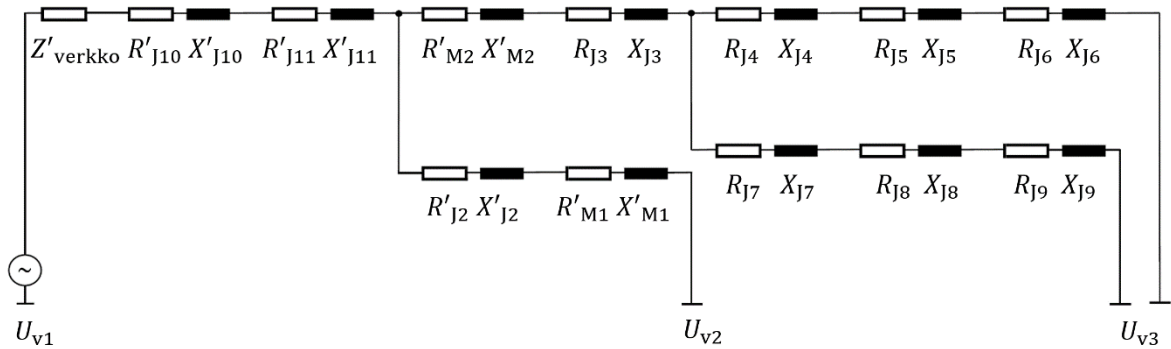
Jakeluverkko kykenee vikatilanteessa syöttämään 5,6 kA oikosulkuvirran liityntäpisteessä 20 kV jännitetasossa. Oikosulkuvirran arvo on huomattavasti suurempi kuin ensimmäisessä kytkentätilanteessa, kun yleisestä sähköverkosta erotun saarekkeen sähkön tuotannosta huolehti diesel-varavoimakone yksinään. Varavoimakoneen generaattori kykeni syöttämään 2900 A virran 400 V jännitetasossa.

Kuten ensimmäisessä kytkentätilanteessa, myös tässä tarkasteltavassa kytkentätilanteessa lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta kymmenessä eri tarkastelupisteessä. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 34. Tarkastelupisteet ovat samat kuin aikaisemmassa edellisessä luvussa tarkastelussa kytkentätilanteessa.



Kuva 34. Kytchentilanne 2. ja tarkastelupisteet 1–10.

Sähkönjakeluverkon käyttötilanne, kun yleinen sähkönjakeluverkko syöttää kohdetta voidaan mallintaa yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jota käytetään oikosulkuvirtojen tarkasteluun. Mallissa komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla. Kuvan 35 sijaiskytkennässä on tilanne, jossa yleinen sähköverkko syöttää kohdetta yksinään eli varatuotantolaitteistot eivät ole kytkettyinä jakeluverkkoon. Uutta puistomuuntamoja mallintava haara on kuvassa keskellä.



Kuva 35. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan yleisestä sähköverkosta syötettyä kohteen sähkölaitteistoa.

Sähköenergian syöttö saadaan tässä kytkentätilanteessa yleisestä 20 kV jakeluverkosta. Jakeluverkko syöttää vikatilanteessa oikosulkuvirtaa I_k , joka on 5,6 kA.

Koska oikosulkuvirtojen tarkastelu tehdään 400 V jännitetasossa pitää virta-arvo redusoida yhtälöllä 40. Sulkulausekkeessa oleva muuntosuhde pitää kääntää, koska mennään alempaan jänniteportaaseen.

$$I' = \left(\frac{U_{N1}}{U_{N2}} \right) \cdot I = \left(\frac{20\,000\text{ V}}{400\text{ V}} \right) \cdot 5\,600\text{ A} = 280\text{ kA}$$

Yleisen 20 kV jakeluverkon oikosulkuimpedanssin resistiivisen ja reaktiivisen komponentin osuus ei ole käytettävissä. Tarkastelussa oletetaan R/X -suhteen arvoksi 0,038, joka vastaa hyvin tässä työssä tarkasteltavan kohteen tilannetta, jossa päämuuntaja on lähellä liityntäpistettä (ABB 2000, 208-209). Yleisen jakeluverkon oikosulkuimpedanssi Z'_{verk} ratkaistaan yhtälöllä 4.

$$Z'_{verk} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I'_k} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 280\,000\text{ A}} = 0,825\text{ m}\Omega$$

Yleisen jakeluverkon oikosulkuimpedanssin Z'_{verk} ja sen resistiivisen komponentin R'_{verk} välinen kulma φ saadaan R/X -suhteen avulla. Ratkaistaan jakeluverkon oikosulkuimpedanssin resistiivinen komponentti R'_{verk} ja reaktiivinen komponentti X'_{verk} .

$$\cot \varphi = \frac{R}{X} = 0,038 \Rightarrow \varphi = 87,82^\circ$$

$$R'_{verk} = \cos \varphi \cdot Z'_{verk} = \cos(87,82^\circ) \cdot 0,825 \text{ m}\Omega = 0,031 \text{ m}\Omega$$

$$X'_{verk} = \sqrt{Z'_{verk}{}^2 - R'_{verk}{}^2} = \sqrt{(0,825 \text{ m}\Omega)^2 - (0,031 \text{ m}\Omega)^2} = 0,824 \text{ m}\Omega$$

Muuntajien resistanssit ja reaktanssit saadaan luvun 6.1 tarkastelusta. Kaapeleiden J1-J9 tiedot saadaan luvun 6.1 taulukosta 10. Uusina tässä tarkastelussa tulevien kaapeleiden J10 ja J11 tyypit, pituudet, resistanssit ja reaktanssit kerätään taulukkoon 12. Keskijännitekaapelin AHXAMK-W 3x120+35 arvot pitää redusoida 400 V jänniteportaaseen yhtälön 38 avulla. Kaapelin vastusarvot saadaan valmistajalta (Prysmian 2018, 2). Sulkulausekkeessa oleva muuntosuhde pitää kääntää, koska mennään alempaan jänniteportaaseen.

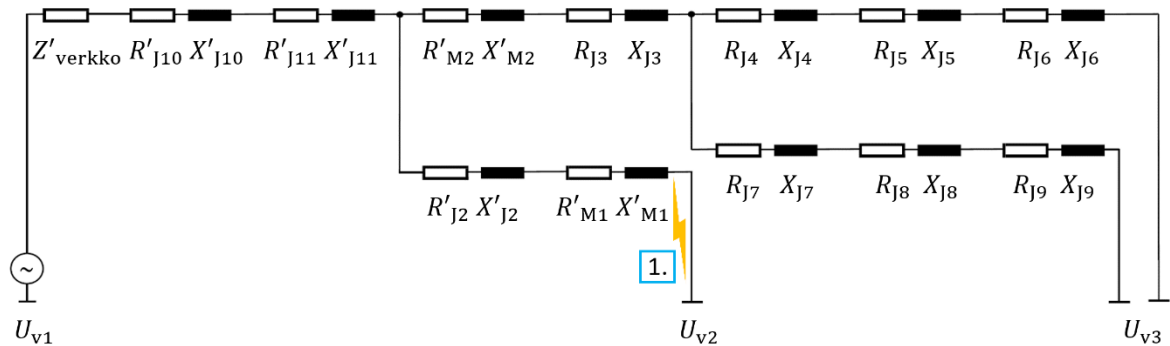
$$R'_{J10} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot R_{J2} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 0,330 \text{ }\Omega/\text{km} = 0,132 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

$$X'_{J10} = \left(\frac{U_{N2}}{U_{N1}}\right)^2 \cdot X_{J2} = \left(\frac{400 \text{ V}}{20\,000 \text{ V}}\right)^2 \cdot 0,1225 \text{ }\Omega/\text{km} = 0,049 \text{ m}\Omega/\text{km}$$

Taulukko 12. Kaapelit J10 ja J11. Kaapelien vastusarvot saadaan valmistajalta (Prysmian 2018, 2).

	Tyyppi	Resistanssi mΩ/km	Reaktanssi mΩ/km	Pituus km	Resistanssi mΩ	Reaktanssi mΩ
J10	AHXAMK-W 3x120+35	0,132	0,049	1,0	0,132	0,049
J11	AHXAMK-W 3x120+35	0,132	0,049	0,5	0,0660	0,0245

Lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 tapahtuvassa oikosulussa. Tarkastelu tehdään kuvan 36 sijaiskytkennän avulla.



Kuva 36. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteessä 1 tapahtuva oikosulku.

Oikosulkuimpedanssi tarkastelupisteessä 1 eli vikapaikasta syöttävään verkkoon päin näkyvä impedanssi Z_{tot} saadaan yhtälöllä 43, jota sovelletaan tässä tarkastelussa käyttämällä kompleksilukuja laskennassa.

$$Z_{tot} = R'_{verk} + jX'_{verk} + R'_{J10} + jX'_{J10} + R'_{J11} + jX'_{J11} + R'_{J2} + jX'_{J2} + R'_{M1} + jX'_{M1}$$

$$Z_{tot} = (0,031 + j0,824 + 0,132 + j0,049 + 0,066 + j0,025 + 0,164 + j0,050 + 1,7146 + j9,085) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{tot} = (0.0021 + j0.0100) \Omega$$

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 lasketaan yhtälöllä 41. Sijoitetaan luvut yhtälöön.

$$I_{k3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{tot}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0.0021 + j0.0100) \Omega} = 22\,525 \angle -78,14^\circ \text{ A}$$

$$|I_{k3}| = 22\,525 \text{ A}$$

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran maksimi- ja minimiarvot lasketaan taulukon 4 jänniteker-toimen avulla.

$$I_{k3_max} = c \cdot I_{k3} = 1,0 \cdot 22\,525 \text{ A} = 22\,525 \text{ A}$$

$$I_{k3_min} = c \cdot I_{k3} = 0,95 \cdot 22\,525 \text{ A} = 21\,399 \text{ A}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} tarkastelupisteessä 1 saadaan kolmivaiheisesta oikosul-kuvirrasta I_{k3_min} yhtälöllä 44. Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön.

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 21\,399 \text{ A} = 18\,532 \text{ A}$$

Yksivaiheinen oikosulkuimpedanssi tarkastelupisteessä 1 eli vikapaikasta syöttävään verk-koon päin näkyvä impedanssi Z_{tot} voidaan laskea yhtälöllä 43.

$$Z_{tot} = R'_{verk} + jX'_{verk} + R'_{J10} + jX'_{J10} + R'_{J11} + jX'_{J11} + R'_{J2} + jX'_{J2} + R'_{M1} + jX'_{M1}$$

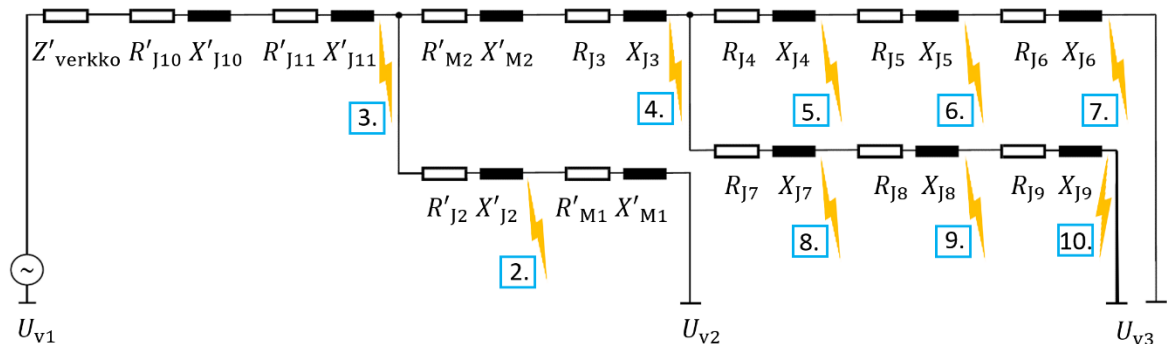
$$Z_{tot} = (0,031 + j0,824 + 0,132 + j0,049 + 0,066 + j0,025 + 0,164 + j0,050 + 1,7146 + j9,085) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{tot} = (0.0021 + j0.0100) \Omega$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 lasketaan yhtälöllä 45. Sijoitetaan luku-arvot yhtälöön.

$$I_{k1} = \frac{c \cdot U_v}{Z_{tot}} = \frac{0,95 \cdot 230 \text{ V}}{(0.0021 + j0.0100) \Omega} = 21\,399 \text{ A}$$

Vastaavasti kuin tarkastelupisteen 1 osalta, lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuvissa oikosuluissa. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 37.



Kuva 37. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuva oikosulku.

Lukuarvojen sijoittelu ja yhtälöiden ratkaisut suoritetaan erillisessä tiedostossa. Tulokset koostetaan taulukkoon 13. Taulukkoon on merkitty myös oikosulkuvirran arvo, joka vähintään vaaditaan, että vikasuojaus toteutuu vaatimusten mukaisessa toiminta-ajassa. Oikosulkusuojaus toteutuu, jos pienin kolme-, kaksi- tai yksivaiheinen oikosulkuvirran arvoista ylittää suojalaitteen toimintarajavirran.

Vaadittua oikosulkuvirran arvoa verrataan laskettuun taulukossa olevaan yksivaiheisen oikosulkuvirran arvoon. Jos laskettu virran arvo on suurempi kuin vaadittu arvo eli vikasuojaus toteutuu, se merkitään taulukkoon. Jos oikosulkusuojaus toteutuu eli kolme-, kaksi- tai yksivaiheinen oikosulkuvirran arvoista pienin ylittää suojalaitteen toimintarajavirran myös se merkitään taulukkoon.

Uusien katkaisijoiden toimintavirta-arvot taulukon tarkastelupisteissä 1 ja 2 ovat suosituksia, jotka tulee ottaa kohteessa käyttöön. Vanhan 20 kV kojeistoa suojavaan katkaisijan ja pääkeskuksen katkaisijan toimintavirta-arvot taulukon tarkastelupisteissä 3 ja 4 ovat nykyistä olemassa olevaa tilannetta vastaavat. Taulukossa 13 tarkastelupisteet 2 ja 3 ovat keskijänniteverkossa. Niiden virta-arvot ovat 20 kV jännitetasossa. Muut virta-arvot ovat 400 V:n jännitetasossa.

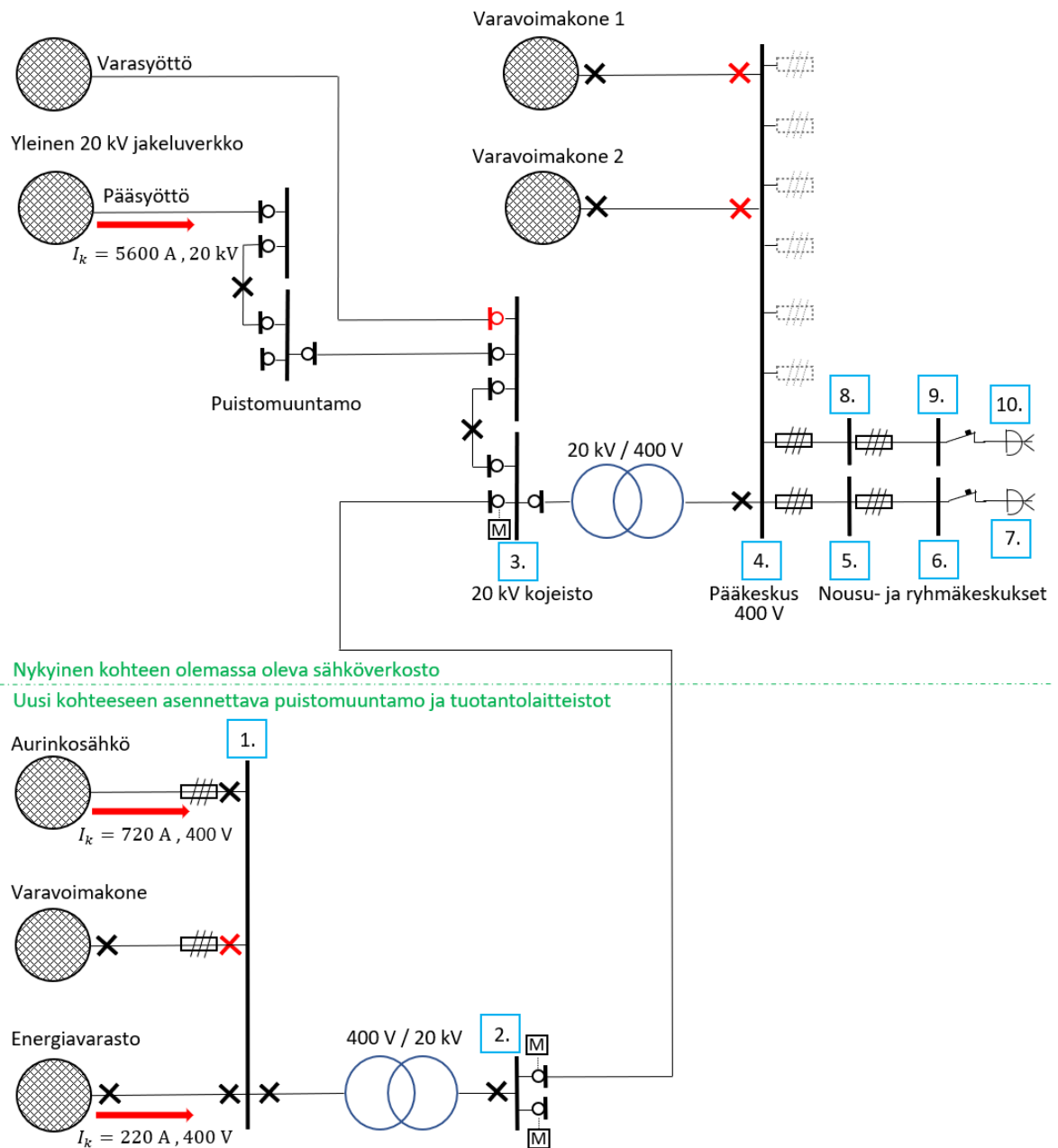
Taulukko 13. Kooste toisen kytkentätilanteen kolme-, kaksi- ja yksivaiheisten oikosulkuvirtojen tarkastelusta. Yleinen sähköverkko syöttää oikosulkuvirtaa.

Tarkastelu- piste	Oikosulku- virta, 3- vaihe [A]	Oikosulku- virta, 2- vaihe [A]	Oikosulku- virta, 1- vaihe [A]	Suojalaite	Vaadittu virta [A]	Oikosulku- ja vikasuo- jaus
Liittymä 20 kV	5 600 kA 20 kV					
1.	22 525	18 532	21 399	PJ-katkaisija	2 200	ok/ok
2.	4 499	3 542		KJ-katkaisija	50	ok/ok
3.	4 981	3 922		KJ-katkaisija	1 000	ok/ok
4.	21 706	17 858	20 592	PJ-katkaisija	12 000	ok/ok
5.	13 602	11 191	6 459	gG 315	2 000	ok/ok
6.	10 858	8 933	4 599	gG 125	800	ok/ok
7.	508,1	418,1	238,1	C 16	160	ok/ok
8.	12 349	10 159	4 809	gG 250	1700	ok/ok
9.	6 451	5 308	2 035	gG 125	800	ok/ok
10.	494,0	406,4	223,8	C 16	160	ok/ok

Taulukon tuloksista havaitaan, että yleisen sähköverkon syöttämä oikosulkuvirtaa riittää polttomaan suurimmankin pääkeskuksen gG-sulakkeen vaaditussa ajassa. Siten myös nousu- ja ryhmäkeskustasolla oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti. Katkaisijoilla tehty jakeluverkon oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti ja selektiivisesti. Kokonaisuutena voidaan todeta, että oikosulkuvirrat ovat riittävät suojalaitteiden toimimiseksi vaaditusti. Puistomuuntamolla tarkastelupisteessä 2 keskijännitekatkaisijan suojareleen asettelussa pitää huomioida, että sähköenergian syöttösuunta on eri kuin ensimmäisessä tarkastelussa. Molemmille käyttötilanteille pitää olla omat suojareleet tai suojareleessä pitää olla mahdollisuus kaksille asetteluille ja energian syöttösuunnille. Sama tilanne on tarkastelupisteessä 4 vanhan olemassa olevan pääkeskuksen pienjännitekatkaisijan osalta, jossa tosin syöttösuunta pysyy samana. Verrattuna ensimmäiseen kytkentätilanteeseen, jossa yleisestä sähköverkosta erotettua saarekettä syötti diesel-varavoimakone yksinään voidaan todeta, että oikosulkuvirrat ovat kauttaaltaan huomattavasti suuremmat.

6.3 3. kytkentilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu.

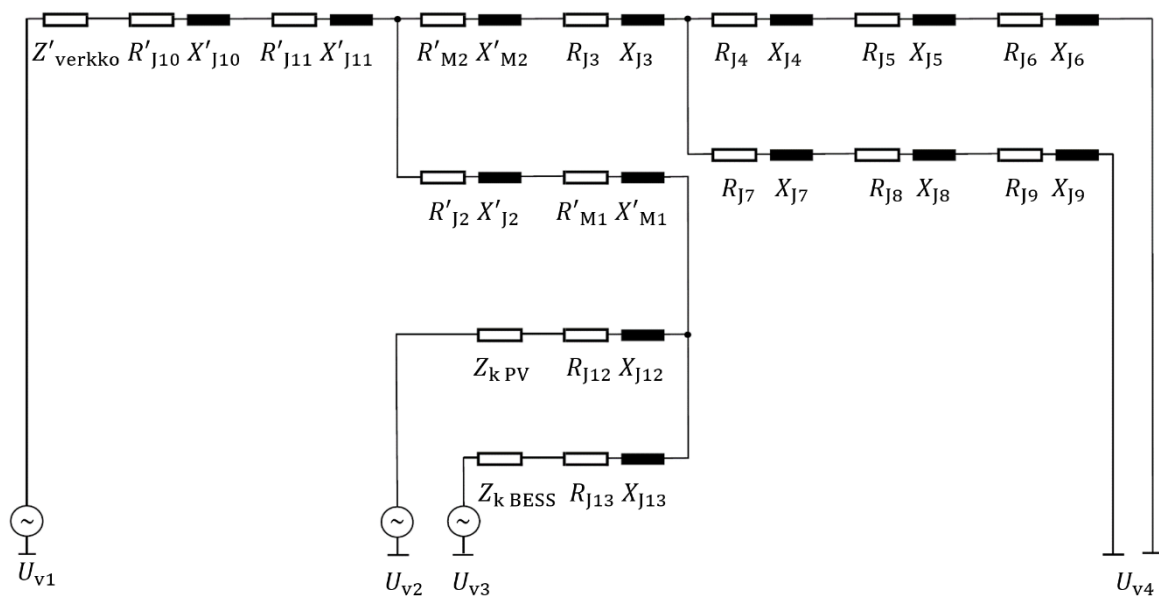
Kolmannessa kytkentilanteessa yleinen sähköverkko huolehtii sähköenergian syötöstä rinnallaan aurinkosähkövoimala ja energiavarasto. Tämä kytkentilanne mallintaa normaalia tilannetta, kun uudet tuotantolaitteistot ja puistomuuntamo on otettu käyttöön (kuva 38). Tämä kytkentilanne antaa tietoa suurimmista oikosulkuvirtojen rasituksista, jotka kohdistuvat suojalaitteisiin, kaapeleihin ja kojeistoihin.



Kuva 38. Kytkentilanne 3. ja tarkastelupisteet 1–10.

Kuvasta 38 nähdään, että verkstoautomaatiolla on tehty käyttötilannetta vastaavat katkaisijoiden ohjaukset. Uusi varavoimakone eivätkä myöskään vanhat varavoimakoneet 1 ja 2 kytkettyneet, joten niitä ohjaavat katkaisijat ovat auki. Auki olevat katkaisijat on havainnollistettu kuvassa punaisella värillä. Myös sähköenergian syöttö yleisestä jakeluverkosta, aurinkosähkövoimalasta ja energiavarastosta on merkitty kuvaan punaisella nuolella. Jakeluverkko kykenee vikatilanteessa syöttämään 5,6 kA oikosulkuvirran liityntäpisteessä 20 kV jännitetasossa. Lisäksi aurinkosähkövoimala ja energiavarasto syöttävät oikosulkuvirtaa verkkosuuntaajiensa välityksellä. Oikosulkuvirran arvot yhteensä ovat suurimmat tarkasteltavista kytkentätilanteista. Kuten ensimmäisessä ja toisessa kytkentätilanteessa, myös tässä tarkasteltavassa kytkentätilanteessa lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta kymmenessä eri tarkastelupisteessä. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 38. Tarkastelupisteet ovat samat kuin aikaisemmassa edellisessä luvussa tarkastelussa kytkentätilanteessa.

Sähkönjakeluverkon käyttötilanne, kun yleinen sähkönjakeluverkko syöttää kohdetta rinnallaan aurinkosähkövoimala ja energiavarasto voidaan mallintaa yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jota käytetään oikosulkuvirtojen tarkasteluun. Mallissa komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla (kuva 39).



Kuva 39. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan kytkentätilannetta, jossa yleinen sähköverkko, aurinkovoimalaitos ja energiavarasto syöttävät oikosulkuvirtaa.

Toisen kytkentätilanteen tarkastelussa luvussa 6.2 todettiin, että yleisen 20 kV jakeluverkon oikosulkuimpedanssin resistiivisen ja reaktiivisen komponentin osuus ei ole käytettävissä. Toisen kytkentätilanteen tarkastelussa resistiivisen ja reaktiivisen komponentin suhteelle käytettiin tyypillistä lähdetietoon perustuvaa arvoa, jonka perusteella jakeluverkon oikosulkuimpedanssi Z'_{verk} jaettiin resistiiviseen komponenttiin R'_{verk} ja reaktiiviseen komponenttiin X'_{verk} . Samoja luvussa 6.2 laskettuja lukuarvoja käytetään tässä tarkastelussa.

Aurinkosähkövoimalaa mallinnetaan tässä tarkastelussa oikosulkuimpedanssilla $Z_{k_{PV}}$. Aurinkosähkövoimalan virrantuotantokyky riippuu auringon säteilyn tasosta. Oletuksena tässä tarkastelussa on, että aurinkosähkövoimala syöttää tehokertoimella yksi olevan nimellistehonsa vikatilanteessa. Vikatilanteen jatkuessa yli 400 ms aurinkosähkövoimala voi irrota sähköverkosta. Sähköverkosta irtautumista ei kuitenkaan huomioida tässä, koska tarkastelusta haetaan suurimpia oikosulkuvirran arvoja. Aurinkosähkövoimalan syöttämä oikosulkuvirta $I_{k_{PV}}$ lasketaan yhtälöllä 25 ja oikosulkuvirta $Z_{k_{PV}}$ yhtälöllä 4.

$$I_{k_{PV}} = \frac{P_{n_{PV}}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{500 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 721,69 \text{ A}$$

$$Z_{k_{PV}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{k_{PV}}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 721,69 \text{ A}} = 0,32 \text{ } \Omega$$

Akkuenergiavarastoa mallinnetaan tässä tarkastelussa oikosulkuimpedanssilla $Z_{k_{BESS}}$. Oletuksena tässä tarkastelussa on, että akkuenergiavarasto syöttää tehokertoimella yksi olevan nimellistehonsa vikatilanteessa. Vikatilanteen jatkuessa yli 400 ms akkuenergiavarasto voi irrota sähköverkosta. Sähköverkosta irtautumista ei kuitenkaan huomioida tässä, koska tarkastelusta haetaan suurimpia oikosulkuvirran arvoja. Aurinkosähkövoimalan syöttämä oikosulkuvirta $I_{k_{BESS}}$ lasketaan yhtälöllä 25 ja oikosulkuvirta $Z_{k_{BESS}}$ yhtälöllä 4.

$$I_{k_{BESS}} = \frac{P_{n_{BESS}}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{150 \text{ kW}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 216,51 \text{ A}$$

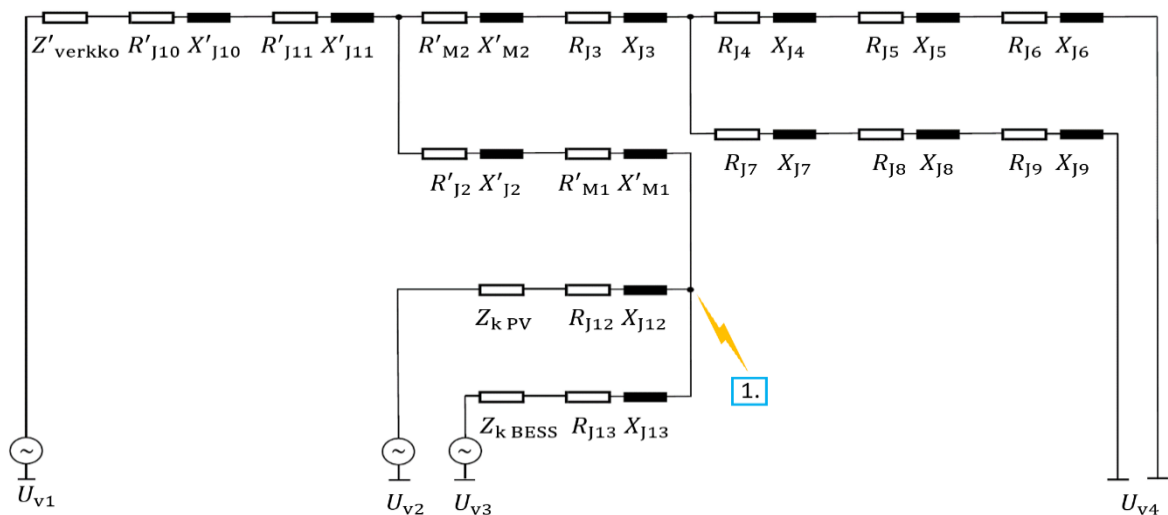
$$Z_{k_{BESS}} = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{k_{PV}}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 216,51 \text{ A}} = 1,07 \text{ } \Omega$$

Muuntajien resistanssit ja reaktanssit saadaan luvun 6.1 tarkastelusta. Kaapeleiden J1-J11 tiedot saadaan taulukoista 10 ja 12. Uusina tässä tarkastelussa tulevien kaapeleiden J12 ja J13 tyypit, pituudet, resistanssit ja reaktanssit kerätään taulukkoon 14.

Taulukko 14. Kaapelit J12 ja J13. Kaapelien vastusarvot saadaan julkaisun D1-2017 taulukosta 41.6. (STUL 2017, 96).

	Tyyppi	Resistanssi mΩ/km	Reaktanssi mΩ/km	Pituus km	Resistanssi mΩ	Reaktanssi mΩ
J12.1	2 kpl AMCMK 4x300+88	66,500	39,500	0,080	5,320	3,160
J12.2	2 kpl PE-johdin 88 mm ²	122,000	41,000	0,080	9,760	3,280
J13.1	AMCMK 4x240+72	16,200	79,000	0,030	0,486	2,370
J13.2	PE-johdin 72 mm ²	336,000	82,000	0,030	10,080	2,460

Lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 tapahtuvassa oikosulussa. Tarkastelu tehdään kuvan 40 sijaiskytkennän avulla.



Kuva 40. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteessä 1 tapahtuva oikosulku.

Kuvassa tarkastelupisteeseen 1 kytkeytyy vikatilanteessa kolme lähdettä. Kirchhoffin virtalain mukaisesti solmupisteeseen kytkeytyvät virrat voidaan laskea yhteen. Lasketaan solmupisteeseen tulevien haarojen oikosulkumpedanssit $Z_{k3\ haara1}$, $Z_{k3\ haara2}$ ja $Z_{k3\ haara3}$. Sovelletaan yhtälöä 43, mutta käytetään laskennassa kompleksilukuja.

$$Z_{k3\ haara1} = R'_{verk} + jX'_{verk} + R'_{J10} + jX'_{J10} + R'_{J11} + jX'_{J11} + R'_{J2} + jX'_{J2} + R'_{M1} + jX'_{M1}$$

$$Z_{k3\ haara1} = (0,031 + j0,824 + 0,132 + j0,049 + 0,066 + j0,025 + 0,164 + j0,050 + 1,7146 + j9,085) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k3\ haara1} = (0.0021 + j0.0100) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara2} = Z_{k\ PV} + R_{J12.1} + jX_{J12.1}$$

$$Z_{k3\ haara2} = (0,32 + 0,00532 + j0,00316) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara2} = (0.3253 + j0.0032) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara3} = Z_{k\ BESS} + R_{J13.1} + jX_{J13.1}$$

$$Z_{k3\ haara3} = (1,06667 + 0,000486 + j0,002370) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara3} = (1.0672 + j0.0024) \Omega$$

Lasketaan solmupisteeseen kytkeytyvät oikosulkuvirrat $I_{k3\ haara1}$, $I_{k3\ haara2}$ ja $I_{k3\ haara3}$ yhtälöllä 41.

$$I_{k3 \text{ haara1}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3 \text{ haara1}}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0.0021 + j0.0100) \Omega}$$

$$= 22\,525 \angle -78,14^\circ \text{ A}$$

$$I_{k3 \text{ haara2}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3 \text{ haara2}}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0.3253 + j0.0032) \Omega}$$

$$= 709,85 \angle -0,56^\circ \text{ A}$$

$$I_{k3 \text{ haara3}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3 \text{ haara3}}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (1.0672 + j0.0024) \Omega}$$

$$= 216,40 \angle -0,13^\circ \text{ A}$$

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 saadaan laskemalla solmupisteeseen kytkeytyvät virrat yhteen.

$$I_{k3} = I_{k3 \text{ haara1}} + I_{k3 \text{ haara2}} + I_{k3 \text{ haara3}}$$

$$I_{k3} = (22\,525 \angle -78,14^\circ \text{ A}) + (709,85 \angle -0,56^\circ \text{ A}) + (216,40 \angle -0,13^\circ \text{ A})$$

$$I_{k3} = 22\,740,5 \angle -75,85^\circ \text{ A}$$

$$|I_{k3}| = 22\,740,5 \text{ A}$$

Kolmivaiheisen oikosulkuvirran maksimi- ja minimiarvot lasketaan taulukon 4 jännitekerrointen avulla.

$$I_{k3_max} = c \cdot I_{k3} = 1,0 \cdot 22\,740,5 = 22\,740,5 \text{ A}$$

$$I_{k3_min} = c \cdot I_{k3} = 0,95 \cdot 22\,740,5 \text{ A} = 21\,603,5 \text{ A}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} tarkastelupisteessä 1 saadaan kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta I_{k3_min} yhtälöllä 44. Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön.

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 21\,603,5 \text{ A} = 18\,709,2 \text{ A}$$

Yksivaiheisessa oikosulussa tarkastelupisteessä 1 oikosulkuvirtojen solmupiste muodostuu muuntajan tähtipisteessä kiinni olevasta haarasta sekä aurinkovoimalaitoksen ja energiavaraston haaroista. Täten aurinkovoimalaitoksen ja energiavaraston kaapeleiden suojajohtimen impedanssit tulevat tarkasteluun mukaan. Lasketaan solmupisteeseen tulevien haarojen oikosulkuimpedanssit $Z_{k1\ haara1}$, $Z_{k1\ haara2}$ ja $Z_{k1\ haara3}$. Sovelletaan yhtälöä 43, mutta käytetään laskennassa kompleksilukuja.

$$Z_{k1\ haara1} = R'_{verk} + jX'_{verk} + R'_{J10} + jX'_{J10} + R'_{J11} + jX'_{J11} + R'_{J2} + jX'_{J2} + R'_{M1} + jX'_{M1}$$

$$Z_{k1\ haara1} = (0,031 + j0,824 + 0,132 + j0,049 + 0,066 + j0,025 + 0,164 + j0,050 + 1,7146 + j9,085) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k1\ haara1} = (0.0021 + j0.0100) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara2} = Z_{k\ PV} + R_{J12.1} + jX_{J12.1} + R_{J12.2} + jX_{J12.2}$$

$$Z_{k1\ haara2} = (0,32 + 0,00532 + j0,00316 + 0,00976 + j0,00328) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara2} = (0.3351 + j0.0064) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara3} = Z_{k\ BESS} + R_{J13.1} + jX_{J13.1} + R_{J13.2} + jX_{J13.2}$$

$$Z_{k1\ haara3} = (1,06667 + 0,000486 + j0,002370 + 0,01008 + j0,00246) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara3} = (1.0772 + j0.0048) \Omega$$

Lasketaan solmupisteeseen kytkeytyvät oikosulkuvirrat $I_{k3\ haara1}$, $I_{k3\ haara2}$ ja $I_{k3\ haara3}$ yhtälöllä 45.

$$\begin{aligned} I_{k1\ haara1} &= \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1\ haara1}} = \frac{0,95 \cdot 400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0.0021 + j0.0100) \Omega} \\ &= 21\ 399\text{ A} \angle -78,14^\circ \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{k1\ haara2} &= \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k\ haara2}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0.3351 + j0.0064) \Omega} \\ &= 654.63 \angle -1,09^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{k1\ haara3} &= \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k\ haara3}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (1.0772 + j0.0048) \Omega} \\ &= 203.66 \angle -0,26^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 saadaan laskemalla solmupisteeseen kytkeytyvät virrat yhteen.

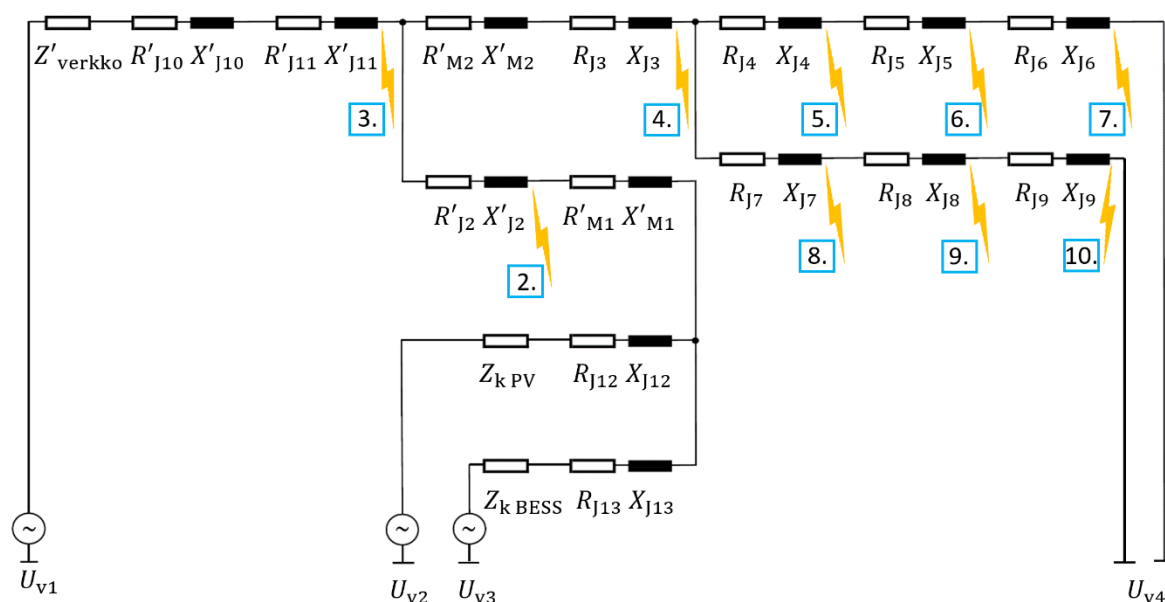
$$I_{k1} = I_{k1\ haara1} + I_{k1\ haara2} + I_{k1\ haara3}$$

$$\begin{aligned} I_{k1} &= (21\ 399\text{ A} \angle -78,14^\circ \text{ A}) + (654.63 \angle -1,09^\circ \text{ A}) + (203.66 \angle \\ &\quad -0,26^\circ \text{ A}) \end{aligned}$$

$$I_{k1} = 21\ 604,5 \angle -75,91^\circ \text{ A}$$

$$|I_{k1}| = 21\ 604,5 \text{ A}$$

Vastaavasti kuin tarkastelupisteen 1 osalta, lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuvissa oikosuluissa. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 41. Yhtälöt ratkaistaan erillisessä tiedostossa. Tulokset koostetaan taulukkoon 15.



Kuva 41. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuva oikosulku.

Taulukko 15. 3. kytkentätilanteen kolme-, kaksi- ja yksivaiheisten oikosulkuvirtojen tarkastelu. Yleinen sähköverkko, aurinkovoimalaitos ja energiavarasto syöttävät oikosulkuvirtaa.

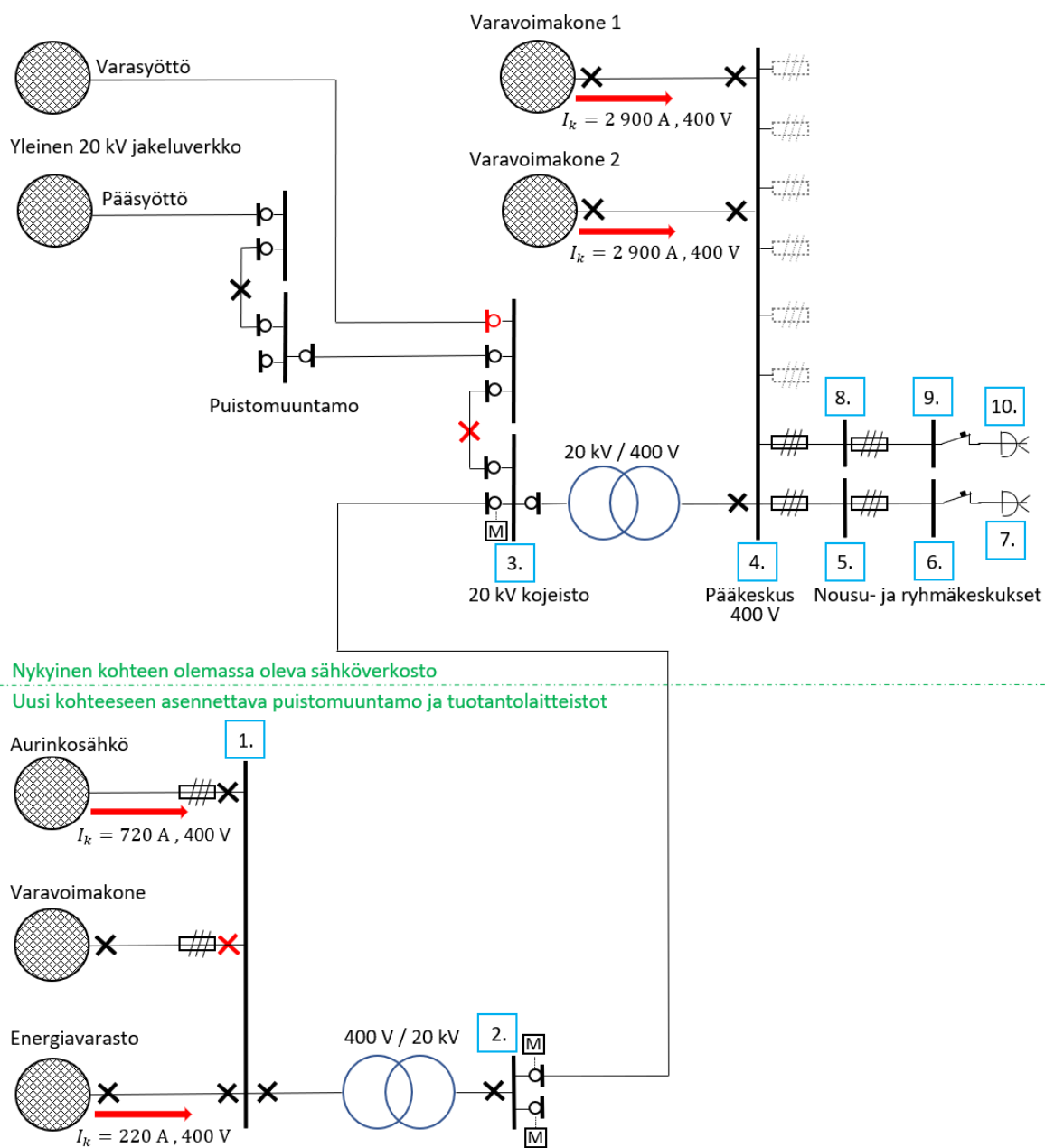
Tarkastelupiste	Oikosulkuvirta, 3-vaihe [A]	Oikosulkuvirta, 2-vaihe [A]	Oikosulkuvirta, 1-vaihe [A]	Suojalaite	Vaadittu virta [A]	Oikosulku- ja vikasuojaus
1.	22 741	18 709	21 605	PJ-katkaisija	2 200	ok/ok
2.	4 506	3 903		KJ-katkaisija	50	ok/ok
3.	4 987	4 319		KJ-katkaisija	1 000	ok/ok
4.	21 709	17 861	20 595	PJ-katkaisija	12 000	ok/ok
5.	13 602	11 191	6 459	gG 315	2 000	ok/ok
6.	10 858	8 933	4 599	gG 125	800	ok/ok
7.	508,1	418,1	238,1	C 16	160	ok/ok
8.	12 350	10 161	4 810	gG 250	1700	ok/ok
9.	6 451	5 308	2 035	gG 125	800	ok/ok
10.	494,0	406,4	223,8	C 16	160	ok/ok

Taulukossa 18 tarkastelupisteet 2 ja 3 ovat keskijänniteverkossa. Näiden tarkastelupisteiden virta-arvot ovat 20 kV jännitetasossa. Muut virta-arvot ovat 400 V:n jännitetasossa. Taulukossa esitetyn tarkastelun tuloksista havaitaan, että yleinen sähköverkko, aurinkovoimalaitos ja energiavarasto rinnallaan kykenee syöttämään suurimman oikosulkuvirran tarkasteluista kytkentätilanteista. Voidaan todeta, että oikosulkuvirrat ovat riittävät suojalaitteiden toimimiseksi vaaditusti ja selektiivisesti. Uusien puistomuuntamoon tulevien katkaisijoiden toimintavirta-arvot taulukon tarkastelupisteissä 1 ja 2 ovat suosituksia, jotka tulee ottaa kohteessa käyttöön. Vanhan 20 kV kojeistoa suojavaan katkaisijan ja pääkeskuksen katkaisijan toimintavirta-arvot taulukon tarkastelupisteissä 3 ja 4 ovat nykyistä olemassa olevaa tilannetta vastaavat. Tässäkin tarkastelussa havaitaan, että katkaisijoiden ohjausta varten eri käyttötilanteille pitää olla omat suojareleet tai suojareleessä pitää olla mahdollisuus kaksille asetuille ja energian syöttösuunnille.

6.4 4. kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelu.

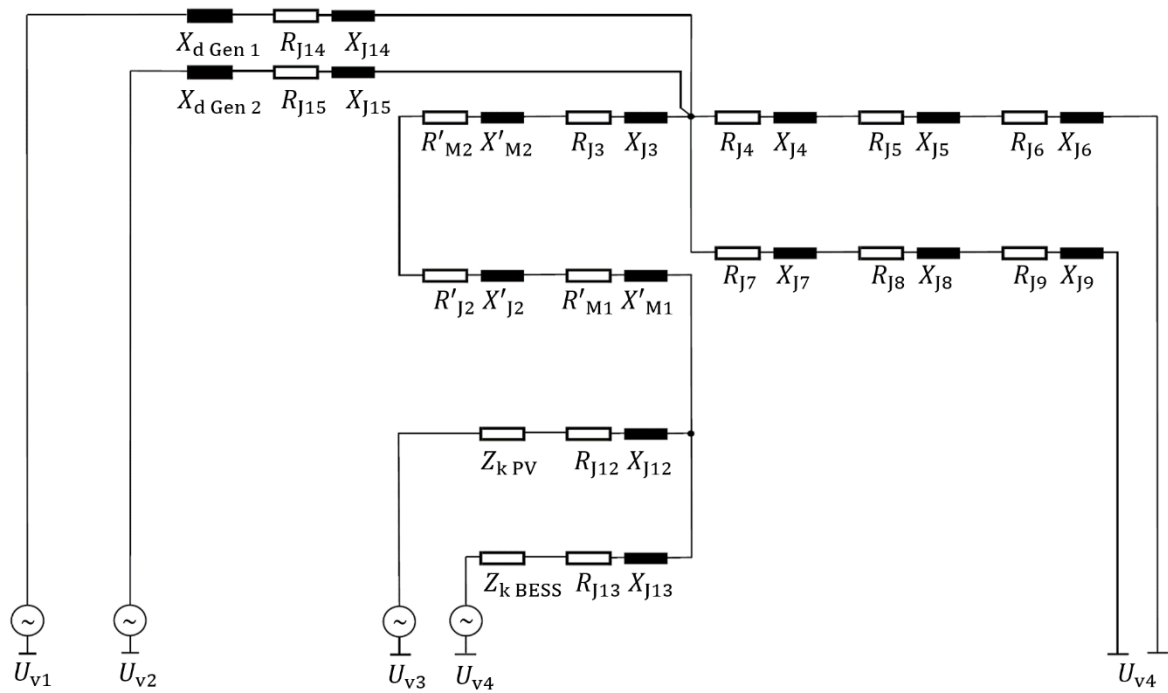
Neljännessä kytkentätilanteessa varavoimakoneet 1 ja 2 huolehtivat sähköenergian syötöstä rinnallaan aurinkosähkövoimala ja energiavarasto. Tämä kytkentätilanne mallintaa normaaliolojen häiriötilannetta tai poikkeusoloja, kun yleinen sähköjakelu on keskeytynyt. Sähkölaitteisto on erottu yleisestä sähköverkosta. Verkostoautomaatiolla on tehty käyttötilannetta vastaavat katkaisijoiden ohjaukset. Keskeytyskriittistä toimintaa voidaan jatkaa saarekekäytössä. Uusi puistomuuntamoon liitettävä varavoimakone ei ole mukana tarkastelussa tässä käyttötilanteessa, joten sen verkkokatkaisija on ohjattu auki. Auki olevat katkaisijat on havainnollistettu kuvassa punaisella värillä. Myös sähköenergian syöttö varavoimakoneilta 1 ja 2, aurinkosähkövoimalasta ja energiavarastosta on merkitty kuvaan 42 punaisella nuolella.

Kuten aikaisemmissa kytkentätilanteissa, myös tässä tarkasteltavassa kytkentätilanteessa lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta kymmenessä eri tarkastelupisteessä. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 42. Tarkastelupisteet ovat samat kuin aikaisemmassa edellisessä luvussa tarkastelussa kytkentätilanteessa. Oletuksena tässä tarkastelussa on, että aurinkosähkövoimala ja energiavarasto syöttävät tehokertoimella yksi olevan nimellistehonsa vikatilanteessa. Vikatilanteen jatkuessa yli 400 ms aurinkosähkövoimala ja energiavarasto voivat irrota sähköverkosta. Sähköverkosta irtautumista ei kuitenkaan huomioida tässä tarkastelussa.



Kuva 42. Kytkentätilanne 4. ja tarkastelupisteet 1–10.

Sähkönjakeluverkon käyttötilanne, kun varavoimakoneet 1 ja 2 syöttävät kohdetta rinnallaan aurinkosähkövoimala ja energiavarasto voidaan mallintaa yksivaiheisella sijaiskytkennällä, jota käytetään oikosulkuvirtojen tarkasteluun. Mallissa komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla (kuva 43).



Kuva 43. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan kytkentätilannetta, jossa varavoimakoneet 1 ja 2, aurinkovoimalaitos ja energiavaraisto syöttävät oikosulkuvirtaa.

Kuten kolmannen kytkentätilanteen tarkastelussa, myös tässä aurinkosähkövoimalaa mallinnetaan oikosulkuimpedanssilla Z_{k_PV} ja akkuenergiavaraustoa mallinnetaan oikosulkuimpedanssilla Z_{k_BESS} , joiden arvot laskettiin kolmannen kytkentätilanteen tarkastelun yhteydessä luvussa 6.3.

$$Z_{k_PV} = 0,32 \Omega$$

$$Z_{k_BESS} = 1,07 \Omega$$

Varavoimakoneita 1 ja 2 mallinnetaan tässä tarkastelussa tahtireaktanssilla X_d . Varavoimakoneen valmistaja ilmoittaa tahtigeneraattorin jatkuvuustilan oikosulkuvirran I_k , joka on 2 900 A (liite 1, 7). Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön 4, jolloin saadaan tahtigeneraattorin reaktanssi X_d oikosulun jatkuvuustilassa.

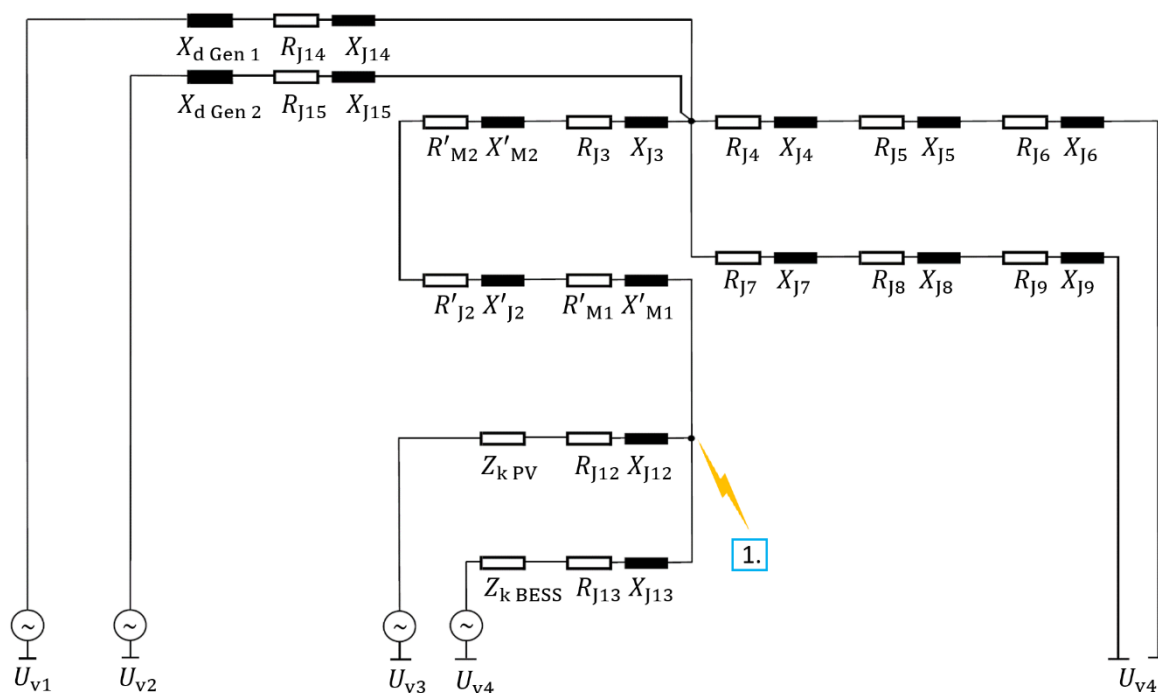
$$X_d = \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot 2\,900 \text{ A}} = 0,0796 \Omega$$

Muuntajien resistanssit ja reaktanssit saadaan luvun 6.1 tarkastelusta. Kaapeleiden J1-J13 tiedot saadaan taulukoista 10, 12 ja 14. Uusina tässä tarkastelussa tulevien kaapeleiden J14 ja J15 tyypit, pituudet, resistanssit ja reaktanssit kerätään taulukkoon 16.

Taulukko 16. Kaapelit J14 ja J15. Kaapelien vastusarvot saadaan julkaisun D1-2017 taulukosta 41.6. (STUL 2017, 96).

	Tyyppi	Resistanssi mΩ/km	Reaktanssi mΩ/km	Pituus km	Resistanssi mΩ	Reaktanssi mΩ
J1.1	2 kpl AMCMK 4x300+88	66,500	39,500	0,030	1,9950	1,1850
J1.2	2 kpl PE-johdin 88 mm ²	122,000	41,000	0,030	3,6600	1,2300
J1.1	2 kpl AMCMK 4x300+88	66,500	39,500	0,030	1,9950	1,1850
J1.2	2 kpl PE-johdin 88 mm ²	122,000	41,000	0,030	3,6600	1,2300

Lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 tapahtuvassa oikosulussa. Tarkastelu tehdään kuvan 44 sijaiskytkennän avulla.



Kuva 44. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteessä 1 tapahtuva oikosulku.

Kuvassa 44 nähdään, että tarkastelupisteeseen 1 kytkeytyy vikatilanteessa kolme lähdettä. Kirchhoffin virtalain mukaisesti solmupisteeseen kytkeytyvät virrat voidaan laskea yhteen. Lasketaan solmupisteeseen tulevien haarojen oikosulkuimpedanssit $Z_{k3\ haara1}$, $Z_{k3\ haara2}$ ja $Z_{k3\ haara3}$. Sovelletaan yhtälöä 43, mutta käytetään laskennassa kompleksilukuja.

$$Z_{k3\ haara1} = \left(\frac{(jX_d + R_{J14.1} + jX_{J14.1}) \cdot (jX_d + R_{J15.1} + jX_{J15.1})}{(jX_d + R_{J14.1} + jX_{J14.1}) + (jX_d + R_{J15.1} + jX_{J15.1})} \right) + R_{J3} \\ + jX_{J3} + R'_{M2} + jX'_{M2} + R'_{J2} + jX'_{J2} + R'_{M1} + jX'_{M1}$$

$$Z_{k3\ haara1} = \\ \left(\left(\frac{(79,6 + 1,33 + j0,79) \cdot (79,6 + 1,663 + j0,988)}{(79,6 + 1,33 + j0,79) + (79,6 + 1,663 + j0,988)} \right) + 0,082 + j0,001 \right. \\ \left. + 1,448 + j9,593 + 0,164 + j0,050 + 1,7146 + j9,085 \right) \text{m}\Omega$$

$$Z_{k3\ haara1} = (4,157 + j58,974) \text{m}\Omega$$

$$Z_{k3\ haara2} = Z_{k\ PV} + R_{J12.1} + jX_{J12.1}$$

$$Z_{k3\ haara2} = (0,32 + 0,00532 + j0,00316) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara2} = (0.3253 + j0.0032) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara3} = Z_{k\ BESS} + R_{J13.1} + jX_{J13.1}$$

$$Z_{k3\ haara3} = (1,06667 + 0,000486 + j0,002370) \Omega$$

$$Z_{k3\ haara3} = (1.0672 + j0.0024) \Omega$$

Lasketaan solmupisteeseen kytkeytyvät oikosulkuvirrat $I_{k3\ haara1}$, $I_{k3\ haara2}$ ja $I_{k3\ haara3}$ yhtälöllä 41.

$$I_{k3\ haara1} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3\ haara1}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (4,157 + j58,974)\text{ m}\Omega} \\ = 3\ 905,10 \angle -85,97\text{ A}$$

$$I_{k3\ haara2} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3\ haara2}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0,3253 + j0,0032)\ \Omega} \\ = 709,85 \angle -0,56^\circ\text{ A}$$

$$I_{k3\ haara3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3\ haara3}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (1,0672 + j0,0024)\ \Omega} \\ = 216,40 \angle -0,13^\circ\text{ A}$$

Kolmevaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 saadaan laskemalla solmupisteeseen kytkeytyvät virrat yhteen.

$$I_{k3} = I_{k3\ haara1} + I_{k3\ haara2} + I_{k3\ haara3}$$

$$I_{k3} = (3\ 905,10 \angle -85,97\text{ A}) + (709,85 \angle -0,56^\circ\text{ A}) + (216,40 \angle \\ -0,13^\circ\text{ A})$$

$$I_{k3} = 4\ 083,40 \angle -72,90^\circ\text{ A}$$

$$|I_{k3}| = 4\ 083,40\text{ A}$$

Kolmevaiheiset oikosulkuvirran maksimi- ja minimiarvot lasketaan taulukon 4 jänniteker-toimen avulla.

$$I_{k3_max} = c \cdot I_{k3} = 1,0 \cdot 4\ 083,40\text{ A} = 4\ 083,40\text{ A}$$

$$I_{k3_min} = c \cdot I_{k3} = 0,95 \cdot 4\,083,40 \text{ A} = 3\,879,23 \text{ A}$$

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta I_{k2} tarkastelupisteessä 1 saadaan kolmivaiheisesta oikosulkuvirrasta I_{k3_min} yhtälöllä 44. Sijoitetaan lukuarvot yhtälöön.

$$I_{k2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{k3_min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 3\,879,23 \text{ A} = 3\,359,49 \text{ A}$$

Yksivaiheisessa oikosulussa tarkastelupisteessä 1 oikosulkuvirtojen solmupiste muodostuu muuntajan tähtipisteessä kiinni olevasta haarasta sekä aurinkovoimalaitoksen ja energiavaraston haaroista. Täten aurinkovoimalaitoksen ja energiavaraston kaapeleiden suojajohtimen impedanssit tulevat tarkasteluun mukaan. Lasketaan solmupisteeseen tulevien haarojen oikosulkuimpedanssit $Z_{k1\ haara1}$, $Z_{k1\ haara2}$ ja $Z_{k1\ haara3}$. Sovelletaan yhtälöä 43, mutta käytetään laskennassa kompleksilukuja.

$$Z_{k1\ haara1} = \left(\frac{(jX_d + R_{J14.1} + jX_{J14.1}) \cdot (jX_d + R_{J15.1} + jX_{J15.1})}{(jX_d + R_{J14.1} + jX_{J14.1}) + (jX_d + R_{J15.1} + jX_{J15.1})} \right) + R_{J3} \\ + jX_{J3} + R'_{M2} + jX'_{M2} + R'_{J2} + jX'_{J2} + R'_{M1} + jX'_{M1}$$

$$Z_{k1\ haara1} = \\ \left(\left(\frac{(79,6 + 1,33 + j0,79) \cdot (79,6 + 1,663 + j0,988)}{(79,6 + 1,33 + j0,79) + (79,6 + 1,663 + j0,988)} \right) + 0,082 + j0,001 \right. \\ \left. + 1,448 + j9,593 + 0,164 + j0,050 + 1,7146 + j9,085 \right) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k1\ haara1} = (4,157 + j58,974) \text{ m}\Omega$$

$$Z_{k1\ haara2} = Z_{k\ PV} + R_{J12.1} + jX_{J12.1} + R_{J12.2} + jX_{J12.2}$$

$$Z_{k1\ haara2} = (0,32 + 0,00532 + j0,00316 + 0,00976 + j0,00328) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara2} = (0.3351 + j0.0064) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara3} = Z_{k\ BESS} + R_{J13.1} + jX_{J13.1} + R_{J13.2} + jX_{J13.2}$$

$$Z_{k1\ haara3} = (1,06667 + 0,000486 + j0,002370 + 0,01008 + j0,00246) \Omega$$

$$Z_{k1\ haara3} = (1.0772 + j0.0048) \Omega$$

Lasketaan solmupisteeseen kytkeytyvät oikosulkuvirrat $I_{k3\ haara1}$, $I_{k3\ haara2}$ ja $I_{k3\ haara3}$ yhtälöllä 45.

$$\begin{aligned} I_{k1\ haara1} &= \frac{c \cdot U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k1\ haara1}} = \frac{0,95 \cdot 400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (4,157 + j58,974)\text{ m}\Omega} \\ &= 3\,710,98 \angle -85,97^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{k1\ haara2} &= \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k\ haara2}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (0.3351 + j0.0064)\ \Omega} \\ &= 654.63 \angle -1,09^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{k1\ haara3} &= \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{k\ haara3}} = \frac{400\text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (1.0772 + j0.0048)\ \Omega} \\ &= 203.66 \angle -0,26^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

Yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä 1 saadaan laskemalla solmupisteeseen kytkeytyvät virrat yhteen.

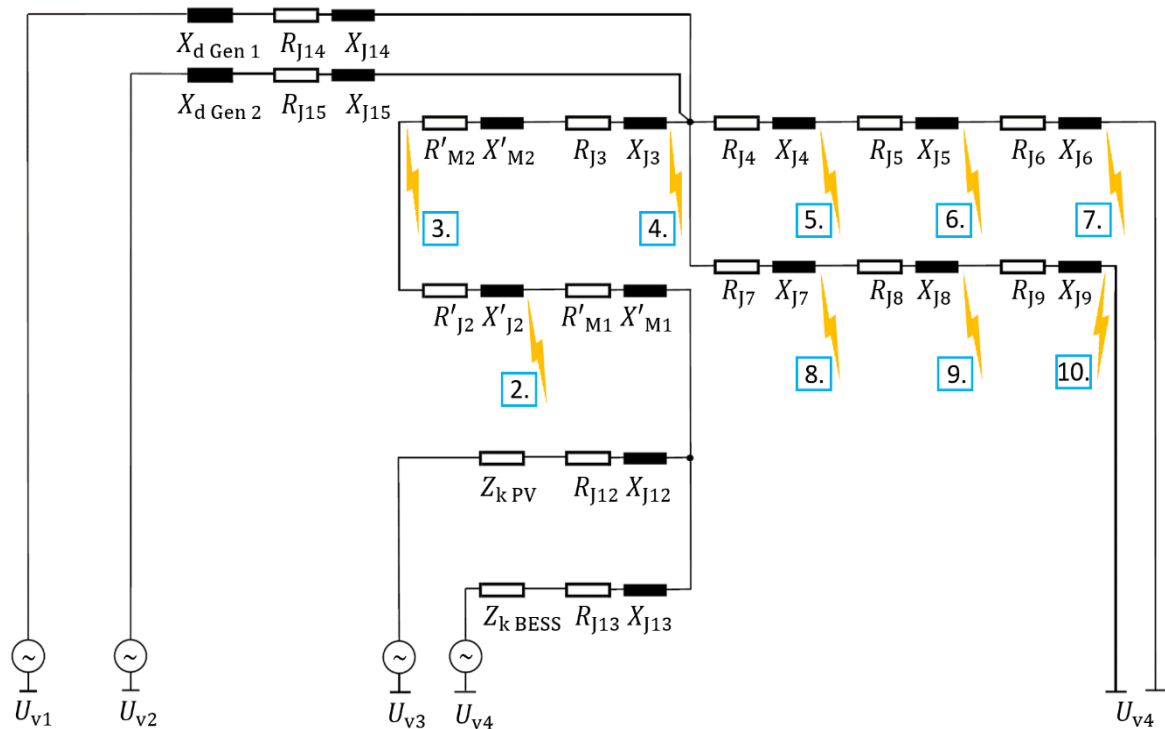
$$I_{k1} = I_{k1\ haara1} + I_{k1\ haara2} + I_{k1\ haara3}$$

$$I_{k1} = (3\,710,98 \angle -85,97^\circ \text{ A}) + (654,63 \angle -1,09^\circ \text{ A}) + (203,66 \angle -0,26^\circ \text{ A})$$

$$I_{k1} = 3\,880,08 \angle -73,24^\circ \text{ A}$$

$$|I_{k1}| = 3\,880,08 \text{ A}$$

Vastaavasti kuin tarkastelupisteen 1 osalta, lasketaan kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuvissa oikosuluissa. Tarkastelupisteet on merkitty kuvaan 44. Lukuarvojen sijoittelu ja yhtälöiden ratkaisut suoritetaan erillisessä tiedostossa. Tulokset koostetaan taulukkoon 17.



Kuva 44. Sijaiskytkentä, jolla mallinnetaan tarkastelupisteissä 2–10 tapahtuva oikosulku.

Taulukko 17. 4. kytkentätilanteen kolme-, kaksi- ja yksivaiheisten oikosulkuvirtojen tarkastelu. Varavoimakoneet 1 ja 2, aurinkovoimalaitos ja energiavarasto syöttävät oikosulkuvirtaa.

Tarkastelupiste	Oikosulkuvirta, 3-vaihe [A]	Oikosulkuvirta, 2-vaihe [A]	Oikosulkuvirta, 1-vaihe [A]	Suojalaite	Vaadittu virta [A]	Oikosulku- ja vikasuojaus
1.	4 083	3 359	3 880	PJ-katkaisija	2 200	ok/ok
2.	95,91	83,06		KJ-katkaisija	50	ok/ok
3.	95,96	83,10				
4.	5 896	4 851	5 562	PJ-katkaisija	4 000	ok/ok
5.	5 201	4 279	3 817	gG 315	2 000	ok/ok
6.	4 883	4 017	3 198	gG 125	800	ok/ok
7.	500,4	411,7	236,2	C 16	160	ok/ok
8.	4 890	4 023	3 144	gG 250	1700	ok/ok
9.	3 840	3 159	1 754	gG 125	800	ok/ok
10.	486,3	400,1	222,0	C 16	160	ok/ok

Taulukossa 17 tarkastelupisteet 2 ja 3 ovat keskijänniteverkossa. Niiden virta-arvot ovat 20 kV jännitetasossa. Muut virta-arvot ovat 400 V:n jännitetasossa. Taulukon 17 tuloksista havaitaan, että varavoimakoneiden 1 ja 2 sekä aurinkovoimalaitoksen ja energiavaraston syöttämä oikosulkuvirtaa riittää polttomaan suurimmankin pääkeskuksen gG-sulakkeen vaaditussa ajassa. Siten myös nousu- ja ryhmäkeskustasolla oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti. Katkaisijoilla tehty jakeluverkon oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti ja selektiivisesti. Kokonaisuutena voidaan todeta, että oikosulkuvirrat ovat riittävät suojalaitteiden toimimiseksi vaaditusti. Kuitenkin on huomioitava, että tarkastelupisteessä 4 olevan pienjännitekatkaisijan suojareleen asettelu muuttuu aikaisempiin kytkentätilanteisiin verrattuna. Myös oikosulkuvirran syöttösuunta on tässä tarkastelussa kyseisen katkaisijan läpi eri kuin aikaisemmissa tarkasteluissa.

6.5 Havaintojen vaikutus kaapeleiden, kojeistojen ja suojalaitteiden valintaan

Neljän kytkentätilanteen oikosulkuvirtojen tarkastelun perusteella saatiin kokonaiskuva sähkölaitteiston oikosulku- ja vikasuojauksen toimivuudesta. Vanhan olemassa olevan sähkölaitteiston suojalaitteet on aikanaan mitoitettu ja valittu niin, että ylivirta- ja vikasuojaus toimii vaaditusti. KytKentätilanteissa 2–4 saadut tulokset tukivat tätä tietoa. KytKentätilanteissa 2–4 tulosten perusteella oikosulkuvirta riittää polttomaan suurimmankin pääkeskukselta lähtevän nousukaapelia suojaavan gG-sulakkeen vaaditussa ajassa. Myös nousu- ja ryhmäkeskustasolla oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti. Katkaisijoilla tehty jakeluverkon oikosulku- ja vikasuojaus toimii vaaditusti ja selektiivisesti. KytKentätilanteissa 2–4 voidaan todeta, että oikosulkuvirrat ovat riittävät suojalaitteiden toimimiseksi vaaditusti. Kuitenkin ensimmäisessä kytkentätilanteessa havaittiin, että 500 kW varavoimakoneen syöttämän oikosulkuvirta on liian alhainen suojauksen täydelliseen toteutumiseen selektiivisesti saarekekäytössä.

Taulukoihin 11, 13, 15 ja 17 koostettiin kytkentätilannetta vastaava kolme-, kaksi- ja yksivaiheinen oikosulkuvirta tarkastelupisteessä. Lisäksi taulukoihin määritettiin tarkastelujen tulosten perusteella katkaisijoiden vaaditut toimintarajavirrat kullekin kytkentätilanteelle. Havaittiin, että samalle katkaisijalle pitää määrittää useampia asetteluja ja myös sähköenergian syöttösuunnat vaihtelivat eri kytkentätilanteissa. Käytännössä tällöin eri käyttötilanteille pitää olla omat katkaisijaa ohjaavat suojareleet tai suojareleessä pitää olla mahdollisuus useammille asetteluille.

Kullekin kytkentätilanteella määritellyt katkaisijoiden oikosulkuvirran raja-arvojen asetellut koostetaan taulukkoon 18. Taulukossa huomioidaan myös ylikuormitussuojauksen asettelu. Ylikuormitussuojauksen asettelu tehdään kohdekäynnillä tehtyjen havaintojen perusteella. Havaintoja tehtiin vanhan olemassa olevan sähkölaitteiston osan kuormista pääkeskuksella. Myös katkaisijoiden suojareleiden havahtumisaikojen asetellut on esitetty taulukossa. Oikosulkusuojan aikaviive tulee olla lyhyt, jotta oikosulkuvirta saadaan nopeasti katkaistua. Ylikuormitussuojan aikaviive pitää asetella riittävän pitkäksi, että virhelaukaisuilta vältytään. Tällöin pitää ottaa huomioon hetkelliset kuormitusmuutoksien aiheuttamat kytkentävirtapiikit. Suojalaitteiden asetteluarvojen määrittelyssä kiinnitetään huomiota myös suojauksen selektiivisyyden toteutumiseen.

Taulukko 18. Katkaisijoiden ylivirtasuojauksen suositeltavat asetteluarvot eri kytkentätilanteiden perusteella.

Tarkastelupiste	Kytkenätilanne 1–4	Oikosulkuvirta, 2-vaihe [A]	Virtaraja, oikosulkusuojaus [A]	Havahtumisaika, oikosulkusuojaus [s]	Virtaraja, ylikuormitussuojaus [A]	Havahtumisaika, ylikuormitussuojaus [s]
1.	1	2 350	2 200	0,8	800	90
	2	18 532	2 200	0,4	800	60
	3	18 709	2 200	0,4	800	60
	4	3 359	2 200	0,5	800	60
2.	1	44,5	38	0,7	16	70
	2	3 542	50	0,4	16	70
	3	3 903	50	0,4	16	70
	4	83,0	50	0,6	16	80
3.	1	44,4	-	-	-	-
	2	3 922	1 000	0,4	65	0,4
	3	4 319	1 000	0,4	65	0,4
	4	83,1	-	-	-	-
4.	1	1 906	1 900	0,5	800	60
	2	17 858	12 000	0,5	1 600	90
	3	17 861	12 000	0,5	1 600	90
	4	4 851	4 000	0,7	800	90

Oikosulkusuojauksen virta-asettelun, on oltava pienempi kuin piirissä esiintyvä oikosulkuvirta. Oikosulkusuojan virta-asettelun arvoa määritettäessä otettiin huomioon taulukon 11, 13, 15 ja 17 kunkin vaakarivin oikosulkuvirran pienin arvo, joka oli näissä tarkasteluissa kaksivaiheisen oikosulkuvirran arvo. Taulukosta 18 nähdään, että ensimmäisessä kytkentätilanteessa, vanhan olemassa olevan pääkeskuksen pienjännitekatkaisijan oikosulkuvirran toimintarajaksi on valittu 1900 A. Pääkeskus vastaa taulukon tarkastelupistettä 4. Asettelu on määritelty niin, että suojaus toimii kaksivaiheisessa oikosulussa. Oikosulkusuojaus tarkastelupisteestä 4 syöttösuuntaa kohti on puistomuuntamon releohjatun keskijännitekatkaisijan varassa tarkastelupisteessä 2, joka joudutaan täten asettelemaan myös samaan oikosulkuvirran raja-arvoon. Keskijänniteverkon 20 kV jännitetasossa 38 A vastaa pienjänniteverkon 400 V jännitetasossa virtaa 1 900 A. Selektiivisyys on näiden katkaisijoiden välille tehty oikosulkusuojauksen viiveaika-asettelulla.

Taulukoiden 11, 13, 15 ja 17 tulosten perusteella havaitaan, että yleinen sähköverkko aurinkovoimalaitos ja energiavarasto rinnallaan kykenee syöttämään suurimman oikosulkuvirran tarkastelluista kytkentätilanteista. Suurin oikosulkuvirran arvo saadaan kolmivaiheisesta tarkastelusta. Tällöin kaapelit, suojalaitteet ja kojeistot pitää mitoittaa niin, että ne kestävät kolmannen kytkentätilanteen kolmivaiheisen oikosulkuvirran rasitukset mahdollisessa vikatilanteessa. Koostetaan suurimmat oikosulkuvirrat taulukkoon 19 ja määritetään suojalaitteiden nimellisvirrat ja katkaisukyvyt tarkistelluissa kohdissa sähkölaitteistoa.

Taulukko 19. Suojalaitteiden nimellisvirta ja katkaisukyky tarkastelupisteiden suurimpien oikosulkuvirtojen perusteella.

Tarkastelupiste	Oikosulkuvirta, 3-vaihe [A]	Suojalaite	Sijainti	Suojalaitteen nimellisvirta [A]	Suojalaitteen katkaisukyky [kA]
1.	22 741	PJ-katkaisija	Uusi puistomuuntamo	2 000	100
2.	4 506	KJ-katkaisija	Uusi puistomuuntamo	400	16
3.	4 987	KJ-katkaisija	Kohteen 20 kV kojeisto	400	16
4.	21 709	PJ-katkaisija	Kohteen pääkeskus	2 000	75

Katkaisijat tarkastelupisteissä 1 ja 2 ovat uusia puistomuuntamoon tulevia ja tarkastelupisteissä 3 ja 4 ovat nykyistä olemassa olevia. Vanhan olemassa olevan sähkölaitteiston pääkeskuksella on käytetty gG-kahvasulakkeita. Kahvasulakkeen katkaisukyky on riittävä. Eräs valmistaja ilmoittaa katkaisukyvyyn olevan 120 kA (ABB 2009, 8). Sulakkeilla on lisäksi oikosulkuvirtaa rajoittava ominaisuus. Tällöin 10 kA katkaisukyvyllä olevia johdonsuojakatkaisijoita voidaan käyttää sähkölaitteiston nousukeskuksilla ja siitä eteenpäin sähköenergian syöttösuunnassa, kun etukojeena on kytkinvaroke, jossa on gG-tyyppinen kahvasulake. Kaapeleiden osalta terminen oikosulkuvirran kestävyys saadaan kaapelin valmistajilta. Valmistajat ilmoittavat suurimman sallitun yhden sekunnin oikosulkuvirran kaapelille. Jos oikosulku katkaistaan alle yhdessä sekunnissa, sovelletaan yhtälöä 28, jolloin oikosulkuvirta

voi olla suurempi. Yhtälöä voidaan soveltaa myös toisinpäin eli yli yhden sekunnin kestävissä oikosuluissa suurin sallittu virta on alhaisempi, kuin valmistajan ilmoittama yhden sekunnin arvo. Kaapeleiden osalta terminen oikosulkuvirran kestävyys tarkastellaan taulukossa 20.

Taulukko 20. Suurimmat oikosulkuvirrat tarkastelupisteissä ja kaapeleiden suurimmat sallitut 1 sekunnin oikosulkuvirrat (Prysmian 2018, 2; Prysmian 2018, 3).

Tarkastelupiste	Oikosulkuvirta 3-vaihe [A]	Kaapeli J1-15	Kaapelin tyyppi	Suurin sallittu 1 sekunnin oikosulkuvirta [kA]	ok / ei
1.	22 741	J1	AMCMK 4x300+88	28,2	ok
		J12	AMCMK 4x300+88	28,2	ok
		J13	AMCMK 4x240+72	22,6	ei
2.	4 506	-	-	-	-
3.	4 987	J2	AHXAMK-W 3x95+35	17,4	ok
4.	21 709	J3	Kiskosilta, 120x15 mm	erillinen tarkastelu	ei
		J4	AMCMK 4x185+57	14,0	ei
		J7	AMCMK 4x240+72	22,6	ei
5.	13 602	J5	AMCMK 4x70+35	5,3	ei
6.	10 858	J6	MMJ 3x2,5	erillinen tarkastelu	ei
7.	508,1	-	-	-	-
8.	12 350	J8	AMCMK 4x70+35	5,3	ei
9.	6 451	J9	MMJ 3x2,5	erillinen tarkastelu	ei
10.	494,0	-	-	-	-

Kaapelit J1, J12 ja J2 kestävät sähkölaitteistossa esiintyvät suurimpien oikosulkuvirtojen termiset rasitukset. Kaapelien J1 ja J12 suojana on 355 A gG-sulakkeet, joiden toiminta-aika kuvan 33 käyrästäön mukaan 24,2 kA oikosulkuvirralla on alle 1 sekuntia. Kaapelin J2 suojana on katkaisija, joka toimii 0,4 sekunnissa. Taulukon 20 perusteella kaapelien J4, J5, J7, J8 ja J13 osalta tilannetta pitää tarkastella lisää. Pistorasiaryhmien MMJ-kaapelit J6 ja J9 tarkastellaan myös erikseen. Samoin kiskosilta J3. Lasketaan oikosulun suurin sallittu

kestoaika kaapeleille J4, J5, J7, J8 ja J13 sekä kiskosillalle J3 yhtälöllä 28. Kerroin k saadaan taulukosta 8. Kaapelin poikkipinta-ala [mm^2] ja oikosulkuvirta [A] sijoitetaan yhtälöön ilman yksikköä.

$$t_{J3} = (k \cdot A/I)^2 = \left(115 \cdot \frac{1\,800}{21\,709}\right)^2 = 90,92 \text{ s}$$

$$t_{J4} = (k \cdot A/I)^2 = \left(76 \cdot \frac{185}{21\,709}\right)^2 = 0,42 \text{ s}$$

$$t_{J5} = (k \cdot A/I)^2 = \left(76 \cdot \frac{70}{13\,602}\right)^2 = 0,15 \text{ s}$$

$$t_{J7} = (k \cdot A/I)^2 = \left(76 \cdot \frac{240}{21\,709}\right)^2 = 0,71 \text{ s}$$

$$t_{J8} = (k \cdot A/I)^2 = \left(76 \cdot \frac{70}{12\,350}\right)^2 = 0,19 \text{ s}$$

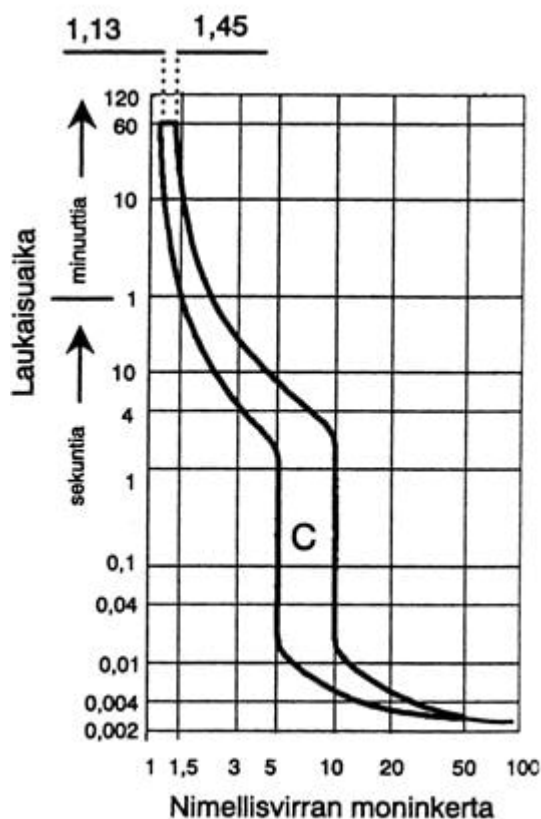
$$t_{J13} = (k \cdot A/I)^2 = \left(76 \cdot \frac{240}{22\,741}\right)^2 = 0,64 \text{ s}$$

Kaapelien J7 ja J13 sekä kiskosillan J3 osalta voidaan todeta, että ne kestävät suurimman oikosulkuvirran termisen rasituksen, koska oikosulku kytketään pois taulukon 18 mukaan 0,5 ja 0,4 sekunnissa. Kaapeleiden J4, J5 ja J8 osalta tarkastelua jatketaan kuvan 33 kahvasulakkeen valmistajan käyrästä avulla.

Kaapeleiden J4, J5 ja J8 suojana ovat gG-kahvasulakkeet. Kaapelia J4 suojaa 315 A gG-kahvasulake, jonka toiminta-aika kuvan 33 käyrästä mukaan 21,7 kA oikosulkuvirralla on alle 0,1 sekuntia. Kaapeleita J5 ja J8 suojaavat 125 A gG-kahvasulakkeet, jonka toiminta-aika kuvan käyrästä mukaan 12,3 kA oikosulkuvirralla on alle 0,1 sekuntia. Myös kaapelien J4, J5 ja J8 osalta voidaan todeta, että ne kestävät suurimman oikosulkuvirran termisen

rasituksen, koska oikosulku kytketään pois nopeammin kuin oikosulun suurin sallittu kesto-aika sallii.

Pistorasiaryhmien MMJ 3x2,5 kaapeleiden J6 ja J9 suojana ovat C-käyräiset 16 A johdonsuojakatkaisijat. Oikosulkuvirran poiskytkennän osalta tilannetta voidaan havainnollistaa johdonsuojakatkaisijan laukaisukäyrän avulla (kuva 45). Suurella oikosulkuvirralla johdonsuojakatkaisija toimii erittäin nopeasti ja oikosulkuvirta ei pääse termisesti rasittamaan kaapelia kuin erittäin lyhyen aikaa. Kuten aikaisemmin todettiin 10 kA katkaisukyvyyn omaavia johdonsuojakatkaisijoita voidaan käyttää suurempi virtaisissa keskuksissa, kunhan etukojena on gG-tyyppinen kahvasulake, joka rajoittaa virtaa vikatilanteessa. Tarkasteltavissa tilanteissa on 125 A gG-kahvasulakkeet ennen johdonsuojakatkaisijoita.



Kuva 45. Johdonsuojakatkaisijan laukaisukäyrä (Jokinen, M. 2021).

Kojeistojen osalta termisen oikosulkuvirran kestävyys lisäksi tulee huomioida oikosulkuvirran dynaamiset voimavaikutukset. Tarkastelu rajataan tämän opinnäytetyön tavoitteen

mukaisesti kohteeseen hankittavaan uuteen puistomuuntamoon. Sysäysoikosulkuvirta eli dynaaminen oikosulkuvirta pitää ottaa huomioon, koska sen voimavaikutukset voivat aiheuttaa mekaanisia vaurioita esimerkiksi keskuksen kiskostoissa. Vian alkuhetkellä oikosulkuvirran huippuarvo on suurempi kuin tehollisarvo. Oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvoa kutsutaan sysäysoikosulkuvirraksi. Aikaisemmin todettiin, että sen suuruus voi olla keskijänniteverkossa noin 2,5-kertaa ja pienjänniteverkossa noin 2-kertaa alkuoikosulkuvirran suuruinen.

Kohteeseen hankittavan uuden puistomuuntamon suurin oikosulkuvirta tarkastelujen perusteella on pienjänniteosassa 22 741 A ja keskijänniteosassa 4 506 A. Sysäysoikosulkuvirta \hat{i}_p lasketaan yhtälöllä 44. Puistomuuntamon pienjännitekeskuksen osalta kertoimen k yhtälön oikosulkuresistanssi ja oikosulkureaktanssi saadaan luvussa 6.3 lasketusta oikosulkuvirrasta yhtälöllä 41.

$$Z_{k3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{k3}} = \frac{400 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (22\,740,5 \angle -75,85^\circ \text{ A})} = (2,48 + j9,85) \text{ m}\Omega$$

Lasketaan kerroin k ja sysäysoikosulkuvirta $\hat{i}_{p\,400 \text{ V}}$ puistomuuntamon pienjännitekeskuksella.

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot R_k}{X_k}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot 2,48 \cdot 10^{-3} \Omega}{9,85 \cdot 10^{-3} \Omega}} = 1,48$$

$$\hat{i}_{p\,400 \text{ V}} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3} = 1,48 \cdot \sqrt{2} \cdot 22\,740,5 \text{ A} = 47\,600 \text{ A}$$

Puistomuuntamon keskijännitekojeiston osalta kertoimen k yhtälön oikosulkuresistanssi ja oikosulkureaktanssi saadaan yhtälöllä 41.

$$Z_{k3} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I_{k3}} = \frac{20\,000 \text{ V}}{\sqrt{3} \cdot (4\,506,39 \angle -67,26^\circ \text{ A})} = (0,99 + j2,36) \Omega$$

Lasketaan kerroin k ja sysäysoikosulkuvirta $\hat{i}_{p\,20 \text{ kV}}$ puistomuuntamon keskijännitekojeistossa.

$$k = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot R_k}{X_k}} = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{-3 \cdot 0,99 \Omega}{2,36 \Omega}} = 1,30$$

$$\hat{i}_{p\ 20\text{ kV}} = k \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k3} = 1,30 \cdot \sqrt{2} \cdot 4\ 506,39\ \text{A} = 8\ 277\ \text{A}$$

Sysäysoikosulkuvirran yhtälössä kertoimen k suuruus riippuu tarkastelupisteen R/X -suhteesta. Tässä tarkastelupisteen R/X -suhteeseen vaikuttavat syöttävät lähteet, kaapelit ja jakelumuuntaja. Luvussa 6.3, josta saatiin lähtöarvot sysäysoikosulkuvirran laskentaan, ei ollut käytettävissä yleisen 20 kV jakeluverkon oikosulkuimpedanssin resistiivisen ja reaktiivisen komponentin osuutta. Luvussa 6.3 käytettiin oletuksena lähdetietoon perustuvaa R/X -suhdetta. Lähteen tilanne vastaa hyvin tässä työssä tarkasteltavan kohteen tilannetta, jossa päämuuntaja on lähellä liityntäpistettä. Mahdollista virhettä arvioitiin laskemalla erilliseen tiedostoon suurimman kertoimen k antava R/X -suhde, joka vastaa täysin reaktiivispainotteista syöttävää jakeluverkkoa. Tällöin kertoimen k arvo puistomuuntamon pienjännitekeskuksella ei muutu kahden desimaalin tarkkuudella tarkasteltaessa ja puistomuuntamon keskijännitekojeistolla se nousee arvoon 1,33. Tällöin suurin mahdollinen virhe olisi 3 %.

Tulosten perusteella suositellaan uuden puistomuuntamon pienjännitekeskuksen nimellisvirraksi 2 000 A, oikosulkuvirran kestoisuudeksi terminen 30 kA, 1 s ja dynaaminen 60 kA. Vastaavasti uuden puistomuuntamon keskijännitekojeiston nimellisvirraksi 630 A, oikosulukestoisuudeksi terminen 8 kA, 1 s A ja dynaaminen 20 kA. Suositellut arvot ovat laskettuja arvoja jonkin verran suuremmat, koska ne antavat mahdollisuuden tulevaisuuden muutoksille jakeluverkossa.

Kaapeleiden kuormitettavuus pitää myös tarkastella. Tarkastelu rajataan tämän opinnäytetyön tavoitteen mukaisesti uusiin puistomuuntamon ja tuotantolaitteistojen kaapeleihin. Vanhan olemassa olevan sähkölaitteiston kaapelit on aikanaan mitoitettu ja ylikuormitussuojaus toteutettu niin, ettei kaapeleita kuormiteta liikaa.

Kaapeleiden kuormitettavuuden tarkastelu tehdään vertaamalla ylikuormitussuojan virta-asettelua ja toimintarajavirtaa kaapelin kuormitettavuuteen. Ylikuormitussuojan toimintarajavirta tulee olla enintään johdon jatkuvan kuormitettavuuden suuruinen. Kaapeleiden J1, J2, J13 ja J14 kuormitettavuus, suojalaitteiden arvot ja suurimmat kuormitusvirrat on esitetty taulukossa 21. Kuormitettavuuden arvot ovat julkaisun D1-2017 taulukosta 52.1 ja kaapelin

valmistajalta (STUL 2017, 226; Prysmian 2018, 2–3). Myös kaapelin asennustapa vaikuttaa kuormitettavuuteen. Kaapelit J1, J2, J13 ja J14 asennetaan maahan.

Tarkastelussa tulee huomioida, että gG-sulakkeita käytettäessä ylikuormitussuojaukseen kaapelin kuormitettavuuden tulee olla suurempi kuin gG-sulakkeen nimellisvirta. Esimerkiksi taulukossa 21 esiintyvää 355 A gG-sulaketta käytettäessä kaapelin kuormitettavuus tulee olla vähintään 392 A (STUL 2017, 137–138).

Taulukko 21. Kaapeleiden J1, J2, J13 ja J14 suurimmat kuormitusvirrat, kuormitettavuus ja ylikuormitussuojat.

	Tyyppi	Kaapelin suurin kuormitusvirta	Kaapelin asennustapa	Kaapelin kuormitettavuus asennustapa huomioiden	Suojalaite / kaapelin kuormitettavuus oltava
J1	2 kpl AMCMK 4x300+88	680 A / 2 = 340 A	maa-asennus D	430 A	gG-sulake 355 A / 392 A
J2	AHXAMK-W 3x95+35	14 A	maa-asennus D	300 A	Katkaisija / 16 A
J12	2 kpl AMCMK 4x300+88	680 A / 2 = 340 A	maa-asennus D	430 A	gG-sulake 355 A / 392 A
J13	AMCMK 4x240+72	216 A	maa-asennus D	297 A	Katkaisija / 250 A

Taulukosta havaitaan, että kaapelin J1 ja J12 kuormitettavuus 680 A kuormitusvirralla on riittävä. Rinnakkain kytkettyjä AMCMK 4x300+88 kaapeleita voidaan kuormittaa yhteensä 860 A kuormitusvirralla. Ylikuormitussuojaus toimii, kun molemmat rinnan kytketyt kaapelit ovat suojattu kolmella 355 A gG-sulakkeella. Kuormitettavuus voidaan todeta riittäväksi myös kaapeleiden J2 ja J13 osalta.

Kohteen 20 kV kojeiston katkaisija on ohjattu ylikuormitus- ja oikosulkusuojauksen suojarileen lisäksi myös maasulkureleellä. Uuden puistomuuntamon kaapelointi lisää keskijännitekaapeloinnin kokonaispituutta ja siten kaapeleiden tuottamaa maasulkuvirtaa jonkin verran. Rajataan maasulkusuojauksen tarkastelu tämän työn tavoitteen mukaisesti uuteen

puistomuuntamon kaapeliin. Vanhan olemassa olevan sähkölaitteiston keskijännitekaapelit on aikanaan mitattu ja maasulkureleen asettelu tehty vallinneen tilanteen mukaan.

Uutta AHXAMK-W 3x95+35 keskijännitemaakaapelia tulee 200 metriä lisää. Kaapelin käyttökapasitanssi C_0 saadaan valmistajalta (Prysmian 2018, 2). Uuden keskijännitekaapelin tuottama maasulkuvirta I_e voidaan laskea.

$$\begin{aligned} I_e &= \sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0 \cdot l \cdot U = \sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 0,22 \frac{\mu\text{F}}{\text{km}} \cdot 0,2 \text{ km} \cdot 20 \text{ kV} \\ &= 0,48 \text{ A} \end{aligned}$$

Maasulkureleen maasulkuvirran havahtumisen asettelua nostetaan uuden puistomuuntamon kaapelin tuottaman maasulkuvirran vaikutuksen verran 0,5 A. Käytännössä vaikutus on hyvin vähäinen, mutta tällä varmistetaan, että uuden kaapelin lisäys jakeluverkkoon ei aiheuta maasulkureleen väärää laukeamista.

7 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli tuottaa spesifistä tietoa suunnittelun tueksi sähköenergian tuotantolaitteistojen liittämistä ja yhteensovittamisesta valmiiseen olemassa olevaan sähköjakeluverkkoon sekä varmistaa erään kohteen sähköverkon suojausten vaatimusten mukainen toimiminen. Tätä varten tarkasteltiin kolmen erilaisen tuotantolaitteiston olennaisimmat ominaisuudet, jotka tulee ottaa huomioon ennen hankintaa. Säädöstausta ja sähköjakeluverkon komponentit, vikatyypit ja laskentamenetelmät käytiin läpi siltä osin kuin se oli opinnäytetyön tavoitteen asettelun kannalta tarpeellista. Ylivirta- ja vikasuojauksen toteutuminen tarkasteltiin käytännössä kohteen osalta. Kohteeseen tehtävät tuotantolaitteistojen hankinnat täsmentyivät ja etenivät opinnäytetyön edetessä. Opinnäytetyöstä saatuja havaintoja tullaan Puolustuskiinteistöissä käyttämään tulevien vastaavien hankkeiden suunnittelun perustana.

Opinnäytetyössä havaittiin, että diesel-varavoimakoneen tai useamman varavoimakoneen muodostama kokonaisuus on erinomainen perusratkaisu sähköenergian tuotantoon normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa, kun yleinen sähköjakelu on keskeytynyt. Kun kohteessa on varatuotantojärjestelmä, voidaan keskeytyskriittistä toimintaa jatkaa saarekkeessa. Dieselmoottorin pyörittämä tahtigeneraattori pystyy syöttämään nimellisvirtaansa nähden huomattavasti suuremman noin 3-kertaisen oikosulkuvirran. Tämä on tärkeä seikka, koska myös saarekekäytössä sähköverkon suojausten pitää toimia vaatimusten mukaisesti. Virransyöttökykyä vaaditaan vikatilanteessa oikosulussa olevan sähköjakeluverkon osan suojalaitteen toimimiseksi. Suojauksen tulee toimia selektiivisesti, jolloin vikapaikka pystytään kohtuudella löytämään. Kuormitettavuuden ja oikosulkuvirran tarve kohteessa pitää selvittää ennen varavoimakoneen hankintaa. Oikein mitoitettu diesel-varavoimakone voi hoitaa saarekkeen energian tuotannon sähköturvallisesti lähes yleisen jakeluverkon tavoin. Opinnäytetyössä tarkastellun kohteen oikosulkuvirtojen tarkastelussa havaittiin, että tehontarpeen mukaan valitun diesel-varavoimakoneen syöttämä oikosulkuvirta on pienempi kuin yleisen sähköverkon syöttämä oikosulkuvirta. Tämä tuo haasteita suojauksen toteuttamiseen selektiivisesti. Normaalioloissa diesel-varavoimakonetta ei yleensä kannata käyttää huonon hyötysuhteen takia. Syksyn 2022 aikana sähköenergian jyrkkä hinnan nousu on tehnyt tästäkin harkinnan arvoisen vaihtoehdon. Kohteen uusi siirrettävä varavoimalaitteisto muodostuu yhdestä 20 jalan merikonttiin asennetusta 500 kW dieselgeneraattorista.

Muut tarkasteltavat sähköenergian tuotantolaitteistot olivat aurinkosähkövoimala ja akkuenergiavarasto. Molemmat laitteistot syöttävät tuottamaansa sähköenergiaa verkkosuuntaajansa välityksellä. Verkkosuuntaajalla ei pääsääntöisesti voida syöttää sen nimellisvirtaa suurempaa oikosulkuvirtaa. Jo ennen tutkimusta oli selvää, että saarekekäyttö ei voi olla aurinkosähkövoimalan varassa, koska auringon säteilyn vaihtelu rajoittaa sen käyttöä. Kuitenkin ajateltiin, että energiavarasto voi mahdollistaa katkottoman sähköverkon toteutumisen saarekkeessa, kun yleinen sähkönjakelu on keskeytynyt. Jotta tähän tavoitteeseen olisi päästy energiavaraston olisi pystyttävä kattamaan koko saarekkeen huipputehontarve ja lisäksi sen olisi pystyttävä syöttämään jakeluverkon vaatima oikosulkuvirta vikatapauksessa. Lähemmin asiaa tarkasteltaessa havaittiin, että molempien edellä mainittujen vaatimusten toteutuminen tarkoittaa käytännössä, että akkuenergiavarastoa ei mitoiteta kohteen tehontarpeen, vaan oikosulkuvirtavaatimuksen mukaan, koska akkuenergiavarasto ei kykene syöttämään energiakapasiteettiinsä nähden merkittävää oikosulkuvirtaa. Tämä olisi johtanut energiavaraston nimellistehon monikertaiseen ylimitoittamiseen, tarkasteltavan kohteen tehontarpeeseen verrattuna. Tämä ei ollut teknistaloudellisesti perusteltavissa. Lopulta kohteeseen päädyttiin hankkimaan aurinkosähkövoimalan tuotantoa tasaava akkuenergiavarasto, jonka kapasiteetiksi täsmentyi 180 kWh ja syöttötehoksi 150 kW. Energiavaraston akusto toteutetaan NMC-akkukemialla, jonka vahvuuksia on korkea energiatiheys ja hyötysuhde sekä vanhempiin akkukemioihin verrattuna selvästi pidempi syklinen käyttöikä. Valittujen NMC-akkujen suositeltu käyttölämpötila on $23 \pm 4^\circ\text{C}$. NMC-akuston hallintajärjestelmä rajoittaa tarvittaessa lataus- ja purkausvirtaa estäen akkujen liiallisen lämpenemisen. Merikonttiin sijoitettavalle akusto- ja suuntaajatekniikalle asennetaan suljettuun ilmankiertoon perustuva jäähdytysjärjestelmä.

Kohteen aurinkosähkövoimala muodostuu 600 kWp maa-asenteisesta aurinkopaneeliken-
tstä, jonka tuotto on optimoitu viidellä 100 kWp aurinkosähköinvertterillä. Optimointi on kannattavaa, koska paneelit tuottavat harvoin nimellistä tehoa. Tämä johtuu muun muassa paneelien lämpenemisestä. Kesäpäivien tuotantohuippuaikoina paneelit ylittävät standardi testiolosuhteiden lämpötilan 25°C . Standardi testiolosuhteet ylittävä lämpötila laskee tuotantotehoa noin $0,4 \text{ } \%/^\circ\text{C}$, mikä tarkoittaa, että huipputehot leikataan jo tasasähköpuolella, eikä invertteri leikkaa energiaa yhtä paljon. Tämän lisäksi auringon säteily standardi testiolosuhteissa on 1000 W/m^2 , mikä on Ilmatieteen laitoksen mukaan erittäin korkea intensiteetti. Aurinkosähköinvertteri toimii parhaalla hyötysuhteella nimellistehollaan. On myös tärkeää huomioida, että alimitoitettu aurinkosähköinvertteri leikkaa vain tuotannon yli

nimellistehon, ei siis koko tuotantoa. Tämä on myös syy siihen, miksi invertteriä ei voi ylikuormittaa. Kohteen aurinkosähkövoimala toimii yleisen sähköverkon rinnalla uusiutuvan sähköenergian lähteenä ja energiavarasto sen rinnalla tuotantoa tasaavana laitteistona. Tällöin sähköenergian tuotanto vastaa sähkömarkkinalain määritelmän mukaista pientuotantoa. Tuotettu sähköenergia kulutetaan Puolustuskiinteistöjen omistamissa kiinteistöissä jakeluverkon alueella. Normaaliolojen häiriötilanteissa ja poikkeusoloissa aurinkosähkövoimala voi toimia diesel-varavoimakoneen rinnalla, jolloin se pienentää polttoaineen kulutusta.

Kaikkien kolmen tuotantolaitteiston ominaisuudet ja kyvykyys vikatilanteessa tarkasteltiin lopuksi käytäntöön sovellettavassa tilanteessa. Opinnäytetyöhön kuului erään kohteen sähkölaitteiston ylivirta- ja vikasuojauksen vaatimusten mukaisuuden tarkastelu. Tarkastelu rajattiin käsittämään uusien tuotantolaitteistojen ja puistomuuntamon osuus sähkölaitteistosta. Vanha olemassa oleva sähköverkosto ja uudet tuotantolaitteistot muodostavat kokonaisuuden, joten vanhaa jakeluverkon osaa piti joiltain osin tarkastella. Sähkölaitteiston tarkasteltiin neljässä käyttötilanteessa sähköenergian tuotantolähteitä vaihdellen ja yhdistellen. Kaksi käyttötilannetta tarkasteltiin saarekekäytössä ja kahdessa käyttötilanteessa yleinen jakeluverkko oli kytketty, jolloin saatiin referenssitietoa analysointia varten. Kaikissa tarkasteltavissa kytkentätilanteissa laskettiin yksi-, kaksi- ja kolmivaiheinen oikosulkuvirta kymmenessä eri tarkastelupisteessä. Yleisesti tuloksista havaitaan, että syöttävän lähteen oikosulkuvirran syöttökyvyllä on oleellinen merkitys lopputulosten kannalta. Keskijännitekaapeleiden impedanssi on lähes merkityksetön, kun taas jakelumuuntajan oikosulkuimpedanssin merkitys on huomattavasti suurempi. Pienjännitekaapeleiden impedanssin vaikutus oikosulkuvirtaan on huomattava riippuen kaapelin poikkipinta-alasta ja pituudesta. Oikosulkuvirta kohteen pääkeskuksella eri kytkentätilanteissa vaihteli todella paljon, jopa 10-kertaisesti. Kuitenkin ero kauimmaisissa pienjänniteverkon tarkastelupisteissä oli hyvin pieni, vain alle viisi ampeeria. Mitä kauemmas pienjänniteverkossa mennään sähköenergiaa syöttävältä lähteeltä sitä, merkitsevämmäksi tulee pienjänniteverkon kaapeleiden impedanssin osuus.

Tulosten perusteella pienimmät oikosulkuvirrat tarkastelupisteissä havaitaan kytkentätilanteessa, jossa uusi 500 kW diesel-varavoimakone toimii yksin saarekekäytössä. Tällöin varavoimakoneen generaattorin syöttämä 2 900 A oikosulkuvirta pienenee kohteen pääkeskukselta tarkasteltaessa yksivaiheisen oikosulkuvirran arvoon 2 200 A. Tällöin pääkeskuksen suurimman sulakelähdön kaapelin päässä yksivaiheinen oikosulkuvirta on 1 970 A, nousukeskuksen suurimman sulakelähdön päässä 1 350 A ja pisimmän pistorasiaryhmän päässä

220 A. Pääkeskuksen suurimman sulakelähdön osalta oikosulkuvirta ei ole riittävä nopean poiskytketymisen toteutumiseksi vikasuojauksen kannalta vaadituissa 5 sekunnin toiminta-ajassa. Kuitenkin tarkastelun perusteella havaittiin, että nousu- ja ryhmäkeskustasolla, jossa suojaus on toteutettu gG-sulakkeilla ja johdonsuojakatkaisijoilla, ylivirta- ja vikasuojaus toimii vaaditusti ja selektiivisesti. Myös katkaisijoilla suojattu jakeluverkon osuus toimi vaatimusten mukaan. Kokonaisuus ei kuitenkaan toimi selektiivisesti, koska pääkeskuksen suurimman sulakelähdön kaapelin päässä aiheutuvassa viassa liian suuri osa jakeluverkkoa voi erottua vaikeuttaen vikapaikan löytymistä. Tarkastelun perusteella suositellaan, että tässä kohteessa saarekekäytössä ajetaan aina kahta varavoimakonetta rinnakkain. Tällöin oikosulkuvirratt ovat riittävät suojalaitteiden toimimiseksi vaaditusti ja selektiivisesti. Tätä ehdotusta tukee sekin seikka, että käytännössä oikosulkuvirta voi olla alhaisempi kuin mitä laskelmin on määritelty, johtuen vikapaikan impedanssista. Laskelmissa vikaimpedanssin oletetaan olevan nolla ohmia. Käytännössä esimerkiksi valokaariviassa vikaimpedanssi voi olla tätä suurempi, jolloin oikosulkuvirta on täten pienempi.

Tulosten perusteella havaitaan, että yleinen sähköverkko rinnallaan aurinkovoimalaitos ja energiavarasto kykenee syöttämään suurimman oikosulkuvirran tarkastelluista kytkentätilanteista. Suurin oikosulkuvirran arvo saatiin kolmivaiheisesta tarkastelusta. Tulosten perusteella aurinkovoimalaitoksen ja energiavaraston osuus suurimpiin oikosulkuvirtoihin on pieni. Suurin oikosulkuvirta rasittaa termisesti ja dynaamisesti kaapeleita, suojalaitteita ja kojeistoja vikatilanteessa. Tarkastelujen perusteella sähkölaitteisto kestää suurimpien oikosulkuvirtojen rasitukset. Myös kaapeleiden kuormitettavuus on riittävä ja ylikuormitussuojaus toteutettu niin, ettei kaapeleita kuormiteta liikaa. Tarkastelujen yhteydessä annettiin suosituksia suojalaitte- ja kojeistovalintoihin. Tarkastelujen perusteella havaittiin myös, että joidenkin suojalaitteiden suositeltavat asetteluarvot vaihtelivat eri kytkentätilanteissa. Samoin sähköenergian syöttösuunta suojalaitteen läpi. Tämän takia katkaisijoille, joilla suojaus toteutetaan pitää olla omat suojareleet tai suojareleessä pitää olla mahdollisuus kaksille asetuille ja energian syöttösuunnille.

Käytännössä kohteen suojauksien toimivuuden tarkastelu, kun kyseessä on valmis olemassa oleva sähkölaitteisto, vaatii dokumentteihin tutustumista, laskentaa ja kenttätyötä. On hyvä muistaa, että pienjänniteverkkoon tuotettua, keskijänniteverkon yli siirrettyä, vikavirtaa ei voida sähköasennustesterillä mittaamalla todentaa, vaan siihen tarvitaan verkostolaskentaa. Tämä johtuu siitä, että sähköasennustesteri mittaa silmukkaimpedanssia, jonka perusteella

se laskee oikosulkuvirran suuruuden eli se olettaa jakelumuuntajaa syöttävän verkon olevan ns. jäykkä verkko eli $Z_k \approx 0 \Omega$. Näin ei kuitenkaan ole varatuotantolaitteistoilla keskijänniteverkon yli pienjänniteverkkoa syötettäessä. Yleensä varatuotantojärjestelmillä ei päästä yleisen sähköverkon syöttämän oikosulkuvirran tasolle. Tässä opinnäytteessä kuvatun kaltaisissa kohteissa verkostonlaskenta tulee tehdä, kun vanhaan olemassa olevaan sähkölaitteistoon lisätään sähköenergian tuotantolaitteistoja. Verkostonlaskentaa voidaan helpottaa ja toimintaa kehittää hankkimalla avuksi soveltuva laskentaohjelmisto. Verkostonlaskentaohjelmisto ei voi kuitenkaan korvata ymmärrystä sähköjakeluverkon ja sähköenergian tuotantolaitteistojen ominaisuuksista ja mallintamisesta.

Kohteeseen toteutettavan hankkeen valmistuessa voidaan tarkastelua jatkaa akkuenergiavarastosta saatavan hyödyn arvioinnin kannalta. Arvioinnin kannalta on oleellista tarkastella käyttötilanteita saarekekäytössä. Toimiiko dieselgeneraattori ja aurinkosähkövoimala moitteetta rinnankäytössä ilman tasaavaa akkuenergiavarastoa? Akkuenergiavarasto on hankinta- ja elinkaarikustannuksiltaan merkittävä osa hankkeen kokonaiskustannuksista. Energiavarastosta saatava hyöty on tässä kohteessa vähäinen, jos sitä ei tarvita dieselgeneraattorin ja aurinkosähkövoimalan rinnalla saarekekäytössä. Katkoton sähköjakelu tärkeimmille keskeytyskriittisille laitteille voidaan tuottaa ilman energiavarastoa kohdistetusti paikallisilla UPS-laitteistoilla. Jatkossa on silti mielenkiintoista seurata varsinkin superkondensaattoreilla toteutettujen energiavarastoratkaisujen kehitystä. Elinkaarikustannusten kannalta merkittävä käyttösyklien määrä on superkondensaattorilla todella suuri, ainakin nykyisiin akkuihin verrattuna. Voitaisiinko varavoimakohteessa yleisen sähköverkon katketessa superkondensaattoriin perustuvalla energiavarastolla paremmin kattaa dieselgeneraattorin käynnistyksen melko lyhyt noin 30 sekunnin viiveaika? Superkondensaattorilla voidaan syöttää suurta tehoa, mutta vain lyhyen aikaa, koska sen energiakapasiteetti on suhteessa pieni tehoon nähden.

Tavoitteet tämän opinnäytetyön osalta saavutettiin, mutta valmiuden ja varautumisen kehittäminen myös sähköverkostojen osalta jatkuu Puolustuskiinteistöissä. Näin ollen tietoa ja kokemusta erilaisista ratkaisuista tarvitaan ja tullaan varmasti saamaan jatkossa vielä lisää. Uusiutuvan energian pientuotannon lisääminen sähköverkostoihin on tullut yhä kannattavamaksi nykyisellä sähkön hintaennusteella. Harkitulla ja hyvin suunnitellulla hankkeella voidaan samalla parantaa sekä kohteen sähköverkon resilienssiä että energiatehokkuutta. Samalla voidaan pienentää energian tuotannosta syntyviä päästöjä.

Lähteet

- ABB. 2000. Teknisiä tietoja ja taulukoita. 9.p. Vaasa.
- ABB. 2001. Kahvasulakkeet 2-1250 A gG- ja aM-tyypit. Luettu 16.8.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- ABB. 2009. Kahvasulakkeet 2-1600 A gG- ja aM-tyypit. Luettu 16.8.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- ABB. 2022. Keskijännitekojeistojen valokaarisuojaus. Luettu 23.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- ABB. 2022. Selectivity techniques. The different selectivity techniques, also from the operational point of view. Saatavissa [verkosta](#).
- Acosta-Cambranis, F., Zaragoza, J., Romeral, L. & Berbel, N. 2020. Comparative analysis of SVM techniques for a five-phase VSI based on SiC devices. *Energies*, 2020, Vol.13, s.1-25. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).
- Anjala, R. 2008. Pienjänniteverkon ja jakelumuuntajan sähköinen mitoittaminen SA 2:08. Helsinki, Energiateollisuus ry. Luettu 20.6.2022.
- Battery University. 2021. Types of Lithium-ion. Luettu 12.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Bioenergianeuvoja. 2022. Energia-arvot ja muuntokertoimet. Luettu 14.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Blomqvist, K., Härkönen, J. & Makkonen, T. 2018. Sähkön varastointitekniikat- ja markkinat. Pdf-tiedosto. Luettu 6.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Chatzivasileiadi, A., Ampatzi, E. & Knight, I. 2013. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2013-09, Vol.25, s. 814-830. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).
- Danfoss. 2021. EC-C1200-450 Electric converter data sheet. Luettu 3.6.2022. Saatavana [verkosta](#).

Dhundhara, S., Verma, Y., Williams, S. 2018. Techno-economic analysis of the lithium-ion and lead-acid battery in microgrid systems. Energy conversion and management, 2018-12-01, Vol.177, s.122-142. Luettu 12.7.2022.

Energiateollisuus ry. 2021. Sähkön pientuotannon tekniset vaatimukset. Luettu 5.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Enico. 2022. Akkuenergiavaraston verkkosuuntaaja Danfoss NXA03256. Mitoituslaskelma urakka-aineistosta. Luettu 1.8.2022.

Fingrid. 2018. Voimalaitosten järjestelmätekniiset vaatimukset VJV2018. Luettu 5.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Fingrid. 2020. Sähkövarastojen järjestelmätekniiset vaatimukset. Luettu 15.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Fronius. 2022. Fronius Eco 27.0-3-S. Tekninen tiedosto. Luettu 6.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

FutureBridge. 2021. Power to methane: current scenario in EU. Luettu 19.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Hakanen, P., Hakala, P., Kortelainen, T., Kousa, P., Laaksonen, M., Nurmi, M. & Piippo, E. 2019. Varavoimakoneet- ja laitokset. 4.p. Espoo, Grano.

Hayes, P., Arevalo, J. 2017. Benefits of energy storage reach beyond the integration of renewables. Windpower engineering and development, 2017-7-20. Saatavissa [verkosta](#).

Hietalahti, L. 2011. Muuntajat ja sähkökoneet. 1.p. Tampere, Tammertekniikka.

Hietalahti, L. 2011. Tehoelektroniikan perusteet. 1.p. Tampere, Tammertekniikka.

International Electrotechnical Commission. 2011. Electrical energy storage. Pdf-tiedosto. Luettu 6.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Jäger, K., Isabella, O., Smets, A., van Swaaij, R. & Zeman, M. 2014. Solar energy fundamentals, technology, and systems. Delft University of Technology. Luettu 12.7.2022.

Kauppinen, J., Wikström, R. & Hietalahti, L. 2020. Generaattorit. Tampere, Tammertekniikka.

- Kaderbhai, M. 2017. Understanding ISO 8528-1 generator set ratings. Luettu 20.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Kore Power. 2022. Energy storage. Pinnacle Ridge solar and storage. Luettu 8.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Kore Power. 2022. Energy storage. NMC Cell. Luettu 8.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Kore Power. 2022. Energy storage. Technical specs. Luettu 8.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Lakervi, E. Partanen, J. 2009. Sähköjaketekniikka. 2. p. Helsinki, Hakapaino.
- Lale Zeynelgil, H. 2016. Performance of superconducting synchronous generator for three-phase short-circuit at its terminals. Journal of electrical and electronic engineering. Vol. 4, nro 3, s. 44-50. Saatavissa [verkosta](#).
- Lassila, L. 2021. Electrical energy storages. Pdf-tiedosto. Electric and hybrid vehicle powertrains -opintojakso. LUT Yliopisto. Luettu 1.6.2022.
- Luthander, R. Widén, J. Nilsson, D. Palm, J. 2015. Photovoltaic self-consumption in buildings. A review, Volume 142, 15 March 2015, s. 80-94. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).
- Machinery. 2022. Kohler SDMO KD-sarjan varavoimakoneet. Luettu 18.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Mbali, L., Dzobo, O. 2021. Design of an off-grid hybrid PV/diesel energy system with battery storage for electrification of a remote region. IEEE AFRICON, 2021-09-13, s.1-6. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).
- Or, T., Gourley, S., Kaliyappan, K., Yu, A. & Chen, Z. 2019. Recycling of mixed cathode lithium-ion batteries for electric vehicles: Current status and future outlook. Luettu 11.7.2022. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).
- Prysmian Group. 2018. Kaapelin tekninen tiedosto. AHXAMK-W 20 kV. Luettu 7.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Prysmian Group. 2018. Kaapelin tekninen tiedosto. AMCMK 400 V. Luettu 10.8.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Prysmian Group. 2018. Kaapelin tekninen tiedosto. AXCMK-HF 400 V. Luettu 18.8.2022. Saatavissa [verkosta](#).

- Ponte, P. 2019. Technical Information from Cummins. Transient performance of generating sets. Luettu 21.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- PVshop.eu. 2022. Example of a grid-connected photovoltaic installation and surge protection. Luettu 6.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Pyrhönen, J., Jokinen, T. & Hrabovcová, V. 2008. Design of rotating electrical machines. John Wiley & Sons.
- Sesko. 2022. Standardi ehdotus. SFS 6000 2022 Pienjännitesähköasennukset. Sähkötekniikan alan kansallinen standardointijärjestö. Luettu 26.7.2022.
- SFS-EN 62485-2. 2018. Akkujen ja akkuasennusten turvallisuusvaatimukset. Osa 2 paikalliset. SFS-EN IEC 62485-2:2018.
- SFS 6000-4-41. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto.
- SFS 6000-4-43. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 4-43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto.
- SFS 6000-5-52. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Johtojärjestelmät. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto.
- SFS 6000-5-53. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 5-53: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Erottaminen, kytkentä ja ohjaus. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto.
- SFS 6000-7-729. 2017. Pienjännitesähköasennukset. Osa 7-729: Erikoistilojen ja -asennusten vaatimukset. Jakokeskusten asentaminen. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto.
- SFS 6001. 2018. Suurjännitesähköasennukset. Helsinki, Suomen standardisoimisliitto.
- SKS Suomalaisten kemistien seura. 2020. Professori Ulla Lassin haastattelu. Suomestakouuden akkuteknologian edelläkävijä. Luettu 11.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).
- Solnet. 2022. Aurinkosähkövoimalan ja generaattorin rinnankäyttö. Kuva urakka-aineistosta. Luettu 1.8.2022.
- Stamford. 2010. Tahtigeneraattorin tekninen tiedosto. Stamford HCI 534F/544F. Luettu 1.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Starlight Power. 2018. Generator structure diagram -kuva. Luettu 19.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

STUL. 2017. D1-2017 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. 25. p. Helsinki, Painokurki.

Sähköenergialiitto. 1994. Verkostosuositus SA 5:94. Keski-jänniteverkon sähköinen mitoittaminen. Helsinki, Sähköenergialiitto ry. Luettu 20.2.2022.

Jokinen, M. 2021. Sähkösuunnittelua. Johdonsuojakatkaisijat. Luettu 15.9.2021. Saatavissa [verkosta](#).

Teodorescu, R., Liserre, M. & Rodriguez, P. 2011. Grid converters for photovoltaic and wind power systems. John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, United Kingdom. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).

Trevizan, R., Headley, A., Geer, R., Atcitty, S. & Gyuk, I. 2021. Integration of energy storage with diesel generation in remote communities. MRS energy & sustainability, 2021-10-12, Vol.8, nro 2, s. 57-74. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).

Tukes. 2019. Luettelo S10-2019. Sähkölaitteiston turvallisuutta ja sähkötyöturvallisuutta koskevat standardit. Luettu 20.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Valio, J. 2019. Akkuekosysteemi – nykytilaselvitys. Pirkanmaan liitto. Luettu 11.7.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Väisänen, J., Kosonen, A., Ahola, J., Sallinen, T. & Hannula, T. 2019. Optimal sizing ratio of a solar PV inverter for minimizing the levelized cost of electricity in Finnish irradiation conditions. Luettu 9.6.2022. Saatavissa [LUT Tiedekirjastosta](#).

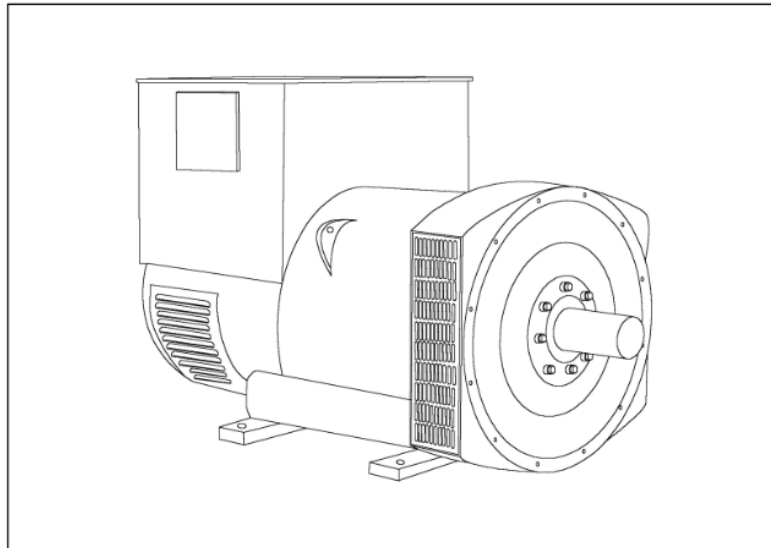
World Energy Council. 2016. Resources E-storage: Shifting from cost to value wind and solar applications: Luettu 17.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Zhao, Y., An, A., Xu, Y., Wang, Q. & Wang, M. 2021. Model predictive control of grid-connected PV power generation system considering optimal MPPT control of PV modules. Protection and control of modern power systems vol.6, nro 32. Luettu 9.6.2022. Saatavissa [verkosta](#).

Liite 1. Varavoimakoneen generaattori Stamford HCI544 (Stamford 2010).



HCI 534F/544F - Technical Data Sheet



HCI534F/544F

SPECIFICATIONS & OPTIONS

STAMFORD

STANDARDS

Stamford industrial generators meet the requirements of BS EN 60034 and the relevant section of other international standards such as BS5000, VDE 0530, NEMA MG1-32, IEC34, CSA C22.2 100, AS1359. Other standards and certifications can be considered on request.

VOLTAGE REGULATORS

AS440 AVR - STANDARD

With this self-excited system the main stator provides power via the Automatic Voltage Regulator (AVR) to the exciter stator. The high efficiency semi-conductors of the AVR ensure positive build-up from initial low levels of residual voltage. The exciter rotor output is fed to the main rotor through a three-phase full-wave bridge rectifier. The rectifier is protected by a surge suppressor against surges caused, for example, by short circuit or out-of-phase paralleling. The AS440 will support a range of electronic accessories, including a 'droop' Current Transformer (CT) to permit parallel operation with other ac generators.

MX341 AVR

This sophisticated AVR is incorporated into the Stamford Permanent Magnet Generator (PMG) control system. The PMG provides power via the AVR to the main exciter, giving a source of constant excitation power independent of generator output. The main exciter output is then fed to the main rotor through a full wave bridge, protected by a surge suppressor. The AVR has in-built protection against sustained over-excitation, caused by internal or external faults. This de-excites the machine after a minimum of 5 seconds. An engine relief load acceptance feature can enable full load to be applied to the generator in a single step. If three-phase sensing is required with the PMG system the MX321 AVR must be used. We recommend three-phase sensing for applications with greatly unbalanced or highly non-linear loads.

MX321 AVR

The most sophisticated of all our AVRs combines all the features of the MX341 with, additionally, three-phase rms sensing, for improved regulation and performance. Over voltage protection is built-in and short circuit current level adjustments is an optional facility.

WINDINGS & ELECTRICAL PERFORMANCE

All generator stators are wound to 2/3 pitch. This eliminates triplen (3rd, 9th, 15th ...) harmonics on the voltage waveform and is found to be the optimum design for trouble-free supply of non-linear loads. The 2/3 pitch design avoids excessive neutral currents sometimes seen with higher winding pitches, when in parallel with the mains. A fully connected damper winding reduces oscillations during paralleling. This winding, with the 2/3 pitch and carefully selected pole and tooth designs, ensures very low waveform distortion.

TERMINALS & TERMINAL BOX

Standard generators are 3-phase reconnectable with 12 ends brought out to the terminals, which are mounted on a cover at the non-drive end of the generator. A sheet steel terminal box contains the AVR and provides ample space for the customers' wiring and gland arrangements. It has removable panels for easy access.

SHAFT & KEYS

All generator rotors are dynamically balanced to better than BS6861:Part 1 Grade 2.5 for minimum vibration in operation. Two bearing generators are balanced with a half key.

INSULATION/IMPREGNATION

The insulation system is class 'H'. All wound components are impregnated with materials and processes designed specifically to provide the high build required for static windings and the high mechanical strength required for rotating components.

QUALITY ASSURANCE

Generators are manufactured using production procedures having a quality assurance level to BS EN ISO 9001.

The stated voltage regulation may not be maintained in the presence of certain radio transmitted signals. Any change in performance will fall within the limits of Criteria 'B' of EN 61000-6-2:2001. At no time will the steady-state voltage regulation exceed 2%.

DE RATES

All values tabulated on page 8 are subject to the following reductions

5% when air inlet filters are fitted.
3% for every 500 metres by which the operating altitude exceeds 1000 metres above mean sea level.
3% for every 5°C by which the operational ambient temperature exceeds 40°C.

Note: Requirement for operating in an ambient exceeding 60°C must be referred to the factory.

NB Continuous development of our products entitles us to change specification details without notice, therefore they must not be regarded as binding.

Front cover drawing typical of product range.

HCI534F/544F**STAMFORD****WINDING 311**

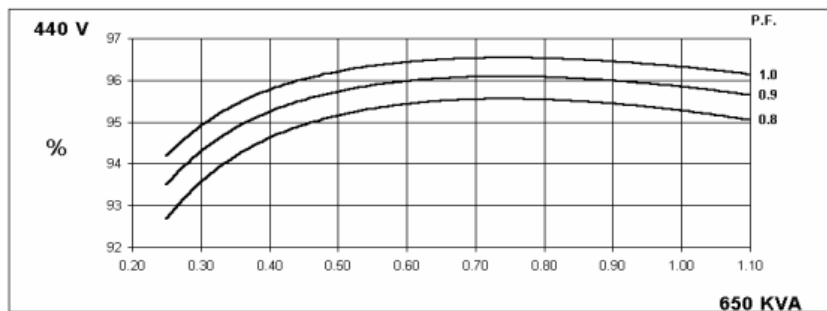
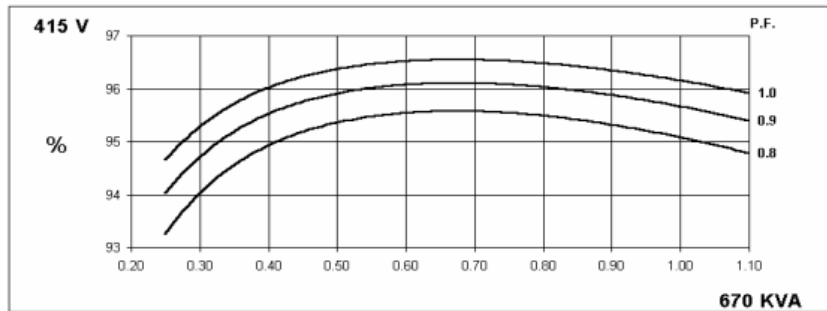
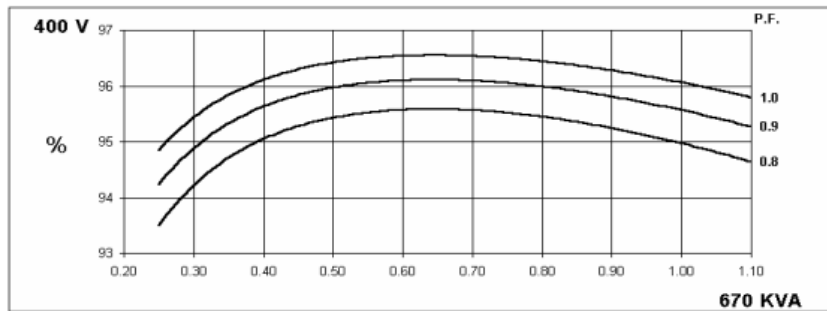
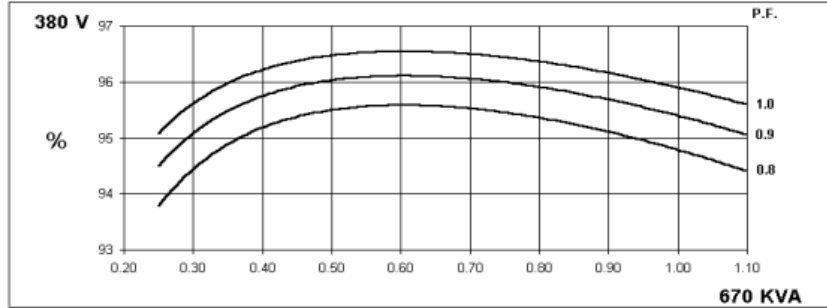
CONTROL SYSTEM	SEPARATELY EXCITED BY P.M.G.							
A.V.R.	MX321	MX341						
VOLTAGE REGULATION	± 0.5 %	± 1.0 %	With 4% ENGINE GOVERNING					
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	REFER TO SHORT CIRCUIT DECREMENT CURVES (page 7)							
CONTROL SYSTEM	SELF EXCITED							
A.V.R.	AS440							
VOLTAGE REGULATION	± 1.0 %	With 4% ENGINE GOVERNING						
SUSTAINED SHORT CIRCUIT	SERIES 4 CONTROL DOES NOT SUSTAIN A SHORT CIRCUIT CURRENT							
INSULATION SYSTEM	CLASS H							
PROTECTION	IP23							
RATED POWER FACTOR	0.8							
STATOR WINDING	DOUBLE LAYER LAP							
WINDING PITCH	TWO THIRDS							
WINDING LEADS	12							
STATOR WDG. RESISTANCE	0.0037 Ohms PER PHASE AT 22°C SERIES STAR CONNECTED							
ROTOR WDG. RESISTANCE	2.16 Ohms at 22°C							
EXCITER STATOR RESISTANCE	17 Ohms at 22°C							
EXCITER ROTOR RESISTANCE	0.092 Ohms PER PHASE AT 22°C							
R.F.I. SUPPRESSION	BS EN 61000-6-2 & BS EN 61000-6-4, VDE 0875G, VDE 0875N. refer to factory for others							
WAVEFORM DISTORTION	NO LOAD < 1.5% NON-DISTORTING BALANCED LINEAR LOAD < 5.0%							
MAXIMUM OVERSPEED	2250 Rev/Min							
BEARING DRIVE END	BALL. 6220 (ISO)							
BEARING NON-DRIVE END	BALL. 6314 (ISO)							
	1 BEARING				2 BEARING			
WEIGHT COMP. GENERATOR	1685 kg				1694 kg			
WEIGHT WOUND STATOR	805 kg				805 kg			
WEIGHT WOUND ROTOR	684 kg				655 kg			
WR ² INERTIA	10.033 kgm ²				9.7551 kgm ²			
SHIPPING WEIGHTS in a crate	1775 kg				1780kg			
PACKING CRATE SIZE	166 x 87 x 124(cm)				166 x 87 x 124(cm)			
	50 Hz				60 Hz			
TELEPHONE INTERFERENCE	THF<2%				TIF<50			
COOLING AIR	1.035 m ³ /sec 2202 cfm				1.312 m ³ /sec 2780 cfm			
VOLTAGE SERIES STAR	380/220	400/231	415/240	440/254	416/240	440/254	460/266	480/277
VOLTAGE PARALLEL STAR	190/110	200/115	208/120	220/127	208/120	220/127	230/133	240/138
VOLTAGE SERIES DELTA	220/110	230/115	240/120	254/127	240/120	254/127	266/133	277/138
kVA BASE RATING FOR REACTANCE VALUES	670	670	670	650	738	775	800	825
X _d DIR. AXIS SYNCHRONOUS	2.90	2.62	2.43	2.10	3.33	3.13	2.95	2.80
X' _d DIR. AXIS TRANSIENT	0.16	0.14	0.13	0.11	0.16	0.15	0.14	0.13
X'' _d DIR. AXIS SUBTRANSIENT	0.11	0.10	0.09	0.08	0.11	0.10	0.10	0.09
X _q QUAD. AXIS REACTANCE	2.42	2.19	2.03	1.75	2.66	2.50	2.36	2.23
X'' _q QUAD. AXIS SUBTRANSIENT	0.25	0.23	0.21	0.18	0.31	0.29	0.27	0.26
X _L LEAKAGE REACTANCE	0.05	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04
X ₂ NEGATIVE SEQUENCE	0.18	0.16	0.15	0.13	0.21	0.20	0.19	0.18
X ₀ ZERO SEQUENCE	0.08	0.08	0.07	0.06	0.09	0.08	0.08	0.08
REACTANCES ARE SATURATED VALUES ARE PER UNIT AT RATING AND VOLTAGE INDICATED								
T' _d TRANSIENT TIME CONST.	0.08s							
T'' _d SUB-TRANSTIME CONST.	0.012s							
T' _{do} O.C. FIELD TIME CONST.	2.5s							
T _a ARMATURE TIME CONST.	0.019s							
SHORT CIRCUIT RATIO	1/X _d							

**50
Hz**

HCI534F/544F
Winding 311

STAMFORD

THREE PHASE EFFICIENCY CURVES

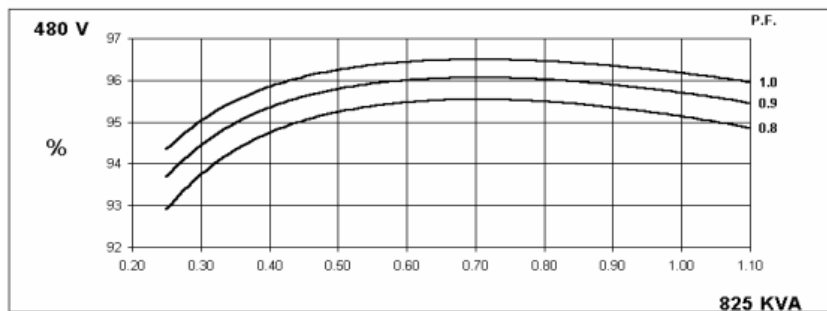
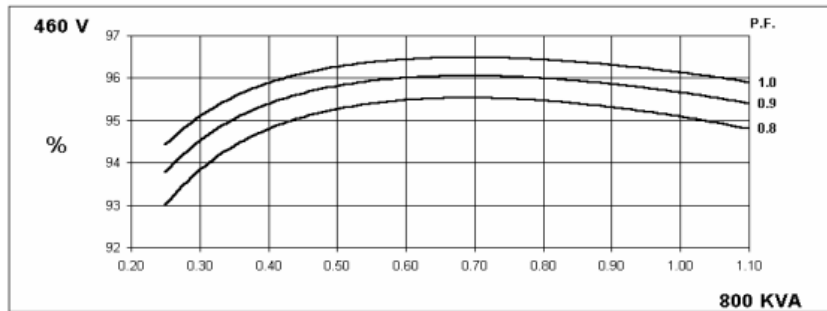
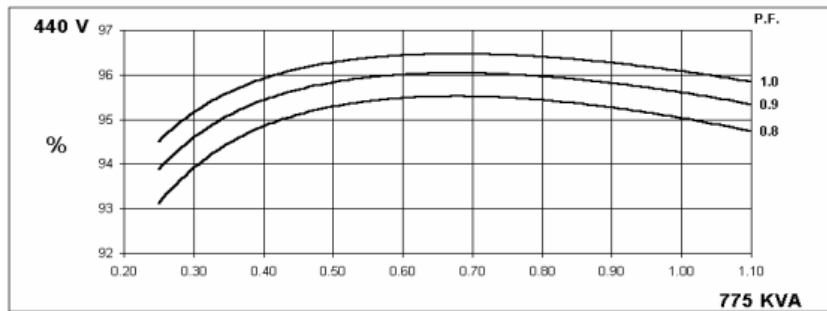
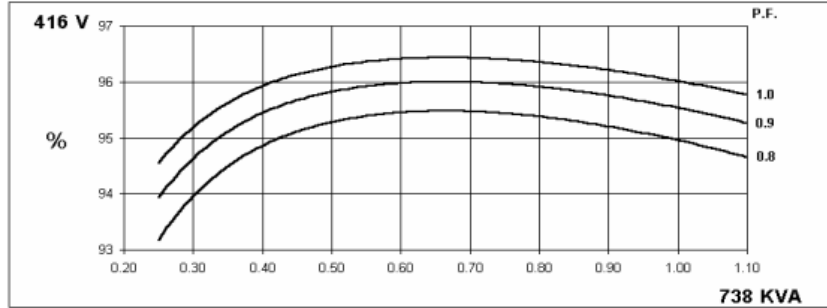


**60
Hz**

HCI534F/544F
Winding 311

STAMFORD

THREE PHASE EFFICIENCY CURVES



HCI534F/544F
Winding 311

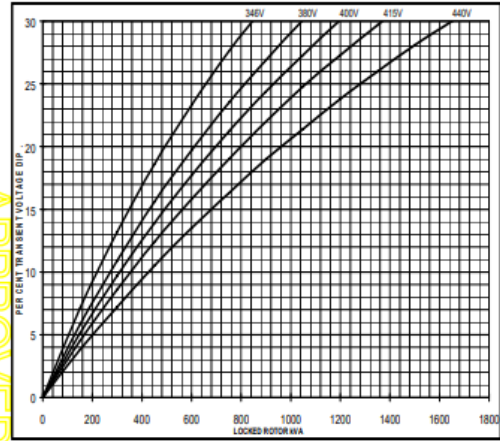
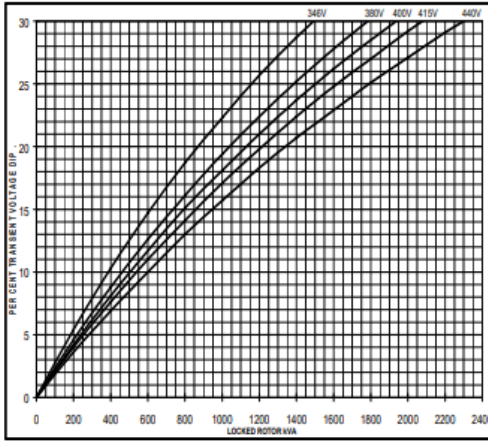
STAMFORD

Locked Rotor Motor Starting Curve

50 Hz

MX

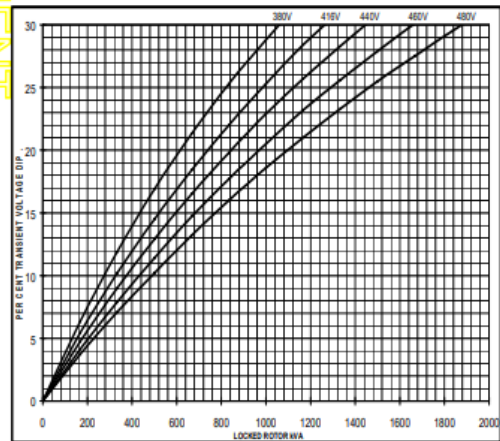
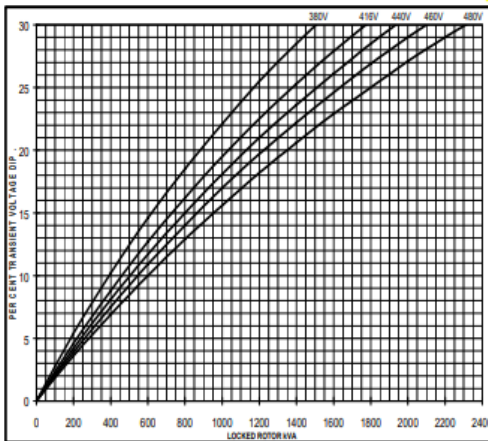
SX



60 Hz

MX

SX



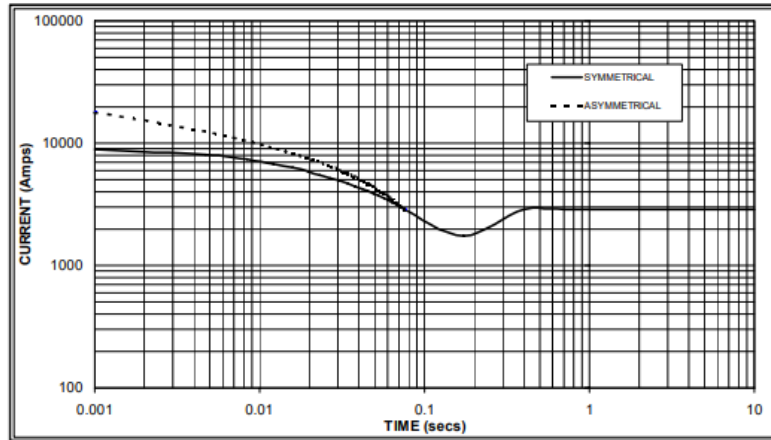
APPROVED DOCUMENT

HCI534F/544F

STAMFORD

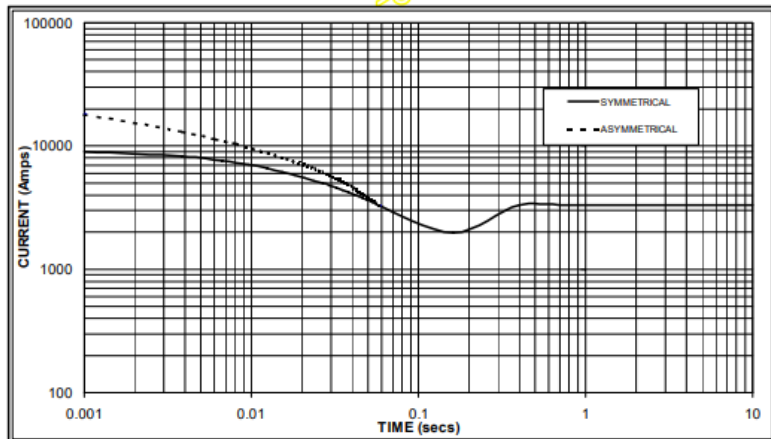
**Three-phase Short Circuit Decrement Curve. No-load Excitation at Rated Speed
Based on star (wye) connection.**

**50
Hz**



Sustained Short Circuit = 2,900 Amps

**60
Hz**



Sustained Short Circuit = 3,300 Amps

Note 1

The following multiplication factors should be used to adjust the values from curve between time 0.001 seconds and the minimum current point in respect of nominal operating voltage :

50Hz		60Hz	
Voltage	Factor	Voltage	Factor
380v	X 1.00	416v	X 1.00
400v	X 1.06	440v	X 1.06
415v	X 1.09	460v	X 1.12
440v	X 1.12	480v	X 1.20

The sustained current value is constant irrespective of voltage level

Note 2

The following multiplication factor should be used to convert the values calculated in accordance with NOTE 1 to those applicable to the various types of short circuit :

	3-phase	2-phase L-L	1-phase L-N
Instantaneous	x 1.00	x 0.87	x 1.30
Minimum	x 1.00	x 1.80	x 3.20
Sustained	x 1.00	x 1.50	x 2.50
Max. sustained duration	10 sec.	5 sec.	2 sec.

All other times are unchanged

Note 3

Curves are drawn for Star (Wye) connected machines. For other connections the following multipliers should be applied to current values as shown :

Parallel Star = Curve current value X 2

Series Delta = Curve current value X 1.732

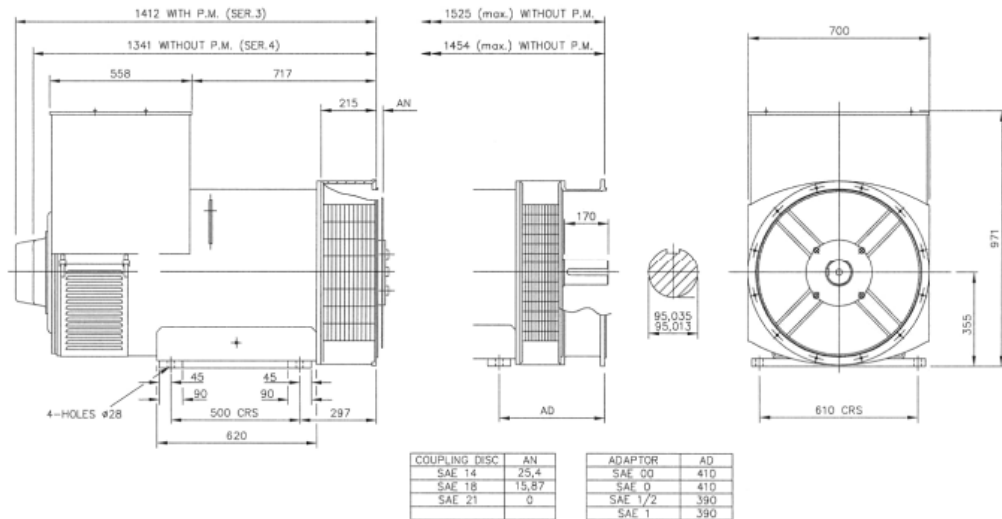
HCI534F/544F
Winding 311 0.8 Power Factor

STAMFORD

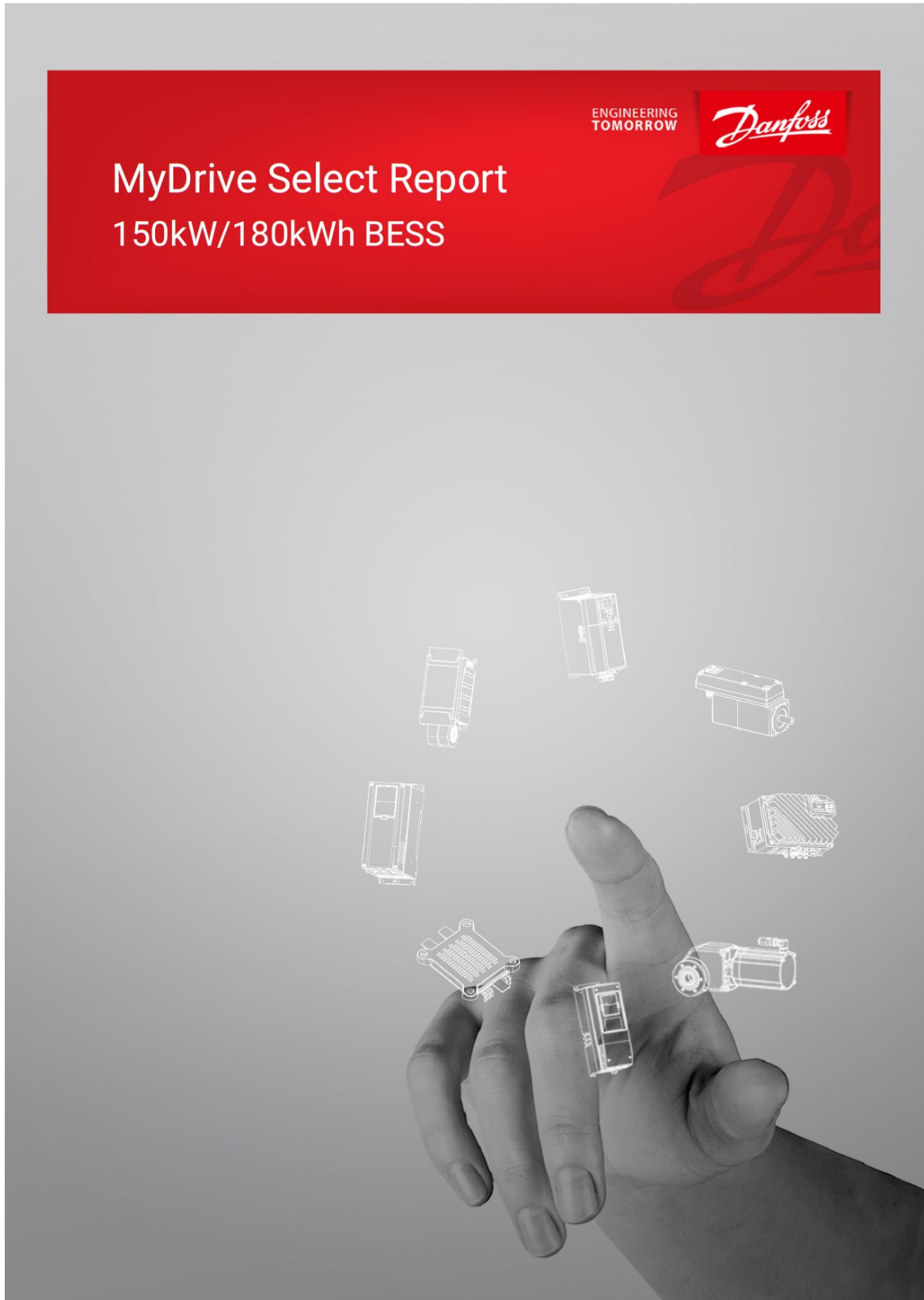
RATINGS

Class - Temp Rise		Cont. F - 105/40°C				Cont. H - 125/40°C				Standby - 150/40°C				Standby - 163/27°C			
50 Hz	Series Star (V)	380	400	415	440	380	400	415	440	380	400	415	440	380	400	415	440
	Parallel Star (V)	190	200	208	220	190	200	208	220	190	200	208	220	190	200	208	220
	Series Delta (V)	220	230	240	254	220	230	240	254	220	230	240	254	220	230	240	254
	kVA	620	620	620	600	670	670	670	650	710	710	710	690	738	738	738	715
	kW	496	496	496	480	536	536	536	520	568	568	568	552	590	590	590	572
	Efficiency (%)	95.0	95.2	95.3	95.4	94.8	95.0	95.1	95.3	94.6	94.8	94.9	95.1	94.4	94.6	94.8	95.1
	kW Input	522	521	520	503	565	564	564	546	600	599	599	580	625	624	623	601
60 Hz	Series Star (V)	416	440	460	480	416	440	460	480	416	440	460	480	416	440	460	480
	Parallel Star (V)	208	220	230	240	208	220	230	240	208	220	230	240	208	220	230	240
	Delta (V)	240	254	266	277	240	254	266	277	240	254	266	277	240	254	266	277
	kVA	688	719	731	750	738	775	800	825	781	819	848	875	806	844	878	906
	kW	550	575	585	600	590	620	640	660	625	655	678	700	645	675	702	725
	Efficiency (%)	95.1	95.2	95.3	95.3	95.0	95.0	95.1	95.1	94.8	94.9	94.9	95.0	94.7	94.8	94.8	94.9
	kW Input	579	604	614	630	621	653	673	694	659	690	715	737	681	712	741	764

DIMENSIONS



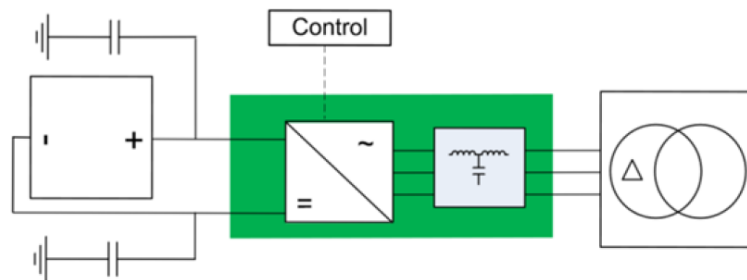
Liite 2. Akkuenergiavaranaston verkkosuuntaaja Danfoss NXA03256 (Enico 2022).



Introduction

This document provides guidance in sizing the VACON NXP DC/AC-Converter power unit. Based on customer application parameters etc. source voltage and current or power profile, the selection of power unit is greatly affected. Document provides guidance on selecting appropriate filter and fuses but the responsibility of these components is within customer or source component providers side. Also efficiency- and PQ-graph of the system in given application is shown.

Results are indicating the continuous loading situations. Derating or overload situations are similar to standard VACON NXP converter ratings.



Project

Unit system	Metric
Type	Electrification

Application

Product	VACON NXP® Grid Converter 1
---------	-----------------------------

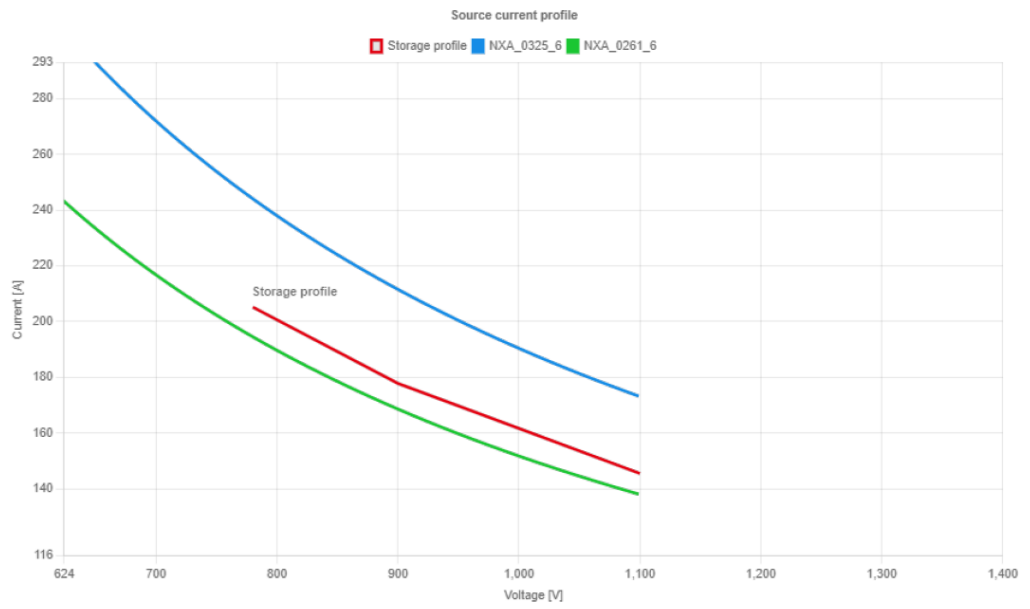
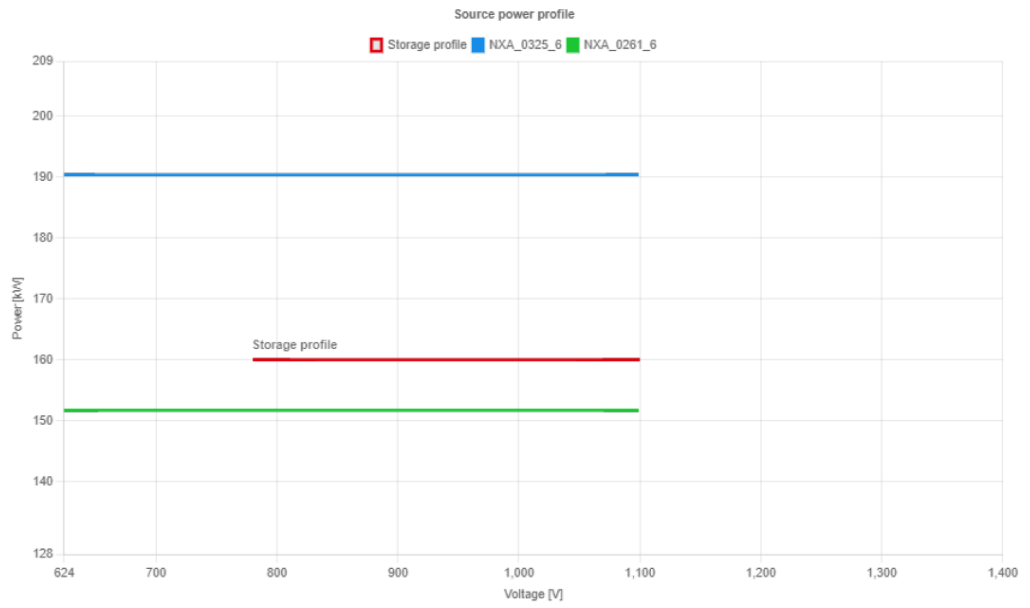
Grid converter

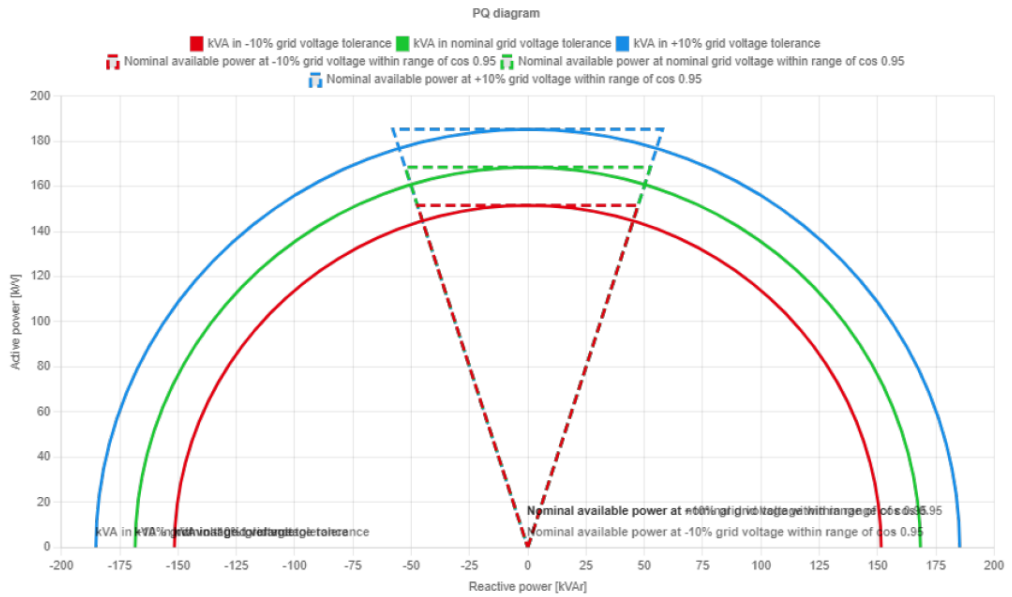
Designation	NXA_0325_6
Enclosure	F110
Cooling method	Air
Configuration	Single
AC fuse type	PC73UD13C450TF
AC fuse amount	3
DC fuse type	170M6496
DC fuse amount	2
Continuous AC current HO	261 [A]
Apparent current	325 [A]
Max AC voltage	600 [V]
Active current	261 [A]
Maximum DC voltage	1100 [V]
Min AC voltage	220 [V]
Minimum DC voltage	640 [V]
Overcurrent trip level	951 [A]
LCL filter type code	LCL-0325-6
Filter amount	1
Max AC voltage with specified source voltage	443 [V]
Min DC voltage with specified AC voltage	543 [V]

Design parameters

Cooling method	Air
----------------	-----

Design parameters	
Source sizing criteria	Power
Altitude	0 [m]
Source voltage level (Vdc)	Varying
Maximum DC voltage	1100 [V]
Nominal DC voltage	900 [V]
Minimum DC voltage	780 [V]
Max power	160 [kW]
Power at max DC voltage	160 [kW]
Power at nominal DC voltage	160 [kW]
Power at min DC voltage	160 [kW]
Max current	205 [A]
DC current at max DC voltage	145 [A]
DC current at nominal DC voltage	178 [A]
DC current at min DC voltage	205 [A]
Power direction	From source to grid
Ambient temperature	40 [°C]
Inverter output voltage	329 [V]
AC filter type	LCL filter
Grid AC voltage [Vac]	443.28 [V]
AC current	214 [A]
Modulator type	Grid Converter Modulator
Operation mode	AFE
Power factor	0.95
Negative AC voltage tolerance (%)	10
Positive AC voltage tolerance (%)	10
Switching frequency	3.6 [kHz]





The compilation of information in this report (the "Information") relies upon the accuracy of the data entered by the user of MyDrive® Select and of the actual operating and environmental conditions. Thus, the Information can be used as a guide only. The Information cannot substitute technical advice, are not promises for correct operation and should be used for estimation purposes only. It is provided "AS IS" without any warranty of any kind and does not constitute a guarantee that the information is complete, current or correct and Danfoss accepts no responsibility for unsuitable or inaccurate material that may be encountered. The use of this report does not relieve the user of any obligation or duty that might arise under any legislation covering the activities to which this document has been or is to be applied.

