

samk



Satakunnan ammattikorkeakoulu
Satakunta University of Applied Sciences

JUHO JOKINEN

Sähköasemien apusähköjärjestelmien laskelmat

SÄHKÖ- JA AUTOMAATIOTEKNIIKAN TUTKINTO-OHJELMA
2024

TIIVISTELMÄ

Jokinen, Juho: Sähköasemien apusähköjärjestelmien laskelmat
Opinnäytetyö, AMK
Sähkö- ja automaatiotekniikka
Huhtikuu 2024
Sivumäärä: 46

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä sähköasemien apusähköjärjestelmiin ja luoda kerättyjen tietojen perusteella Excel-laskentapohja Despro Oy:n sähköasematiimin suunnittelijoiden käyttöön. Uuden laskentapohjan tavoitteena oli yksinkertaistaa ja tehostaa laskentojen suorittamista sekä mahdollistaa iteratiivinen suunnittelu.

Opinnäytetyön alussa perehdyttiin kirjallisuuden avulla sähköasemiin ja niiden apusähköjärjestelmiin, tutustuttiin siihen, mitä ne ovat, mihin niitä käytetään ja miksi ne ovat niin tärkeitä. Seuraavaksi selvitettiin, mitä standardeja niiden suunnittelussa ja mitoituksessa tulee noudattaa ja näiden pohjalta tutustuttiin apusähköjärjestelmissä syntyviin vikatilanteisiin, mitä ne ovat, mistä ne johtuvat ja miten ne voidaan laskea. Tämän jälkeen luotiin Excel-laskentapohja, jolla kyseiset tilanteet voidaan laskea.

Opinnäytetyön loppuosassa tutustuttiin markkinoilta löytyviin vaihtoehtoisiiin ohjelmiin, kuitenkin vertaamalla niitä tehtyyn Excel-laskentapohjaan. Lopussa tutustuttiin luotuun Exceliin.

Avainsanat: sähköasema, apusähköjärjestelmä, vikatilanne, kaksoismaasulku

Abstract

Jokinen, Juho: Calculations of auxiliary electricity systems for substations
Bachelor's thesis
Electrical and Automation Engineering
April 2024
Number of pages: 46

The purpose of this thesis was to familiarize oneself with substation's auxiliary power systems and, based on the collected data to create an Excel calculation template for the designers of Despro Oy's substation team. The aim of the new calculation template was to simplify and streamline the performance of calculations and to enable iterative planning.

At the beginning of the thesis, we will focus on substations and their auxiliary electrical systems, getting acquainted with what they are, what they are used for and why they are so important. Next, we investigated which standards should be followed in their design and dimensioning, and based on these, we familiarized ourselves with the fault situations that arise in auxiliary power systems, what they are, what causes them and how they can be calculated. After that, an Excel calculation template was created that can be used to calculate these situations.

The final part of the thesis explored alternative programs found on the market, without comparing them with the Excel calculation template. At the end, we got acquainted with the created Excel.

Keywords: substation, auxiliary power system, fault situation, double ground fault

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	7
1.1 Työn toimeksiantaja.....	7
1.2 Tekoälyn käyttö tässä opinnäytetyössä	8
2 SÄHKÖASEMA.....	9
2.1 Sähköasematyypit	9
2.1.1 SF6-eristeinen kytkinlaitos.....	10
2.1.2 Ilmaeristeinen kytkinlaitos (AIS).....	11
3 APUSÄHKÖJÄRJESTELMÄT	12
3.1 Vaihtosähköjärjestelmät	12
3.2 Tasasähköjärjestelmät.....	13
3.3 Jakelujärjestelmät.....	14
3.3.1 TN-järjestelmä	15
3.3.2 TT-järjestelmä.....	16
3.3.3 IT-järjestelmä	16
3.4 Akusto	17
4 APUSÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ SOVELLETTAVAT STANDARDIT.....	19
4.1 SFS 6000-4-41 ja SFS 6000-4-43 suojaus.....	19
4.2 SFS 6000-5-52 jännitteenalenema	21
4.3 SFS 6000-5-57 akusto.....	21
4.4 IEC 61660-1 DC oikosulku	22
5 VIRHETILANTEET	23
5.1 Oikosulku.....	23
5.1.1 Oikosulkuvirta suojaus.....	24
5.1.2 Vaihtosähkö oikosulkuvirtojen määrittäminen laskemalla	25
5.2 Ylikuormitus	26
5.3 Jännitteenalenema	29
5.4 Kaksoismaasulku	30
6 VAIHTOEHTOISET OHJELMAT	35
6.1 ETAP	35
6.2 PSCAD	36
6.3 DigSILENT PowerFactory	36
6.4 Ols-Consult Oy Mitoitus- ja Akkuohjelmat	37
6.5 Nelfo Febdok	38
7 EXCEL LASKENTAPOHJA.....	40
7.1 Käytettävyyden parantaminen	40

7.2 Laskut.....	41
8 YHTEENVETO.....	42
LÄHTEET.....	44

LYHENNELUETTELO

AIS	Air insulated switchgear eli ilmaeristetty kytkinlaitteisto.
GIS	Gas insulated switchgear eli kaasueristetty kytkinlaitteisto.
kA	Kiloampeeri, 1000 A.
kV	Kilovoltti, 1000 V.
NC ER	Network Code for Emergency and Restoration.
PSCAD	Power System Computer Aided Design.
ETAP	Electrical Transient Analyzer Program.

1 JOHDANTO

Sähköasemien apusähköjärjestelmät ovat ratkaisevan tärkeitä sähköverkkoinfrastruktuurin toimivuuden kannalta ja niiden suunnittelu, toteutus ja ylläpito ovat keskeisiä tekijöitä varmistamaan sähköasemien tehokkaan ja turvallisen toiminnan.

Opinnäytetyön aiheen antoi Despro Engineering Oy. Tässä työssä tutustutaan standardeihin, jotka ohjaavat sähköasemien apusähköjärjestelmien suunnittelua ja rakentamista. Painopiste on erityisesti standardien vaatimuksissa ja niiden merkityksessä sähköasemien toimivuuden ja turvallisuuden varmistamisessa.

Lisäksi opinnäytetyön avulla luodaan Excel-pohjainen laskentatyökalu. Tarkoituksena on tehdä täysin uusi laskentapohja, joka on vanhaan verrattuna helpompi käyttää. Nykyinen laskentapohja on työläs ja sillä on mahdollista saada suunnittelijakohtaisesti eri tuloksia.

Työn lopussa vertaillaan keskenään eri ohjelmistoja, jotka tarjoavat samankaltaisia laskentamahdollisuuksia. Tarkoituksena on kartoittaa näiden vaihtoehtoisten ohjelmistojen vahvuuksia ja heikkouksia, eikä niinkään verratta niitä luotuun Excel-pohjaiseen laskentatyökaluun.

1.1 Työn toimeksiantaja

Despro Engineering Oy on asiantuntijapalveluita tarjoava yritys, joka on perustettu vuonna 2015 Tampereella. Yrityksen toimitusjohtajana toimii Antti Savolainen ja hallituksen puheenjohtajana Sami Somero. Vuonna 2022 yhtiön liikevaihto oli 8,15 miljoonaa euroa ja tilikauden tulos oli -14 tuhatta euroa. Vuoden 2022 lopussa yhtiöllä oli 89 työntekijää, mikä merkitsi 12,7 % kasvua

edelliseen tilikauteen verrattuna. (Finder, 2022.) Nykyään Despro Oy:llä on n. 110 työntekijää. (Despro Engineering Oy, n.d.)

Despro Oy aloitti jakeluverkon suunnittelulla, ja on siitä lähtenyt laajentamaan osaamistaan ja palveluitaan yritysostojen ja henkilöstön kasvattamisen avulla. Despro Oy on erikoistunut uusiutuvan energian ja kriittisen infran asiantuntijapalveluihin, ja nykyään tarjoaa asiantuntijapalveluita sähkö-, tele- ja valaistus-infran koko elinkaaren ajalle, suunnittelusta käyttöönottoon ja ylläpitoon. (Despro Engineering Oy, n.d.)

1.2 Tekoälyn käyttö tässä opinnäytetyössä

Opinnäytetyön tekemisessä olen hyödyntänyt ChatGPT:tä ideointiin, kielentarkistukseen ja -muokkaamiseen. Tekoälyn avulla olen muokannut tekstiä siten, että sen kieliasu pysyisi tasaisena ja yhtäläisenä ja teksti olisi helposti ymmärrettävää ja luettavaa, mutta kuitenkin pysyen sellaisena, kuin sen itse olen halunnut.

Olen pitänyt huolen, että tekoäly ei ole muokannut tekstin asiasisältöä, vaan se on niin, kuin alkuperäisessä lähteessä on kerrottu. Kaikki teoksessa käytetyt lähteet ovat minun löytämiäni ja käyttämiäni ja niihin on viitattu asianmukaisella tavalla. Tekoälyä on käytetty vastuullisesti, huolehtien tietosuojasta ja siitä, että tekijänoikeuksia ei ole rikottu. Tämän alaluvun kirjoittamiseen ei ole käytetty tekoälyä.

2 SÄHKÖASEMA

Sähköasemalla tarkoitetaan sähköverkon kohtaa, jossa suoritetaan erilaisia toimintoja sähköenergian siirron ja jakelun yhteydessä. Näillä asemilla on keskeinen rooli sähköverkon toiminnassa ja niiden tehtävänä on mahdollistaa sähkön sujuva siirtyminen ja jakautuminen eri johdoille ja sitä kautta kuluttajille. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 76.)

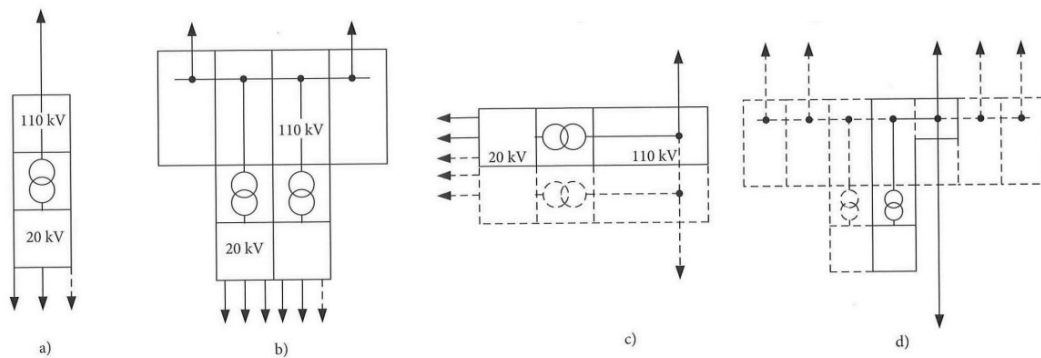
Sähköasemat omaavat monipuolisia toimintoja, kuten erilaiset kytkennät, jännitteen muunnokset, sekä sähköenergian keskittäminen ja jakaminen eri johtimille. Tärkeimpiä komponentteja sähköasemilla ovat muuntajat, jotka mahdollistavat jännitteen muuntamisen tarvittavaan tasoon. Katkaisijat, jotka hallitsevat sähkövirran kulkua. Erottimet, jotka eristävät osat verkosta huolto- ja turvallisuustarkoituksissa, ja mittamuuntajat, jotka ovat välttämättömiä sähkön mittauksessa ja valvonnassa. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 76.)

Lisäksi sähköasemat voivat sisältää releitä, jotka liittyvät suurjänniteverkkoon ja ohjaavat sähkönjakelua. Pienjännite- ja keskijänniteverkoissa käytetään myös varokkeita, jotka suojaavat laitteita ja verkkoa ylijänniteiltä. Ylijännitesuojauksessa voidaan lisäksi käyttää venttiilisuojuja tai kipinävälejä, jotka toimivat laitteiden turvana ja ylläpitävät sähköverkon vakaata toimintaa. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 76.)

2.1 Sähköasematyypit

Sähköasemia voi olla kahdenlaisia: pääteasemia ja johdonvariasemia. Pääteasema sijaitsee verkon päätepisteessä ja voi tarvittaessa muuttua kokoomakiskolaitokseksi, joka yhdistää useita sähkölinjoja. Johdonvariasema sen sijaan sijaitsee sähkölinjan varrella ja ottaa tehoa alueen läpikulkevasta sähkölinjasta, jota voidaan käyttää paikalliseen jakeluun ja muihin alueellisiin tarpeisiin. (Hietalahti, 2013, s. 106.)

Sähkö- eli kytkinaseman rakenteeseen (kuva 1) vaikuttaa merkittävästi sen tehtävä verkossa, olipa sen tarkoitus siirtää tai jakaa sähköä, liittyä voimalaitokseen tai toimia vain verkon kytkentä- tai muuntoasemana. Rakenteeseen vaikuttaa myös aseman sijainti verkoston solmukohtassa ja sen merkitys verkon toiminnan kannalta. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 96.)



Kuva 1. Sähköasemien perusratkaisuja, 110kV liitäntäjohto. a) ja b) ovat pääteasemia ja c) ja d) johdonvariasemia. Katkoviivat kuvaavat mahdollista laajennettavuutta. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 99.)

Riippumatta sähköaseman käyttötarkoituksesta, niitä toteutetaan kahdella eritavalla: kaasueristeisinä sisäkytkinlaitoksina tai ilmaeristeisenä, avoimena ulkokentällä.

2.1.1 SF6-eristeinen kytkinlaitos

SF6-eristeisten kytkinlaitosten jännitteelliset komponentit sijaitsevat hermeettisesti suljetussa, maadoitetussa metallikotelossa, riippumatta käytettävästä jännitteestä. Tämän metallikotelon sisällä käytetään SF6-kaasua suurjännitekojeistoissa yleisesti paineella 3–6 bar ja keskijännitekojeistoissa paineella 1,2–1,5 bar. Tämä rakennelma mahdollistaa kosketus- ja valokaarisuojauksen, mikä edistää merkittävästi henkilöturvallisuutta. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 129.)

Lisäksi vikojen vaikutusten rajoittamiseksi ja kaasun tyhjentämiseksi huoltotoimenpiteiden aikana on kytkinlaitos jaettu erillisiin kaasutiloihin, jotka on erotettu toisistaan kaasutiiviillä läpivientieristimillä. Suurjännite-GIS-laitoksissa

kiskot, katkaisijat, mittamuuntajat sekä verkko- ja muuntajaliitännät ovat yleensä omassa osastossaan. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 129.)

Tällä hetkellä SF6-eristeisiä ratkaisuja käytetään jännitealueella 12–800 kV, tällöin mitoitusvirrat vaihtelevat 630–8000 A välillä. Oikosulkukestoisuudet vaihtelevat 12,5–100 kA:n välillä. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 128.)

2.1.2 Ilmaeristeinen kytkinlaitos (AIS)

Suomessa yleisesti käytetty suurjännitekytkinlaitosten rakenne on avorakenteinen ulkokytkinlaitos. Tällainen laitos sijaitsee ulkona ja sen suurjännitteiset kokoojakiskot eristetään toisistaan ympäröivällä ilmalla. Tämä rakenne on erityisen hyödyllinen ja kustannustehokas vaihtoehto suljetuille ratkaisuille, erityisesti silloin, kun saatavilla on riittävästi edullista ulkotilaa. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 117–119.)

Suomen suurjännitejohdot ovat pääosin avojohdoja, mikä tekee niiden liittämisen avorakenteiseen ulkokytkinlaitokseen helpoksi. Maisemavaikutuksia pyritään vähentämään tarkkaan harkitsemalla kytkinlaitoksen sijaintia. Tavoitteena on sijoittaa se kauas vilkasliikenteisistä teistä ja välttää rakentamista avonaisilla alueilla. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 117–119.)

Yleisesti pyritään myös välttämään muuntajien ja kiskokatkaisijakenttien sijoittamista suoraan kytkinlaitoksen päihin, sillä tämä voisi vaikeuttaa myöhempiä laajennuksia ja kenttien vahvistuksia. Yleisesti laitteiden sijoittelu suunnitellaan niin, että vähintään 110 kV:n avojohdot voidaan liittää päätepylväisiin mahdollisimman kohtisuoraan. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 117–119.)

3 APUSÄHKÖJÄRJESTELMÄT

Apusähköjärjestelmä käsittää kokonaisuuden, joka huolehtii sähköaseman ohjaus-, suojaus- ja valvontajärjestelmien tarvitsemasta sähkövoimasta. Sähköaseman apusähköjärjestelmät voidaan jakaa kahteen pääluokkaan: vaihtosähköjärjestelmään, joka palvelee sähköaseman omakäyttöä, ja tasasähköjärjestelmään. (Siivonen, 2007, s. 7.)

Vaihtosähköjärjestelmään kuuluvat pääasiassa sähköaseman omakäyttölaitteet ja -järjestelmät, kuten valaistus, lämmitys ja pistorasiakuormat. Sähköasema on varustettu erillisellä muuntajalla, omakäyttökojeistolla ja -keskuskella omakäytön tarpeisiin. Tämä tarkoittaa, että sähköasemalla voi työskennellä ilman jännitettä kiskostossa, mikä on tärkeää esimerkiksi rakennus-, huolto- ja saneeraustöissä. (Siivonen, 2007, s. 7.)

Tasasähköjärjestelmään kuuluu aseman suojausjärjestelmän ja kaukokäytön komponentteja sekä laitteita. Tämä järjestelmä on erityisen kriittinen, sillä suojaustoimintojen on oltava toimintavalmiina jatkuvasti. Tasasähköjärjestelmä saa syöttönsä omakäyttökeskuksesta, johon on liitetty tasasuuntaaja, joka on varmennettu akkuvarmennuksella, parantaen toimintavarmuutta. (Siivonen, 2007, s. 7.)

3.1 Vaihtosähköjärjestelmät

Vaihtosähkö- eli omakäyttöjärjestelmä vastaa sähköaseman laitteiden tarvitsemien sähkön toimittamisesta. Näihin laitteisiin kuuluvat muun muassa muuntajan käänikytkin sekä ilmastointi, lämmitys ja valaistus. Omakäytön tarvitsema sähkö saadaan yleensä keskijännitekojeiston omakäyttömuuntajasta. (Haveri. 2006, s. 18.)

Omakäyttömuuntaja sijoitetaan yleensä omiin tiloihinsa sähköasemalla, mahdollisesti myös ulos. Usein omakäyttömuuntajat ovat samanlaisia kuin tavalliset jakelumuuntajat. Omakäyttömuuntajan tuottama teho syötetään AC-

pääkeskuksen kautta latureille ja muille laitteille, jotka käyttävät vaihtovirtaa. Sähköaseman vaihtojännite on standardoitu 50 Hz:n kolmivaihejännite, jonka pääjännite on 400 V. Järjestelmä on rakennettu perinteisen kodin sähköjärjestelmän mukaisesti käyttäen TN-S-järjestelmää. TN-S-järjestelmässä on erillinen nollajohto ja suojamaadoitusjohto koko sähköjärjestelmän laajuudella. (Haveri. 2006, s. 19.)

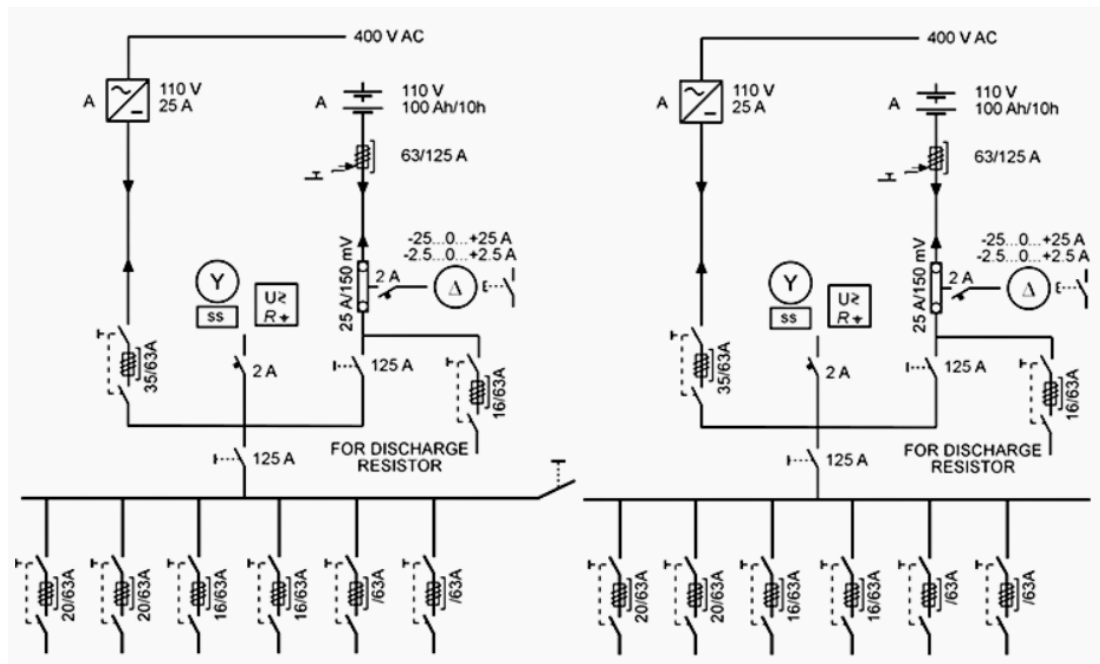
AC-pääkeskus voi olla sijoitettuna relehuoneeseen tai omiin tiloihinsa. Useimmat sähköaseman 400 VAC laitteista ovat sellaisia, että riittää, että ne toimivat normaalin sähkösyötön aikana eivätkä siten tarvitse erillistä varmennusta. Tällaisia laitteita ovat esimerkiksi sähköaseman valaistus. (Haveri. 2006, s. 19.) Kriittisiä 230 VAC kuormia syötetään akku varmennuksesta vaihtosuuntaajan avulla (Ryynänen, 2016, s. 6).

Vaihtosähköjärjestelmän sähkönsyöttö on varustettu kahdella erillisellä syötöllä. Sähköasemilla on varasyöttöä varten varasyöttömuuntaja. Tämä varasyöttömuuntaja saa sähkönsyötön toisesta sähköasemasta. Tärkeää on, että varasyöttö on täysin riippumaton siitä sähköasemasta, josta normaalisti syötetään omakäyttökojeistoa. Tällä tavoin varmistetaan sähköjakelun jatkuvuus ja varasyötön luotettavuus, vaikka toinen syöttö olisi poissa käytöstä tai yllättäen katkeaisi. (Ryynänen, 2016, s. 5; Siivonen, 2007, s. 9.)

3.2 Tasasähköjärjestelmät

Sähköaseman tasasähkön jatkuva saatavuus on ensisijaisen tärkeää, sillä useat kriittiset toiminnot, kuten suojareleiden ja kaukokäytön toiminta, ovat täysin riippuvaisia tasasähköstä. Tasasähköjärjestelmä saa syöttönsä omakäyttökeskuksesta tasasuuntaajien avulla ja järjestelmä on varustettu akkuvarmennuksella. (Siivonen, 2007, s. 13–25.)

Yleensä sähköasemalla on kaksi erillistä tasasähköjärjestelmää (kuva 2) ja nämä järjestelmät syöttävät kuormia siten, että ne varmistavat toistensa toiminnan erillisten suojaustoimintojen avulla. (Siivonen, 2007, s. 2.)



Kuva 2. Kahdennettu DC-järjestelmä (Edvard Csanyi, 2015).

Normaalissa tilanteessa, eli silloin kun omakäyttökeskuksen vaihtosähkösyöttö toimii normaalisti, tasasuuntaajat huolehtivat sähköaseman tasasähkötarpeesta ja samalla lataavat akustoja. Kun vaihtosähkösyötössä ilmenee ongelmia tai katkoja, syöttö siirtyy akustolle ja varmistaa näin tasasähkön jatkuvan saatavuuden. (Siivonen, 2007, s. 13–25.)

Tasasähkøjärjestelmissä esiintyy 12 VDC, 24 VDC, 48 VDC, 110 VDC ja 220 VDC jännitetasoja, joista 110 VDC ja 220 VDC ovat yleisimmin käytettyjä. Jännitteitä 24 VDC ja 48 VDC käytetään pääasiassa kaukokäyttöjärjestelmien apujännitteenä sekä automaatio-, merkinanto- ja hälytysjärjestelmissä. (Kivistö, 2023; Siivonen, 2007, s. 18.)

3.3 Jakelujärjestelmät

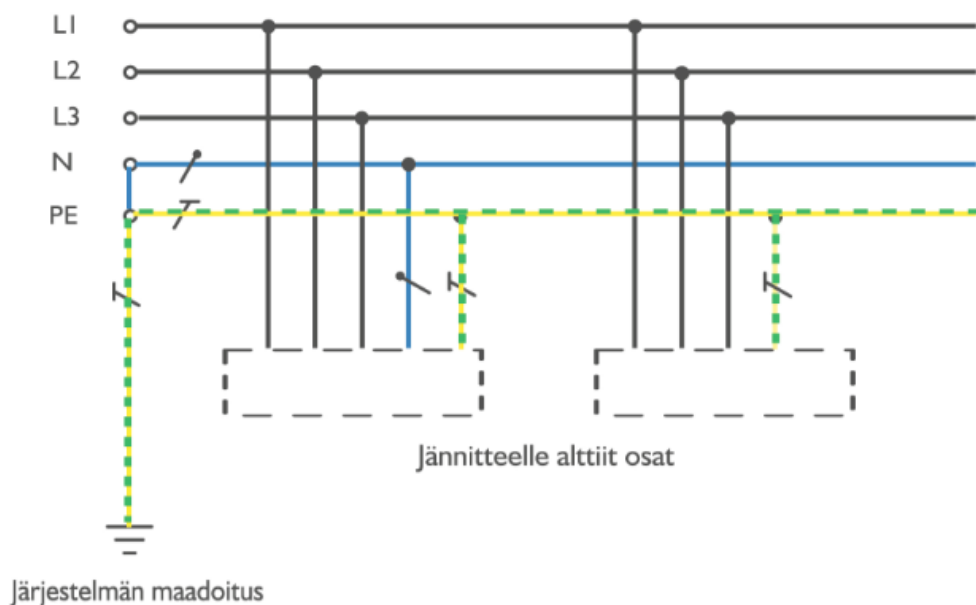
Jakelujärjestelmät voidaan jakaa kahteen osaan niiden ominaisuuksien perusteella. Jännitteisten johtimien ja maadoitusjohtimien tyyppien ja lukumäärien perusteella ja järjestelmän maadoitustavan perusteella. Seuraavaksi avaan

erilaisia järjestelmän maadoitustapoja, joita ovat TN-, TT- ja IT-järjestelmät. (Sähköinfo, 2022, s. 56.)

3.3.1 TN-järjestelmä

TN-järjestelmässä yksi piste virtapiirissä on suoraan maadoitettu ja sähkölaitteiden jännitteelle altistuvat osat on kytketty tähän pisteeseen suojajohdolla. Yleensä maadoitettu piste vastaa kolmivaihejärjestelmän tähtipistettä. TN-järjestelmät kattavat TN-S- ja TN-C-järjestelmät sekä niiden yhdistelmän, TN-C-S-järjestelmän. (Sähköinfo, 2022, s. 57.)

Normaaleissa asennuksissa Suomessa käytetään yleensä TN-järjestelmää (kuva 3). Käytännössä kaikki yleiset jakeluverkot, joilla sähköä toimitetaan kulluttajille, ovat TN-järjestelmiä. Mikäli TN-järjestelmässä suojajohdin ja jännitteinen osa pääsevät kosketuksiin, niistä syntyvä oikosulku aiheuttaa yksivaiheisen oikosulun suuruisen virran. (ST-53.21, 2022, s. 4–5.)

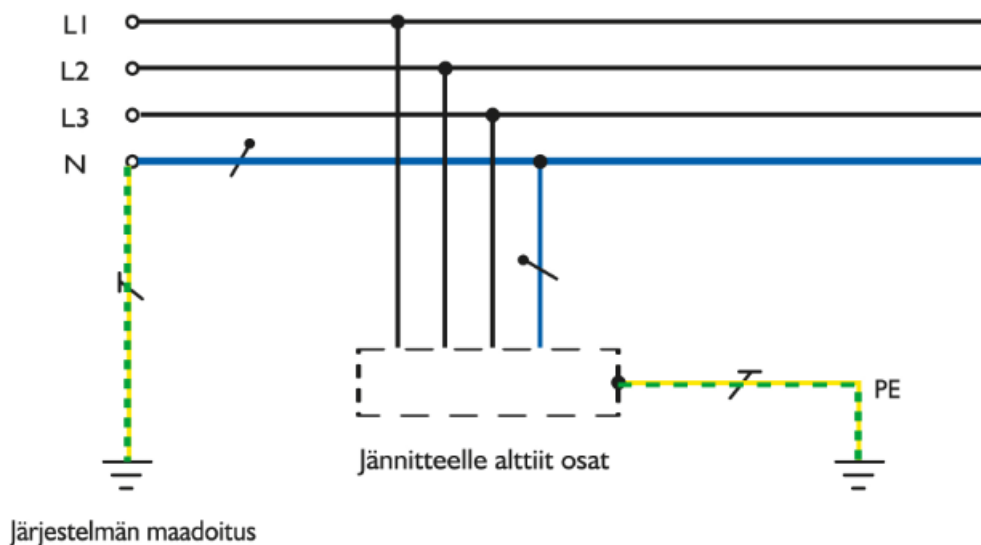


Kuva 3. TN-S-järjestelmä (Sähköinfo, 2022, s. 57).

3.3.2 TT-järjestelmä

TT-järjestelmässä (kuva 4) virtapiiristä yksi piste on suoraan maadoitettu, yleensä muuntajan tähtipiste. Toisin kuin TN-järjestelmässä, sähkölaitteistojen ja -laitteiden jännitteelle alttiit osat on maadoitettu erillisten tai erillisen maadoituselektrodin avulla. Näiden maadoituselektrodien on oltava sähköisesti erilliset syöttöverkon maadoituselektrodeista. (Sähköinfo, 2022, s. 60.)

Suomessa TT-järjestelmää ei käytetä, mutta Etelä-Euroopan jakeluverkoissa se on yleinen ratkaisu. Oikosulun tapahtuessa jännitteisen osan ja suojaohjimen välillä, vikavirta kulkee maadoituselektrodiin. Vikavirran määrä riippuu suoraan maadoitusimpedanssista, kuten SFS 6000 -standardin osan 4–41 kohdan 411.5.3 mukaan määritellään. Käytännössä tämä vikavirta on yleensä niin pieni, että tarvitaan erillisiä vikavirtasuojia suojalaitteina. (ST-53.21, 2022, s. 4, 6.)



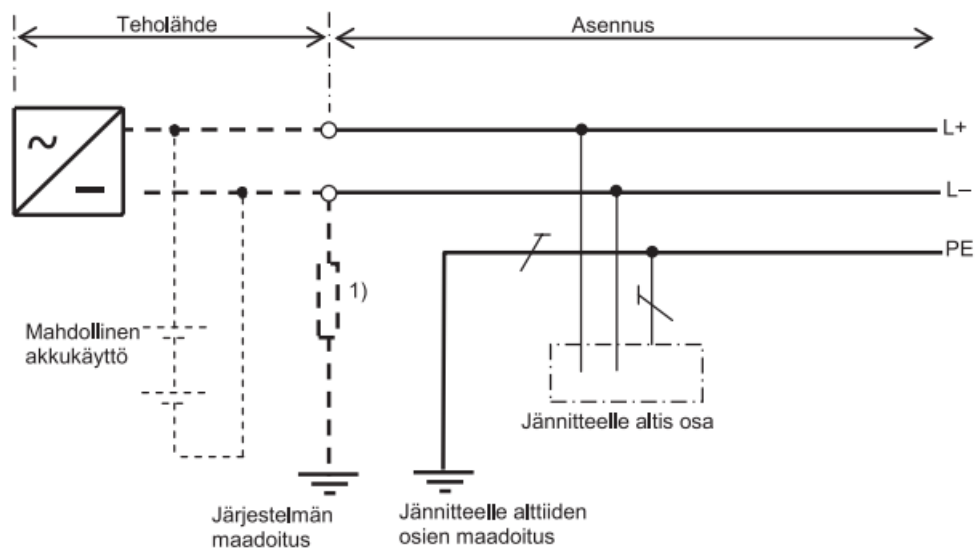
Kuva 4. TT-järjestelmä (Sähköinfo, 2022, s. 60).

3.3.3 IT-järjestelmä

IT-järjestelmässä (kuva 5) ei ole suoraan maadoitettuja jännitteisiä osia. Sen sijaan IT-järjestelmässä yksi piste, joko nollapiste, keskipiste tai keinotekoinen

nollapiste, voidaan maadoittaa suuren impedanssin kautta. Keinotekoinen nol-lapiste voidaan kytkeä suoraan maahan, mutta tällöin kokonaisnollaimpedanssin on oltava tarpeeksi suuri. Mikäli virtapiirissä ei ole tähtipistettä, äärijohdin voidaan kytkeä maahan suuren impedanssin avulla. (SFS 6000-4-41:2022, 2022, s. 12.)

Yksivaiheinen maasulku ei aiheuta IT-järjestelmässä välitöntä käyttökatkoa, mikä tekee siitä suosittua vaihtoehtona sähkönjakelujärjestelmissä, joissa keskeytykset ovat erityisen haitallisia. (Sähköinfo, 2022, s.63.)



Kuva 5. Tasasähkö IT-järjestelmä (SFS 6000-1:2022, 2022, s. 58).

3.4 Akusto

Akku toimii energiavarastona, johon sähköenergiaa voidaan varastoida toistuvasti kemiallisessa muodossa. Akun pienin yksikkö, eli kenno, koostuu akkulevyistä, elektrolyytistä, akkuastiasta ja muista rakenneosista. Lyijyakkukennon nimellinen jännite on yleisesti 2 voltia. (ST 52.30.02, 2016, s. 1.)

Ryhmäakussa on useita kennoja, jotka on sijoitettu samaan astiaan ja kytketty sarjaan, minkä ansiosta tyypillinen jännite on yleensä 4, 6 tai 12 voltia. Nämä saadaan vielä kytkettyä tarvittaville 12–220 V jännitetasolle. Paikallissakkuja käytetään pääasiassa varmistamaan katkotonta sähkönsyöttöä kohteissa,

joissa sähkönsyötön katkeaminen ei ole hyväksyttävää, erityisesti tilanteissa, joissa verkkosähkö ei ole saatavilla. Nämä akut on suunniteltu kestämään jatkuvaa ylläpitovarausta useiden vuosien ajan. Tämän vuoksi ne eroavat merkittävästi autojen käynnistysakuista, jotka on suunniteltu pääasiassa tarjoamaan lyhytaikaista, mutta suurta käynnistysvirtaa. (ST 52.30.02, 2016, s. 1.)

Verkkosäätö sähköverkon hätätilanteista ja palauttamisesta, NC ER, on suunniteltu estämään häiriöiden leviäminen, pysäyttämään suurhäiriöiden kehittyminen ja varmistamaan järjestelmän ripeä palautuminen normaalitilaan. Yhtenä NC ER vaatimuksena kriittisiltä sähköasemilta vaaditaan 24 tunnin toimintakykyä akkukäytöllä. (Fingrid, n.d.)

4 APUSÄHKÖJÄRJESTELMISSÄ SOVELLETTAVAT STANDARDIT

Yli 1 kV vaihtojännitteisistä asennuksista määrätään standardissa SFS 6001:2018 Suurjännitesähköasennukset. Tässä opinnäytetyössä keskitytään apusähköjärjestelmien vaatimuksiin ja mitoituksiin, joista määrätään standardissa SFS 6000:2022 Pienjännitesähköasennukset. Tähän kuuluvat alle 1 kV:n vaihtojännite ja alle 1,5 kV:n tasajännite asennukset.

Standardin SFS 6000-4-41 kohdan 132 mukaan sähköasennusta suunniteltaessa on tärkeää varmistaa, että suojaus toteutuu standardin luvun 131 mukaisesti. Luku 131 sisältää tarkemmat vaatimukset vikasuojauksesta koskien. Turvallisuusmääräykset edellyttävät, että sähkölaitteiston on täytettävä olennaiset turvallisuusvaatimukset, ja sähköasennusten on noudatettava perussuojauksen ja vikasuojauksen vaatimuksia sähköiskujen ehkäisemiseksi. Asennuksen on oltava sellainen, ettei se normaalissa tai vikatilanteessa oikein käytettynä aiheuta vaaraa ihmisille, eläimille tai omaisuudelle. (Sähköinfo, 2022, s. 88.)

4.1 SFS 6000-4-41 ja SFS 6000-4-43 suojaus

Standardissa SFS 6000-4-43, määritellään suojalaitteidentyyppit ja ylikuormitus- ja oikosulkusuojauksen vaatimukset. Kyseinen standardi edellyttää, että sähköasennuksen suojauksen perusvaatimukset toteutuvat jo suunnitteluvaiheessa. Nämä voidaan varmistaa laskemalla tai muulla luotettavalla tavalla. (ST 53.24, 2017, s.1.)

Standardi SFS 6000-4-41 sisältää ohjeita ja määräyksiä erilaisille sähköasennusjärjestelmille, kuten TN-, TT- ja IT-järjestelmille. Standardissa käydään läpi myös missä ajassa minkäkin jännitetason suojalaitteiden on toimittava vaihtotai tasasähköllä.

Taulukko 1. Standardin SFS 6000-4-41 taulukko 41.1, missä on suurimmat sallitut poiskytkentäajat vaihto- ja tasasähköllä (SFS 6000-4-41:2022, 2022, s. 9).

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

^a Poiskytkentää voidaan tarvita muusta syystä kuin sähköiskulta suojaamiseen.

Taulukon 1 arvoja sovelletaan apusähköjärjestelmien 230 VAC ja 400 VAC TN-järjestelmiin, kun niiden mitoitusvirta ei ylitä 63 A syöttäessä yhtä tai useampaa pistorasiaa eikä 32 A syöttäessä kiinteästi liitetyjä sähkölaitteita. Mikäli arvot ylittyvät, tai kyseessä on pääjohto, on 5 sekunnin poiskytkentäaika sallittu. (SFS 6000-4-41:2022, 2022, s. 8–9.) Oikosulkuvirtojen laskuista lisää kappaleessa 5.1.2 Oikosulkuvirtojen määrittäminen laskemalla.

Taulukon 1 arvoja voidaan soveltaa myös apusähköjärjestelmien 220 VDC IT-järjestelmiin kaksoismaasulku tilanteessa, standardin SFS 6000-4-41 kohdan 411.6.4 mukaan: ”Jos jännitteelle alttiit osat on yhdistetty suojajohtimella samaan yhteiseen maadoitusjärjestelmään, noudatetaan TN-järjestelmää vastaavia suojausjärjestelyä.” Kun nimellisjännite on alle 120 VDC tasasähköisissä IT-järjestelmissä, kytkentäajan kestolle ei ole määritelty aikarajaa. Poiskytkentä voidaan kuitenkin vaatia sähköiskulta suojaamisen lisäksi muustakin syystä, kuten tulipalolta ehkäisyn takia. (SFS 6000-4-41:2022, 2022, s. 9.)

IT-järjestelmän on annettava hälytys ensimmäisen vian syntyessä, mikä on säilyttävä niin kauan, kun vika on olemassa. Hälytys voi olla äänihälytys tai näkyvä hälytys. Hälytyksen on oltava sellaisessa paikassa, josta vastuulliset henkilöt näkevät sen. (SFS 6000-4-41:2022, 2022, s. 13.) Sähköasemilla maasulunvalvonta lähettää maasulun syntyessä tiedon valvomoon ja pitää hälytyksen päällä vian poistamiseen asti. (Kivistö, 2023.)

4.2 SFS 6000-5-52 jännitteenalenema

Standardissa SFS 6000-5-52, taulukossa G.52.1 (taulukko 2) määritetään suhteellinen maksimijännitteenalenema. Pienjänniteasennuksissa, joita syötetään suoraan jakeluverkosta, maksimijännitteenalenema valaistuskäytössä on 3 % ja muussa käytössä 5 %. Pienjänniteasennuksissa, joita syötetään yksityisestä pienjänniteteholähteestä omaa löysemmät vaatimukset. Valaistuskäytössä jännitteenalenema saa olla 6 % ja muussa käytössä 8 %. (SFS 6000-5-52:2022, 2022, s. 62.)

Taulukko 2. Standardin SFS 6000-5-52 taulukko G52.1, jossa on maksimijännitteenalenemat (SFS 6000-5-52:2022, 2022, s. 62).

Asennuksen tyyppi	Valaistuskäyttö %	Muu käyttö %
A – Pienjänniteasennus, joka on syötetty suoraan yleisestä jakeluverkosta	3	5
B – Pienjänniteasennus, joka on syötetty yksityisestä pienjänniteteholähteestä ^a	6	8

^a Suositellaan, että niin pitkälle kuin mahdollista ryhmäjohtojen jännitteenalenema ei ylitä asennustyyppille A annettuja arvoja. Kun asennuksen pääjohdot ovat pitempiä kuin 100 m, näitä jännitteenalenemia voidaan kasvattaa 0,005 % johdon 100 m ylittävän pituuden metriä kohti. Ilman tätä lisäystä se ei saa olla suurempi kuin 0,5 %.

Jännitteenalenema määritellään sähkölaitteen tehontarpeen mukaan käyttäen soveltuvin osin tasoituskertoimia, tai käyttäen piirien suunniteltuja virtoja.

Vaikka standardi SFS 6000-5-52 antaisi pienjänniteteholähteestä syötetyn verkon, tässä tapauksessa akustolla toimivan verkon jännitteenaleneman olla 6 % valaistuskäytössä ja 8 % muussa käytössä, on Despro Oy:lla käytetty tiukempia 3 % ja 5 % rajoja. Jännitteenaleneman laskusta lisää kappaleessa 5.3 Jännitteenalenema.

4.3 SFS 6000-5-57 akusto

Standardissa SFS 6000-5-57 kerrotaan akustoon koskevista määräyksistä. Akuston sijoituspaikassa on tärkeää huolehtia ilmanvaihdosta, joka pitää vedyn konsentraation alle 1 %. 4–77 % välillä vedyn konsentraatiota pidetään paloherkkänä ja se voi syttyessään aiheuttaa räjähdysriskin. (SFS 6000-5-57:2022, 2022, s. 15.)

Mikäli käytössä on erillinen akustotila, jossa on avokennoja käytössä, lattian tulee olla elektrolyyttiä läpäisemätöntä ja kestää elektrolyytin kemiallisia

vaikutuksia, tai vaihtoehtoisesti kennot on sijoitettava sopiville alustoille. Lattian tulee kestää akkujen paino ja sen resistanssin on oltava välillä 50 k Ω ja 10 M Ω . Lisäksi akkujen välinen etäisyys tulisi olla 1,25 metriä estämään staattisten sähkövarausten syntymisen. (SFS 6000-5-57:2022, 2022, s. 18.)

Akkuhuoneet ovat merkittävä ISO 3864 -standardin mukaisilla varoituskilvillä, kuten "Vaarallinen jännite" mikäli akun jännite on yli 60 VDC. Akuston kuntoa tulisi myös tarkkailla säännöllisesti. (SFS 6000-5-57:2022, 2022, s. 20.)

4.4 IEC 61660-1 DC oikosulku

Standardissa IEC 61660-1 kerrotaan oikosulkuvirtojen laskemisesta voimalaitosten ja sähköasemien tasasähköapujärjestelmissä. Kyseistä standardia sovelletaan tasasähkö IT-järjestelmien kaksoismaasulkutapausten ja oikosulkuvirtojen laskennassa. Kaksoismaasulkutilanteen laskemisesta lisää kappaleessa 5.4 kaksoismaasulku.

5 VIRHETILANTEET

Sähköasemien apusähköjärjestelmät ovat keskeinen osa sähköverkkojen luotettavaa toimintaa. Ne varmistavat sähköjakelun jatkuvuuden ja suojaavat sähköverkkoa erilaisilta häiriöiltä. Seuraavaksi tarkastellaan neljää yleistä viikatilannetta sähköasemien apusähköjärjestelmissä: oikosulkuja, ylikuormitusta, jännitteenalenemaa ja maasulkuja, erityisesti kaksoismaasulkuja. Näitä tilanteita pidetään kriittisinä, sillä ne voivat vaikuttaa sähköjakelun tehokkuuteen ja turvallisuuteen ja niitä on tärkeä hallita ja ennaltaehkäistä sähköverkkojen vakauden takaamiseksi.

5.1 Oikosulku

Oikosulku on virtapiiri, joka voi muodostua eristysvian tai ulkoisen kosketuksen vaikutuksesta ja virtapiiri voi sulkeutua joko suoraan, valokaaren tai muun vikaimpedanssin kautta. Kun oikosulku tapahtuu, kaksi eri potentiaalilla olevaa pistettä yhdistyvät pienen impedanssin kautta ja oikosulkuvirta rajoittaa vain se osa piiristä, jonka läpi oikosulkuvirta kulkee. Kolmivaiheinen oikosulku syntyy, kun oikosulku muodostuu kolmen vaihejohtimen välille, kun taas kaksivaiheinen oikosulku syntyy, kun oikosulku tapahtuu kahden vaihejohtimen välillä. Eristysvika voi myös ilmetä joko vaihejohtimen ja maan potentiaalinvälillä tai vaihe- ja nollajohtimen välillä. (Lakervi & Partanen, 2008, s. 28.)

Myös inhimilliset virheet, kuten virheet kytkennöissä, voivat aiheuttaa virtapiiriin oikosulun. Tällaiset virheet johtuvat usein kiireestä, osaamattomuudesta tai huolimattomuudesta.

Tasasähköjärjestelmissä oikosulkuvirtojen lähteinä toimivat akut ja varaajat. Toisin kuin vaihtosähköjärjestelmissä, joissa sähkövirta katkeaa 50 hertsin taajuudella, tasavirrassa ei ole luonnollisia nollapisteitä. Tämä tarkoittaa sitä, että tasavirrassa käytettävien kytkinten, sulakkeiden ja johdonsuojakatkaisijoiden arvot poikkeavat vaihtovirtajärjestelmissä käytettävistä arvoista. Tämä on

tärkeä huomioitava tekijä laitteita valittaessa ja niiden toiminnan tarkistuksessa tasavirtajärjestelmissä. (ST-Käsikirja 20, 2005, s. 165.)

5.1.1 Oikosulkuvirta suojaus

Suojaus on tarpeen missä tahansa johtovian kohdassa. Oikosulun sallittuun kesto aikaan vaikuttavat kaapelin lämpeneminen ja rakenteiden mekaaninen kestävyys. Yleensä kaapelit ja muut osat suunnitellaan kestämään enintään 5 sekunnin oikosulkuvirran aiheuttama lämpeneminen. Oikosulkuvirran suuruus määrää pisimmän sallitun oikosulun kestoajan. (ST 53.24, 2017, s. 2.)

Suurempijännitteiset tasavirtajärjestelmät, kuten 110 VDC ja 220 VDC, ovat yleensä eristettyjä maadoituksesta, eli ne noudattavat IT-järjestelmän periaatteita. Tämän vuoksi oikosulkusuojien on oltava kaksinapaisia, jotta ne voivat tehokkaasti hallita mahdollisia oikosulkuvirtoja tällaisissa järjestelmissä. (ST-Käsikirja 20, 2005, s. 165.)

Tasasähköjärjestelmässä varaajan tuottama oikosulkuvirta rajoittuu sen virranrajoituksen arvoon, joka on noin kaksinkertainen verrattuna varaajan nimellisvirtaan. Varaajan sulakkeet mitoitetaan yleensä varaajan nimellisvirran mukaan tai seuraavan suuremman sulake koon mukaan. (ST-Käsikirja 20, 2005, s. 166.)

Varaajan nimellisvirtana valitaan yleensä virta, joka vastaa kolmen tunnin purkausvirtaa. Tasasähköjärjestelmässä esiintyvän oikosulkuvirran suuruus on riippuvainen akun ominaisuuksista, sen tilasta, varaajan ominaisuuksista sekä piirien resistansseista. On tärkeää varmistaa, että sulakkeet suunnitellaan niin, että ne palavat myös tilanteessa, jossa akku on osittain tyhjentynyt (vajaava- raustila). (ST-Käsikirja 20, 2005, s. 166.)

Tasasähköpiireissä oikosulkusuojaus saavutetaan käyttämällä sulakkeita ja johdonsuojakatkaisijoita. Akuston pääsulakkeet, jotka toimivat suurimpana suojausportaana, on suunniteltu siten, että ne palavat ainoastaan

tasasähkökeskuksen kiskosto-oikosuluissa. Tämä johtuu siitä, että kiskostosta lähtevillä syötöillä on omat ylivirtasuojansa. (ST-Käsikirja 20, 2005, s. 166.)

5.1.2 Vaihtosähkö oikosulkuvirtojen määrittäminen laskemalla

Oikosulkuvirta voidaan joko mitata tai laskea. Suurin haaste liittyy suojattavan piirin riittävän oikosulkuvirran määrittämiseen. Mikäli suojauksen tehokkuus arvioidaan jo suunnitteluvaiheessa, oikosulkuvirtaa ei välttämättä tarvitse mitata työn valmistuttua. Korjaukset suojauksessa jälkikäteen voivat olla hankalia ja kalliita. Tämä korostaa suojauksen suunnittelun tärkeyttä suunnitteluvaiheessa. (Sähköinfo, 2022, s. 88.)

Oikosulkuvirran laskemisessa käytännössä voidaan tehdä muutamia yksinkertaistuksia. Käytettäessä kaavan 1 menetelmää, virhe on yleensä korkeintaan noin 10 %. Tätä menetelmää voidaan kuitenkin hyödyntää, koska mahdolliset virheet johtavat aina parempaan lopputulokseen, eli laskettu oikosulkuvirta on todellista oikosulkuvirtaa pienempi. (Sähköinfo, 2022, s. 90.)

$$I_k = \frac{c \times U}{\sqrt{3} \times Z} \quad (1)$$

- I_k on pienin yksivaiheinen oikosulkuvirta (A).
- c kerroin 0,95 huomioi jännitteen pienenemisen liittimissä, johtimissa, sulakkeissa, kytkimissä ja vastaavissa komponenteissa.
- U on pääjännite (V).
- Z on virtapiirin kokonaisimpedanssi, joka koostuu jakeluverkon ennen muuntajaa olevasta impedanssista, itse muuntajan impedanssista sekä muuntajan jälkeisten johtimien muodostamasta impedanssista.

Mitattujen oikosulkuvirtojen on oltava 25 % suurempia kuin suojalaitteiden toimintarajavirrat (taulukko 3). Tämä johtuu siitä, että mittausvaiheessa vallitseva lämpötila on yleensä alhaisempi kuin varsinaisen oikosulun aikana oleva lämpötila. Alle 70 mm² johtimilla impedanssin arvona voidaan käyttää resistanssin arvoa, sitä isommilla johtimilla myös reaktanssi on otettava huomioon. (Sähköinfo, 2022, s. 88.)

Taulukko 3. Pienimmät B-, C-, D- ja K-tyypin johdonsuojakatkaisijoiden ja gG sulakkeiden toimintavirrat ja vaaditut mitatut arvot (Sähköinfo, 2022, s. 88–89).

Nimellisvirta	B-tyyppi 0,4 s ja 0,5 s	Vaadittu mitattu arvo	C-tyyppi 0,4 s ja 0,5 s	Vaadittu mitattu arvo	D-tyyppi 0,4 s ja 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo	K-tyyppi 0,4 s ja 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo	gG-sulake 0,4 s	Vaadittu mitattu arvo	gG-sulake 5,0 s	Vaadittu mitattu arvo
A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
2	-	-	-	-	-	-	-	-	16	20	9	11,3
4	-	-	-	-	-	-	-	-	32	40	18	22,5
6	30	37,5	60	75	120	150	72	90	46,5	58,2	28	35
10	50	62,5	100	125	200	250	120	150	82	102,5	46,5	58,2
13	65	81,3	130	162,5	280	325	156	195	-	-	-	-
16	80	100	160	200	320	400	192	240	110	137,5	65	81,3
20	100	125	200	250	400	500	240	300	145	181,3	85	106,3
25	125	156,3	250	312,5	500	625	300	375	180	225	110	137,5
32	160	200	320	400	640	800	384	480	270	337,5	150	187,5
35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	175	218,8
50	250	312,5	500	625	1000	1250	600	750	470	587,5	250	312,5
63	315	393,8	630	787,5	1260	1575	756	945	550	687,5	320	400
80	400	500	800	1000	1600	2000	960	1200	840	1050	425	531,3
100	-	-	-	-	-	-	-	-	1000	1250	580	725
125	625	781,3	1250	1562,5	2500	3125	1500	1875	1450	1812,5	715	893,8

5.2 Ylikuormitus

Ylikuormituksella tarkoitetaan virtaa, jonka jokin laite ottaa, mikä on mitoitusvirtaa suurempi virta. Ylikuormitusvirta ei aina johdu viasta, vaan esimerkiksi liian suuresta kuormituksesta. Ylikuormitussuojauksen tarkoituksena on katkaista ylikuormitusvirta ennen kuin sen aiheuttama lämpötilan nousu vahingoittaa johtimien ympäristöä, laitetta, jatkoksia, eristyksiä tai liitoksia. Ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa johdonsuojakatkaisijoilla tai sulakkeilla. (ST 53.14, 2018, s. 4; Sähköinfo, 2022, s. 134.)

Ylikuormitussuojan sijoituksessa johtoon pätevät tietyt ehdot: se on asennettava sellaiseen johdon kohtaan, jossa muutokset poikkipinnassa, johdinlajissa, asennustavassa tai muussa rakenteessa pienentävät johtimen kuormitettavuutta. Edellä mainittujen muutoskohtien ja suojan sijoituspaikan välillä ei saa olla pistorasioita, eikä johtoa saa haaroittaa. (SFS 6000-4-43:2022, 2022, s. 8–9.)

Standardi SFS 6000-4-43 kohta 433.1 asettaa kaksi ehtoa, jotka ylikuormituksesta suojaavan suojalaitteen on täytettävä, epäyhtälöt 2 ja 3.

$$I_B \leq I_n \leq I_Z \quad (2)$$

$$I_2 \leq 1,45 \times I_Z \quad (3)$$

Mikäli ylikuormitussuojauksena käytetään sulaketta, on huomattava, että sulakkeen sulamisrajavirta on 1,6–2,1 kertaa sulakkeen mitoitusvirran suuruinen. Taulukossa 5 on yleisimpien johtojen kuormitettavuudet gG-sulakkeelle. Sulamisrajavirta on se virta, jonka ylittäessään sulake sulaa tai katkeaa yleensä tunnin kuluessa. Koska sulamisrajavirta voi vaihdella 1,6–2,1 välillä on laskeamiseen käytettävä epäyhtälöä 4. Taulukossa 4 ovat gG-tyypin sulakkeiden ylemmät sulamisrajakertoimet ja toiminta-ajat. (SFS 6000-4-43:2022, 2022, s. 70; Sähköinfo, 2022, s. 134.)

$$K \times I_n \leq 1,45 \times I_z \quad (4)$$

- I_B on piirin suunniteltu virta.
- I_z on johtimen kuormitettavuus.
- I_n on suojalaitteen mitoitusvirta.
- I_2 on virta, jossa suojalaite toimii suojalaitteelle määritetyssä ajassa.
- K on sulakkeen ylempään sulamisrajavirran ja sulakkeen nimellisvirran suhde.

Taulukko 4. gG-tyypin sulakkeen sulamisrajakertoimet ylikuormitussuojan käyttäessä (Sähköinfo, 2022, s. 134).

gG-tyypin sulakke		
Nimellisvirta	Ylempi toimintaraja	Aika
$I_n \leq 4 \text{ A}$	$2,1 * I_n$	1h
$4 \text{ A} < I_n < 16 \text{ A}$	$1,9 * I_n$	1h
$16 \text{ A} < I_n < 63 \text{ A}$	$1,6 * I_n$	1h
$63 \text{ A} < I_n < 160 \text{ A}$	$1,6 * I_n$	2h

Taulukko 5. Pienimmät johtojen kuormitettavuudet gG-sulakkeelle, joka toimii ylikuormitussuojana (Sähköinfo, 2022, s. 135).

gG-tyyppisen sulakkeen suurin sallittu nimellisvirta (A)	Johdon sallittu kuormitus vähintään (A)
6	8
10	13,5
16	18
20	22
25	28
32	35
35	39
40	44
50	55
63	70
80	88
100	110
125	138
160	177
200	221
250	276
315	348
400	441
500	552
630	695

Ylikuormitussuojaus voidaan toteuttaa johdonsuojakatkaisijoilla. Siihen sopivia ovat B-, C- ja D-tyyppiset johdonsuojakatkaisijat, jotka ovat standardin SFS-EN 60 898 mukaisia (taulukko 6). Terminen toimintarajavirta, joka on johdonsuojakatkaisijoilla 1,45 kertaa suojalaitteen nimellisvirran kokoinen, mahdollistaa ylikuormitussuojan valinnan suoraan johdon kuormitettavuuden perusteella. (Sähköinfo, 2022, s. 133.)

Taulukko 6. ABB S 200 sarjan B-, C-, D-, K ja Z-tyyppisten johdonsuojakatkaisijoiden toimintaominaisuudet (ABB, n.d., s. 32–33).

Toimintakäyrä ja nimellisvirrat	Terminen laukaisu	Laukaisuaika	Magneetti laukaisu	Laukaisuaika	DC ylempilaukaisurajavirta	Laukaisuaika	
B	$\leq 63 \text{ A}$	$1,13 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$	$3 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$	$7,5 \times I_n$	$< 0,1 \text{ s}$
		$1,45 \times I_n$	$< 1 \text{ h}$	$5 \times I_n$	$< 0,1 \text{ s}$		
C	$\leq 63 \text{ A}$	$1,13 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$	$5 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$	$15 \times I_n$	$< 0,1 \text{ s}$
		$1,45 \times I_n$	$< 1 \text{ h}$	$10 \times I_n$	$< 0,1 \text{ s}$		
D	$\leq 63 \text{ A}$	$1,13 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$	$10 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$	-	-
		$1,45 \times I_n$	$< 1 \text{ h}$	$20 \times I_n$	$< 0,1 \text{ s}$		
K	$\leq 63 \text{ A}$	$1,05 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$	$8 \times I_n$	$\geq 0,2 \text{ s}$	$21 \times I_n$	$< 0,2 \text{ s}$
		$1,20 \times I_n$	$< 1 \text{ h}$	$12 \times I_n$	$< 0,2 \text{ s}$		
Z	$\leq 63 \text{ A}$	$1,05 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$	$2 \times I_n$	$\geq 0,2 \text{ s}$	$4,5 \times I_n$	$< 0,2 \text{ s}$
		$1,20 \times I_n$	$< 1 \text{ h}$	$3 \times I_n$	$< 0,2 \text{ s}$		

- B-tyyppi on nopeasti toimiva ja sitä voidaan käyttää esimerkiksi resistiivisillä kuormilla, lämmitykseen, johdonsuojaksi ja valaistukseen. (Tiainen, 2015, s. 34.)
- C-tyyppi on hitaasti toimiva ja sitä voidaan käyttää kuten B-tyyppiä, mutta myös lievästi induktiivisille ja kapasitiivisille kuormille. (Tiainen, 2015, s. 34.)
- D- ja K-tyyppi ovat erittäin hitaita ja niitä voidaan käyttää todella induktiivisille ja kapasitiivisille kuormille, jotka aiheuttavat suuren käynnistysvirtasysäyksen. (Tiainen, 2015, s. 34.)
- Z-tyyppi soveltuu käytettäväksi piireissä, joissa on tarve suojata puoli-johteita ja jännitemuuntajia. Erinomainen valinta virtapiireille, joissa oikosulkuvirran taso on erittäin matala. (ABB, n.d., s.8).

5.3 Jännitteenalenema

Sähköjärjestelmän komponenttien aiheuttamat jännitehäviöt luovat ilmiön, jota kutsutaan jännitteenalenemaksi. Komponentin aiheuttama jännitehäviö kasvaa, kun impedanssi suurenee. Myös kuormituksen tyyppi vaikuttaa siihen, kuinka suuri jännitteenalenema on. Jännitteenalenemasta puhuttaessa, viitataan yleensä suhteelliseen jännitteenalenemaan, joka kertoo prosentuaalisen eron syöttävän jännitteen ja syötettävän laitteen jännitteen välillä. Absoluuttinen jännitteenalenema taas ilmaisee saman eron voltteina. (Broman, 2013, s. 41.)

Standardin SFS 6000 antavan kaavan lisäksi jännitteenalenema voidaan laskea kaavoilla 5, 6 ja 7. Yksivaiheisen vaihtojännitteen jännitteenalenema voidaan laskea kaavalla 5. Jos kuorma on induktiivista, käytetään plusmerkkiä, kapasitiivisellä kuormalla käytetään miinusmerkkiä. (Sähköinfo, 2022, s. 239.)

$$\Delta U = I \times 2 \times l \times (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad (5)$$

Kolmivaiheisen vaihtojännitteen jännitteenalenema voidaan laskea kaavalla 6.

$$\Delta U = I \times l \times \sqrt{3} \times (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) \quad 6$$

Tasajännitteellä jännitteenalenema voidaan laskea kaavalla 7.

$$\Delta U = I \times 2r \times l \quad (7)$$

Suhteellinen jännitteenalenema voidaan laskea kaavalla 8.

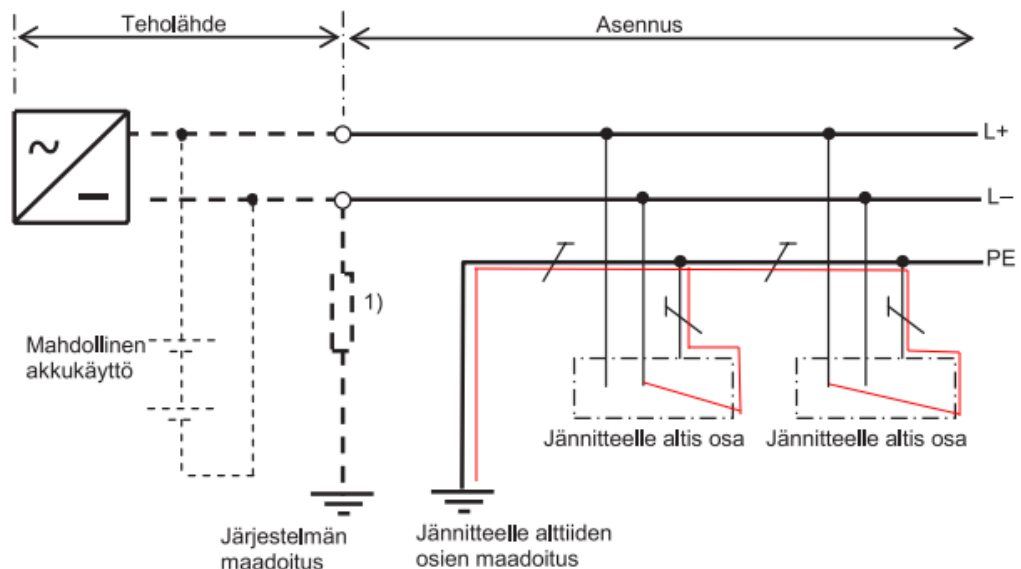
$$\Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100 \% \quad (8)$$

- ΔU on jännitteenalenema (V).
- I on kuormitusvirta (A).
- l on johdonpituus (m).
- x on ominaisreaktanssi (Ω/m).
- r on ominaisresistanssi (Ω/m).
- φ on jännitteen ja virran välinen vaihekulma.
- Δu on suhteellinen jännitteenalenema (V).
- U_n on nimellisjännite (V).

5.4 Kaksoismaasulku

Sähköasemilla apusähköjärjestelmien 110 V ja 220 V tasasähköjärjestelmissä on käytössä IT-järjestelmä, joka on valvottu ja ensimmäinen eristysvika aiheuttaa hälytyksen. Ensimmäisestä viasta ei synny vaarallista kosketusjännitettä, jonka takia sitä ei laukaista ja käyttöä jatketaan normaalisti. Vika kuitenkin

pyritään paikallistamaan ja poistamaan mahdollisimman nopeasti, jotta toisen vian sattuessa ei synny kaksoismaasulkua. Mikäli tilanne pääsee kehittymään kaksoismaasuluksi, on se kytkettävä mahdollisimman nopeasti pois, sillä tällöin tilanne vastaa oikosulkua. Kuva 6 esittää kaksoismaasukutilannetta. (ST-Käsikirja 20, 2005, s. 173.)



Kuva 6. Kuva 5 muokattu vastaamaan kaksoismaasukutilannetta tasasähkö IT-järjestelmässä (SFS 6000-1:2022, 2022, s. 58).

Laskemiseen käytetään standardin SFS 6000-4-41 kohdan 411.6.4 kaavaa (9). Mikäli vastaukseksi saadaan järjestelmän jännitettä pienempi tai yhtä suuri jännite, on suojaus toimiva.

$$2 \times I_a \times Z_s \leq U \quad (9)$$

- U on äärijohtimien välinen tasajännite (V).
- I_a on virta, jolla suojalaite toimii taulukon 1 vaatimassa ajassa (A).
- Z_s on piirin äärijohtimen ja suojamaadoitusjohtimen sisältämän vikapiirin impedanssi (Ω).
- 2 on kerroin, mikä ottaa huomioon mahdollisen vian syntymisen samaan aikaan, kahdessa eri piirissä.

Vikapiirin impedanssi saadaan laskemalla vajaavaraustilaisen akuston sisäinen resistanssi summattuna ääri- ja suojamaadoitusjohtimien resistanssien

kanssa (kaava 11). Mikäli valmistaja ei ilmoita akuston nimellisjännitettä, saadaan se kertomalla sarjassa olevien kennojen lukumäärä kahdella voltilla. Akuston sisäinen resistanssi lasketaan kaavalla 10, ellei valmistaja sitä itse ilmoita. Vajaavaraustilaisen akuston jännite saadaan kertomalla akuston nimellisjännite kertoimella 0,9 ja vajaavaraustilaisen akuston sisäinen resistanssi saadaan kertomalla täysinäisen akuston sisäinen resistanssi kertoimella 1,7, kertoimet tulevat standardista IEC 61660-1 (SFS-EN 61660-1:1998, 1997, s.11, 37). Laskuissa käytetään kaapeleiden tasavirtaresistansseja 70°C lämpötilassa, sillä se on maksimi johdinlämpötila jatkuvassa käytössä. Kun käytetään akuston vajaavaraustilaa ja kaapelin maksimi käyttölämpötilaa, saadaan laskettua huonoin mahdollinen tilanne. Yleisempien MCMK ja AMCMK kaapeleiden tasavirtaresistanssit löytyvät taulukosta 7.

$$R_B = \frac{E_B}{i_{pB}} \quad (10)$$

$$Z_s = R_B \times 1,7 + 2 \times (L \times 10^{-3} \times R_k) \quad (11)$$

- E_B on akuston nimellisjännite (V).
- R_B on akuston sisäinen resistanssi (Ω).
- i_{pB} on akuston oikosulkuvirta (A).
- Z_s on piirin äärijohtimen ja suojamaadoitusjohtimen sisältämän vikapiirin impedanssi (Ω).
- L on kaapelinpituus (m).
- R_k on kaapelin resistanssi kilometriä kohden (Ω/km).

Taulukko 7. MCMK ja AMCMK kaapeleiden tasavirtaresistanssit (Ω/km) 20°C ja 70°C lämpötiloissa (Reka, n.d.).

Johtimien poikkipinta mm ²	Kupari			Johtimien poikkipinta mm ²	Alumiini			
	Resistanssi R (20 °C)	Resistanssi R (70 °C)	Resistanssi Pe R (70 °C)		Resistanssi R (20 °C)	Resistanssi R (70 °C)	Resistanssi Pe Cu R (20 °C)	Resistanssi Pe Cu R (70 °C)
4 x 1,5/1,5	12,100	14,000	14,00					
4 x 2,5/2,5	7,410	8,570	8,57					
4 x 6/6	3,080	3,560	3,56					
4 x 10/10	1,830	2,120	2,12					
4 x 16/16	1,150	1,330	1,33	4 x 16/10	1,910	2,290	1,830	2,120
4 x 25/16	0,727	0,841	1,33	4 x 25/16	1,200	1,440	1,150	1,330
4 x 35/16	0,524	0,606	1,33	4 x 35/16	0,868	1,040	1,150	1,330
4 x 50/25	0,387	0,448	0,841	4 x 50/16	0,641	0,770	1,150	1,330
4 x 70/35	0,268	0,310	0,606	4 x 70/21	0,443	0,532	0,868	1,042*
4 x 95/50	0,193	0,223	0,448	4 x 95/29	0,320	0,384	0,641	0,769*
4 x 120/70	0,153	0,177	0,310	4 x 120/41	0,253	0,304	0,443	0,532*
4 x 150/70	0,1240	0,143	0,310	4 x 150/41	0,206	0,248	0,443	0,532*
4 x 185/95	0,0991	0,1147	0,223	4 x 185/57	0,164	0,197	0,320	0,384*
4 x 240/120	0,0754	0,0873	0,177	4 x 240/72	0,125	0,150	0,253	0,304*
4 x 300/150	0,0601	0,0695	0,143	4 x 300/88	0,100	0,120	0,206	0,247*

*Resistanssi laskettu kaavalla $R_{70}=[1+\alpha(T-20^{\circ}\text{C})]\cdot R_{20}$. Kuparin resistiivisuuden lämpötilakerroin $\alpha = 0,004$

Kuten taulukossa 1 kerrotaan, alle 120 VDC järjestelmässä ei tarvita poiskytkentää sähköiskutasuojaamisen takia, mutta vika kuitenkin pitää poistaa muista syistä. Tällöin 110 VDC järjestelmissä lasketaan kaksoismaasulku vikapiirin oikosulkuvirta kaavalla 12 ja varmistetaan, että vika kytkeytyy pois ylikuormitussuojan ansiosta. Laskennassa käytetään vajaavaraustilaisen akuston jännitettä ja sisäistä resistanssia, jotta huonoin tilanne saadaan laskettua.

$$I_k = \frac{E_B \times 0,9}{R_B \times 1,7 + Z_k \times 3} \quad (12)$$

- I_k on akuston pienin oikosulkuvirta (A)
- E_B on akuston nimellijännite (V).
- R_B on akuston sisäinen resistanssi (Ω).
- Z_k on kaapelin impedanssi (Ω).

Standardin antamassa kaavassa 9, on käytössä kerroin neljä, joka muodostuu, kun vikapiirin impedanssia laskiessa käytetään kerrointa 2 (kaava 11) ja itse kaavassa 9 käytetään myös kerrointa kaksi, kuvaamaan vikaa samaan aikaan kahdessa eri paikassa. Sähköasemilla IT-järjestelmä poikkeaa hieman normaalista IT-järjestelmästä. Sähköasemilla kulutuslaitteet ovat liitettynä maadoituksen osalta suoraan toisiinsa, minkä vuoksi koskaan ei pääse syntymään

tilannetta, jossa tarvittaisiin vikatilanteen laskemiseen kerrointa neljä. Kulutuslaitteiden välinen maadoitus käytännössä poistaa yhden reitin mitä pitkin vika-virta voisi kulkea ja tämän takia laskuissa voitaisiin käyttää kerrointa 3, joka riittäisi kuvaamaan huonointa mahdollista tilannetta. (Kivistö, 2024.)

6 VAIHTOEHTOISET OHJELMAT

Yksi opinnäytetyöni osa-alueista oli tutustua valmiisiin vaihtoehtoihin ohjelmiin, joilla kyseisiä sähköasemien apusähköjärjestelmien suunnitteluun vaa-
dittavia laskelmia voisi tehdä. Tarkoituksena ei niinkään ole verrata tekemääni Excel-laskentapohjaa valmiisiin ohjelmiin, vaan selvittää, mitä markkinoilla olisi saatavilla. Myöskään hintoihin ei tässä vertailussa keskitytä.

Despro Engineering Oy:lla on jo tällä hetkellä käytössä ohjelmia, joilla oikosul-
kuvirrat ja jännitteenalenemat voitaisiin laskea, mutta kyseiset ohjelmat eivät
tietävästi pysty laskemaan tasasähköjärjestelmien kaksoismaasulku tilanteita.
Ottaen huomioon nykyisten ohjelmistojen rajoitukset, olen suunnannut ohjel-
mistohaun erityisesti sellaisten ratkaisujen löytämiseksi, jotka mahdollisesti
pystyisivät käsittelemään kaikkia tilanteita.

6.1 ETAP

ETAP on Operation Technology Inc:n kehittämä kattava sähköverkon mallin-
nus- ja simulointiohjelmisto. Sitä käytetään laajalti sähköntuotannon ja -jakelun
ja teollisten voimajärjestelmien automatisointiin ja suunnitteluun. (ETAP, n.d.)

ETAP tarjoaa monipuolisen valikoiman sovelluksia sähköasemien apusähkö-
järjestelmien laskentoihin. Load Flow Analysis on työkalu, joka mahdollistaa
järjestelmän kuormitusten ja jännitteenalenemien tarkastelun. Short Circuit
Analysis -sovelluksella puolestaan voidaan tutkia AC-järjestelmien oikosulku-
tilanteita ja -virtoja, kun taas DC Short Circuit Analysis -ohjelmisto keskittyy
vastaaviin laskelmiin DC-järjestelmissä. Kaapelien mitoitus onnistuu Cable Si-
zing Softwarella IEC 60364 -standardin mukaisesti. AC-piirien oikosulkulas-
kennat noudattavat IEC 60909 ja IEC 61363 -standardeja, kun taas DC-pii-
reissä käytetään määrittelemätöntä IEC-standardia. Koska SFS 6000 -stan-
dardi pohjautuu suurelta osin IEC-standardeihin, niiden soveltaminen tarkas-
telumenetelminä on sallittua. (ETAP, n.d; SESKO, n.d.)

ETAP tarjoaa suunnittelun avuksi laajan komponenttikirjaston, jossa on komponentteja monilta eri valmistajilta ja toimittajilta. Komponentit voidaan rajata IEC tai ANSI standardeihin. (ETAP, n.d.)

6.2 PSCAD

PSCAD on Kanadalaisen Manitoba Hydro International Ltd. yrityksen tarjoama sähköverkköjen ja -laitteistojen suunnittelu- ja simulointiohjelmisto. PSCAD:n vahvuudet ovat suurjännitteisten järjestelmien, kuten voimalaitosten, sähkörajojen, siirtoverkkojen ja uusiutuvien energian sovelluksien vikatilojen tutkimisessa ja mallintamisessa laajan komponenttikirjaston avulla. (PSCAD, n.d.)

PSCAD:n avulla on mahdollista mallintaa laaja valikoima sähköverkon skenaarioita. Vaikka kaksoismaasulku tilanteen mallintaminen ei ole yleistä, PSCAD:n teknisen tuen mukaan ohjelmisto on teoriassa kykenevä käsittelemään tällaisia tilanteita. Heidän kokemuksensa mukaan tällaiset tapaukset eivät ole kuitenkaan yleisiä, joten he eivät ole varmoja onko PSCAD optimaalinen valinta juuri tämän tyyppisen skenaarion mallintamiseen ja laskemiseen. (PSCAD support team, 2024.)

6.3 DIgSILENT PowerFactory

DIgSILENT GmbH on saksalainen ohjelmisto- ja konsultointiyritys, joka on erikoistunut tarjoamaan palveluita sähkövoimajärjestelmien alalla. Yhtiö on kehittänyt PowerFactoryn, joka on johtava sähköjärjestelmien analysointiohjelmisto. Powerfactory ohjelmistosta on saatavilla monia versioita, joilla on erilaisia ominaisuuksia eri käyttötarkoituksiin, mukaan lukien siirto-, jakelu-, teollisuusverkot, sähköntuotanto sekä hajautettu tuotanto. (Digsilent, n.d.)

Sähköasemien apusähköjärjestelmien mitoitukseen ja tarkasteluun PowerFactory vaikuttaa todella hyvältä vaihtoehdolta. Ohjelmasta löytyy tarvittavat ominaisuudet, ei sido yhden laitevalmistajan komponentteihin ja laajan

ominaisuuskattauksen ansiosta, ohjelmaa voidaan käyttää myös muihin tarkoituksiin. (Digsilent, n.d.)

Vaihtosähköjärjestelmien oikosulkulaskennassa PowerFactory noudattaa standardia IEC 60909 ja tasasähköjärjestelmien oikosulkulaskennoissa standardia IEC 61660. Kaapeleiden mitoitukseen käytetään standardia IEC 60364-5-52. (Digsilent, n.d; SESKO, n.d.)

6.4 Ols-Consult Oy Mitoitus- ja Akkuohjelmat

Ols-Consult Oy:n tarjoaa kaksi sähköteknistä laskentasovellusta, jotka ovat suunniteltu käytettäväksi Microsoft Excel -alustalla. Nämä sovellukset ovat Akku- ja Mitoitusohjelmat, jotka ovat kehitetty helpottamaan ja nopeuttamaan sähköteknisiä mitoitustehtäviä. Molemmissa sovelluksissa käytetään sähkötekniikan peruskaavoja, sekä SFS ja IEC-standardeihin pohjautuvia laskentamenetelmiä. (Ols-Consult, n.d.)

Akkuohjelma on tarkoitettu DC-verkkojen mitoitukseen, joita syötetään akuilla. Se laskee eri keskuksien minimi- ja maksimioikosulkuvirrat, johtojen kuormittavuuden sekä suurimman sallitun sulakkeen nimellisvirran, kun sulake toimii sekä oikosulku- että ylikuormitussuojana. Ohjelman avulla on myös mahdollista määrittää ryhmä- ja liitäntäjohtojen enimmäispituudet noudattaen laukaisuehtoja, arvioida johtojen kykyä kestää lyhytaikaista virtaa sekä laskea oikosulkusuojien sallimat I^2t -arvot. Lisäksi se antaa tarvittavat resistanssiarvot PE-jatkuvuusmittauksiin ja ilmoittaa akkujen, johtojen sekä keskusten aiheuttaman jännitteenaleneman prosentuaalisesti suhteessa verkon nimellisjännitteeseen. (Ols-Consult, n.d.)

Mitoitusohjelma puolestaan on tarkoitettu vaihtojännitepiirien suunnitteluun ja mitoitukseen. Se avulla voidaan laskea esimerkiksi oikosulkuvirrat, johtojen maksimipituudet ja jännitteenalenemat. (Ols-Consult, n.d.)

Sähköasemien apusähköjärjestelmien suunnitteluun Akku- ja Mitoitus-ohjelmista löytyvät kaikki tarvittavat ominaisuudet, myös haastavat tasasähköjärjestelmien kaksoismaasulku tilanteet on mahdollista laskea Akku-ohjelmalla.

6.5 Nelfo Febdok

FEBDOK on vuonna 1991 norjalaisen sähköurakoitsijaliiton Nelfon luoma ohjelmisto, joka on suunniteltu pienjännitesähköasennusten mitoitukseen ja dokumentointiin. Se mahdollistaa sähkönjakelun mitoituksen ja tarjoaa työkalut sähköasennusten suojausten tarkistamiseen. Ohjelmisto tukee myös muita mitoitusperusteita, kuten Norjan, Ruotsin ja Iso-Britannian standardeja, jotka ovat saatavilla erikseen. Laajat komponenttikirjastot, jotka kattavat useiden suurten valmistajien tuotteet, tekevät ohjelmistosta monipuolisen työkalun sekä vanhojen että uusien sähköasennusten tarkistamiseen ja suunnitteluun. FEBDOK sisältää myös erikoistoimintoja, kuten generaattorien, muuntajien ja UPS-jakelujen järjestelmien laskennan. (Nelfo n.d.; Sähköinfo, n.d.)

FEBDOK:n laskennat ja tarkastelut perustuvat seuraaviin standardeihin:

- IEC 60909: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 0: Calculation of currents
- IEC 61363-1: Electrical installations of ships and mobile and fixed offshore units - Part 1: Procedures for calculating short-circuit currents in three-phase a.c.
- IEC 60287-1-1: Electric cables - Calculation of the current rating - Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses – General

Sähköaseman apusähköjärjestelmien suunnitteluun FEBDOK:sta löytyy melkein kaikki tarvittava. Ohjelmalla on mahdollista laskea oikosulku- ja vikavirrat, jännitteenalenemat ja myös kosketusjännitteen huomioiminen onnistuu. Tosin tasasähkö IT-järjestelmässä ohjelma ei laske toisen vian tilannetta, kun taas vaihtosähkö IT-järjestelmässä se sen laskee. Lisäksi FEBDOK auttaa virtakiskojen sekä kaapeleiden valinnassa, arvioiden niiden sopivuuden tietyille piirille.

FEBDOK:sta on myös mahdollista tulostaa erilaisia raportteja, minkä avulla laskettujen tulosten dokumentointi on helppoa. (Febdok käyttöohje, n.d., s.1 ja 82)

7 EXCEL LASKENTAPOHJA

Opinnäytetyön päätavoitteena oli luoda Despro Oy:lle uusi Excel-laskentapohja, jonka avulla voidaan laskea sähköasemien apusähköjärjestelmiä suunniteltaessa tarvittavia tilanteita. Laskentapohjan tulisi olla vanhaa selkeämpi ja helpompi käyttää, laskuissa ei saisi näkyä suunnittelijakohtaisia eroja, kuten aiemmin oli mahdollista. Laskentapohjaa lähdin toteuttamaan työhöni kerätyn teorian perusteella varmistaen, että laskut pohjautuvat voimassa oleviin standardeihin ja säädöksiin.

7.1 Käytettävyyden parantaminen

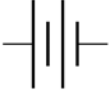
Yksi vanhan laskentapohjan suurimmista haasteista oli sen manuaalisuus. Esimerkiksi aikaisemmin kaapeleiden tiedot piti hakea taulukosta ja täyttää käsin tarvittaviin laskuihin, mikä altistaa helposti näppäilyvirheisiin, jolloin koko lasku menee väärin. Uudessa laskentapohjassa halusin poistaa ylimääräisen manuaalisen työn ja siitä johtuvat virheet, joten tein tarvittavista tiedoista taulukot, kuten kaapeleiden tiedoista, sulakkeista ja johdonsuojakatkaisijoista ja niiden toimintavirroista ja -ajoista. Taulukoiden avulla pystyin lisäämään laskuissa jokaiseen tarvittavaan kohtaan avattavan luettelon, joka täytti laskussa tarvittavat tiedot automaattisesti. Kuvassa 7 esimerkki avattavasta luettelosta. Luettelot ovat dynaamisesti päivittyviä, eli uusi taulukkoon lisätty asia tulee automaattisesti luetteloon valittavaksi.

Kaapeli reitti:		
Kaapelin lämpötila	70	°C
Kaapeli	MCMK 2 x 1,5/1,5	
Vaihejohdin resistanssi	14	Ω/km
PE-Johdin resistanssi	14	Ω/km

Kuva 7. Kaapeli kohdassa on avattava luettelo eri kaapeleista, kaapelin valitua, täyttää Excel automaattisesti Vaihe- ja PE-johtimen resistanssit.

Toinen käytettävyyttä parantava muutos oli laskentapohjan visuaalisuuden uudistaminen. Excel koostuu neljästä eri laskentavälilehdestä:

Jännitteenalenema AC, Jännitteenalenema DC, oikosulkuvirta ja kaksoismaasulku. Jokainen laskentavälilehti alkaa lähtötietojen täyttämällä, jonka jälkeen täytetään yksi kaapelireitti kerrallaan (kuva 8). Uusi kaapelireitti kohta osaa ottaa huomioon aina edeltävänsä kaapelin ja sen tiedot. Kaapelireittejä voidaan lisätä ja poistaa tarvittaessa. Jokainen laskentataulukko on suunniteltu niin, että sen tulostaminen PDF-muodossa tuottaa selkeän ja ammattimaisen asiakirjan.

Akusto:		G02-akusto	
Nimelliskapasiteetti:	393	Ah	
Yhteensä kennoja:	107	kpl	
Kennon jännite	2	V	
Oikosulkuvirta I _{k_akusto} :	3500	A (100 % varaustasolla, valmistajan ilmoittama)	
Järjestelmän nimellisjännite E _b :	214	V (kennojännitteellä 2,0 V)	
Järjestelmän maksimijännite E _{bmax} :	251,5	V (pikavarausjännitteellä 2,35 V/kenno)	
Järjestelmän minimijännite E _{bmin} :	192,6	V (U _n * 0,9. IEC 61660-1 s.37)	
Sisäinen resistanssi täysi akku R _b :	0,061	Ω (koko akustolle, U _n / I _k)	
Sisäinen resistanssi tyhjä akku R _b :	0,1039	Ω (koko akustolle, 1,7 * R, 100 % varaustasolla. IEC 61660-1 s.37)	

Kaapeli reitti:			
Johtimen poikkipinta:	1,5	mm ²	
Vaihejohdin	12,1	Ω/km 20 °C	
Virta I	2,34	A	
Teho	500	W	
Kaapelin pituus	5	m	
Jäännösjännite	213,72	ΔU	
Suhteellinen j-alenema	0,13 %	Δu	OK

Jännitteenalenema laskettu kaavalla $\Delta U = I \times 2R \times L$. Jännitteenaleneman oltava alle 5 %, silloin OK. Laskennassa noudatetaan standardia SFS 6000.

Kuva 8. Esimerkki kuva DC jännitteenaleneman laskusta.

7.2 Laskut

Kaikki laskentapohjan laskut pohjautuvat tässä opinnäytetyössä esitettyihin kaavoihin ja sääntöihin. Jokaisessa laskennassa tarkistetaan, että saadut arvot ovat standardin sallimissa rajoissa, täten noudattaen SFS 6000 ja IEC 61660 sarjan standardeja.

Excelissä kaikki kaavat toimivat dynaamisesti ja esimerkiksi lähtöarvojen muuttaminen muuttaa samalla kaikkia sen alapuolella siihen liittyviä laskelmia. Tämän vuoksi laskentapohjaa voidaan käyttää jo suunnittelun alkuvaiheista alkaen, tarkistaen pysyvätkö tilanteet sallittujen arvojen sisällä suunnittelun edetessä, helpottaen koko suunnitteluprosessia.

8 YHTEENVETO

Tämän työn tavoitteena oli perehtyä sähköasemien apusähköjärjestelmiin, niiden toimintaan, tarpeellisuuteen ja niissä tapahtuvien vikatilanteiden laskemiseen. Opinnäytetyö voidaan jakaa kolmeen osaan. Työn alussa tutustutaan sähköasemiin laajemmin kirjallisuuden avulla, jonka jälkeen keskitytään apusähköjärjestelmiin ja standardeihin, joita suunnitellessa pitää noudattaa. Näiden jälkeen läpikäydään virhetilanteet ja niiden laskeminen. Lopussa tarkastellaan markkinoilla olevia eri vaihtoehtoja, jotka mahdollistavat laskelmien tekemisen ja läpikäydään hieman toteutetun Excel-laskentapohjan toimintaa.

Opinnäytetyön tärkeimpänä asiana tilaajan kannalta oli saada uusi laskentapohja sähköasemasuunnittelijoiden käyttöön. Desprolla oli jo jonkin aikaa ollut tarve saada uusi laskentapohja apusähköjärjestelmien laskelmiin, sillä vanha oli työläs käyttää ja sillä oli esimerkiksi mahdollista saada suunnittelijakohtaisesti eri tuloksia. Uuden Excel-laskentapohjan tein hyödyntäen kokoamaani aineistoa, ohjaajani suosituksia sekä suunnittelijoiden toiveita. Laskentapohjalla on mahdollista laskea neljä eri apusähköjärjestelmissä tapahtuvaa vikatilannetta; Oikosulku, AC ja DC jännitteenalenemat ja kaksoismaasulku. Ennen lopullista luovuttamista laskentapohja oli suunnittelijoilla testikäytössä, jotta kaikki epäkohdat saadaan hiottua pois, ja jotta lopullisesta versiosta saadaan heti käyttövalmis tulevaisuuden projekteihin.

Laskentapohjasta tuli omasta ja suunnittelijoiden mielestä selkeä ja helppo käyttää, ja se tulee toivottavasti helpottamaan suunnittelua tulevaisuudessa. Toivon, että laskentapohjasta tulee suunnittelijoiden vakituinen työkalu, suunnittelutyön tueksi. Kehitysehdotuksena laskentapohjan tulosten tulostus mahdollisuutta voisi parantaa. Tällä hetkellä laskentapohjasta on mahdollista viedä koko yksittäinen sivu PDF-tiedostoksi. Tätä voisi kehittää niin, että nappia painamalla Excel osaisi viedä tulokset valmiiseen Word-pohjaan, joka voitaisiin sellaisenaan toimittaa asiakkaalle.

Opinnäytetyön toissijaisena tavoitteena oli myös tutustua markkinoilta löytyviin ohjelmiin, joilla tarvittavat laskelmat ja tarkastelut voitaisiin tehdä. Vertailuun valikoiduista ohjelmista kaksi oli erittäin kiinnostavia, Ols-Consult Mitoitus- ja Akku-ohjelmat ja DlgSILENT:n tarjoama PowerFactory. Ols-Consult:n tarjoamien ohjelmien vahvuus on se, että ne on suunniteltu nimenomaan Despron tarvitsemaan tarkoitukseen. PowerFactoryn etuna on, että Desprolla on jo olemassa oleva lisenssi ohjelmaan, mikä mahdollistaa sen laajan käytön eri suunnittelutehtävissä. Tulevaisuudessa näihin ohjelmiin tulisi ehdottomasti tutustua tarkemmin.

Opinnäytetyön tekemisen aikana pääsin tutustumaan sähköasemiin ja varsinkin apusähköjärjestelmien toimintaan todella syvällisesti. Opin erityisesti standardien vaatimuksista ja siitä, kuinka niitä kuuluu soveltaa apusähköjärjestelmiä suunniteltaessa. Olen päässyt soveltamaan standardeja myös aikaisemmissa koulutöissä, mutta en koskaan niin laajasti ja tarkasti, mitä tämä työ vaati. Tämän vuoksi koen, että sain hyvän kosketuksen siihen, kuinka tarkkaa suunnittelutyö oikeasti on ja mitä siihen vaaditaan, että sähkönjakelu toimii varmasti ja turvallisesti tilanteesta riippumatta.

LÄHTEET

ABB. (n.d.). Pienjännitekojeet. https://library.e.abb.com/public/26b7051f45e4e9ccc125707300247ed9/s200_1fi05_01.pdf

Antti Ryyänen. (2016). Kokonaistaloudellisin ratkaisu uusien sähköasemien apusähköjärjestelmän varmentamiseksi. [Diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto]. Trepo. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:tty-201608234434>

Despro Engineering Oy. (n.d.). Intohimoiset insinöörit luomassa tulevaisuutta. Haettu 19.9.2023 osoitteesta <https://www.despro.fi/yritys/>

Digsilent. (n.d.). Features overview. Haettu 2.2.2024 osoitteesta <https://www.digsilent.de/en/features.html>

Edvard Csanyi. (2015). Substation DC Auxiliary Supply – Battery And Charger Applications. <https://electrical-engineering-portal.com/substation-dc-auxiliary-supply-battery-and-charger-applications>

Elovaara J., & Haarla L. (2011). Sähköverkot 1 — Järjestelmätekniikka ja sähköverkon laskenta. Otatieto.

Elovaara J., & Haarla L. (2011). Sähköverkot 2 — Verkon suunnittelu järjestelmät ja laitteet. Otatieto.

ETAP. (n.d.). ETAP verkkosivut. Haettu 20.2.2024 osoitteesta <https://etap.com/>

Fingrid. (n.d.). Käytösäännöt. Haettu 4.12.2023 osoitteesta <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/markkinoiden-yhtenaisyyys/verkkosaannot/kayttosaannot/#network-code-for-emergency-and-restoration-nc-er>

Kalle Siivonen. (2007). Sähköaseman apusähköjärjestelmät. [AMK-opinnäytetyö Tampereen ammattikorkeakoulu]. Theseus. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201003064626>

Kivistö P. (12.9.2023). Henkilökohtainen keskustelu Pasi Kivistön kanssa.

Kivistö P. (12.2.2024). Henkilökohtainen keskustelu Pasi Kivistön kanssa.

Lakervi E., & Partanen J. (2008). Sähkönjakelutekniikka. Otatieto.

Lauri Hietalahti. (2013). Sähkövoimatekniikan perusteet. Tammertekniikka.

Mikko Broman. (2012). Julkisen rakennuksen sähköverkon suunnittelu ja oikosulkutarkastelu. [AMK-opinnäytetyö, Tampereen ammattikorkeakoulu]. Theseus. <https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201305117761>

Nelfo. (n.d.). Fedbok. Haettu 4.12.2023 osoitteesta <https://www.nelfo.no/produkter-og-tjenester/febdok/in-english/>

Ols-Consult. (n.d.). Tuotteet. Haettu 17.1.2024 osoitteesta <http://www.ols-consult.fi/tuotteet.html>

Petteri Haveri. (2006). Kaupunkisähköaseman elinkaaren hallinta. [Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu]. Aaltodoc. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2006/urn007221.pdf>

PSCAD. (n.d.). The World's Most Advanced Tool for Power Systems EMT Simulations. Haettu 23.1.2024 osoitteesta <https://www.pscad.com/software/pscad>

PSCAD support team. (31.1.2024). PSCAD tuen sähköpostiviesti.

Reka. (n.d.). Kaapeleiden tekniset tiedot. Haettu 19.2.2024 osoitteesta <https://www.reka.fi/kaapelitietoa/kaapeleiden-tekniset-tiedot/>

SESKO. (n.d.). SFS-/IEC-/EN-standardit. Haettu 2.2.2024 osoitteesta <https://sesko.fi/standardit/sfs-iec-en-standardit/>

SFS 6000-1:2022. Pienjännitesähköasennusten standardisarja. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi>

SFS 6000-4-41:2022 Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–41: Suojausmenetelmät. Suojaus sähköiskulta. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi>

SFS 6000-4-43:2022 Pienjännitesähköasennukset. Osa 4–43: Suojausmenetelmät. Ylivirtasuojaus. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi>

SFS 6000-5-52:2022 Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–52: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi>

SFS 6000-5-57:2022 Pienjännitesähköasennukset. Osa 5–57: Sähkölaitteiden valinta ja asentaminen. Kiinteiden akustojen asennukset. Suomen Standardisoimisliitto. <https://online.sfs.fi>

SFS-EN 61660-1 Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations - Part 1: Calculation of short-circuit currents. <https://online.sfs.fi>

Sähköinfo. (2022). D1-2022 Käsikirja rakennusten sähköasennuksista. Sähköinfo.

Sähköinfo. (n.d.). Fedbok. Haettu 13.1.2024 osoitteesta <https://www.sahkoinfo.fi/product/group/63>

Sähköinfo. (n.d.). Fedbok käyttöohje. Haettu 13.1.2024 osoitteesta <https://severi.sahkoinfo.fi/DocumentRoot/feb-dok/K%C3%A4ytt%C3%B6ohje,%20Febdok%206.x.pdf>

ST 52.30.02. Akustot ja varaajat. Valinta ja mitoittaminen. (2016). Sähköinfo Oy. <https://severi.sahkoinfo.fi>

ST 53.14 Ohjeet perinteisten sulakkeiden valinnasta ja käytöstä alle 1000 V:n sähköjärjestelmät. (2018). Sähköinfo Oy. <https://severi.sahkoinfo.fi>

ST 53.24 OHJEITA KIINTEISTÖJEN ENINTÄÄN 1000 V JOHTOJEN MITOITUKSESTA JA SUOJAUKSESTA. (2017). Sähköinfo Oy. <https://severi.sahkoinfo.fi>

ST-Käsikirja 20 Varmennetut sähkönjakelujärjestelmät. (2005). Sähkötieto. <https://severi.sahkoinfo.fi>

Tiainen E. (2014). Pienjännitesähkölaitteiston mitoitus. Sähköinfo Oy