

LUT
Sähkötekniikka
BL30A1104 Laboratory Course in Electrical Power Engineering

RAPORTTI
22.02.2022

Laboratoriotyö

Network protection 1.5 op

	Ennakkotehtävä	Laboratorio-työskentely	Raportti	Kokonais-arvosana
0523399 Aleksandr Haapalainen				
0498110 Janne Riikonen				

Mitattu:

Palautettu:

Palautettu katsottavaksi/korjattavaksi: _____

Hyväksytty: _____

Tarkastaja: _____

SISÄLLYSLUETTELO

1.	Ennakkotehtävät.....	3
1.1	Relesuojaus.....	3
1.2	Katkaisija ja erotin.....	4
1.3	Selektiivinen relesuojaus.....	4
1.4	Kennoterminaali.....	5
1.4.1	Suojaustoiminnot NOC3High ja DEF2Low.....	5
1.5	Oikosulkusuojauksen suunnittelu.....	5
1.6	Maasulkusuojauksen suunnittelu.....	8
1.7	Maasulku maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa.....	11
2.	Laboratorio-osuus.....	13
2.1	Suojausten asettelu.....	13
2.2	Vikatestaus.....	14
3.	Yhteenveto ja palaute.....	15
	Lähteet.....	15

1. ENNAKKOTEHTÄVÄT

1.1 Relesuojaus

Oikosulku-, ylivirta-, ja maasulkusuojaus toteutetaan keski- ja suurjänniteverkoissa releiden avulla. Releet saavat mittaustietoja mittamuuntajilta, joiden perusteella rele mm. päättää, tuleeko katkaisijalle lähettää avaamis- tai sulkemiskäskeä. Relesuojauksella pyritään aukottomaan, selektiiviseen, luotettavaan, nopeaan ja käyttövarmaan suojaukseen. Suojaus on myös usein edullinen suhteessa suojattavaan kohteeseen.

Suojareleet voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan niiden toiminnallisuuden mukaan. Ensimmäisenä markkinoille aikoinaan tulivat sähkömekaaniset releet, joita seurasivat staattiset releet. Nykypäivänä enimmäkseen tuotetut releet ovat niin kutsuttuja numeerisia releitä. Sähkömekaaniset releet saavat käyttöenergiansa mittamuuntajilta, sisältävät liikkuvia osia, jotka vaativat huolto ja ovat toiminnaltaan hitaita. Sähkömekaaniset releet omaavat huonon asettelutarkkuuden, joka tarkoittaa suuria aikaporrastuksia. Staattiset releet tulivat markkinoille 1960-luvulla. Toiminnaltaan nämä ovat välimalli sähkömekaanisen ja numeerisen releen välillä. Nämä releet sisältävät jo mikropiirejä ja puolijohdekomponentteja ja ovat nopeita sekä tarkkoja. Numeeriset releet tulivat markkinoille 1980-luvulla. Isoin merkittävä ero aikaisempiin tyyppeihin on numeeristen releiden prosessointikyky. Mikroprosessoriteknikan avulla yhteen releeseen saadaan useita toiminnallisuuksia. Näitä releitä kutsutaan monitoimisuojuiksi. (Lassila, 2021)

Erilaisia reletyypppejä ovat mm. (Lassila, 2021):

- Ylivirtarele, joka toimii, kun virta ylittää asetteluvaron
- Yli- ja alijänniterele, joka toimii jännitteen ylittäessä tai alittaessa asetteluvaron
- Taajuusrele, toimii taajuuden perusteella
- Epäsymmetriarele, toimii vinokuormatilanteissa
- Differentiaalirele, mittaa kahden pisteen virtojen erotusta
- Distanssirele, mittaa vikapaikan etäisyyttä
- Suuntarele, mittaa virran ja jännitteen kulmia (maasulkusuojaus)
- Tehorele, estää generaattorin käymisen moottorina

Kennotermiinali on suojarele, jolla voi olla erilaisia reletoinnallisuuksia, jotka voidaan ohjelmoida releeseen tarvittaessa. Yksikkö mittaa myös kennon/kentän virtaa ja kiskon jännitettä ja lähettää tietoja tiedonsiirtoväyliä pitkin eteenpäin.

1.2 Katkaisija ja erotin

Katkaisija on sähköverkoissa käytettävä laite, jolla pystytään katkaisemaan jopa kolmivaiheinen oikosulkuvirta. Katkaisijat ovat releohjattuja eli ne saavat avautumis- ja sulkeutumiskäskynsä releeltä, joko automaattisesti tai paikallisohjattuna. Katkaisijoita on useita eri tyypppejä, kuten tyhjiökatkaisija, öljyeristeinenkatkaisija ja SF₆-katkaisija.

Eroin on laite, jolla saadaan verkonosa erotettua jännitteettömäksi. Erottimia ei suunnitella kestäväksi avaamista virrallisena, joten avaaminen tapahtuu, kun katkaisijalla virta on katkaistu ensin. Kuormanerotit myöskin avautumaan nimellisvirrallaan. Erottimien

peruseriaate on toteuttaa näkyvä avausväli, jotta voidaan olla varma jännitteettömyydestä. Myös jotkin katkaisijat on varustettu erotustoiminnolla, jossa vaunukatkaisija (keskijännite) avataan erotusasentoon pyörittämällä se ulos kennosta. Tässä tilanteessa näkyvää avausväliä ei välttämättä näy, mutta erotustapa on todettu toimivaksi. Erottimet voivat olla moottorikäyttöisiä tai käsin ohjattavia.

1.3 Selektiivinen relesuojaus

Suojauksen selektiivisyys tarkoittaa sitä, että vika-aluetta rajataan mahdollisimman pieneksi. Tämä käytännössä tarkoittaa sitä, että vikatilanteessa vain vikapaikan lähimmän suojalaitteen tulisi toimia. Tähän voidaan pyrkiä hyödyntämällä virta- tai aikaselektiivisyyttä. Virtaselektiivisyydessä tavoitteena on suojalaitteiden laukaisuvirtojen porrastus siten, että ylempi suojalaite ei laukea alemman suojalaitteen suojaamaan alueen vikavirroilla. Tällaisen selektiivisyyden toteuttaminen vaatii suojalaitteiden välille riittävää impedanssia rajoittamaan vikavirtaa, jotta vikavirran suuruuden perusteella voidaan luottaa vian olevan joko alemman suojalaitteen ylä- tai alapuolella ja valita suojalaitteille varmatoimiset ja selektiiviset laukaisuvirrat. Virtaselektiivisyyttä käytetään tyypillisesti pienjänniteverkoissa, missä oikosulkuimpedanssit ovat jo suhteellisen suuria ja katkaisijoiden välinen selektiivisyys on helpoimmin saavutettavissa. Virtaselektiivisyyden etuja ovat sen nopeus sekä suhteellisen halpa ja helppo toteutus.

Virtaselektiivisyyden vaatimuksena on siis edellä mainittu suojalaitteiden välinen impedanssi, mitä kuitenkin ei ole aina virtapiirissä tarjolla, jos suojalaitteet ovat lähellä toisiaan. Tällöin voidaan käyttää aikaselektiivisyyttä, joka on kehittyneempi versio virtaselektiivisyydestä. Aikaselektiivisyyden asettelu tapahtuu vertailemalla toiminta-aikakäyriä, jotka eivät saa missään tilanteessa leikata toisiaan. Aikaselektiivisyyden toteutus tapahtuu tyypillisesti käyttämällä elektronisia releitä. Aikaselektiivisyydessä mitoitus tehdään niin, että lähinnä kuormaa oleva suoja toimii kaikissa vikatapauksissa ensimmäisenä. Aikaselektiivinen järjestelmä sallii suojausfunktioiden kahdentamisen, on halpa, yksinkertainen ja helppo toteuttaa. (ABB 2010, s. 116)

1.4 Kennotermiinaali

Kennotermiinaalit ovat erittäin älykkäitä suojauslaitteita. Kennotermiinaalit ovat numeerisia releitä ja kennotermiinaali nimitys tulee niiden monipuolisuudesta, sekä siitä että ne on asennettu sähköasemien johtolähtöjen kennoihin. Modernin kennotermiinaalin edut pohjautuvat suurelta osin sen ohjelmistollisiin toimintoihin. Tällä tarkoitetaan, että koska kennotermiinaali pohjautuu mikroprosessoriin, on siihen toteutettu merkittävä määrä erilaisia toimintoja, kuten releen kunnonvalvontaa, mahdollisuus kommunikoida väylän kautta eri protokollia hyödyntäen, sekä helppo toimintojen ja konfiguraatioiden muokkaaminen.

1.4.1 Suojaustoiminnot NOC3High ja DEF2Low

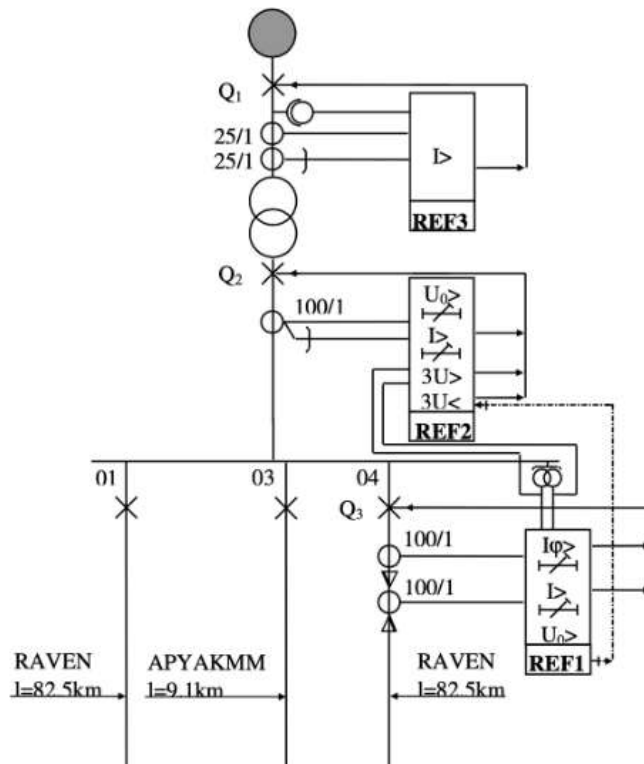
Suojaustoiminto NOC3High on kolmivaiheinen suuntaamaton ylivirtasuoja ylemmästä portaasta. DEF2Low toiminto on suunnattu maasulkusuoja alemmasta portaasta.

1.5 Oikosulkusuojauksen suunnittelu

Tässä luvussa käytetyt laskentaperiaatteet ovat esitetty kirjassa *Sähkönjakelutekniikka 2008, Erkki Lakervi ja Jarmo Partanen, s 176–182*.

Lähtöarvot:

- $S = 2,5 \text{ MVA}$
- $U_{1n} = 110 \text{ kV}$
- $U_{2n} = 20 \text{ kV}$
- $S_n = 16 \text{ MVA}$
- $Z_k = 10 \%$
- $P_{kn} = 85 \text{ kVA}$
- $S_k = 3000 \text{ MVA}$



Kuva 1. Sähköaseman keskijännitelähdöt.

Suojareleiden asetteluarvojen määrittelemiseksi on laskettava suojattavan lähdön pienimmät oikosulkuvirrat ja suurimmat oikosulkuvirrat. Pienimmät oikosulkuvirrat lasketaan suojauksen toiminnan varmistamiseksi ja suurimmat oikosulkuvirrat lasketaan komponenttien oikosulkukestoisuuden varmistamiseksi. Lähdön 04 tapauksessa pienin oikosulkuvirta on kaksivaiheinen oikosulkuvirta lähdön lopussa ja suurin oikosulkuvirta on kolmivaiheinen oikosulkuvirta lähellä lähdön kiskoa. Aluksi on laskettava Theveninin impedanssit tarkasteltavissa pisteissä. Theveninin impedanssi lähellä lähdön kiskoa voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$Z_{pm} = P_{kn} \frac{U_{2n}^2}{S_n^2} + j \sqrt{Z_k^2 - \left(\frac{P_{kn}}{S_n} \right)^2} \frac{U_{2n}^2}{S_n} = 0,13 + j2,5 \Omega \# \quad (1.1)$$

jossa P_{kn} on kuormitushäviöt, Z_k on suhteellinen oikosulkuimpedanssi, U_{2n} on alajännitepuolen nimellinen jännite ja S_n on nimellisteho. Syöttävän verkon oikosulkureaktanssi voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä:

$$X_k = j \frac{U_{1n}^2}{S_k} \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}} \right)^2 = j0,13 \Omega \# (1.2)$$

jossa U_{1n} on yläjännitepuolen nimellinen jännite ja S_k on oikosulkuteho. Lisätään saatu arvo yhtälön 1.1 kautta saatuun arvoon, jolloin saadaan sähköaseman kiskon Theveninin impedanssiksi $0,13 + j2,63 \Omega$. Johdon impedanssi saadaan laskettua sen pituuden ja sähkötekniikan parametrien avulla yhtälöllä 1.3. Raven johdon resistanssi on $0,537 \Omega/\text{km}$ ja reaktanssi on $0,379 \Omega/\text{km}$.

$$Z_j = l(r_j + x_j) = 44,30 + j31,27 \Omega \# (1.3)$$

Oletetaan, että lähdöt 01 ja 03 eivät syötä oikosulkuvirtaa verkkoon, jolloin saadaan tarkasteltavien pisteiden impedansseiksi $0,13 + j2,63 \Omega$ ja $44,43 + j33,90 \Omega$. Kolmivaiheinen oikosulkuvirta saadaan laskettua seuraavalla yhtälöllä:

$$I_k = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{th}} \# (1.4)$$

jossa c on kerroin, jolla huomioidaan vikapaikan jännitteenalenema, U verkon pääjännite ja Z_{th} theveninin impedanssi vikapaikassa. Käytetään c kertoimena arvoa 1.1 ja lasketaan suurin mahdollinen kolmivaiheinen oikosulkuvirta kiskossa yhtälöllä 1.4, jolloin saadaan tulokseksi 4823 A. Pienimmän mahdollisen kolmivaiheisen oikosulkuvirran laskennassa käytetään c kertoimena arvoa 1 ja saadaan tulokseksi 207 A. Tämä arvo kerrotaan vakiolla $\frac{\sqrt{3}}{2}$, jolloin saadaan pienin mahdollinen vikavirta eli 179 A:n kaksivaiheinen oikosulku. Lähdön suurin kuormitusvirta voidaan laskea näennäistehon S avulla yhtälön 1.5 mukaisesti.

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} = 72,16 \text{ A} \# (1.5)$$

Katkaisijan virta-asetteluarvon $I >$ on siis oltava välillä 72 – 179 A, joten valitaan asetteluarvoksi 120 A eli 1.2 In. Hidastusajaksi $t >$ valitaan 0,2 sekuntia. Oikosulkuvirran ekvivalenttinen vaikutusaika lasketaan seuraavalla yhtälöllä:

$$t = t_1 e^{\frac{-t_0}{\tau}} + t_2 = 1.88 \text{ s} \# (1.6)$$

jossa t_0 on AJK:n jännitteetön aika 120 s, t_1 on oikosulun kesto aika ennen AJK:n jännitteetöntä aikaa 0,95 s, t_2 AJK:n jälkeisen oikosulun kesto aika 1,2 s ja τ Raven johtimen jäähtymisaikavakio 360 s. Ekvivalenttisen vaikutusajan perusteella voidaan laskea oikosulkukestoisuus seuraavasti:

$$I_{kk} = \frac{I_{k1s}}{\sqrt{t}} = 3865 \text{ A} \# (1.7)$$

jossa I_{k1s} on johdon 1 sekunnin oikosulkukestoisuus eli 5,3 kA Raven johdolla. Oikosulkukestoisuudeksi jälleenkytkentäsekvenssin kanssa saatiin noin 3,9 kA, mikä

tarkoittaa sitä, että johto ei kestä termisesti tätä suurempia oikosulkuvirtoja. Johto suojataan tältä asettamalla $I \gg$ virta-asetteluarvoksi 600 A eli 6 In, joka katkaisee virran ilman jälleenkytkentöjä, joten oikosulkukestoisuus säilyy lähellä sähköasemaa tapahtuvassa viassa. Oikosulkukestoisen suojauksen voisi myös määrittää laskemalla yhtälöiden 1.7, 1.6 avulla ekvivalenttisen ajan, jota Raven kestää kiskon lähellä tapahtuvalla oikosulkuvirralla ja siten määrittää lyhyemmät hidastusajat jälleenkytkennöissä.

Ylivirtasuojauksen asetteluarvot:

- $I > 1,2 I_n$
- $t > 0,2 \text{ s}$
- $I \gg 6 I_n$
- $t \gg 0 \text{ s}$

1.6 Maasulkusuojauksen suunnittelu

Tässä luvussa käytetyt laskentaperiaatteet ovat esitetty kirjassa Sähköjakelutekniikka 2008, Erkki Lakervi ja Jarmo Partanen, s 182–198.

Suunnitellaan lähdölle 04 maasulkusuojaus. Suunnittelun ehtoina ovat, että suojauksen tulee toimia vikapaikan resistanssin R_f ollessa 3 k Ω . Verkko on maasta erotettu. Maasulkusuojauksista ei voi tehdä oikosulkusuojauksen tavoin ylivirtasuojilla, sillä maasta erotetussa verkossa vikavirta on erittäin pieni. Maasulku voidaan kuitenkin havaita sen aiheuttamien vaihevirtojen epäsymmetrian ja tähtipistejännitteen kohoaman perusteella. Maasulkusuojauksen tulee toimia vain, kun maasulku esiintyy sen suojaamalla lähdöllä, joka tässä tapauksessa on lähtö 04. Releen toiminnan ehtoina ovat se, että kennon läpi kulkeva maasulkuvirta I_r ja tähtipistejännite U_0 ylittävät asetteluarvot. Maasulkuvalokaaren sammuttamiseksi käytetään pikajälleenkytkentää.

Maasulun suuntareleen toimintaehdot:

- $I_r > I_h$ I_h = havahtumisvirta
- $U_0 > U_h$ U_h = havahtumisjännite
- $90^\circ - \Delta\alpha < \alpha < 90^\circ + \Delta\alpha$ α = virran jännitteen kulmaero, $\Delta\alpha$ = toleranssi

Vikaresistanssin kautta tapahtuva maasulkuvirta saadaan yhtälön 1.8 avulla:

$$I_f = \frac{3\omega C}{\sqrt{1+(3\omega CR_f)^2}} U_v \quad (1.8)$$

jossa C on galvaanisesti kytketyn verkon maakapasitanssi/vaihe, $\omega = 2\pi f$ ja U_v vaihejännite.

Lähdön maasulkusuojan tuntema maasulkuvirta I_r saadaan yhtälön 1.9 avulla:

$$I_r = \frac{C-C_f}{C} I_f \quad (1.9)$$

jossa C_f on viallisen lähdön maakapasitanssi/vaihe.

Nollajännite saadaan yhtälöllä 1.10:

$$U_0 = \frac{U_v}{\sqrt{1+(3\omega CR_f)^2}} \quad (1.10)$$

Tarkasteltava lähtö 04 ja aseman muut lähdöt ovat esitetty kuvassa 1. Lähdöillä esiintyy ilmajohtoa (Raven) ja maakaapelia (APYAKMM). Ravenille maakapasitanssi/vaihe on 6,126 nF/km ja APYAKMM:lle 413,5 nF/km. Lähdön 01 muodostama kokonaiskapasitanssi/vaihe on 505.4 nF ja lähdön 03 taas 3762.8 nF. Lähdön 04 maakapasitanssi/vaihe C_j on myös 505.4 nF.

Tarkastellaan suojauksen kannalta hankalampaa tilannetta, jossa lähtö 01 ja 04 ovat kytkettyinä. Näin eri lähtö yhdistelmistä kyseessä on pienimmän kapasitanssin tilanne. Maakapasitanssi on silloin

$$C = 505.4 \text{ nF} + 505.4 \text{ nF} = 1010.8 \text{ nF}$$

Tästä voidaan laskea vikaresistanssin kautta tapahtuva maasulkuvirta yhtälöllä 1.8.

$$I_f = \frac{3\omega * 1010 * 10^{-9}}{\sqrt{1+(3\omega * 1010 * 10^{-9} * 3000)^2}} * \frac{20000}{\sqrt{3}} \text{ A} = 3.63 \text{ A}$$

Tästä voidaan yhtälön 1.9 avulla määrittää lähdöllä 04 havaittu vikavirta:

$$I_r = \frac{1010 * 10^{-9} - 505.4 * 10^{-9}}{1010 * 10^{-9}} * 3.63 \text{ A} = 1.82 \text{ A}$$

Jos kytkettynä lähtöjen 01 ja 04 lisäksi olisi vielä 03, vikavirrat kasvaisivat kasvaneen kapasitanssin vuoksi, joten näitä ei tarvitse tässä määrittäksessä huomioida. Jos kytkettynä on vain lähtö 04, summavirtamuuntajan mittaama virta on nolla ja silloin suojauksen täytyy perustua vain nollajännitteeseen.

Lasketaan vikatilanteessa esiintyvä nollajännite yhtälöllä 1.10. Yhtälöstä voidaan nähdä, että nollajännite on pienimmillään, kun kaikki lähdöt ovat kytkettyinä. Lasketaan tämän tilanteen nollajännite.

$$U_0 = \frac{\frac{20000}{\sqrt{3}}}{\sqrt{1+(3\omega * (1010 + 3762.8) * 10^{-9} * 3000)^2}} \text{ V} = 853.2 \text{ V}$$

Lasketuilla arvoilla voidaan muodostaa maasulun releasettelut lähdölle 04, jotka voivat olla esimerkiksi seuraavat:

- $I_h > 1,5 \text{ A}$
- $U_0 > 5 \%$ vaihejännitteestä
- $\Delta\alpha = 90^\circ$

Maasulun kestoajalle voitaisiin asettaa vikavirran mukaan porrastusta siten, että pienen vikaresistanssin ja suuren vikavirran sekä nollajännitteen maasulut kytkettäisiin nopeammin pois. Nopea laukaisu suurilla nollajännitteillä olisi turvallisuuden kannalta edullista, kun taas hitaampi laukaisu pienillä virroilla mahdollistaisi maasulun sammumisen tai muuttumisen oikosuluksi, jolloin vian paikantaminen olisi helpompaa.

Näin ollen aiempia vikavirran ja nollajännitteen arvoja voitaisiin käyttää hitaammassa portaassa ja laskea uudet arvot nopeammalle laukaisulle. Valitaan vikaresistanssiksi esimerkiksi $100\ \Omega$ ja lasketaan tälle asetteluarvot.

Nopea laukaisu:

- $I_h > 1,5\ \text{A}$
- $U_o > 50\ \%$ vaihejännitteestä
- $\Delta\alpha = 90^\circ$

Nollajännite nousee $100\ \Omega$ vikaresistanssin tilanteessa jopa $91\ \%$:iin vaihejännitteestä. Vikavirta ei muutu niin radikaalisti, joten pidetään asetteluarvo sen suhteen samana.

Maasulkuvirta muodostaa vikapaikassa maadoitusjännitteen, joka on riippuvainen maasulkuvirrasta I_f ja maadoitusresistanssista R_m yhtälön 1.11 mukaisesti.

$$U_m = I_f * R_m \quad \#(1.11)$$

Maadoitusjännite aiheuttaa ihmisille tai eläimille vaarallisen kosketusjännitteen, joten standardissa SFS 6001 on määritelty sallittavat kosketusjännitteet ja niiden laukaisuaajat. Maadoitusjännite ja sallittu kosketusjännite noudattavat yhtälöä 1.12.

$$U_m \leq k * U_{TP} \quad \#(1.12)$$

jossa U_{TP} on kosketusjännite ja k kerroin, joka riippuu maadoitusolosuhteista. Tehtävän esitietojen mukaan voidaan maadoitusolosuhteiden olettaa olevan hyvät, joten k kerroin on silloin 2. Taulukossa 1.1 on esitetty sallitut kosketusjännitteet ja niiden laukaisuaajat (SFS 6001).

Taulukko 1.1 Kosketusjännitteet ja sallitut laukaisuaajat (SFS 6001).

Laukaisuaika [s]	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
U_{TP} [V]	390	280	215	160	132	120	110	110

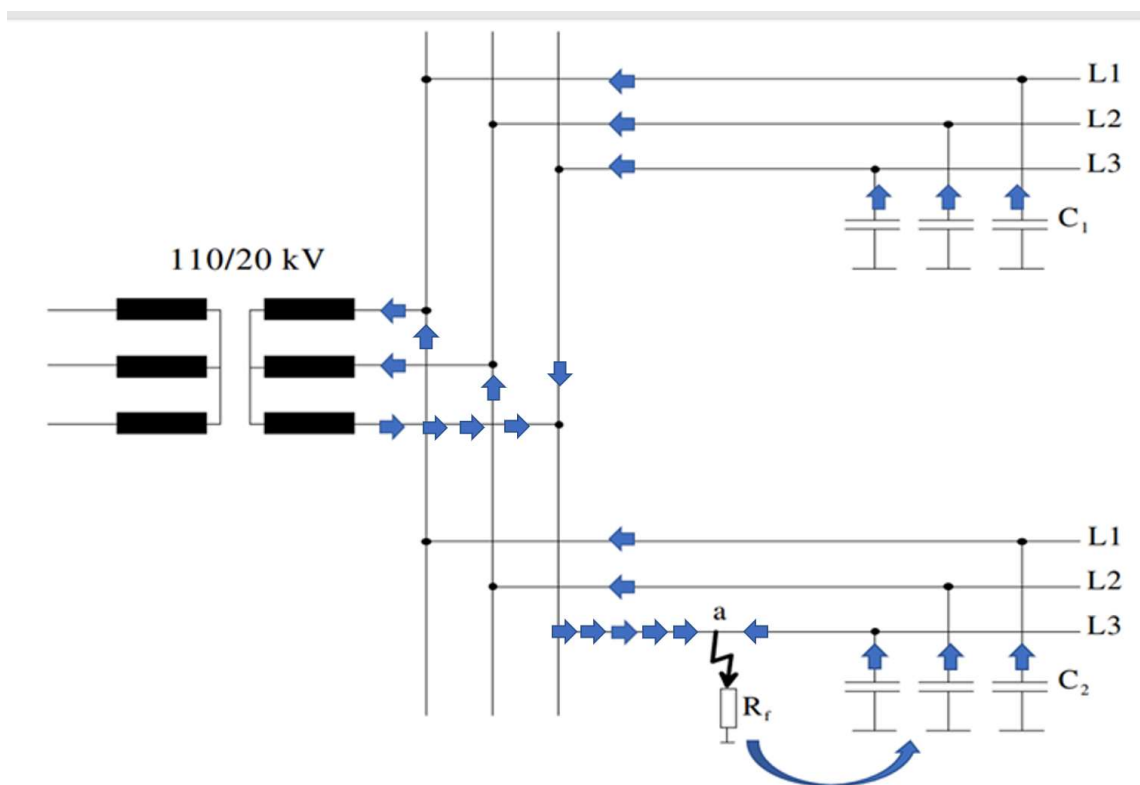
Maadoitusjännite tulee laskea hankalimmassa tilanteessa, joka esiintyy suurimmalla maasulkuvirralla eli silloin, kun kaikki lähdöt ovat kytkettynä ja vikapaikan resistanssi on $0\ \Omega$. Tässä tilanteessa yhtälön 1.8 avulla maasulkuvirraksi saadaan $52\ \text{A}$, joka $8\ \Omega$:n maadoitusresistanssilla on yhtälön 1.11 mukaisesti $416\ \text{V}$. Sijoitetaan saatu arvo yhtälöön 1.12 ja katsotaan taulukosta sopiva aika.

$$416\ \text{V} \leq 2 * 215\ \text{V} \quad (0,5\ \text{s})$$

Näin saadaan, että vika pitää laukaista alle $0,5$ sekunnissa tässä hankalimmassa tilanteessa. Asetetaan korkeamman portaan nopealle laukaisulle $0,4$ sekunnin hidastus. Hitaammalla portaalla voidaan asettelu laittaa $0,8$ sekuntiin, kun huomioidaan sen ja nopeamman portaan havahtumiserot eli nollajännitteen asettelu. Hitaampi porras havahtuu ja laukaisee, kun $5\ \% > U_o > 50\ \%$. Tämä väli tarkoittaa tilanteita, joissa vikaresistanssit ovat väliltä $350\ \Omega < R_f < 3000\ \Omega$. Vikaresistanssin ollessa $350\ \Omega$, maasulkuvirta on noin $27,9\ \text{A}$, joka johtaa $222\ \text{V}$ maadoitusjännitteeseen.

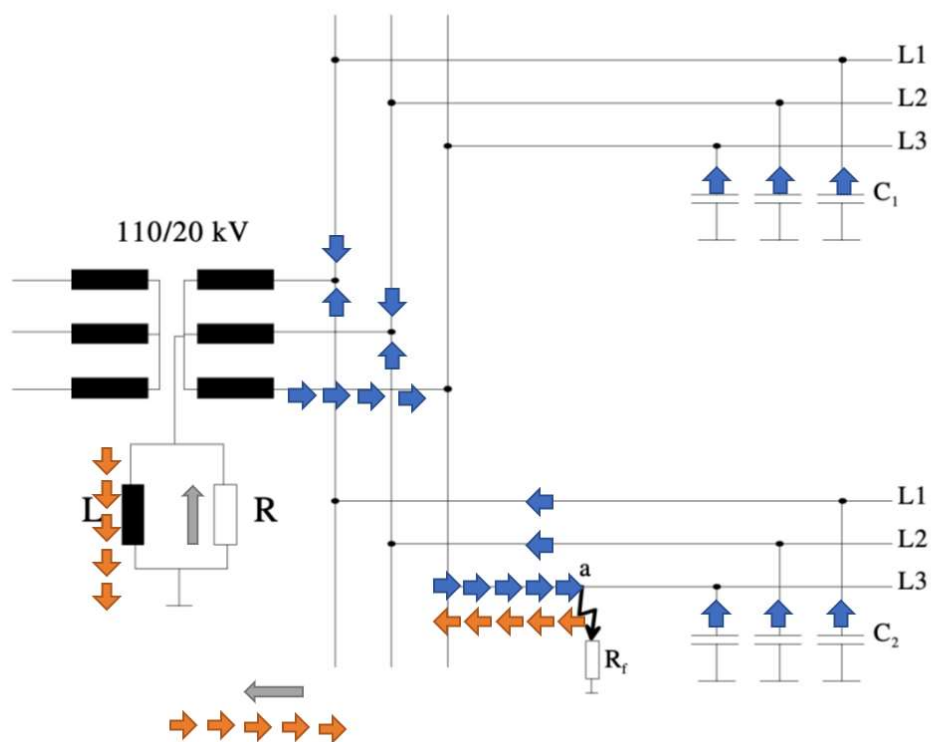
1.7 Maasulku maasta erotetussa ja sammutetussa verkossa

Terveessä verkossa vaihejännitteiden ollessa symmetrisiä myös maakapasitanssien kautta kulkevat varausvirrat muodostavat symmetrisen järjestelmän ja näin ollen niiden summa on nolla. Maasulkutilanteessa varausvirtojen summa poikkeaa nolasta ja tämä osa virrasta kulkee vikapaikan kautta maahan. Kuvassa 1.1 on esitetty maasulkuvirran kulkureitti yksivaiheisessa maasulussa. Kuten kuvasta 1.1 nähdään, kulkee maasulkuvirta vikapaikan kautta maahan ja maakapasitanssien sekä terveiden vaiheiden kautta päämuuntajan käämityksiin ja sieltä taas vian kautta maahan. Maasulkuvirran suuruus on siis riippuvainen vikaresistanssista ja verkon maakapasitansseista. Maasulun sijainti voidaan havaita vaihesiirron avulla, koska jos vikapaikka on taustaverkossa ovat vaihesiirtokulmat negatiivisia.



Kuva 1.1 Maasta erotetun verkon maasulkuvirrat

Sammutetussa verkossa verkon tähtipisteen ja maan välille kytketään kompensointikela kuvan 1.2 mukaisesti. Kelan induktanssi viritetään niin, että kelan kautta kulkeva induktiivinen loisvirta on suunnilleen yhtä suuri kuin vastakkaissuuntainen maakapasitanssien kautta kulkeva kapasitiivinen loisvirta. Näin vikapaikan kautta kulkeva maasulkuvirta jää pieneksi, joka johtaa pienempiin kosketusjännitteisiin. Viallisen lähdön summavirtamittauksessa havaitaan taustaverkon kapasitiivisen virran ja sammutuskuristimen induktiivisen ja resistiivisen virran summa. Tämä virta on hieman induktiivinen, koska kuristimen induktiivisella virralla kompensoidaan myös viallisen haaran kapasitiivinen vikavirta, jota ei havaita summavirtamittauksessa. Havaittavan virran suuruuden määrää likimain sammutuskuristimen resistanssi ja vikaimpedanssi.



Kuva 1.2 Sammutetun verkon maasulkuvirrat. Sinisellä vikaantuneen lähdön ja taustaverkon kautta kulkeva kapasitiivinen virta. Oranssilla sammutuskuristimen induktiivinen vikavirta. Harmaalla sammutuskuristimen resistiivinen vikavirta

2. LABORATORIO-OSUUS

Laboratoriossa tietokoneelta avattiin käytönvalvontajärjestelmä ABB MicroSCADA ja käytöntukijärjestelmä ABB DMS600. Järjestelmät ovat kytkettyinä laboratorion releseinään, jossa simuloidaan kuvan 1 mukaisia keskijännitelähtiä. Tehtävänä oli asettaa lähdön 04 suojareleelle oiko- ja maasulkusuojaus luvuissa 1.5 ja 1.6 tehdyn laskennan tuloksien perusteella ja testata asettelujen toimivuutta.

1.8 Suojausten asettelu

Ensimmäisenä SCADA:n releasettelutyökalusta otettiin vanhat asetteluarvot talteen oiko- ja maasulkusuojauksille. Nämä vanhat arvot on esitetty taulukossa 2.1. Releen nimellisvirta In on asetettu 100 A:iin.

Taulukko 2.1 Alkuperäiset asetteluarvot.

Suojausfunktio	NOC3Low	NOC3High	DEF2Low	DEF2High
Havahtumisvirta [x In]	1,2	12	0,015	0,18
Hidastusaika [s]	0,5	0,05	0,5	0,2

Seuraavaksi aseteltiin releille arvot suojaussuunnittelun tulosten perusteella. Nämä asettelut ovat esitetty taulukossa 2.2. Tarkoituksena maasulkusuojauksessa oli käyttää myös pelkän maasulkuvirran lisäksi nollajännitettä asettelussa, mutta tämä ei laboratoriovälineillä ollut käytännössä mahdollista.

Taulukko 2.2 Uudet asetteluarvot.

Suojausfunktio	NOC3Low	NOC3High	DEF2Low	DEF2High
Havahtumisvirta [x In]	1,2	6	0,015	0,015
Hidastusaika [s]	0,2	0,05	0,8	0,4

1.9 Vikatestaus

Ensimmäisenä lähdölle 04 aiheutettiin kolmivaiheinen oikosulku lähdön loppupäässä. Tähän alempi oikosulkuporras NOC3Low havahtui ja laukaisi vian. Reletyökalu tallensi vikadatan ja tapahtumalistauksesta voitiin nähdä releiden havahtumis- ja laukaisutiedot. Vikadatasta nähtiin myös, että oikosulkuvirta lähdön loppupäässä oli noin 155–158 A, joka on laskennallista pienintä kolmivaiheista oikosulkuvirtaa 207 A hieman pienempi, mutta suojaus toimi tässä tilanteessa.

Seuraavaksi lähdölle 04 aiheutettiin maasulku 3000 Ω :n vikaimpedanssilla, kun lähdöt 01 ja 02 olivat myös kytkettyinä. Ylemmän portaan maasulkusuojaus laukaisi vian ja vikadatasta nähtiin, että nähty maasulkuvirta oli keskiarvoltaan 3,3 A. Datan perusteella nollajännite kohosi 2,1 %:iin vaihejännitteestä. Havaittu maasulkuvirta vastaa laskentaa erittäin tarkasti, mutta nollajännite poikkeaa laskennallisesta. Tämä voi johtua releseinän huonosta nollajännitteen mallinnuskyvystä.

Sama vika toteutettiin, kun lähtö 01 kytkettiin irti. Tämä ei vaikuttanut merkittävästi tuloksiin, sillä kyseessä oli ilmajohtolähtö, joka ei vaikuttanut kokonaiskapasitanssiin merkittävästi. Suojaus toimi. Tämän jälkeen lähtö 01 kytkettiin takaisin ja 02 irtikytettiin. Maasulkuvirta tippui 1,8 A:iin, koska maakaapelilähdön tuoma korkea maakapasitanssi hävisi verkosta. Nollajännite nousi tässä tilanteessa 9,5 %:iin myös samasta syystä. Maasulkusuojaus oli kuitenkin aseteltu sopivasti, joten se havaitsi ja laukaisi vian.

3. YHTEENVETO JA PALAUTE

Laboratoriotyön esiselvityksessä perehdyttiin sähköverkon suojauksessa hyödynnettävissä oleviin suojalaitteisiin, erilaisiin sähköverkon vikailmiöihin, sekä suojauksen suunnittelun ja toiminnan yleisperiaatteisiin. Esiselvityksen myötä saatiin hyvin pohjatietoa laboratoriomittauksessa käydyistä asioista. Itse laboratoriomittaus aloitettiin käymällä rakentavaa keskustelua esiselvityksessä tutkituista asioista, jonka jälkeen tutustuttiin eri aikakausien suojareleisiin. Esittelyn aikana saatiin tietoa eri suojausreleiden ominaisuuksista ja niiden eroavaisuuksista. Esittelyn jälkeen tutustuttiin kennoterminalien toimintaan. Tämän osion aikana käytiin läpi, miten kennoterminalien asettelut voidaan konfiguroida paikallisesti, sekä SCADA ohjelmistoa hyödyntäen. Tämän lisäksi käytiin läpi muun muassa miten vikatilanteet näkyvät valvomoon ja SCADA ohjelmistoon.

Kokonaisuudessaan työ oli onnistunut ja erittäin mielenkiintoinen. Työn aikana käydyn rakentavan keskustelun todettiin olevan erittäin hyödyllinen tiedon sisäistämisen kannalta ja laboratoriomittauksen alussa toteutettu suojareleiden esittely oli mielestämme tärkeä, sillä koulutuksen aikana komponenttien tutkimista ”livenä” on ollut erittäin vähän.

LÄHTEET

- (ABB, 2010) Electrical installation handbook Saatavilla:
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC010002D0206>
- (Lakervi, 2008) Lakervi Erkki, Partanen Jarmo, 2008, Sähkönjakelutekniikka. Kirja
- (Lassila, 2021) Jukka Lassila, 2021. Luentokalvot kurssilta Sähköverkkojen suojaus. Luento 1.
- (SFS 6001) SFS 6001 + A1 + A2. 2009
SUURJÄNNITESÄHKÖASENNUKSET: Suomen
Standardisoimisliitto SFS RY.