



Keskijännitekojeiston suojarleiden konfigurointi teollisuusympäristössä

Oiva Rimpiläinen

Opinnäytetyö, AMK

Joulukuu 2024

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma

Rimpiläinen, Oiva

Keskijännitekojeiston suojausjärjestelmien konfigurointi teollisuusympäristössä

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu, Joulukuu 2024, 43 sivua.

Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: Suomi

Julkaisulupa avoimessa verkossa: Kyllä

Tiivistelmä

Opinnäytetyö kirjoitettiin Elektron E oy:n toimeksiannosta. Tavoitteena oli avata suojausjärjestelmien konfiguraatiota ja sen lähtökohtia lukijalle ymmärrettävällä tavalla, kun suojattava kohde on teollisuusalueen keskijännitekojeisto. Samalla opinnäytetyö kehitti toteuttajan omaa ymmärrystä suojausjärjestelmien konfiguraatiosta.

Työ toteutettiin soveltavana tutkimuksena. Myös laadullisia menetelmiä käytettiin kokemuspohjaisen tiedon tukemiseen. Näin varmistettiin, että työssä huomioitiin sekä teoreettiset perusteet että käytännön sovellukset, mikä teki työstä kattavan ja toimeksiantajan tarpeisiin sopivan.

Opinnäytetyön tuloksena luotiin suojausjärjestelmien toimintojen teoriatausta lyhyen toimintaselosteen kanssa. Toimeksiantajalle toimitettiin laajempi salassa pidettävä suojausjärjestelmien konfiguraation toimintaseloste. Koska suojausjärjestelmien konfiguraatio on monimutkainen ja vaatii perehtymistä, työssä painotettiin erityisesti olennaisten käsitteiden ja periaatteiden esittämistä ymmärrettävästi ja systemaattisesti.

Avainsanat (asiasanat)

Suojausjärjestelmät, konfigurointi, suojausjärjestelmien konfiguraatio, keskijännitekojeistot, releasetukset, vikavirtasuojaus, vikasuojaus, häiriösuojaus, releet, sähköjakelu, kytkinlaitteet, sähkölaitteet, älykkäät sähköverkot

Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

Liite 1. on salassa pidettävä, ja se on poistettu julkisesta työstä. Salassapidon peruste on Julkisuuslain 621/1999 24§, kohta 17, yrityksen liike- tai ammattisalaisuus. Salassapitoaika on kolmekymmentä (30) vuotta, salassapito päättyy 1.1.2055

Rimpiläinen, Oiva

Configuration of protection relays for medium-voltage switchgear in an industrial environment

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, December 2024, 43 pages

Degree Programme in Automation and Electrical Technology. Bachelor's thesis.

Permission for open access publication: Yes

Language of publication: Finnish

Abstract

The thesis was commissioned by Elektron E oy. The objective was to create a text that allows the reader to understand the basics of protection relay configuration when the protected target is a medium-voltage switchgear in an industrial area.

The thesis was carried out as applied research. Qualitative methods were also utilized to support experience-based knowledge. This ensured that both theoretical foundations and practical applications were considered, making the work comprehensive and well-suited for the commissioning company's needs.

The result of the thesis is a theoretical background of the functions of protection relays, along with a brief operational description of relay configuration. A more extensive confidential operational description was created for the commissioning company. Due to the complexity of the protection relay configuration, the thesis particularly focused on presenting the essential concepts and principles in a clear and systematic manner.

Keywords/tags (subjects)

Protection relays, configuration, protection relay configuration, medium-voltage switchgears, relay settings, fault current protection, fault protection, relays, power distribution, switching devices, electrical devices, smart grids

Miscellaneous (Confidential information)

Appendix 1 is confidential and removed from the public thesis. The basis for secrecy is section 24(17) of the Act on the Openness of Government Activities (621/1999), a company's business or trade secret. The period of secrecy is thirty (30) years, the secrecy will end on the 1st of January 2055.

Sisältö

1	Johdanto	3
1.1	Osana tulevaisuuden sähköjakelua.....	3
1.2	Toimeksiantaja	4
2	Työn lähtökohdat	4
2.1	Rajaus	4
2.2	Eettisyys ja luotettavuus	6
2.3	Tutkimusote	7
3	Teollisuusalueen sähköjakelun suojaaminen	8
3.1	Keskijännitekojeisto	8
3.2	Suojarele.....	10
4	Ohjaustoiminnot.....	12
4.1	Ohjaussignaalit	12
4.2	Matriisi	13
4.3	Ohjelmoitava logiikka.....	15
4.4	Toimintopainikkeet	15
4.5	Lukitukset	16
5	Mittaustoiminnot	17
5.1	Yleistä	17
5.2	Virtamittaus.....	18
5.3	Jännitemittaus.....	19
5.4	Muut mittaukset	20
6	Avustavat toiminnot	20
6.1	Sisäinen relevika ja itseseuranta	20
6.2	Tapahtumaloki.....	21
6.3	Häiriötallennin.....	21
6.4	Laukaisupiirin valvonta.....	22
6.5	Virtamittauspiirin valvonta	22
6.6	Katkaisijan kunnon valvonta	23
7	Suojausfunktiot	23
7.1	Suojausfunktion nimeäminen	24
7.2	Aikaviive ja suunnattu suojaus.....	25
7.3	Ylivirtasuojaja	27
7.4	Maasulkusuojaja	29

7.5	Valokaarisuoja	29
7.6	Katkaisijan vikasuoja	30
7.7	Jännite- ja taajuussuojat	32
8	Kommunikaatio	32
8.1	Yleistä	32
8.2	Profibus	32
8.3	IEC61850.....	33
9	Suojarelekonfiguraation toteutus	34
10	Pohdinta.....	38
	Lähteet	40
	Liitteet	43
	Liite 1. Suojarelekonfiguraation toteuttaminen teollisuuden keskijännitekojeistolle (salassa pidettävä)	43

Kuviot

Kuvio 1.	Yksinkertaistettu keskijännitekojeiston pääkaavio.....	9
Kuvio 2.	Matriisiesimerkki.....	14
Kuvio 3.	Logiikkaesimerkki	15
Kuvio 4.	Virtamittamuuntajan sähköpiirustuksen esimerkki	18
Kuvio 5.	Jännitemittauksen esimerkki	20
Kuvio 6.	IEC60617 standardin mukainen ylivirtamerkintä.....	25
Kuvio 7.	IEC60617 standardin mukaiset suojauksen alamerkinnot	26
Kuvio 8.	Ylivirtasuojan laukaisukäyrän esimerkki	28
Kuvio 9.	Katkaisijan vikasuojaesimerkki.....	31
Kuvio 10.	Katkaisijan vikasuojan aikajana	31
Kuvio 11.	Mimiikka.....	36
Kuvio 12.	Suojausten aktivoiminen.....	36
Kuvio 13.	Ylivirtasuojan 1. portaan vakioaika-asetteluarvojen esimerkki	36
Kuvio 14.	Mittauspiirin aikaviiveen määrittäminen.....	37
Kuvio 15.	Käytännön matriisiesimerkki.....	37

1 Johdanto

1.1 Osana tulevaisuuden sähköjakelua

Älykkäät sähköverkot on laaja termi, jota käytetään kuvaamaan nykymaailman sähköverkkoja. Se edustaa käsitteenä trendiä, koska ei ole olemassa yhtä pistettä, missä sähköverkkoa voidaan pitää älykkäänä. Pohjimmiltaan älykkäässä sähköverkossa tavoitteena on, että sähkönjakelu ja -käyttö olisi mahdollisimman helppoa, tehokasta ja automatisoitua aina sähkön tuotannosta käyttäjän kahvinkeittimeen asti.

Yksi syy älykkäiden sähköverkkojen kehittämiseksi on yksinkertaisesti tarve kattavammille toiminnoille sähkönjakelussa erilaisten käyttö- ja sähköntuotantokohteiden muuttuessa maailman kehityksen mukana. Esimerkiksi uusiutuvien energianlähteiden yleistyminen maailmalla on positiivinen asia kestävän kehityksen kannalta, mutta niiden käyttöönotto on haastavaa. Tuuli- ja aurinkovoima ovat sääolosuhteista riippuvaisia, ja tämä aiheuttaa uudistamisen tarpeita sähköverkoissa, joissa järjestelmän toimivuus perustuu tasaiseen ja ennaltaodotettavaan energian tuotantoon. Älykkäiden sähköverkkojen trendiä voidaan havainnoida tutkimalla esimerkiksi investointien määrää energiasektorin eri osa-alueille. Euroopan komissio julkaisi ”Digitalization of the energy system” toimintasuunnitelman vuoden 2022 lopulla ja odottaa 584 miljardin euron investointia Euroopan sähköverkkoihin vuoden 2030 loppuun mennessä. Tästä summasta 170 miljardia menisi verkkojen digitalisaatiosektorille. (Smart Grids n.d.)

Kun uusia sähköntuotantolaitoksia ja jakelukeskuksia pystytetään, niiden sähköverkot pitää suojata perusteellisesti erilaisilta vikatiloilta, jotka voivat aiheuttaa henkilö- tai materiaalivahinkoja. Yksi tärkeimmistä komponenteista sähkönjakelujärjestelmässä on sähköaseman kojeiston suojaus. Suojarele kerää ja käsittelee sähköverkon mittaustietoja, joiden perusteella se vikatilassa lähettää avaamiskäskyn katkaisijalle sähkön syötön keskeyttämiseksi. Suojareleiden osuus älykkäiden sähköverkkojen kehittämisessä on merkittävä. Tästä on näkynyt selkeä trendi jo kauan; suojaustoimintoja kehitetään toimimaan nopeammin ja tarkemmin, ja sähköasemien toimilaitteiden tilatietoja ja sähkönjakelun parametreja halutaan seurata aktiivisesti etäluettavilla valvontajärjestelmillä. Tämä opinnäytetyö seuraa älykkäiden sähköverkkojen kehittämisen trendiä ja tukee tulevaisuuden sähkönjakelun kehitystä avaamalla lukijalle suojauskonfiguraation toimintaperiaatteet.

1.2 Toimeksiantaja

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimi Elektron E oy. Elektron E oy on sähköurakointiyritys, joka toimii laaja-alaisesti erilaisissa sähköprojekteissa. Elektron E oy:n toteuttamia projekteja ovat mm:

- Kemin biotuotetehtaan pääsähkönjakelun asennusurakka.
- Tammiston 400/110 kV sähköaseman saneeraus ja asennusurakka.
- Keski-Suomen uusi aluesairaala Nova, Sähkön pää- ja nousujakelujärjestelmät. (Elektron n.d)

Yrityksenä Elektron E oy pyrkii kilpailukykyiseen toimintaan. Strategiansa mukaisesti Elektron on investoinut oman suunnittelukapasiteetin kasvattamiseen. Suojareleiden konfigurointiosaaminen on olennainen osa sähkötekniisiä suunnittelupalveluita. Opinnäytetyö liittyy tehtäviini Elektronilla, jossa toimin harjoittelijana suunnittelutiimissä vuoden 2024 projektien toteutuksessa. Konfiguraatioprosessien aikana huomasin, miten tehtävän haastavuutta lisää merkittävästi suojausteknisen perusosaamisen puute. Vaikka en joutunut tekemään konfiguraatioita yksin ja prosessia oli tukemassa kokenut sähköinsinööri, riittävän tiedon puute loi prosessiin epävarmuuden, joka hidasti toimintaa merkittävästi. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda konfiguraatioprosessia tukeva teoria- ja toimintapohja, jonka avulla aiheeseen ensimmäistä kertaa tutustuva henkilö voi nopeuttaa oppimisprosessia. Toisena tavoitteena oli kehittää omaa suojausteknistä osaamistani.

2 Työn lähtökohdat

2.1 Rajaus

Kaikilla suojarlevalmistajilla on omat järjestelmät, jotka määrittävät laitteiden toiminnan ja käyttömahdollisuudet. Suojareleiden toimintaperiaatteet voivat siksi vaihdella laitevalmistajien välillä. Suojareleille on standardeja, jotka määrittävät esimerkiksi suojausfunktioiden nimet ja laitteiden toimintavaatimukset. Käytettävä laite on silti erittäin merkittävä tekijä siinä, miten konfiguraatioprosessi etenee. Tunnettuja suojarlevalmistajia ovat esimerkiksi

- Schneider Electric
- ABB
- Siemens
- GE Grid solutions
- Eaton

- SEL (Schweitzer Engineering Laboratories)
- Mitsubishi Electric.

Tämä opinnäytetyö keskittyy erityisesti Schneider Electricin P3-suojarelesarjan sekä ABB:n REF615 ja REX640 suojareleiden toimintaperiaatteisiin, mikä rajaa myös tietopohjan näiden relevalmistajien käytänteisiin.

Suojareleiden konfiguraatioprosessiin vaikuttaa paljon se, millaista suojaustasoa verkon omistaja toivoo ja millaista kohdetta suojataan. Maaseudulla kulkevat ilmajohtodot vaativat automaattisen jälleenkytkentätoiminnon ilmajohtoon luonteen vuoksi. Suurin osa ilmajohtoisissa syntyvistä vioista ovat väliaikaisia (Easergy P3 Universal Relays P3U10, P3U20 and P3U30 User Manual 2022, 232). Puun oksan osuessa ilmajohtoon voi puun runkoa pitkin syntyä hetkellinen maasulku johdon ja maan välille. Oksa on saattanut osua johtoon vain hetkellisesti tuulen vaikutuksesta, mutta vain hetkellinenkin maasulku voi laukaista johtoa syöttävän kennon suojauksen. Suojauksen lauettua rele lähettää avaamiskäskyn katkaisijalle, jolloin vika-alueelle tulee sähkökatko. Jälleenkytkentä mahdollistaa tällaisessa ympäristössä hallitun ja automaattisen katkaisijan uudelleensulkemisen, millä vältetään ylimääräinen resurssien käyttäminen sellaisen ongelman ratkaisemiseen, mitä ei välttämättä olisi tarvinnut välittömästi selvittää. Tällaisissa hetkellisissä vikatilanteissa on järkevämpää kytkeä sähköverkko jännitteiseksi ja tutkia vikaa jälkeinpäin. Kokonaisen alueen pitäminen ilman sähköä ei ole järkevää, ellei vika pysy aktiivisena vielä uudelleenkytkennän jälkeenkin.

Teollisuusalueilla käytetään yleensä ilmajohtojen sijaan maakaapelia. Maan sisälle asennettu kaapeli on suojassa erilaisilta ympäristörasitteilta, millä taataan sujuva ja luotettava sähkönjakelu kriittisiin kohteisiin. Teollisuudessa esiintyy myös paljon erilaisia kuormia, jotka vaativat räätälöityjä suojauskokonaisuuksia. Moottorit luovat korkeita virtapiikkejä käynnistystilanteissa ja muuntajien jännitteistämispölyssä syntyy harmonisia yliaaltoja, jotka voivat laukaista herkä ylivirtasuojaukset. Tämä opinnäytetyö käsittelee sähköaseman kojeiston suojarelekonfiguraatiota, jossa toiselta sähköasemalta syötetty keskijännite jaetaan useisiin lähtöihin eri teollisuusprosessien tarpeisiin. Työssä käydään läpi suojausfunktioita, jotka ovat tällaiselle kohteelle välttämättömiä, ja siksi esimerkiksi moottorilähdön suojaamista tai kahden eri syötön tahdistamista ei käsitellä. Työn oletuksena on myös, että keskijännitekojeiston jakelujärjestelmä

on maasta erotettu. Työ poikkeaa tästä rajauksesta muutamassa maininnassa. (Easergy P3... 2022, 257.)

2.2 Eettisyys ja luotettavuus

Opinnäytetyössä noudatettiin hyvää tieteellistä käytäntöä ja raportointi tehtiin JAMK:in raportointiohjeiden mukaisesti. Työ perustuu vahvasti henkilökohtaiseen kokemukseen relekonfiguraatiosta, mutta empiirisesti kerättyä tietotaitoa tuettiin vastuullisilla analyysimenetelmillä.

Opinnäytetyön aikana toteutettiin haastattelu. Ennen haastattelua haastateltavalle kerrottiin haastattelun tarkoitus, haastattelun vapaaehtoisuus ja haastattelumateriaalin käsittelyn periaatteet. Haastateltavan kysymyksiin prosessiin liittyen vastattiin rehellisesti ja vastuullisesti. Haastattelumateriaalia säilytettiin opinnäytetyöprosessin aikana opiskelijan henkilökohtaisessa tietokannassa analysointia varten. Vain opinnäytetyön kirjoittajalla oli pääsy haastattelumateriaaliin ja työn valmistuttua materiaali hävitettiin. Haastattelun tavoitteena oli kerätä materiaalia laadullista analyysiä varten sellaisesta aiheesta, josta ei löytynyt luotettavia lähteitä.

Opinnäytetyöprosessissa hyödynnettiin tekoälysovellusta ChatGPT. Tekoälyä käytettiin opinnäytetyön toteutusvaiheen ideointiin sekä lähteiden etsimiseen ja analysointiin. Ideointivaiheessa tekoälylle esitettiin kysymyksiä, jotka tukivat opinnäytetyön rakenteellisia ratkaisuja. Lähteiden etsinnässä tekoälyn ehdottamien lähteiden luotettavuus arvioitiin huolellisesti ennen niiden käyttämistä. Lisäksi pitkien lähteiden analysointiin käytettiin tekoälyä lataamalla lähdetiedostoja sovellukseen, mikä mahdollisti tarkasti määriteltyjen mainintojen tehokkaan etsimisen. Tämä menetelmä nopeutti erityisesti pitkien asiakirjojen olennaisten tietojen löytämistä.

Työtä varten luotiin kuvioita Autocad-sovelluksella ja ottamalla kuvankaappauksia itse luoduista konfiguraatioista. Kuvioissa havainnollistettiin suojarelekonfiguraatiolle tärkeitä asioita. Jokainen opinnäytetyön kuvio on luotu itse, eikä niissä siksi ole lähdemerkintöjä. Kuvioissa käytetyt sähkötekniset merkit luotiin IEC60617- ja IEEE C37/2 standardien mukaisesti. Opinnäytetyön salassapidettävän liitteen kuvioissa on kuvankaappauksia myös projektikohtaisista sähköteknisistä

piirustuksista. Näissä piirustuksissa vain käsiteltävä asia on näkyvässä, eikä asiakas tai kuvion kohde käy niistä ilmi.

2.3 Tutkimusote

Työ perustuu vahvasti toteutettujen projektien suojarolekonfiguraatioon. Projekteja varten kerätyn tietotaidon avulla luotu konfiguraatioprosessi on opinnäytetyön pohja, eli työn tutkimusmenetelmä on pohjimmiltaan soveltavaa tutkimusta. Soveltavalla tutkimuksella kerättyä tietotaitoa analysoitiin laadullisesti teorialähtöisellä sisällönanalyysillä, jossa valmista teoriaa verrataan lähteistä löytyvään tietoon (Leinonen 2018). Tämä analyysitapa valittiin, jotta työelämässä opittuja asioita ja periaatteita voi tutkia kriittisesti luotettavien lähteiden avulla. Analyysitapaa varten kerättiin luotettavia kirjoja, standardeja sekä verkkojulkaisulähteitä käyttäen verkkoselaimen lisäksi Jyväskylän ammattikorkeakoulun Janet.finna verkkokirjastoa ja erinäisiä tietokantoja, joihin tästä kirjastosta on Jyväskylän ammattikorkeakoulun opiskelijoilla pääsy.

Yhteen teemaan oli vaikea löytää luotettava lähde, joten myös lyhyt laadullinen haastattelu toteutettiin. Haastateltava oli kokenut diplomi-insinööri laajalla suojaus- ja jakeluverkkoteknisellä osaamisella, joten luotettavuus ei ole ongelma. Haastattelun teeman avautumisen jälkeen lähteiden löytäminen olisi onnistunut helpommin, mutta alkuperäistä haastattelua käytettiin silti lähteenä.

Opinnäytetyön tutkimuskysymykset muodostuivat työn tavoitteiden perusteella. Opinnäytetyön kirjoittamisvaihe rakentui kysymysten ympärille, jotka muovasivat työn rajaukseen ja rakenteen. Kysymykset kiteytyivät kahteen laajaan kysymykseen:

- Mitä toimintoja suojaroleilla on?
- Miten suojaroleen konfiguraatioprosessi etenee?

Ensimmäinen tutkimuskysymys tarjoaa lukijalle kattavan ymmärryksen suojarolekonfiguraatiosta kokonaisuutena. Tämän avulla lukija saa tarvittavan pohjatiedon toisen kysymyksen tarkasteluun, jossa keskitytään konfiguraatioprosessin etenemiseen käytännössä. Molemmat kysymykset liittyvät kiinteästi opinnäytetyön aiheeseen ja tukevat kokonaisvaltaista suojausteknistä ymmärrystä.

3 Teollisuusalueen sähkönjakelun suojaaminen

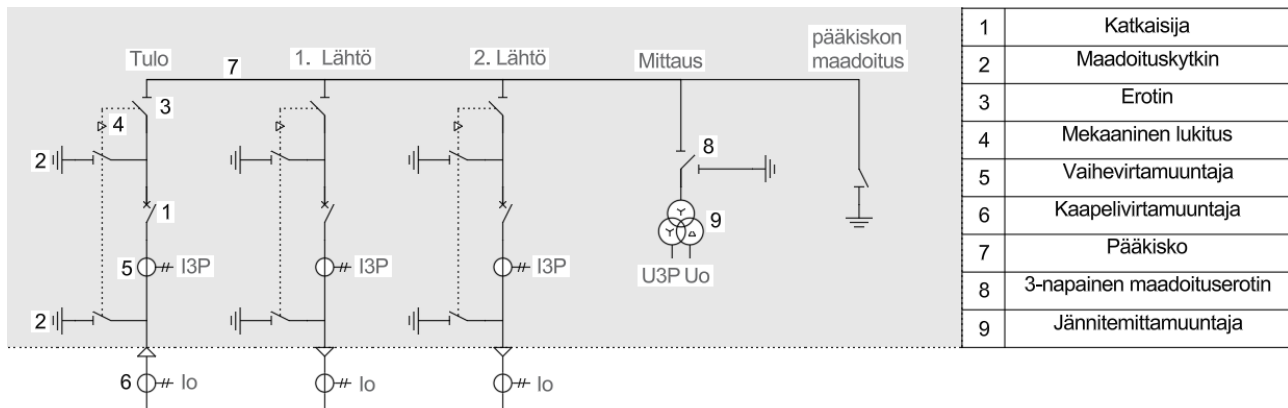
3.1 Keskijännitekojeisto

Teollisuusympäristöjen sähkönjakelussa käsitellään suuria jännite- ja virta-arvoja korkeatehoisten prosessien sähköistämiseksi. Kattava sähkönjakeluverkko on tärkeä osa teollisuusalueita, koska eri prosessit voivat olla pitkien etäisyyksien päässä toisistaan. Keskijännitekojeiston tehtävä teollisuusalueen kokonaisuudessa on ohjata ja hallita sähkön jakamista prosesseille erilaisten kytkentälaitteiden avulla ja varmistaa henkilöstön turvallisuus ja laitteiston kunto nopealla sähkönsyötön katkaisulla (What is a medium voltage switchgear 2022). Suomessa keskijännite määritetään jännitealueelle 1-36 kV (Keskijännite 2014). Opinnäytetyössä käsiteltävä kojeistotyyppi on maasta eristetty jakelukeskuksen kojeisto, jota syötetään suoraan toiselta sähköasemalta tulevalla keskijännitteellä. Tällainen kojeisto vastaa jännitteen jakamisesta pääkiskon kautta eri alueille ja prosesseille.

Sähkökojeistojen yhteydessä termi ”syöttö” on yleistermi, jolla tarkoitetaan toiselta kojeistolta tai päämuuntajalta tulevaa kaapeliyhteyttä. ”Lähtö” termillä kuvataan lähteviä kaapeliyhteyksiä. ”Kenno” ja ”kenttä” ovat yleistermejä, jotka tarkoittavat fyysisesti toisistaan eristettyjä syöttöjä, lähtöjä, mittauskenttiä ja maadoituskennoja. Keskijännitekojeistoissa jokaisella kaapelilähdöllä ja syötöllä on oma numeerinen suojarole tai mittaus- ja tilatietojen keräysyksikkö eli merging unit (MU). Suojareleet vastaavat pääkiskon ja kaapeliyhteyksien suojaamisesta kerättyjen signaalien avulla. Keräysyksiköt käsittelevät samoja signaaleja kuin suojaroleet, mutta lähettävät ne muuta käyttöä varten IEC61850-standardin mukaisesti. Esimerkiksi ABB:n keskitetty suojauslaite jakelukeskuksille SSC600 kykenee keräämään mittatietoja eri keräysyksiköiltä ja toteuttamaan aseman suojaukset keskitetysti (Centralized protection for distribution substations n.d.). Numeeriset suojaroleet toimivat myös keräysyksikköinä.

Kuviossa 1 on yksinkertaistettu esimerkki keskijännitekojeiston pääkaaviosta. Kojestoon kuuluu kuviossa harmaa alue. Nuolet kojeiston alaosassa kertovat syöttöjen ja lähtöjen tehon suunnat. Pääkaaviossa pääkiskoa kuvaavan vaakatasoisen viivan haarat kuvaavat pääkiskon fyysistä

jakautumista vierekkäisiin, toisistaan erotettuihin kennoihin. Pääkisko on yleensä kuparista tai alumiinista valmistettu kisko, joka kulkee näiden kennojen läpi jännitteen jakamista varten.



Kuvio 1. Yksinkertaistettu keskijännitekojeiston pääkaavio.

Kuviossa on yksi syöttö, joka syöttää jännitteen pääkiskolle. Syöttöjen jännite saadaan yleensä toiselta sähkökojeistolta tai päämuuntajalta. Kojeistossa voi olla useampi kuin yksi syöttö, mutta tällöin syöttöjen suojaroleisiin pitää implementoida tahdistustoiminnot, jos niitä käytetään pääkiskon syöttämiseen yhtäaikaisesti. Tahdistuksen avulla syöttöjen jännitteiden amplitudien, vaihekulmien ja taajuuksien varmistetaan täsmävän ennen syöttöjen yhtäaikaista kytkemistä pääkiskon. Tahdistuksella vältetään erilaiset tasoitusvirrat, mitä kahden syötön yhtäaikaisessa kytkemisessä voi syntyä. (REX640 Technical Manual 2024, 13.5.3.)

Kuviossa on kaksi lähtöä, joilta pääkiskolle syötetty jännite jaetaan eri kaapeleille tai jakelumuuntajille, jotka syöttävät pienjännitteisiä kojeistoja ja prosesseja. Jokaiselle vaiheelle on sekä syötöissä että lähdöissä oma vaihevirtamittamuuntaja, joiden avulla suojarole saa 3-vaihevirtamittauksen suojausten toteuttamiseksi. Kuviossa kaapeleilla on myös kaapelivirtamuuntajat. Kaikissa keskijännitekojeistoissa ei ole käytössä kaapelivirtamuuntajia, mutta niiden avulla nolla- eli maasulkuvirran saa helposti selville maasulkusuojausta varten.

Keskijännitekojeistoissa jännitemittauksia ei tarvitse toteuttaa jokaiselle kennolle erikseen, vaan usein on riittävää, että jännitemittaus toteutetaan pääkiskolta kerran. Jännitemittaus toteutetaan syötöillä erikseen, jos kojeistoa syöttää päämuuntaja. Tällaisessa tilanteessa jännite halutaan tarkistaa ennen syötön kytkemistä mahdollisten ali- ja ylijännitteiden vuoksi. Jännitemittauksen

avulla toteutetaan kojeiston jännite- ja taajuusvalvonta. Jännitemittaussignaali jaetaan jokaiselle suojarielelle erikseen tehomonitorointia varten. Tässä esimerkissä oikeanpuoleisin kenno on pääkiskon maadoitusta varten.

Keskijännitekojeistojen kennoissa on yleensä kolme erilaista kytkinlaitetta, joilla sähköä ohjataan eri tilanteiden perusteella. Korkeilla jännite- ja virta-arvoilla kytkinlaitteiden kontaktien välille syntyy avaamis- ja sulkemisoperaatioiden aikana valokaari, jonka katkaisu ja nopea sammuttaminen on tärkeää. Kytkinlaitteet, joita ei ole suunniteltu edellämainittuun operaatioon eivät kykene katkaisemaan sähkövirtaa, vaan syntynyt valokaari pitää piirin aktiivisena vaikka fyysistä kontaktia ei olisi. Katkaisijan tehtävä kojeistossa on katkaista virransyöttö nopeasti ja turvallisesti sekä normaaleissa operointi- että vikatilanteessa. (Circuit Breakers and Switches n.d.)

Erotinta käytetään halutun sähköpiirin osan erottamiseen muusta verkosta huolto-, tarkastus-, ja korjaustoimenpiteiden ajaksi. Erottaminen tehdään sen jälkeen, kun verkon osa on eristetty muusta verkosta katkaisijalla. Manuaalisen ja näkyvästi tapahtuvan erottamisen avulla havainnoidaan, että haluttu verkon osa on varmasti irti verkkovirrasta. Toisin kuin katkaisija, erottimella ei ole vikavirran katkaisukyvykkyyttä, eikä sitä saa käyttää myöskään nimellisvirran katkaisemiseen tai kytkemiseen. Poikkeus tähän on kuormaerotin, jolla on laitteiston nimellisvirran katkaisukyky. (The Difference Between Disconnecter And Switch Disconnecter n.d.)

Maadoituskytkin on tarkoitettu verkon osan maadoittamista varten huolto-, tarkastus- ja korjaustoimenpiteiden ajaksi. Keskijännitekojeistoissa jokaisella syötöllä pitää olla vähintään yksi maadoituskytkin kaapelipääteen maadoittamista varten. Kennojen maadoituskytkimiä on erilaisia ja ne on myös usein yhdistetty kolmenapaiseksi kytkinlaitteeksi yhdessä erottimen kanssa. Tällaisella ohjauslaitteella varmistetaan se, ettei kaapeli pysty missään tilanteessa olla maadoitettu ja yhdistetty verkkoon samanaikaisesti. (Electrical Earthing Switches n.d.)

3.2 Suojarele

Suojarele on laite, joka suojaa sähköjärjestelmää tunnistamalla muutoksen sen vastaanottamassa signaalissa. Tämä signaali on yleensä jännite- ja/tai virta-arvo, jonka mittamuuntaja muuttaa suojarielelle sopivaksi käsiteltävään muotoon. Jos vastaanotetun signaalin suuruus on suojarielelle asetellusta raja-arvosta poikkeava, rele toteuttaa jonkin ennaltamääritetyn

toimenpiteen. Toimenpide on usein katkaisijan avaaminen ohjaamalla katkaisijan laukaisupiiriin kytketyn koskettimen tilaa. Juan M. Gersin ja Edward Holmesin kirjoittamassa Protection of electricity and Distribution networks (2022) kirjassa Gers ja Holmes määrittävät suojareleet kolmen teeman perusteella; rakenne, vastaanotettava signaali ja toiminto (Gers & Holmes 2022, 42).

Rakenne voidaan eritellä sen mukaan millaiseen kytkentätapaan releen toiminta perustuu. Yksinkertaisempia ja vanhempia kytkentätapoja ovat sähkömekaaninen liikkuvien osien kytkeminen, sähkövirran ohjaaminen puolijohdetekniikan avulla ja sähköstä poikkeavan suureen tilamuutoksen havaitseminen. Sähköstä poikkeavia suureita ovat esimerkiksi paine ja lämpötila. (Gers & Holmes 2022, 43.)

Uudempiä relerakenteita ovat mikroprosessorirele ja numeerinen rele. Mikroprosessorirele tai toiselta nimeltään digitaalinen rele otettiin ensimmäistä kertaa käyttöön vuonna 1977 Bad Kissingenin kaupungissa Saksassa, jonka jälkeen se nopeasti yleistyi ympäri maailmaa 1980-luvun alussa (Schossig 2020). Digitaalinen rele käsittelee ja analysoi mittalaitteiden ja sensoreiden keräämää tietoa aktiivisesti mikroprosessorin avulla ja vertaa niitä ennaltamääritettyihin raja-arvoihin (What Is Digital Relay n.d.).

Ohjaustoiminnot toteutetaan joko itse mikroprosessorin tai vaihtoehtoisesti -kontrollerin avulla. Digitaalisten releiden kyvykyys toteuttaa erilaisia loogisia toimintoja ja algoritmeja nopeasti ja tarkasti asetti kiintopisteen suojaustekniikan nopealle kehitykselle 1980-luvulta nykypäivään asti. (Gers & Holmes 2022, 50.)

Numeerinen rele on uusin suojarelerakenne sekä reletyyppi johon tämän opinnäytetyön aihe perustuu. Numeerinen rele on tietokoneteknologiaan perustuva uudelleenohjelmitava suojauslaite, joka käyttää mitta-arvojen käsittelemiseen signaaliprosessoria. Koska signaaliprosessori on suunniteltu käsittelemään digitaalisia signaaleja nopeasti ja tehokkaasti, on numeerisen suojareleen signaalinkäsittelykapasiteetti korkeampi, kuin mikroprosessoripohjaisella digitaalisella releellä (Digital Signal Processor n.d.). Numeerisilla releillä on laajasti myös muita toisista releistä poikkeavia toimintoja, jotka tekevät siitä teknisesti ylivoimaisen reletyyppin (Gers & Holmes 2022, 51). Näitä toimintoja käsitellään opinnäytetyön luvuissa 4-9.

Suojareleet toteuttavat toimintansa niiden vastaanottamien signaalien perusteella.

Vastaanotettavat signaalit ovat yleensä sähkötekniisiä mittauksia, mutta myös muita tietoja voidaan käsitellä. Releen mittaukset määräytyvät sille suunniteltujen toimintojen perusteella:

- Jännitesuojarele tunnistaa jännitteen arvonmuutokset jännitemittauksen perusteella ja toteuttaa toiminnot näiden mittausten pohjalta.
- Lämpötilarele vastaanottaa lämpötilasensorin analogisen tai digitaalisen mittauksen ja suorittaa operaatiot mittaustuloksen perusteella.
- Ylivirtareleelle viedään virtamittaus, jota vertaamalla sille aseteltuihin raja-arvoihin toteutetaan ylivirtasuojaus.

Numeeriset releet kykenevät lähes aina vastaanottamaan virta- ja jännitemittauksia sekä muita analogisia mittauksia. Sähkömekaanisten- ja puolijohdereleiden rakenteellisten rajoitusten sijaan numeeristen releiden rajoitukset riippuvat pääosin releen laitteistollisista rajoituksista ja ohjelmallisesta toteutuksesta.

Koska suojareleet ovat teollisuusympäristöissä melkein aina numeerisia, viitataan niihin suoraan termillä ”suojarele” ellei ole erityistä tarvetta eritellä numeerista suojarelettä muista reletyypeistä. Opinnäytetyön seuraavissa osissa paneudutaan enemmän numeerisen suojareleen eri toimintoihin. Tekstin yksinkertaistamiseksi ja sulavuuden takaamiseksi käytetään jatkossa vain termiä ”suojarele” tai ”rele”, ellei tarkemmalle määrittelylle ole tarvetta.

Suojareleillä on erilaisia uudellenohjelmoitavia toimintoja, joiden avulla seurataan järjestelmän tilaa ja toteutetaan ennaltamääritettyjä prosesseja. Näitä toimintoja kutsutaan myös funktioiksi. Suojareleiden yhteydessä funktio ja toiminto ovat synonyymejä, mutta tässä opinnäytetyössä vain suojausfunktioista käytetään termiä funktio ja muista funktioista puhuttaessa viitataan toimintoihin.

4 Ohjaustoiminnot

4.1 Ohjaussignaalit

Ohjaustoimintojen avulla järjestelmän tilaa vaihdetaan hallitusti jonkin ennaltamääritetyn ehdon täyttyessä. Suojareleen digitaaliset tulot ja lähdöt asettavat pohjan ohjaustoiminnoille. Ulkoista johdinta pitkin kulkevalla jänniteviestillä vaihdetaan suojareleen sisäisten asetusten tilaa tai ohjataan ulkoisia toimintoja suojareleeltä lähetettävällä signaalilla. Suojareleiden digitaalisilla

tuloilla on reletyypistä riippuvainen jännitetaso, jonka avulla signaalin aktivoituminen tunnistetaan.

Digitaaliset lähdöt ja niiden ominaisuudet voivat vaihdella reletyypin ja valmistajan mukaan. Esimerkiksi ABB:n valmistamassa REX640 yleissuojareleessä on ABB:n määrittämisen mukaan sekä signaali- että teholähtöjä. Signaalilähdöillä ohjataan matalan virtaviestin tarvitsemia prosesseja. Näitä prosesseja ovat mm. ulkoisen LED-valon tilan vaihtaminen ja releiden välisen kommunikaatiosignaalin aktivoiminen. Teholähdöillä ohjataan prosesseja, jotka tarvitsevat korkean virran järjestelmän tilan vaihtamiseksi. Esimerkiksi katkaisijan laukaisukäynnin energisointi tehdään teholähdöllä. ABB:n releillä on myös staattisia teholähtöjä, joiden avulla korkea virtaviesti aktivoituu normaalia teholähtöä nopeammin. (REX640 Technical Manual 2024, 7.14.)

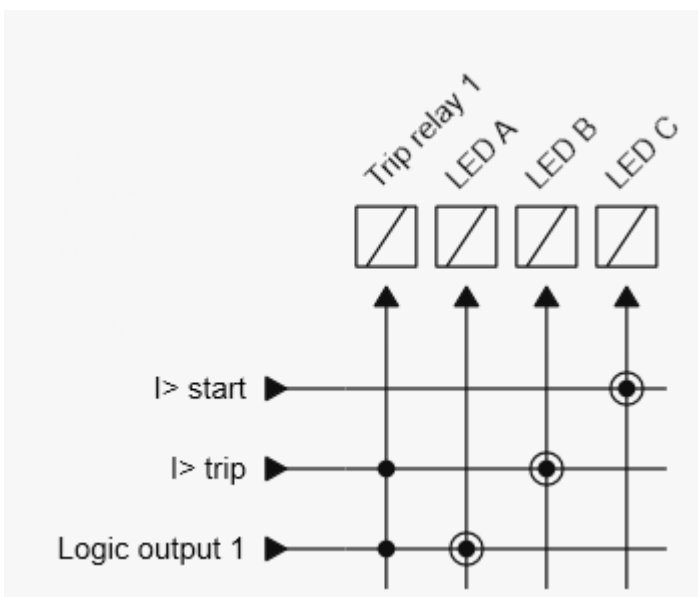
Jos signaali kulkee ulkoista johdinta pitkin jännite- tai virtaviestinä, yhteyttä kutsutaan ”kovajohdotetuksi”. Suojareleiden kovajohdotetut yhteydet näkee kojeiston piirikaavioista. Kovajohdotetun signaalin lisäksi ulkoisia ohjauksia voidaan toteuttaa kommunikaatioväylää pitkin erilaisten kommunikaatioprotokollien avulla. Näitä protokollia käsitellään lisää luvussa 8.

Ulkoisten lähtöjen ja tulojen lisäksi suojareleissä on usein mahdollisuus konfiguroida releen sisäisiä- eli virtuaalisia lähtöjä ja tuloja. Virtuaaliset lähdöt ja tulot eivät ole fyysisiä signaalikytkentöjä digitaalisten vastineidensa tavoin, vaan ne sijaitsevat laitteen muistissa. Toimintatapa digitaalisten ja virtuaalisten ohjausten välillä on sama; lähtöön liitetään signaali, jolla ohjataan muita prosesseja ja tulolla aktivoidaan haluttu prosessi. Virtuaalisella tulolla voidaan vaihtaa mm. releen asetteluarvoja ja virtuaalisella lähdöllä ohjata lähetettävän kommunikaatioväyläviestin tilaa. (Easergy P3... 2022, 65.)

4.2 Matriisi

Matriisi on kaksiulotteisella ruudukolla mallinnettu konfiguraatio työkalu, jolla signaaleja ristikytetään toisiinsa. Jokin haluttu toiminto tapahtuu, kun siihen liitetty signaali aktivoituu. Konfiguraatio-ohjelmistoilla on erilaisia matriiseja ja niiden painoarvo suojareleiden konfiguroinnissa vaihtelee releen tyyppin ja käytetyn ohjelman mukaan.

Kuviossa 2 on esimerkkikuva matriisista. Kuva on Schneider Electricin Esetup Easergy Pro ohjelmalla luodusta lähtömatriisista. Vasemmalle sijoittuvat signaalit ohjaavat ylärivissä olevia lähtöjä. Matriisiin asetetut pisteet yhdistävät signaalit toisiinsa. Yhteys on suora jos siinä on piste ilman kehystä. Suora yhteys pysyy päällä vain, kun ohjaussignaali on aktiivinen. Kehys pisteen ympärillä tarkoittaa, että yhteys on lukittu. Lukittu yhteys pitää itsensä aktiivisena niin kauan, että lukitus poistetaan ulkoisella toimenpiteellä tai ennaltamääritetyllä ehdolla. Tällainen toimenpide voi olla mm. lukitusten fyysinen poistaminen käyttämällä releen etupaneelin käyttöliittymää. Signaali voi tulla myös kommunikaatioväylää pitkin teollisuusalueen valvomosta.



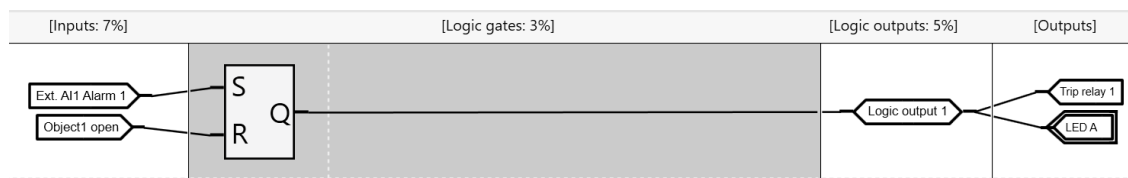
Kuvio 2. Matriisiesimerkki

Kuviossa Trip relay 1 on ABB:n tehölähtöjä vastaava digitaalinen lähtö, jolla energisoidaan katkaisijan avaamiskäämi ylivirtasuojan lauetessa. LEDit A, B ja C ovat releen etupaneelissa olevia indikointivaloja, joiden avulla paikallinen operoija tunnistaa releen toteuttamat toiminnot. Tässä konfiguraation esimerkissä Trip relay 1 aktivoidaan suoralla yhteydellä, koska katkaisijan avaamiskäämiä ei ole suunniteltu pidettäväksi energisoituna pitkiä ajanjaksoja. Jotkin katkaisijan vikasuoja-applikaatiot saattavat seurata käämin tilaa katkaisijan vian havaitsemiseksi, jolloin lukittu signaali johtaa myös virheelliseen toimintaan. LED-valot halutaan yleensä pitää lukittuina vian jälkeen, jotta operoija näkee mitä toimintoja releessä on tapahtunut. Poikkeus tästä on esimerkiksi katkaisijan jousen lataamista tai kommunikaatioväylän vikaa indikoiva LED-valo. Kuviossa näkyvä Logic output 1 on looginen lähtö, josta kerrotaan enemmän luvussa 4.3.

4.3 Ohjelmoitava logiikka

Ohjelmoitava logiikka on suojarleiden toimintotyökalu, jonka avulla toiminnoille voidaan asettaa monimutkaisia ehtoja. Ohjelmoitava logiikka perustuu lohkopohjaiseen ohjelmointiin, missä toiminnot tapahtuvat signaalin kulkiessa erilaisia ominaisuuksia omaavien virtuaalisten lohkojen läpi. Ohjelmoitavassa logiikassa erilaiset toiminnot toteutetaan asettamalla konfiguraatiosovelluksen lohkoja logiikkakaavioon, jossa signaaleja yhdistetään lohkoihin halutun toiminnon aikaansaamiseksi.

Kuviossa 3 on Schneider Electricin eSetup Easergy Pro ohjella luotu esimerkki logiikasta. Ulkoisen analogisen signaalin aiheuttaessa releen sisäisen hälytyksen SR-kiikku kytkee lähdön Q päälle. Signaali kulkee loogisen lähdön kautta digitaaliselle ulostulolle ”Trip relay 1”. Digitaalinen lähtö on tässä esimerkissä kytketty katkaisijan laukaisupiiriin, jolloin hälytyksen tapahtuessa katkaisija aukeaa. Lisäksi looginen lähtö aktivoi LED-valon. Logiikka luo eSetup Easergy Pro sovelluksella automaattisesti yhteyden matriisissa logiikkalähdöltä digitaaliselle lähdölle ja LED-valoa ohjaavalle signaalille. Yhteys lähtöihin on lukittu, kun lähdön reunus on kaksinkertainen ja suora, jos reunus on yksikerroksinen.



Kuvio 3. Logiikkaesimerkki

4.4 Toimintopainikkeet

Suojareleiden etupaneelissa on usein toimintopainikkeita, joita voidaan ohjelmoida toteuttamaan haluttuja toimintoja. Toimintoja ovat esimerkiksi suojausfunktioiden laukaisun kuittaaminen laukaisun vian syyn selvittämisen ja verkon tilan varmistamisen jälkeen ja suojarleiden LED-valojen ohjaaminen normaalitilaan. Painikkeiden määrä vaihtelee suojarleiden välillä. Esimerkiksi Schneider Electricin P3U30 suojarleessä on kaksi fyysistä toimintopainiketta (Easergy P3... 2022, 31). Fyysisten toimintopainikkeiden lisäksi suojarleellä voi olla digitaalisia toimintopainikkeita, joita ohjataan releen etupaneelin näytöltä.

4.5 Lukitukset

Lukitukset ovat tärkeä osa suojausjärjestelmien ohjaustoimintoja, joilla taataan turvallinen kojeiston operointi. Lukitukset ovat toimintoja, joilla jokin prosessi estetään. Jos jokin toiminto sallitaan, kyseessä on vapautus. Suojausjärjestelmien lukituksia on olemassa kahdenlaisia; sisäisiä ja ulkoisia. Suojausjärjestelmien lukituksia kutsutaan yleisesti myös sovelluslukituksiksi. Kojeistoissa on myös sisäänrakennettuja mekaanisia lukituksia, jotka estävät ohjattavien kytkinlaitteiden operoinnin väärässä järjestyksessä fyysisten rajoitteiden avulla. Yleinen mekaaninen lukitustyyppi on avaimilla ohjattavat operaatiot. Avaimilla operaatioiden oikea käyttöjärjestys taataan, kun usampaa operaatiota voi ohjata vain yhdellä avaimella. Avainlukituksia esiintyy ainakin ABB:n ja Schneider Electricin kojeistoissa (Hartmann 2019).

Sisäisillä lukituksilla suojausjärjestelmien jokin toiminto estetään suojausjärjestelmien omien signaalien perusteella. Sisäisiä lukituksia ovat mm. syöttökennon maadoituskytkimen sulkemisen estäminen erottimen ollessa kiinni, tai katkaisijan uudelleensulkemisen estäminen suojausjärjestelmän laukaisun jälkeen. Sisäisten lukitusten toteutus riippuu käytetystä kojeistosta ja suojausjärjestelmien digitaalisille tuloille tuoduista signaaleista.

Katkaisijan, erottimen ja maadoituskytkimen ohjaaminen väärässä järjestyksessä on suositeltavaa toteuttaa sekä mekaanisilla että sovelluslukituksilla. Jos suojausjärjestelmälle ei ole tuotu erottimen ja maadoituskytkimen tilatietoa ja/tai jos näillä operointilaitteilla ei ole omaa digitaalista tuloa operoinnin estämiselle, ei sovelluslukituksen toteuttaminen ole mahdollista. Muita sisäisiä lukituksia ovat mm:

- Katkaisijan sulkemisen estäminen, jos paneeliin on asetettu mekaanisen ohjaamisen vipu.
- Katkaisijan sulkemisen estäminen, jos SF6 eristeisessä kojeistossa SF6 kaasun paine ei ole raja-arvojen sisällä.
- Katkaisijan sulkemisen estäminen, jos laukaisupiirin valvonta on havahtuneessa tilassa tai lauennut.
- Katkaisijan sulkemisen estäminen, jos laukaisupiirin johdonsuojakatkaisija on auki.

Suojausjärjestelmien ulkoisia lukituksia voidaan toteuttaa joko kommunikaatioväylää pitkin tai kovajohdotetusti. Ulkoisilla lukituksilla toteutetaan isomman skaalan lukituksia useamman suojausjärjestelmän välillä. Tällaisia lukituksia ovat mm:

- Keskijännitekojeiston syöttökentän ylivirtasuojauksen 2. portaan lukitseminen minkään lähtökentän ylivirtasuojauksen 1. portaan havahtuessa.
- Pääkiskon maadoittamisen salliminen vain, jos kaikki syöttökentät on erotettu muusta verkosta. Tämä myös toiseen suuntaan: Syöttöjen kytkeminen verkkoon vain, jos pääkisko ei ole maadoitettu.
- Syötettävän ja sitä syöttävän kojeiston suojausvälinen kommunikatio kaapelin virheellisen maadoittamisen estämiseksi.

Ulkoisten lukitusten on hyvä olla sallivia estävien sijaan eli vapautuksia. Tällä tarkoitetaan sitä, että lukituksen tapahtuessa binäärinen lupasignaali muuttuu nolaksi aktiivisen ykkösen sijaan. Käytännössä aktiivisella signaalilla jokin toiminto sallitaan. Tällä estetään vaarallisia tilanteita laitteiden välisen kommunikaation ollessa vikatilassa, jolloin vastaanottava laite saa saman signaalin, kuin lukituksen tapahtuessa. Sähköasemien automaatiolle suunnittelussa IEC61850-standardin osan 8-2 GOOSE-kommunikaatiövälissä on kovajohdotettuihin yhteyksiin verrattuna se hyvä puoli, että viesteillä on sisäänrakennettu vikatilojen havaitsemistoiminto (REX640 Technical Manual 7.19.5.2).

5 Mittaustoiminnot

5.1 Yleistä

Mittaustoiminnot ovat toimintoja, joiden avulla analogisesti mitatut suureet muunnetaan suojaareleelle sopivaan muotoon joko A/D muunnoksella tai laskennallisella operaatiolla. Mittausten tuominen digitaalisena muilta laitteilta on myös mahdollista. Mittaustoiminnot tapahtuvat suojaareleessa syklisesti eli tietty määrä hetkellisiä mittauksia tapahtuu yhden aallonpituuden aikana. Releiden syklit vaihtelevat tuotteiden välillä, mutta esimerkiksi ABB:n valmistaman johtolähdön suojaareleeseen REF615 intervallitaajuus mittauksille on 1600 Hz eli syklistaajuus on 32 mittausta per aallonpituus sähkötaajuuden ollessa 50 Hz (Feeder Protection and Control REF615 Application Manual 2021, 427).

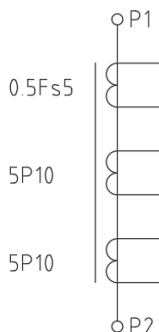
Yleisimmät releelle suoraan tulevat mittaukset ovat mittamuuntajien lähettämät jännite- ja virta-arvot. Arvot muunnetaan releellä digitaaliseen muotoon, jonka jälkeen arvot skaalataan niin, että releellä olevat digitaliset mittaustiedot vastaavat mittamuuntajien ensiöissä kulkevaa virtaa ja jännitettä. Myös muita sähkötekniisiä suureita saatetaan mitata niille tarkoitetuilla välineillä, mutta yleensä riittää, että rele selvittää nämä suureet laskennallisesti kolmivaihevirran ja -jännitteen

avulla. Näitä suureita ovat mm. taajuus, näennäisteho, tehokerroin ja käytetty energia (Gers & Holmes 2022, 54). Suojareleiden konfiguraation näkökulmasta tärkein esimerkki lasketusta tai mitatusta arvosta on maasulkuvirran havaitseminen, johon voidaan käyttää molempia arvojen selvittämistapaa.

5.2 Virtamittaus

Virtamittaus on teollisuusympäristön keskijännitekojeiston tärkein suoritettava mittaus, koska ilman virtamittaus vikavirtasuojauksia ei voida toteuttaa. Vaiheiden virtamittaus toteutetaan vaihevirtamittamuuntajilla, jotka keskijännitekojeistoissa sijaitsevat kennojen sisällä. Jokaisessa syöttö- ja lähtökennossa on kolme vaihevirtamittamuuntaja, jotka skaalaavat vaiheiden korkean virran releelle sopivaan muotoon. ABB:n virtamittamuuntajilla toision nimellinen vaihevirta-arvo on joko 1 A tai 5 A (How to specify the indoor instrument transformers correctly 2017, 3).

Virtamuuntajien mittausparametreja merkataan kolmeosaisella koodilla, joka kertoo laitteen tarkkuuden, käyttötarkoituksen ja saturaatorajan. Kuviossa 4 vaihevirtamuuntajalla on kolme toisiokäämiä, joista kaksi on tyyppiä 5P10 ja yksi tyyppiä 0.5Fs5. Ensimmäinen numero koodissa kertoo käämin tarkkuuden prosentteina, kirjainyhdistelmä käyttötarkoituksen ja viimeinen numero ensiöpuolen nimellisvirran moninkerran, jolla toisio ei vielä satureoidu. Kirjain P = Protection eli suojaus ja Fs = Security factor, joka kertoo mittaussydämen mittarivarmuuskertoimen. Mittaussydän asettaa käämille matalan saturaatorajan. (How to specify the indoor instrument transformers correctly 2017, 4.)



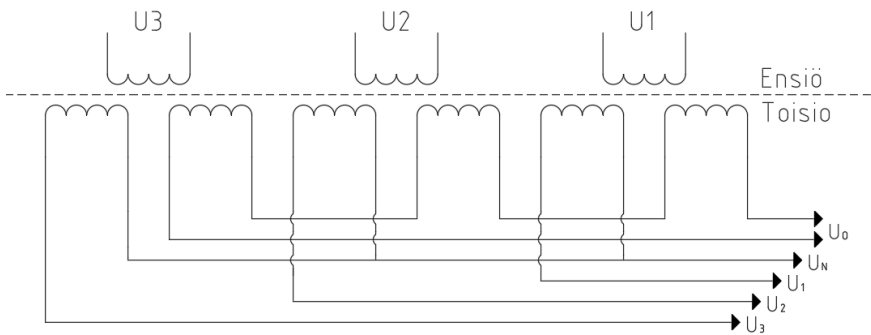
Kuvio 4. Virtamittamuuntajan sähköpiirustuksen esimerkki

Teollisuuden keskijännitekojeistoissa esiintyy sekä suojaustoimintoihin että mittauksiin tarkoitettuja virtamittamuuntajia. Molemmat yleensä sisällytetään yhteen muuntajaan useamman toisiokäämin avulla. Suojareleiden käyttämällä toisiokäämeillä pitää olla korkea saturaatioarvo, jotta releen vastaanottama mittaussignaali on tarpeeksi tarkka myös suurivirtaisissa oikosuluissa. Oikosulkumittauksen ei tarvitse olla kuitenkaan liian tarkka, ja siksi suojakäämien tarkkuusraja on yleensä 5 % tai 10 % muuntajan nimellisvirran moninkerrassa.

Mittauksiin tarkoitettulla toisiokäämillä pitää olla korkea tarkkuusluokitus tärkeiden mittausten suorittamista varten. Sen pitää myös satureitua aikaisin, ettei vian aikana syntyvä korkea toisiovirta vahingoita käämiin kytkettyjä laitteita. Esimerkiksi tehoanalysaattori tarvitsee tällaisen toisiokäämin. Tehoanalysaattorit seuraavat kenttien tehonkulutusta tarkkojen virta- ja jännitearvojen avulla. Vaihevirtamuuntajien lisäksi keskijännitekojeistoissa voi esiintyä kaapelivirtamuuntajia, tästä enemmän luvussa 7.3. (How to specify the indoor instrument transformers correctly 2017, 4.)

5.3 Jännitemittaus

Kirchhoffin virtalain mukaan johtimien risteyskohtaan tulevien ja siitä lähtevien virtojen ero on nolla, joka keskijännitekojeistossa tarkoittaa kojeiston pääkiskolle tulevan virran jakautumista lähdöille. Koska jokaisella lähdöllä on oma virta, pitää virtamittaus toteuttaa kaikissa lähdöissä jokaiselle vaiheelle omalla vaihevirtamuuntajalla. Jännite ei jakaudu, vaan Kirchoffin 2. Lain, eli jännitelain mukaan jännitteiden ero on jokaista nollapotentiaaliin kulkevaa reittiä pitkin nolla. Keskijännitekojeistoissa yleensä riittää, että jännitemittaus tehdään pääkiskon ja nollapotentiaalin välillä vain kerran. Poikkeus on, jos kojeistoa syöttää päämuuntaja, jolloin jännitemittaus pitää tehdä myös syöttökennossa. Jännitemittaus tapahtuu keskijännitekojeistoissa yleensä jännitemittamuuntajalla, missä on kaksi toisiokäämiä: tähteen ja avokolmioon kytketyt käämit. Tähtikytkennällä saadaan selville ensiön vaihejännitteet eli vaiheiden ja nollajohtimen välinen jännite. Avokolmiolla mitataan nollajännite. Kuviossa 5 on esimerkki jännitemittauksesta jonka toisiossa on avokolmioon ja tähteen kytketyt käämit. (Silvonen 2017, 2, 7.)



Kuvio 5. Jännitemittauksen esimerkki

5.4 Muut mittaukset

Virta- ja jännitemittausten lisäksi suojarелеillä toteuttaa tarpeen vaatiessa myös muita mittauksia. SF6 eristeisissä kojeistoissa kennojen SF6-kaasun painetta pitää seurata ja jakelumuuntajaa syöttävän lähdön pitää seurata muuntajan lämpötilaa, ellei tälle ole omaa laitetta. Jos keskijännitekojeistoa syöttää tehomuuntaja, sille pitää toteuttaa käämikytkimen asennonvalvonta, missä käämikytkimen asentotieto tuodaan releelle analogisena virta-arvona. Suojarele muuntaa vastaanotetun virran askelpohjaiseksi dataksi, missä askeleet kertovat käämikytkimen asennon. Kaikki kojeistolle tulevat mittaukset näkee kojeiston piirikaavioista.

6 Avustavat toiminnot

Suojareleet eivät rajoitu vain suojaustoimintoihin, vaan ne tukevat myös taloudellista ja turvallista sähkönjakelua. Avustavat toiminnot ennaltaehkäisevät materiaalivaurioita, helpottavat huoltotoimenpiteitä ja varmistavat sähkökojeiston turvallisen käytön.

6.1 Sisäinen relevika ja itse seuranta

IRF (Internal relay fault) ja watchdog eli sisäinen relevika ja itse seuranta ovat suojarелеisiin sisäänrakennettuja toimintoja, jotka seuraavat suojarелеen kyvykkyyttä toteuttaa sille tarkoitettuja tehtäviä. IRF seuraa suojarелеen laitteistoa ja ohjelmistoa aktiivisesti. Jos IRF havaitsee suojarелеen toiminnoissa vian, se aktivoi hälytyksen. Hälytys voidaan viedä kommunikatiiväylää pitkin valvomoon indikoimaan releessä tapahtuneesta viasta. Esimerkiksi sisäisessä muistissa tapahtunut korruptio on relevika.

Itseseuranta on suoja-releeseen rakennettu piiri, joka seuraa suoja-releen mikrokontrollerin operaatioita. Jos itseseuranta havaitsee mikrokontrollerin vikatilaa, se uudelleenkäynnistää mikrokontrollerin. Jos vika ei poistu uudelleenkäynnistämisen jälkeen, hälytys aktivoituu. Esimerkiksi P3U30 aktivoi itseseurannan hälytykselle varatun servise status (SF) lähdön. (Easergy P3... 2022, 407, 17; REX640 Technical Manual 2024, 7.3.1.)

6.2 Tapahtumaloki

Tapahtumaloki on suoja-releen tapahtumahistoria, minne suoja-rele tallentaa operoinnille merkitykselliset tapahtumat. Lokin laajemmat toiminnot vaihtelevat relevalmistajan ja reletyyppin mukaan, mutta yleensä tapahtumalokista nähdään tapahtumalokikoodi, tapahtuman selite sekä tapahtuma-aika. Tapahtumalokia voidaan sovelletusta kommunikaatioprotokollasta riippuen lukea etäkäyttöisillä käyttöjärjestelmillä. (Easergy P3... 2022, 249.)

6.3 Häiriötallennin

Häiriötallennin on suoja-releen poikkeustilatalennin. Kun suoja-rele havaitsee poikkeustilan, se tallentaa mitatut arvot aikajanelle niin, että arvojen muutoksia voidaan tutkia jälkeinpäin. Mitattuja arvoja ovat mm. virta ja jännite sekä digitaalisten tulojen tilatiedot. Tallentimen parametrintien perusteella myös laskennallisia arvoja voidaan tallentaa. Häiriötallentimen laukaisevia poikkeustiloja ovat mm. suojausfunktioiden havahtuminen ja laukeaminen ja digitaalisen tulon tilamuutos. (P3U30... 2022, 251.)

Häiriötallentimella on käytössä rajattu määrä suoja-releen sisäistä muistia. Tallenteiden koko määrittää, kuinka monta tallennetta suoja-releen muistiin mahtuu. Käytetty muisti riippuu tallenteen laajuudesta, pituudesta ja tallennetaajuudesta. Tallennetaajuus määrittää tilatietojen rekisteröintivälin.

Jos häiriöstä halutaan nähdä virran ja jännitteen aaltomuoto, tallenteen pitää olla sykli-pohjainen. Sykli-pohjaisessa tallennuksessa mittaukset tehdään riittävän tiheällä aikavälillä aaltomuodon havaitsemiseksi. Sykli-pohjainen tallennetaajuus vaihtelee 100 ja 1600 Hz välillä, kun perustaajuus on 50 Hz. 100 Hz:n taajuudella mittaus tehdään jokaisen puoliaallon aikana kerran. Jos häiriötallentimen mittausintervalli on aalto- tai puoliaalto, tallentimeen kirjataan kyseisen

intervallin aikana laskettu RMS-arvo. RMS-arvo kuvaa signaalin tehollista arvoa. (Easergy P3... 2022, 252-253.)

Jos tallenteesta halutaan nähdä keskiarvolliset tiedot tai jos häiriötallenteeseen sisällytetään laskennallisia arvoja, käytetään sekuntipohjaista tallennusta. Sekuntipohjainen tallenne kirjaa signaalien keskimääräisen arvon ylös kerran vaihdellen 200 ms-1 min välillä.

Suojareleen häiriötallentimen muistin täytyessä voidaan valita kahden toimintatilan välillä: kyllästetty ja ylivuoto. Kyllästetyllä asetuksella suojarele ei hyväksy uusia tallenteita ennen vanhojen tallenteiden poistamista. Ylivuotoasetuksella suojarele poistaa vanhimman tallenteen uuden tieltä.

6.4 Laukaisupiirin valvonta

TCS (Trip circuit supervision) eli laukaisupiirin valvonta on toiminto, jonka avulla suojarele seuraa aktiivisesti sen kyvykkyyttä avata katkaisija. Laukaisupiirin valvonta ei ole suojareleeseen sisäänrakennettu toiminto, vaan se toteutetaan katkaisijan laukaisupiiriin digitaalisen tulon avulla. Myös kahta digitaalista tuloa voidaan käyttää laukaisupiirin valvomiseen. Jos katkaisijaa ei voida avata laukaisupiirin vian vuoksi, suojarele saa laukaisupiiristä vikasignaalin digitaalisen tulon kautta. Tällä toiminnolla on hyvä olla pieni viive, koska digitaalisen tulon tila voi muuttua hetkellisesti katkaisijan laukaisun ja sulkemisen aikana. (Easergy P3... 2022, 306, 312.)

6.5 Virtamittauspiirin valvonta

CCS (Current circuit supervision) eli virtamittauspiirin valvonta tutkii virtaa mittaavan sähköpiirin kuntoa. Virtamittauspiirin vika voi laukaista herkkiä suojausvirheellisesti, vaikka suojaus ei oikeasti pitäisi reagoida. Mittauspiirin vikatilanteessa suojausten toiminta voidaan estää hetkellisesti.

Eri laitevalmistajien suojareleet saattavat toteuttaa virtamittauspiirinvalvonnan eri periaatteilla. ABB:n REX640 vertaa releen vaihevirtamittauksesta laskettua nollavirta-arvoa eli maasulkuvirtaa toiseen mitattuun nollavirtaan. Epänormaali tila tunnistetaan mittauspiirin viaksi, jos arvot eroavat toisistaan suojareleen parametrien sisällä. (REX640 Technical Manual 2024, 10.2.3.)

Schneider Electricin P3-sarjan suojarleillä virtamittauspiirin valvomista vastaava toiminto on CT supervision eli virtamuuntajan valvonta. CT supervision tutkii vaihevirtojen välisiä eroja. Hälytys aktivoidaan, jos yhden vaiheen virta-arvo laskee määritetyn I_{min} parametrin alapuolelle samalla, kun toisen vaiheen virta-arvo nousee I_{max} parametrin yläpuolelle. I_{min} ja I_{max} ovat parametreja, jotka pitää määrittää suojarlekonfiguraatiossa. (Easergy P3... 2022, 271.)

6.6 Katkaisijan kunnan valvonta

Katkaisija kokee erilaisia rasituksia virtapiirin avaamisen yhteydessä, mitkä lyhentävät sen käyttöikä. Käyttöikä lyhenee oikosulkujen katkaisemisesta enemmän kuin normaalista avaamisoperaatiosta. Nopeampi kuluminen johtuu korkeilla virta-arvoilla syntyvistä valokaarista, jotka kuluttavat katkaisijan kosketinpintoja. Katkaisija kokee myös fyysistä rasitusta jokaisen avaamisoperaation aikana. Liiallisen rasituksen jälkeen katkaisijan virrankatkaisukyky on epäluotettava, jolloin se pitää huoltaa tai korvata kokonaan uudella katkaisijalla. (Nasrallah, Brikci & Perron 2007.)

Suojareleisiin sisällytetään toimintoja, joiden avulla katkaisijan kuntoa voidaan seurata. Schneider Electricin P3 sarjan suojarleisiin on sisällytetty kaksi katkaisijan kuntoa valvovaa toimintoa; circuit breaker condition monitoring (CBCM) eli katkaisijan kunnanvalvonta ja circuit breaker wear (CBW) eli katkaisijan kuluminen. CBCM ja CBW seuraavat katkaisijan kuntoa eri periaatteilla. CBW seuraa katkaisijan kulumista laskemalla miten monta operaatiota se kestää tietyllä virta-arvolla, kun taas CBCM laskee summautuvasti kaikkien katkaisuoperaatioiden vikavirrat yhteen. CBW antaa hälytyksen katkaisijan kunnosta, kun samanlaisia vikavirtoja on avattu tietty määrä ja CBCM aktivoi hälytyksen summautuvan vikavirran saavuttaessa hälytyksen raja-arvon. (Easergy P3... 2022, 275-281.)

7 Suojausfunktiot

Suojausfunktiot tarkastelevat releen vastaanottamia signaaleja. Kun tutkittavien signaalien arvo saavuttaa määritetyn rajan, rele lähettää avaamiskäskyn kentän katkaisijalle.

7.1 Suojausfunktion nimeäminen

Suojausfunktioista puhuttaessa niistä käytetään yleistettyjä termejä. Näitä termejä ovat ylivirtasuoja, maasulkusuoja, katkaisijan vikasuoja jne. Suojarelekonfiguraatiossa suojausfunktioista käytetään lyhyempiä indikointimenetelmiä osoittamaan funktion toimintaa.

Yleisesti käytettäviä indikointitapoja on kolme:

- IEC61850
- IEC60617
- IEEE C37/2 (ANSI)
(AX2 ANSI & IEC Function References n.d.).

IEC 61850 on kansainvälinen standardi, jossa määritellään kommunikaatio ja järjestelmävaatimukset sähköasemien automaatiojärjestelmille (IEC TR 61850-1 2013). Tämän standardin mukaiset merkintätavat seuraavat standardin tietostruktuurin loogisten solmujen (eng. Logical node) merkintämallia. Esimerkki tällaisesta merkintätavasta on ylivirtasuojauksen ensimmäiselle portaalle PHLPTOC1, missä

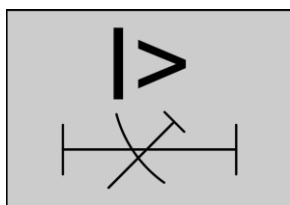
- PH =Vaihe (Phase)
- L = Matala (Low, eli 1. porras)
- P = Suojaus (Protection)
- T = Aika (time)
- OC = Ylivirta (Overcurrent)
- 1 = 1. Instanssi.

Jokainen kirjain ja numero kertoo funktiosta niin, että funktion toiminto saadaan pakattua mahdollisimman tiiviiseen, muuta informatiiviseen muotoon. Tässä tapauksessa kyseessä on vaihevirtoja tutkivan aikatoiminnallisen ylivirtasuojan 1. porras ja 1. instanssi. Lyhyempi yleisversio on PTOC. (Falk 2018, 276.)

IEEE C37/2 on standardi, joka määrittää sähköaseman laitteiden toimint numerot, lyhenteet ja kontaktien merkinnät (IEEE Std C37.2:2022, Abstract). Standardissa suojausfunktioiden merkintä tehdään käyttämällä numeroita ja akronyyimejä. IEEE C37/2 standardin esimerkki aiemmalle IEC61850 esimerkille on 51P-1 (1), missä 51 on käänteisaikapohjaisen ylivirtasuojan numero P kertoo kyseessä olevan vaihevertailuun pohjautuva suojaus, -1 tarkoittaa kyseisen suojauksen ensimmäistä porrasta ja (1) on suojauksen ensimmäinen instanssi. Standardin tarkka seuraaminen

ei ole kovin yleistä ja yleensä merkkkaus olisi vain 51-1. IEEE C37/2 standardin merkintöjä kutsutään myös ANSI merkinnöiksi.

IEC 60617 on standardisoitu sähköpiirrosmerkkien kokoelma, joka sisältää myös suojausfunktioiden piirrosmerkit. IEC60617 piirrosmerkkejä käytetään sähköteknisissä piirustuksissa ja usein niitä käytetään myös suojausten merkitsemiseksi suojausareleiden etupaneeliin. IEC60617 mukaiset piirrosmerkit ovat merkintämalleja, jotka laitteiston käyttäjä yleensä tunnistaa helpoiten. Ylivirtasuojauksen merkintä on verrattavissa piirrosmerkkiin I> (AX2 ANSI & IEC Function References n.d.). Kuvion 6 ylivirtamerkin alle sijoitettu viivamerkintä kertoo suojauksen olevan säädettävissä erilaisilla käänteisaika-asetuksilla.



Kuvio 6. IEC60617 standardin mukainen ylivirtamerkintä

7.2 Aikaviive ja suunnattu suojaus






Jos suojausfunktiossa on aikatoiminto, suojausarele tutkii mittausten ja laskennallisten suureiden arvoja vertaamalla niitä ennaltamääritettyihin arvoihin XY-koordinaatistossa, jossa tutkittava suure on X-akselilla ja aika Y-akselilla. Tutkittavan suureen kasvaessa sallittua raja-arvoa suuremmaksi suojaus aloittaa aikaviiveen laskemisen eli suojaus havahtuu. Jos arvo pysyy raja-arvon yläpuolella sallittua pidempään, suojaus laukeaa ja rele lähettää avaamiskäskyn katkaisijalle.

Vakioaikahidastuksella suojausfunktioilla on yksi tarkasti aseteltu aika, jonka jälkeen laukaisukäsky lähetetään katkaisijalle. Käänteisellä aikatoiminnolla suojaukseen saadaan lisättyä mitattavasta suureesta riippuvainen ajan muutos; tutkittavan suureen kasvaessa aikahidaste katkaisulle pienenee.

Jos suojauksella ei ole aikatoimintoa, suojaus laukeaa heti virran ylittäessä sen asetteluarvon. Aikatoiminnollisilla suojausfunktioilla on usein kaksi tai kolme porrasta, jotka asetellaan omilla aika-asetuksilla. Useamman portaatan avulla suojaus saadaan toimimaan erilaisissa vikatiloissa

paremmin ilman, että kokonaisuuden selektiivisyys kärsii (Falk 2018, 276; IEEE Std C37.2:2022, 27). Järjestelmän selektiivisyys tarkoittaa sen kykyä eristää vain vialle altistunut verkon osa ilman, että muun sähköverkon jakelua häiritään. Yksinkertaisin esimerkki selektiivisyydestä on rakennussähköistyksen selektiivisyys: asuinrakennuksen pistorasiassa syntyvä oikosulku eristetään laukaisemalla sitä syöttävä johdonsuojakatkaisija ilman, että pääsulake laukeaa.

Numeerisilla suojareleillä aikahidastemahdollisuudet ovat melkein poikkeuksetta aseteltavia, joka tarkoittaa mahdollisuutta säätää suojauksen aikaviivettä haluttuun arvoon konfiguraatiovaiheessa. Aikaviiveiden eroavaisuudet on kuitenkin tärkeä tietää, koska aikaviiveen saatavuus vaikuttaa suojausfunktion merkintä- ja nimeämiskäytänteisiin. IEC60617 standardin piirrosmerkit on tarkoitettu käytettäväksi sähkötekniisissä piirrustuksissa, joten määritelmät aikatoimintojen välillä tässä standardissa ovat tarkkoja. Suojauksen aikatoiminto määritetään piirrosmerkin alle asetetulla viivamerkinnällä. Merkit on esitetty kuviossa 7.

Kiinteä vakioaikahidastus	
Aseteltava vakioaikahidastus	
Kiinteä käänteisarvohidastus	
Aseteltava käänteisarvohidastus	
Suunnattu suojaus*	

Kuvio 7. IEC60617 standardin mukaiset suojauksen alamerkinnot

Suunnattu suojaus ei kerro suojauksen aikatoiminnosta, mutta se on tässä vaiheessa hyvä lisämaininta merkinnän tarkoituksesta. Jotkin suojaukset voidaan asettaa tutkimaan vain tietyssä suunnassa tapahtuvia vikatiloja suhteessa mittauspaikkaan. Esimerkiksi pääkiskon syöttöjen maasulkusuojaus voidaan asettaa tutkimaan pääkiskossa tapahtuvia maasulkuja ja kaapelilähtöjen maasulkusuojaus voidaan asettaa tutkimaan kaapelia kuormituksen suuntaan. Tämä pätee myös ylivirtasuojille. Suunnatuilla suojauksilla parannetaan järjestelmän selektiivisyyttä. Myös IEC61850 ja IEEE C37/2 standardeissa on määritetty eri merkinnät suuntaamattomille ja suunnatuille suojauksille.

Erilaiset merkintätavat ovat yllättävän vaikeita sisäistää standardien välillä ja myös tähän opinnäytetyöhön etsityissä lähteissä on eroavaisuuksia merkintöjen välillä. Tämä pätee erityisesti ANSI merkintöihin. IEEE C37/2 (2022) määrittää suuntaamattomalle ylivirta- ja nollavirtasuojalle ilman haluttua aikaviivettä numeron 50. Merkintä on 50TD jos releessä on tarkoituksellinen vakioaikahidastus ja 51 jos suojaus on käänteisarvohidastuksellinen. Numeron jälkeen Kirjaimet P ja N kertovat, onko suojaus vaihe- vai nollavirtaa tutkiva. Nämä samat säännöt pätevät suunnatuille virtasuojille numerolla 67 ilman erottelua aikaviiveiden välillä. (IEEE Std C37.2:2022, 18-19.)

7.3 Ylivirtasuoja

Ylivirtasuoja suojaa virtapiiriä korkeilta virroilta, jotka syntyvät oikosulkujen ja ylikuormitusten yhteydessä (Easergy P3... 2022, 169). Oikosulku tapahtuu, kun sähköjohtimien välille syntyy virtapiiri matalan vastuksen omaavan johtavan materiaalin läpi niin, että virta ohittaa johtimen alunperin syöttämän kuorman (A deep dive into short circuits 2023). Koska virta kulkee matalamman impedanssin kautta nollapotentiaaliin, sen arvo kasvaa ohmin lain mukaan kääntäen verrannollisesti pienenevään impedanssiin nähden (Ohm's law n.d.).

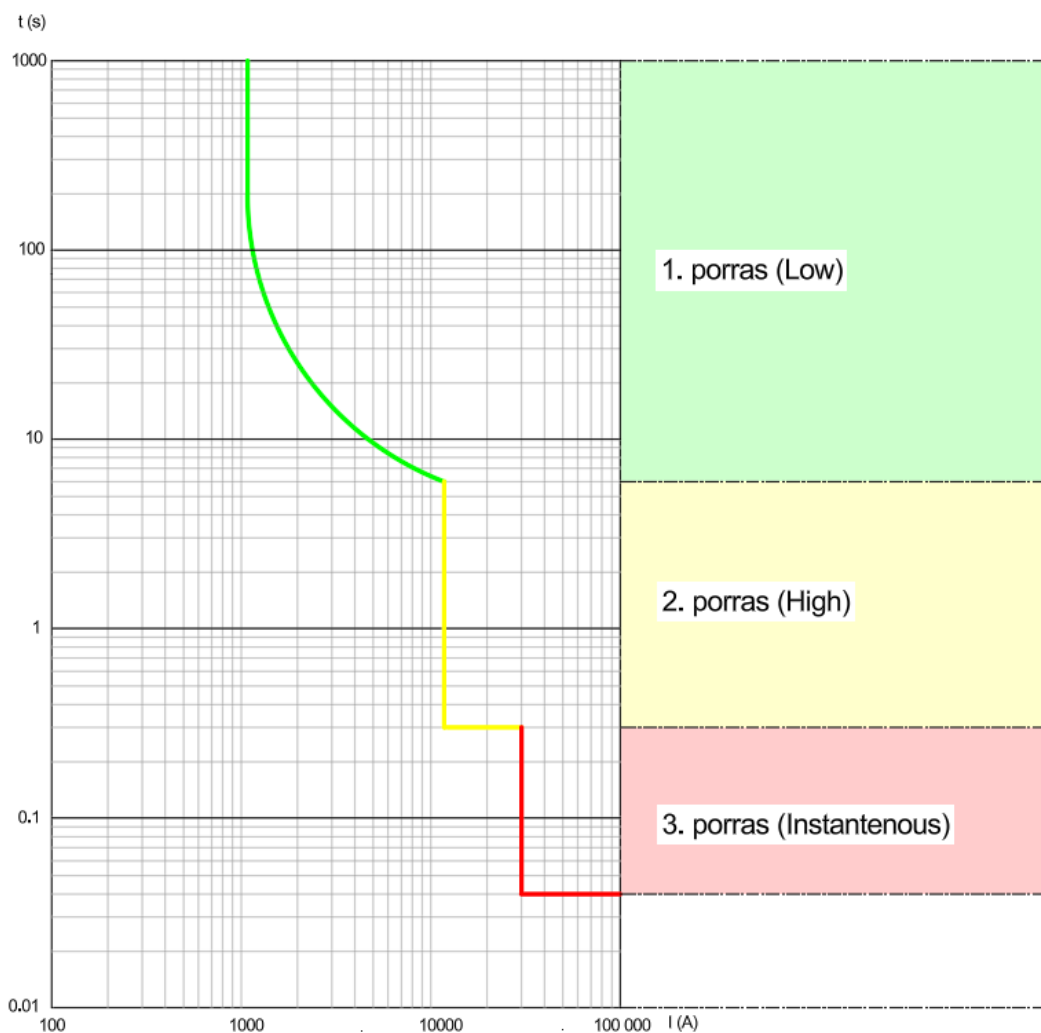
Oikosulku voi keskijänniteverkoissa syntyä vain vaihejohtimien välille, koska erillistä nollajohdinta ei ole. Jos vikavirta kulkee vaiheelta suojajohtimeen, kyseessä on maasulku. Kaikissa tilanteissa oikosulku on vakava vika, mikä voi nostaa johtoja rasittavan virran monikymmenkertaiseksi. Korkea virran nousu luo sähköverkossa useita vaaroja, joita ylivirtasuojalla pyritään estämään.

Kaapeleissa syntyvät kuparihäviöt kasvavat eksponentiaalisesti virran mukana. Kuparihäviöissä johtimen resistanssi vastustaa virtaa, jolloin osa elektronien liike-energiasta muuttuu lämpöenergiaksi. Ylikuormitus- ja oikosulkuilanteessa korkea lämmön nousu vaurioittaa kaapeleita ja muita niitä ympäröiviä laitteita. Pahimmillaan oikosulku voi luoda tulipaloriskin (Laughton & Warne 2003, 51, 1065).

Jos oikosulkuvirta on erittäin korkea, myös mekaaniset vauriot ovat mahdollisia. Michael Faraday tutki, että magneettikentän muutos johtavan materiaalin lähellä luo materiaaliin jännitteen (Faraday 1831, 132). Koska nykymaailman sähkönjakelussa käytetään melkein poikkeuksetta vaihtosähköä, jakelujohto ylläpitää itseään ympäröivää magneettikenttää. Oikosulkuilanteessa

johtimen virta-arvo ja sitä ympäröivä magneettikentän vuon tiheys nousee niin, että ympäröiviin sähköä johtaviin laitteisiin indusoituu sähkövirta. Indusoitunut virta aiheuttaa voimakkaan magneettikentän myös näille laitteille. Kahden magneettikentän vuorovaikutus luo tässä tilanteessa tarpeeksi voimakkaan vuorovaikutuksen mekaaniselle liikkeelle, joka voi aiheuttaa vaurioita järjestelmässä.

Ylivirtasuojalle on mahdollista määrittää kolme suojausporrasta, jotka huolehtivat järjestelmän selektiivisyydestä. Kuviossa 8 ylivirtasuojan 2. ja 3. porrasta on aseteltu vakioaikahidastuksella. 2. porrasta laukeaa ajassa 300 ms virran arvoilla 12-30 kA ja 3. porrasta ajassa 40 ms kaikilla 30 kA ylittävillä virroilla. 1. porrasta on käänteisaikahidastettu toimimaan eri aika-arvoilla virran vaihdellessa välillä 1.1... 12 kA.



Kuvio 8. Ylivirtasuojan laukaisukäyrän esimerkki

7.4 Maasulkusuoja

Will McGugan ja Lilly Vang (2020) toteavat, että vaikka oikosulut ja valokaaret aiheuttavat voimakkaampia vikoja kuin maasulut, on maasulku yleisempänä vikana myös vaarallisempi sekä ihmisille että laitteistoille. Maasulku tapahtuu, kun maan potentiaalista eroava sähköä johtava kappale joutuu kosketuksiin toisen sähköä johtavan kappaleen kanssa sen ollessa yhteydessä maahan. Maasulku voi syntyä esimerkiksi vaurioituneen johtimen koskettaessa johtavaa materiaalia. Okein toimiva maasulkusuoja eristää maasulkuun joutuneen verkon osan muusta verkosta nopeasti ja hallitusti. (McGugan & Vang 2020.)

Toimintaperiaate 3-vaiheisessa järjestelmässä maasulun tunnistamiselle on yksinkertainen: vaihevirtojen kulmaerot on oikein toimivassa järjestelmässä 120, jolloin virtojen summa on millä tahansa ajanhetkellä nolla. Jos jokin vaihe on kosketuksissa maahan, syntyy vaiheiden välille epätasapainoa ja summattu virta eroaa nollostä. Tämä voidaan havaita käytettävissä olevien laitteiden ja suojattavan kohteen rajoitusten mukaan erilaisilla tavoilla joko mittaamalla tai laskennallisesti.

Yksi tapa havaita maasulku on kaapelivirtamuuntajalla niin, että jokainen vaihejohdin vieään muuntajan ilmasydämen läpi. Kaapelivirtamuuntaja summaa vaiheet automaattisesti yhteen, jolloin releelle vietävässä mittauksessa saadaan suoraan tieto nolla- eli maasulkuvirrasta. Toinen vaihtoehto on käyttää vaihevirtamuuntajien vapaita toisiokäämejä. Toisiokäämit kytketään rinnan ja mittaus vieään releelle, jolloin vaihevirrät summautuvat yhteen johtimeen. Jos saatavilla ei ole kaapelivirtamuuntajaa tai vaihevirtamuuntajissa ei ole vapaita toisiokäämejä, voidaan maasulkuvirta selvittää myös laskennallisesti releen sisäisesti. (REX640 Technical Manual 2024, 8.2.2.10.)

7.5 Valokaarisuoja

Valokaari syntyy, kun kahden eri potentiaalilin omaavan johtavan materiaalin välillä oleva ilma ionisoituu korkean vikavirran vuoksi. Vian aikana ilman läpi syntyy hetkellinen virtapiiri toisiaan lähellä olevien johtimien välille (Graver 2020). ABB määrittää valokaaren vakavimpana vikatilana, mikä sähköjärjestelmässä voi tapahtua. Valokaaren yhteydessä syntyvät voimat ja lämpötilat

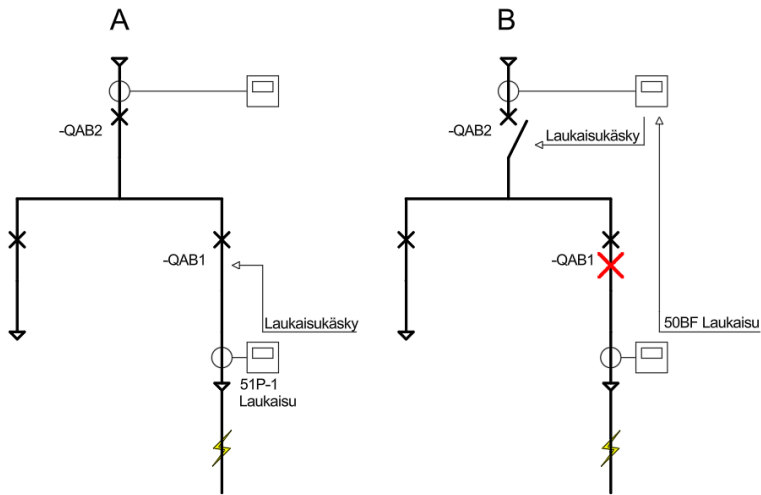
vaurioittavat itse laitteistoa ja yhdessä prosessissa syntyvien myrkkyykaasujen kanssa se luo hengenvaaran toimihenkilöstölle. (Arc fault protection solutions n.d.)

Kojeistoissa valokaari havaitaan tunnistamalla sen kaksi ehtoa; suuri virta ja kirkas valo. Valokaaren yhteydessä syntyvä hetkellinen, mutta kirkas valo havaitaan kojeiston kennojen fyysisesti erotettuihin osiin sijoitetuilla valosensoreilla. Suuri virta havaitaan normaalin virtamittauksen avulla. Kun molemmat ehdoista täyttyvät, valokaarisuoja laukaistaan ilman aikaviiveettä. Valokaarisuojassa voidaan käyttää vain valoehto, mutta ellei tällainen ratkaisu ole kriittisen tärkeä, on suositeltavaa käyttää molempia ehtoja virheellisten laukaisujen välttämiseksi. Valoehto saattaa täytyä esimerkiksi huoltojen yhteydessä.

7.6 Katkaisijan vikasuoja

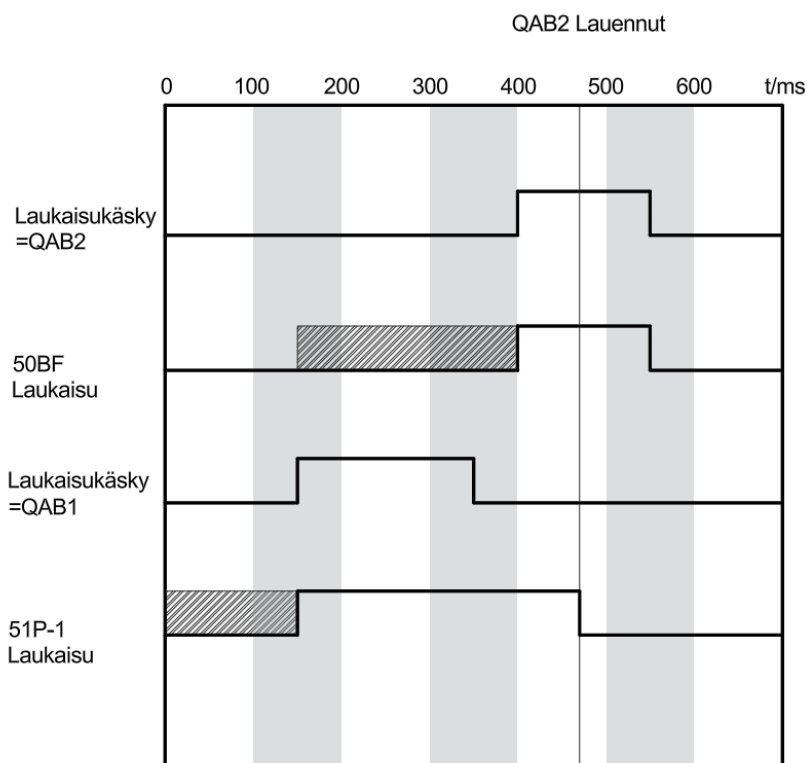
Katkaisijan vikasuoja on olennainen osa kojeiston toimintavarmuutta. Jos katkaisija ei kykene avaamaan virtapiiriä vikatilanteessa, vikasuoja varmistaa vian eristämisen lähettämällä avaamiskäskyn sähköverkon hierarkiassa korkeammalle katkaisijalle. Tämä ei ole normaalitilanteessa toivottu toimenpide, koska myös alkuperäisen vian kanssa rinnan olevat verkon osat eristetään virransyötöstä. Katkaisijan vikasuojan signaali voidaan lähettää joko kovajohdotetusti tai kommunikaatioväylää pitkin.

Kuvioissa 9 mallinnetaan katkaisijan vikasuojan toimintaa. Kuvion kohdassa A johtolähdössä syntyy ylivirta ja kentän suoja-releen ylivirtasuojaa havahtuu. Rele lähettää laukaisukäskyn katkaisijalle - QAB1 ylivirtasuojauksen aikaviiveen jälkeen. Kohdassa B katkaisija -QAB1 ei ole lauennut katkaisijan vian vuoksi, jolloin vikasuoja aktivoituu. Rele lähettää ulkoisen laukaisukäskyn kojeiston syöttöä suojaavalle releelle, joka laukaisee katkaisijan -QAB2 ilman aikaviivettä.



Kuvio 9. Katkaisijan vikasuojaesimerkki

Kuviossa 10 on aiempi tapahtumaketju aikajanalla. Kuviossa on havainnollistettu katkaisijan vikasuojan ja ylivirtasuojan havahtuminen ennen suojausten laukeamista.



Kuvio 10. Katkaisijan vikasuojan aikajana

7.7 Jännite- ja taajuussuojat

Jännitemittausta käytetään jännite- ja taajuussuojausten toteuttamiseen. Muista suojuuksista poiketen ne ovat Suomen keskijännitekojeistoissa yleensä vain indikoivia. Indikoivat suojuukset eivät laukaise virtapiiriä, vaan ilmoittavat vikatilasta valvontajärjestelmään. Poikkeus tästä on nollajännitesuoja maasta eristetyissä keskijännitekojeistoissa, jotka sisältävät jänniteherkkiä komponentteja. Esimerkiksi muuntajat, generaattorit ja moottorit voivat vaurioitua maasulun aikana, eikä maasulkusuoja välttämättä havaitse vikaa tarpeeksi nopeasti. (Dubov 2024.)

8 Kommunikaatio

8.1 Yleistä

Kommunikaatio on nykypäivän sähkönjakelussa olennainen osa järjestelmän turvallisen käytön takaamisessa. Releiden välinen viestintä ja erilaisten kommunikaatioprotokollien käyttö mahdollistavat kokonaisen teollisuusalueen sähkönjakelun seuraamisen yhdestä valvomosta. Valvomo on teollisuusalueen tila, jossa toimihenkilöt valvovat aktiivisesti erilaisia prosesseja. Myös sähkönjakeluun liittyvät tiedot halutaan yleensä tuoda valvomoon, jotta vikatilanteisiin voidaan reagoida nopeasti. Kommunikaatiossa voidaan käyttää joko kovajohdotettuja signaaleja tai kommunikaatiöväylää, jonka avulla laitteiden signaalit kerätään yhteen viestikaapeliin. Kovajohdotettuja yhteyksiä käytetään yhä vaihtelevasti suojarleiden välisessä kommunikaatiossa yhdessä kommunikaatiöväylien kanssa, mutta valvomoon vietävät tiedot toteutetaan lähes poikkeuksetta kommunikaatiöväylää pitkin.

8.2 Profibus

Profibus, eli Process Field Bus, on vuonna 1989 kehitetty serveri- ja asiakasarkkitehtuuriin (Server-Client) perustuva väyläkommunikaatioprotokolla. Tässä järjestelmässä tietoa käyttävä laite (Server) ohjaa prosessia valvovia ja tietoa kerääviä laitteita (Client). Profibus on saanut useita versioita vuosien varrella käyttäjien tarpeiden muuttuessa.

Profibus DP (Decentralized Periphery) korvasi alkuperäisen Profibus FMV: n (Fieldbus Message Specification) vuonna 1993. Profibus DP käyttää erityistä johtoa viestien välittämiseen viestinkeruu- ja ohjauslaitteiden välillä. Nykyaikaisissa ympäristöissä tämä tarkoittaa tarvetta

erityisille kytkimille ja viestimuintimille. Muuntimien avulla Profibus DP-viestit saadaan muunnettua esimerkiksi Ethernet/IP muotoon, jota modernit valvomot usein käyttävät. Profibus-perhe on kehittynyt edelleen Profinet-versioon, joka käyttää Ethernet-kaapelin erityistä alatyyppeä. Profinet ei vaadi erillisiä muuntimia tai kytkimiä. Profibus DP on yhä laajasti käytössä teollisuudessa sen luotettavuuden vuoksi. Uuden järjestelmän käyttöönotto on myös usein kallista ja aikaa vievää, minkä vuoksi Profibus DP on käytössä vielä monissa järjestelmissä. (Worth 2023.)

Profibus DP:n viestit koostuvat kahdesta pääosasta: lähetettävä ja vastaanotettava puskuri. Puskuri on viestin osa, joka sisältää lähetettävän datan. Puskureita voidaan lähettää joko syklisellä tai pyyntöpohjaisella viestinvaihtoprofiililla. Syklisellä profiililla laitteet lähettävät ja vastaanottavat puskureita tasaisin väliajoin, kun taas pyyntöpohjaisessa profiilissa Serveri pyytää haluamansa puskurin Clientilta. Serveri on sähköasema-automaatiossa yleensä etäkäytettävä valvomotietokone.

Profibus DP:n konfigurointi suoja-releeseen on muihin protokolliin verrattuna suhteellisen yksinkertaista. Laitteelle määritetään sille ominainen osoite, käytettävä viestimunnin, viestinvaihtoprofiili sekä puskuridatan rakenne. Osoite voi vaihdella 1 ja 126 välillä. eSetup Easergy Pro ohjelmalla puskurit rakennetaan valmiiseen pohjaan.

8.3 IEC61850

IEC61850 standardia käsiteltiin aiemmin suojausfunktioiden nimeämisen yhteydessä. IEC61850 ei kuitenkaan rajoitu pelkästään suojausten tunnistamiseen, vaan sen tarkoituksena on tarjota yhtenäinen kansainvälinen ratkaisu, jonka avulla eri laitevalmistajien tuotteita voidaan käyttää samassa sähköasema-automaatiojärjestelmässä. Profibus protokollan tavoin IEC61850 tukee Server-Client pohjaista kommunikaatiota, mutta tämän opinnäytetyön kannalta on tärkeämpi käydä läpi standardin osien 8-1 ja 9-2 määrittelemät GOOSE ja SMV viestit.

GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) viestit ovat IEC61850-standardiin sisäänrakennettu viestintäprotokolla. GOOSE viestien avulla älykkäiden sähkölaitteiden välinen horisontaali kommunikaatio on mahdollista toteuttaa ilman satoja yksittäisiä kovajohdotettuja yhteyksiä. GOOSE viesteissä on myös itsevalvonta ominaisuus, jonka avulla järjestelmä havaitsee

virheellisen viestin tai rikkoutuneen yhteyden. Normaalilla kovajohdotetulla yhteydellä vastaava vika näkyy vain nolla-arvona.

Normaalien binääristen viestin lisäksi GOOSE-viestiin voidaan sisällyttää monipuolista dataa, kuten

- Tavuja
- DP arvoja (double point)
- mittaus- ja vaihetietoja
- kokonaislukuja (integer)
- lukitustietoja
- numeroituja arvoja

(REX640 Technical Manual 2024, 7.18.)

Nämä ominaisuudet tekevät GOOSE-viesteistä monikäyttöisiä ja erittäin hyödyllisiä modernissa sähköasemaympäristössä.

SMV (sampled measured value) -viestit ovat IEC 61850 -standardiin kuuluvia tarkkoja viestejä, joita käytetään suojarleiden mittaustietojen välittämiseen. SMV-viestien avulla releet voivat jakaa mittaustietoja lähes reaaliajassa ja tehdä tarkkaa ajanhetkeen perustuvaa vertailua. Tämä ominaisuus on erittäin tärkeä mm. herkemmällä differentiaalisuojilla. SMV-viestit ovat välttämättömiä varsinkin, jos mittauspaikkojen välimatka on satoja metrejä. Tällaisessa tilanteessa analogiset virta-arvot voivat muuttua epäluotettaviksi pitkän siirtomatkan aikana. SMV-viestit lähetetään digitaalisesti esimerkiksi optista kaapelia käyttäen, mikä varmistaa tiedon tarkkuuden ja luotettavuuden.

9 Suojarelekonfiguraation toteutus

Opinnäytetyön alkuosassa esitettiin tavoitteiden perusteella kaksi kysymystä, joihin piti vastata. Tässä vaiheessa on käyty läpi alussa esitetyt suojarlekonfiguraation viisi osa-alueita eli releiden suojausfunktiot, ohjaus-, mittaus- ja avustavat toiminnot, sekä kommunikaatio. Työssä esitetty teksti näille osa-alueille vastaa laajasti kysymyksen ”mitä toimintoja suojarleillä on?”.

Kysymyksen kiteytetty vastaus on: Suojareleet vastaanottavat mittaustietoja useasta lähteestä sekä vastaanottavat ja lähettävät erilaisia signaaleja joko kovajohdotetusti tai kommunikaatiöväylää pitkin. Mittausten ja signaalien perusteella toteutetaan ennaltamääritettyjä

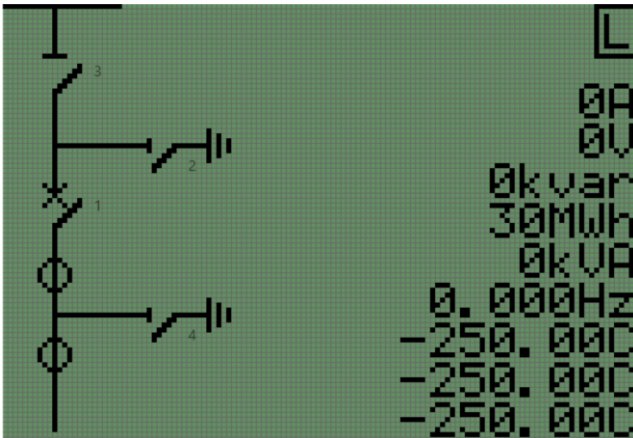
suojauksia ja ohjaustoimintoja. Suojarele tukee sähkökojeiston toimintaa erilaisilla avustavilla toiminnoilla, jotka auttavat vikojen syyn paikantamisessa ja analysoimisessa sekä tukevat turvallista sähkönjakelua valvomalla kojeiston kriittisiä osia.

Suojarelekonfiguraation tavoitteena on tuottaa kojeistolle toimiva sovelluskokonaisuus, joka releille asennettuna kykenee toteuttamaan edellämainitut toiminnot. Suojauskokonaisuutta suunniteltaessa on tärkeää tutustua projektin lähtötietoihin; millainen kojeistokokonaisuus on kyseessä, mitä mittauksia tulee suorittaa, mitä suojauksia jokaiselle paneelille suoritetaan ja miten kommunikaatio suoritetaan. Konfiguraation alkuvaihe riippuu myös vahvasti käytetystä ohjelmasta: PCM600-sovelluksella kaikkien releiden konfiguraatiot saadaan rakennettua yhteen projektipuuhun, kun taas eSetup Easergy Pro-ohjelmalla jokaiselle releelle rakennetaan oma tiedosto. Yleensä jokaisen lähtökentän konfiguraatiot ovat samanlaisia, ellei lähdön kuorma ole jakelumuuntaja. Keski-jännitekojeistolle pitää siis luoda kolmenlaisia konfiguraatioita: syöttö- ja lähtökenttien konfiguraatiot sekä mittauskentän konfiguraatio.

Kun konfiguraatiopohjaan on asetettu projektin perustiedot releiden tilauskoodien lisäksi, eri mittaukset asetellaan käytettävien mittamuuntajien perusteella, esimerkiksi 150/5 A virtamittaukselle. Jos kojeistossa on virta- ja jännitemittausten lisäksi muita mittauksia, myös ne asetellaan. Mittausten asettelussa on tärkeä ottaa huomioon, jos mittalaitteella on mahdollisuus useampaan mittaussuhteeseen, ettei käytetä väärä asetuksia.

Digitaalisten lähtöjen ja tulojen tiedot näkee suoraan piirikaavioista. Yleensä normaalit asettelut riittävät, muuta tilanteesta riippuen tuloille ja lähdöille voidaan asetella aikaviive tai invertointi. eSetup Easergy Pro-ohjelmalla riittää, että digitaalisille tuloille ja lähdöille selvittää jokaisen signaalin numeron ja käyttötarkoituksen. Ohjelma määrittää fyysiset liitännät automaattisesti tilauskoodin perusteella. PCM-600 sovelluksella myös fyysinen liitäntä pitää määrittää tarkasti.

Digitaalisten tulojen määrittämisen jälkeen tiedostoon voidaan luoda kytkentälaitteiden virtuaaliset objektit. Objektien avulla releen etupaneeliin voidaan tehdä kyseisen kentän pääkaavio mimiikka-toiminnolla. Mimiikasta laitteiden asennon näkee reaaliajassa. Suojarele toteuttaa katkaisijan ohjaamisen ja lukitsemisen katkaisijan objektin kautta. Etupaneelin näytölle laitetaan näkyviin myös tärkeimmät mittaukset. Kuviossa 11 mahdollinen ratkaisu mimiikasta.



Kuvio 11. Mimiikka

Suojausfunktiot asetellaan valmiilla asetteluarvoilla, jotka toimittaa toinen suunnittelija. On tärkeä varmistaa, että kaikki halutut suojaukset on aktivoitu käytettäväksi ja aseteltu oikein. Nämä asiat on esitetty kuvioissa 12 ja 13.

Current stages

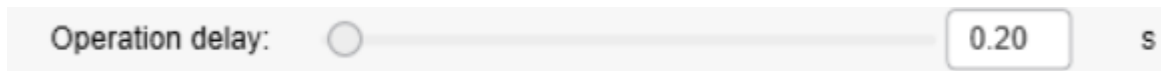
Enable for I>:	<input checked="" type="checkbox"/>
Enable for I>>:	<input checked="" type="checkbox"/>
Enable for I>>>:	<input checked="" type="checkbox"/>

Kuvio 12. Suojausten aktivoiminen

Pick-up setting [A]	38
Pick-up setting [xIn]	0.75
Delay curve family	DT
Delay type	DT
Operation delay [s]	0.30

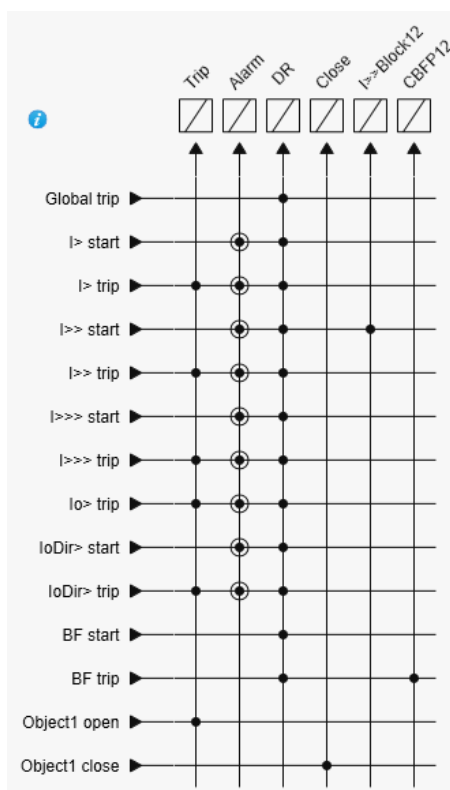
Kuvio 13. Ylivirtasuojan 1. portaan vakioaika-asetteluarvojen esimerkki

Mittaus- ja laukaisupiirin valvontatoimintojen laukaisuille asetetaan pieni viive virheellisten lukitusten estämiseksi. Katkaisijan kunnonvalvontaa varten pitää selvittää käytetyn katkaisijan operaatioiden laukaisukäyrä (trip curve), jonka avulla toiminto saadaan aseteltua. Tämän käyrän saa selville käytetyn katkaisijan datalehdeltä.



Kuvio 14. Mittauspiirin aikaviiveen määrittäminen

Suurin konfiguraatioprosessin osa on matriisin ja logiikan rakentaminen. Kuviossa 15 on yksinkertaistettu esimerkki mahdollisesta matriisista.



Kuvio 15. Käytännön matriisiesimerkki

Valokaarisuojaus toteutetaan yleensä erillisellä laitteella. VAMP321-valokaarisuojareleellä valokaarisuojauksen toteuttaminen ei poikkea normaalista konfiguraatioprosessista paljon. Valo-

ja virtaehdot liitetään niiden omissa matriiseissa Arc Stage nimisiin signaaleihin, joilla aktivoidaan halutut digitaaliset lähdöt ja indikoivat LED-valot.

Tiedostojen luomisen loppuvaiheessa tehdään kommunikaatioasetukset. Tämän vaiheen eteneminen riippuu vahvasti käytetystä kommunikaatioprotokollasta ja siitä, lähetetäänkö kojeiston mittaus- ja signaalitietoja valvontajärjestelmään. Profibus-väylällä pitää määrittää puskurit, laitteiden Profibus-osoitteet ja profiili sekä käytetty muunnin. IEC61850 protokollan asettelu on paljon monimutkaisempi operaatio, jossa konfiguraatioon pitää luoda IEC61850-standardin mukaisia mittaus- ja signaalitietoja sisältäviä datasarjoja. ABB:n youtube-kanavalla on video "How to use IEC 61850 Configuration in PCM600", joka käsittelee tätä enemmän.

10 Pohdinta

Suojarelekonfiguraatio on tehtävä, joka edellyttää laajaa kojeistojen ja suojareleiden tuntemusta turvallisten ja vastuullisten suojauskokonaisuuksien toteuttamiseksi. Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli luoda teoria- ja toimintapohja, joka tukee konfiguraatioprosessia ja nopeuttaa aiheeseen tutustuvan oppimisprosessia. Työn tuloksena syntyi sekä salassapidettävä että julkinen toimintaselite, joita voidaan käyttää suojarelekonfiguraation pohjatiedon ja koulutuksen tukena. Lisäksi työssä muodostettu teoriapohja tarjoaa kattavan yleiskuvan aiheesta.

Työ onnistui hyvin teoria- ja toimintapohjan luomisessa, vaikka osa aihealueista jäi rajauksen vuoksi pintapuolisiksi. Aikarajoitteet ja työn laajuus asettivat haasteita yksityiskohtaisuuden suhteen, mutta työ tarjoaa silti arvokkaan lähtökohdan suojarelekonfiguraation ymmärtämiseksi ja toteuttamiseksi. Käytännön soveltamisessa on kuitenkin tärkeää hyödyntää suojareleiden manuaaleja ja täydentää osaamista itsenäisesti. Konfiguraation toteuttamisessa suositellaan myös kokeneen asiantuntijan tukea.

Työn rajoitukset liittyvät erityisesti lähteiden luotettavuuteen ja yleispätevyyteen. Koska eri laitevalmistajien suojareleet ovat ominaisuuksiltaan yksilöllisiä, työssä esitetyt asiat eivät välttämättä päde kaikkiin tilanteisiin. Näiden puutteiden korjaamiseksi tulevaisuudessa voisi hyödyntää laadullista tutkimusta, kuten asiantuntijahaastatteluja tai teknisten manuaalien syvällisempää analysointia.

Opinnäytetyö tarjoaa hyvän lähtökohdan suojauskonfiguraatiosta kiinnostuneille ja tukee uuden henkilöstön koulutusta toimeksiantajan organisaatiossa. Toimeksiantaja oli erittäin tyytyväinen opinnäytetyöhön. Lisäksi työssä esitetyt teoriat ja käytännön ohjeet tukevat älykkäiden sähköverkkojen kehitystä. Työtä voi jatkossa laajentaa kattamaan monimutkaisempia suojauskokonaisuuksia, laajempia jännitealueita tai keskitetyn suojauksen prosesseja, kuten ABB:n SSC600-laitteen käyttöä.

Lähteet

A deep dive into short circuits. 2023. Oikosulkuja käsittelevä julkaisu Black-Haak nettisivuilla. Julkaistu 13.9.2023. Viitattu 26.10.2024. <https://black-haak.com/a-deep-dive-into-short-circuits/>.

Arc fault protection solutions. N.d. Esittely ABB:n tuotteisiin ABB nettisivuilla. Viitattu 26.10.2024. <https://new.abb.com/medium-voltage/apparatus/arc-fault-protection>.

AX2 ANSI & IEC Function References. N.d. Network Protection & Automation Guide. Schneider Electric. Viitattu 13.9.2024 [https://www.se.com/ww/en/tools/npag-online-re14y/pdf/AX2-ANSI IEC Function References.pdf](https://www.se.com/ww/en/tools/npag-online-re14y/pdf/AX2-ANSI%20IEC%20Function%20References.pdf).

Centralized protection for distribution substations. N.d. Tuoteseloste SSC600-laitteesta ABB:n verkkosivuilla. Viitattu 9.11.2024. <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/campaigns/smart-substation-control-and-protection-ssc600>.

Circuit Breakers and Switches. N.d. Katkaisijoiden ja erottimien esittelysivu Schneider Electricin verkkosivuilla. Viitattu 16.11.2024. <https://www.se.com/in/en/product-category/4200-circuit-breakers-and-switches/>.

Digital Signal Processor (DSP). N.d. Julkaisu Semiconductor engineering verkkosivuilla. Viitattu 25.10.2024. https://semiengineering.com/knowledge_centers/integrated-circuit/ic-types/processors/digital-signal-processor-dsp/

Dubov, M. 2024. Elektron sähkösuunnitteluvastaava. Jyväskylän kaupunki. Haastattelu 22.11.2024.

Easergy P3 Universal Relays P3U10, P3U20 and P3U30 User Manual. 2022. P3U/en M/J006 11/2022. France: Schneider Electric. https://www.se.com/au/en/download/document/P3U_en_M-NAM/

Electrical Earthing Switches. N.d. Julkaisu maadoituskytkimistä savree.com verkkosivuilla. Viitattu 16.11.2024. <https://www.savree.com/en/encyclopedia/electrical-earthing-switches>.

Elektron. N.d. Elektron E oy:n verkkosivu. Viitattu 30.8.2024. <https://elektron.fi/>.

Falk, H. 2018. IEC 61850 Demystified. Norwood: Artech House. <https://janet.finna.fi>, Ebook Central Academic Complete International Edition.

Faraday, M. 1831. V. Experimental researches in electricity. Julkaistu 1.1.1832. <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1832.0006>.

Feeder Protection and Control REF615 Application Manual. 2021. Revision: U. Vaasa: ABB. Julkaistu 10.11.2021.

https://library.e.abb.com/public/f4ea068219714e9483e1b77cfe1d1706/REF615_appl_756378_EN_u.pdf.

Gers, JM. & Holmes, E. 2022. Protection of Electricity Distribution Networks (4th Edition). London: The Institution of Engineering and Technology. Julkaistu 2.2.2022. <https://janet.finna.fi>, Knovel Sustainable Energy and Development Academic.

Graver, R. 2020. The Cause & Effect of Arc Flash/Blast. Opetusjulkaisu powersight.com nettisivuilla. Julkaistu 26.10.2020. Viitattu 26.10.2024. <https://powersight.com/arc-flash-and-arc-blast/>.

Hartmann, R. 2019. Mechanical interlock on ABB 20kV switchgear. Video mekaanisesta lukituksesta ABB:n kojeistossa YouTuben verkkosivuilla Richard Hartmannin kanavalla. Julkaistu 16.5.2019. Viitattu 15.11.2024. <https://www.youtube.com/watch?v=IJTAhEfrsSc>.

How to specify the indoor instrument transformers correctly. 2017. Medium voltage product parameters guide. Laitteentalintaohjeistus ABB:n julkisessa kirjastossa. Julkaistu 22.9.2017. https://library.e.abb.com/public/2c29911ba6444f568b87182f297951c5/Parameters%20guide_1V_LG000733%20Rev.-,%20en.pdf.

IEC TR 61850-1:2013. 2013. IEC Technical Report 61850-1. IEC 61850 standardin 1. Osan kuvaus IEC verkkokaupassa. Viitattu 8.10.2024. <https://webstore.iec.ch/en/publication/6007>.

IEEE Std C37.2™-2022. 2022. IEEE Standard for Electrical Power System Device Function Numbers, Acronyms, and Contact Designations. IEEE Std C37.2-2008 tarkistus. Julkaistu 14.12.2022. Viitattu 12.10.2024. <https://janet.finna.fi>, IEEE Xplore Digital Library.

Laughton, M. A. & Warne, D. F. 2003. Electrical Engineer's Reference Book., 6th edition. Boston: Newnes, 2003. <https://janet.finna.fi>, Knovel General Engineering & Project Administration Academic.

Leinonen, R. 2018. Sisällönanalyysi. Spoken 12.12.2018. Viitattu 20.9.2024. <https://spoken.fi/sisallönanalyysi/>.

McGugan, W. & Vang, L. 2020. Why is ground fault protection needed? Julkaisu consulting – specifying engineer nettisivuilla. Viitattu 20.9.2024. Julkaistu 24.9.2020. <https://www.csemag.com/articles/why-is-ground-fault-protection-needed/>

Nasrallah, E., Brikci, F. & Perron, S. 2007. Electrical contacts in MV & HV Power Circuit breakers. ElectricEnergy T&D January/February 2007. Viitattu 2.12.2024.

<https://electricenergyonline.com/energy/magazine/306/article/Electrical-contacts-in-MV-HV-Power-Circuit-breakers.html>.

Ohm's Law. N.d. Physics of Nondestructive Evaluation. Opetusmateriaali Iowa State University verkkosivuilla. Viitattu 13.9.2023. <https://www.nde-ed.org/Physics/index.xhtml>.

REX640 Technical Manual. 2024. 1MRS759142 Revision H. ABB. Julkaistu 26.9.2024. <https://techdoc.relays.protection-control.abb/r/REX640-Technical-Manual/PCL4/en-US>.

Schossig, W. 2020. History of Protection Engineering. Julkaisu Electrical-Engineering Academy:n verkkosivuilla. Julkaistu 14.12.2020. Viitattu 25.10.2024. <https://www.electrical-engineering.academy/posts/history-of-protection-engineering>.

Silvonen, K. 2017. Sähkötekniikka ja elektroniikka. Opetusmateriaali aallon kurssiverkkosivuilla. Julkaistu 18.9.2017. <https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/1513524/course/section/188482/tXt1.pdf>.

Smart Grids. N.d. älykkäiden sähköverkkojen tilanneseuranta IEA:n verkkosivuilla. Viitattu 3.11.2024. <https://www.iea.org/energy-system/electricity/smart-grids>.

The Difference Between Disconnecter And Switch Disconnecter. N.d. Julkaisu kuormaerottimen ja erottimen eroavaisuuksista CSQ:n verkkosivuilla. Viitattu 16.11.2024. <https://www.csqelectric.com/the-difference-between-disconnector-and-switch-disconnector>.

Keskijännite. 2014. Tieteen termipankki, Sähkötekniikka:keskijännite. Julkaistu 8.2.2014. Viitattu 9.11.2024. <https://tieteentermipankki.fi/wiki/S%C3%A4hk%C3%B6tekniikka:keskij%C3%A4nnite>.

What is a medium voltage switchgear?. 2022. Julkaisu keskijännitekojeistoista aktif.net verkkosivuilla. Julkaistu 16.6.2022. Viitattu 9.11.2024. <https://aktif.net/en/what-is-a-medium-voltage-switchgear/>.

What Is Digital Relay. N.d. Julkaisu indMALL.in nettisivuilla. Viitattu 25.10.2024. <https://www.indmall.in/faq/what-is-digital-relay/>.

Worth, J. 2023. What is PROFIBUS and how does it work?. Julkaisu toolbox.igus.com verkkosivuilla. Julkaistu 6.4.2023. Viitattu 1.11.2024. <https://toolbox.igus.com/4410/what-is-profibus-and-how-does-it-work>.

Liitteet

**Liite 1. Suojarelekonfiguraation toteuttaminen teollisuuden keskijännitekojeistolle
(salassa pidettävä)**