



VAASAN AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Danial Harbi

MONITAAJUUSADMITTANSSIPOHJAI
-SEN MAASULKUSUOJAN TOISIO-
KOESTUS

Tekniikka
2017

TIIVISTELMÄ

Tekijä	Danial Harbi
Opinnäytetyön nimi	Monitaajuusadmittanssipohjaisen maasulkusuojan toisio-koestus
Vuosi	2017
Kieli	suomi
Sivumäärä	80 + 2 liitettä
Ohjaaja	Mikko Västi

Tämän insinöörityön tarkoituksena oli selvittää ABB Medium Voltage Products-yksiölle, miten uusi monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuojaus koestetaan käyttäen Omicron-koestuslaitetta. Työn tavoitteena oli kehittää koestusohjeistus uuteen monitaajuusadmittanssipohjaiseen maasulkusuojaukseen, lisäksi kehittää ohjeistus suunnattujen maasulkusuojien toisiokoetuskytkennöille.

Työn teoriaosuus pyrkii avaamaan lukijalle maasulkua ilmiönä keskijänniteverkossa sekä maasulkutilanteita eri maadoitustavoilla. Teoriaosuus käsittelee myös suojausreleitä ja maasulkusuojauksia, lisäksi mittamuuntajat ja eri suojareleiden koestustavat käydään läpi.

Tässä työssä tutustuttiin uuteen monitaajuusadmittanssipohjaiseen maasulkusuojauksen toimintaan ja selvitettiin, kuinka tämä suojaus tulisi koestaa. Ensin tärkeimmät koestettavat asetteluparametrit valittiin perustuen funktion toiminnan tutkimiseen, mittauksiin ja releiden käyttöönottajilta sekä koestajilta saatuihin palautteisiin. Seuraavaksi tutkittiin ja kehitettiin oikea toisiokoestustapa kullekin asetteluparametrille. Funktion katkeilevien maasulkujen tunnistuskyvyn testausta on myös tähdennetty.

Työn tuloksena luotiin tekninen ohjeistus monitaajuusadmittanssipohjaiseen maasulkusuojaukseen sekä tekninen ohje suunnattujen maasulkusuojien koestuskytkennöille.

ABSTRACT

Author	Danial Harbi
Title	Secondary Testing of Multifrequency Admittance-based Earth-Fault Protection
Year	2017
Language	Finnish
Pages	80 + 2 Appendices
Name of Supervisor	Mikko Västi

The aim of this thesis was to study for the ABB Medium Voltage Products how the new multi-frequency admittance-based earth-fault protection should be tested using the Omicron test device. The target of the thesis was to develop a test guideline for the new earth-fault protection, and to develop guidelines for relay connections for secondary testing of directional earth-fault protection.

The theoretical part of the thesis introduces the earth-fault as a phenomenon in the medium voltage network and earth-fault situations with different earthing arrangements. The theoretical part also discusses the protection relays and earth-fault protection functions, as well the measuring transformers and different testing methods of protection relays.

In this thesis, the new multi-frequency admittance-based earth-fault protection was studied, and it was investigated what is the correct and accurate method to test this function. First, based on the study of the operation and pre-testing of this function, and utilizing the known feedback and experiences from the commissioning engineers, the most important setting parameters for the secondary test was selected. Then, for each parameter the correct testing method was investigated and developed. Testing of the intermittent earth-fault detection in this function was also emphasized.

The outcome of this thesis project were a technical notes for testing the multi-frequency admittance protection with secondary injection device Omicron and a technical guideline for relay connections for secondary testing directional earth-fault protection.

Keywords	protection relay, relay testing, earth-fault, secondary testing
----------	---

ALKULAUSE

Haluaisin kiittää ABB Medium Voltage Products-yksikköä insinöörityön aiheesta. Haluaisin kiittää valvojaani lehtori Mikko Västiä tämän insinöörityön ohjauksesta. Suuret kiitokset kuuluvat myös diplomi-insinööri Ari Wahlroosille, diplomi-insinööri Kai Hiitelälle, diplomi-insinööri Jani Palomäelle, insinööri Jaakko Leskiselle ja insinööri Mats Cainbergille heidän ohjeistaan, neuvoistaan ja antamistaan kommentteista.

Erityiset kiitokset kuuluvat ohjaajalleni diplomi-insinööri Veikko Lehesvuolle, hänen apunsa oli korvaamattoman tärkeä insinöörityön etenemisen kannalta.

Opiskeluajastani haluaisin kiittää luokkatovereitani ja opettajia kuluneista vuosista.

Vaasa 25.11.2017

Danial Harbi

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO	8
2	MAASULKU KESKIJÄNNITEVERKOSSA	9
	2.1 Keskijänniteverkon rakenne ja maadoitus	9
	2.2 Maasulku ilmiönä.....	12
	2.3 Maasta erotetun verkon maasulku	14
	2.4 Kompensoidun verkon maasulku.....	17
	2.5 Suuren vastuksen kautta maadoitetun verkon maasulku	23
3	SUOJARELEET	25
	3.1 Suojareletyypit	26
	3.1.1 ABB 615-, 620- & 630-suojareleet	28
	3.1.2 ABB RIO 600.....	28
4	MAASULKUSUOJAUS	29
	4.1 Suuntaamaton maasulkusuoja.....	30
	4.2 Suunnattu maasulkusuoja.....	32
	4.3 Transientti/katkeilevan maasulkuvian suoja	36
	4.4 Monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuoja.....	42
5	MITTAMUUNTAJAT	55
	5.1 Jännitemuuntajat	55
	5.2 Virtamuuntajat	57
6	RELEKOESTUS	58
	6.1 Käyttöönottokoestus	59
	6.2 Määräaikaiskoestus	60
	6.3 Suojareleiden eri koestustavat.....	60
	6.3.1 Keinovikakoestus	60
	6.3.2 Ensiökoestus.....	61
	6.3.3 Toisiokoestus	62
	6.3.4 Toisiorelekoestus.....	63

6.3.5	Toimintojen raportointi	63
6.4	Koestuksen kattavuus.....	64
7	OHJESTUKSEN LUOMINEN	65
7.1	Omicron-koestuslaite	65
7.2	KytKentäohje	68
7.3	MFADPSDE-toisiokoestusohje	69
7.3.1	Voltage start value.....	70
7.3.2	Min operate current ja Tilt angle.....	71
7.3.3	Operate delay time	72
7.3.4	Katkeilevien vikojen havaitsemiskyvyn tarkastaminen	72
7.3.5	Koestusohjeen pohdintaa	75
8	JATKOKEHITYSAJATUKSET.....	76
9	YHTEENVETO	77
	LÄHTEET.....	79
	LIITTEET	81

LIITELUETTELO

LIITE 1. Relay connections for testing directional earth-fault protection (Kytken-
täohje suunnattujen maasulkusuojien koestukseen)

LIITE 2. Testing Multi-Frequency Admittance-Based Protection Function
MFADPSDE with Omicron (MFADPSDE-funktion toisiokoestusohje)

1 JOHDANTO

Nykyaikaisissa keskijänniteverkoissa tapahtuu yhä useammin katkeilevia maasulkuja verkon maakaapeloinnin lisääntyessä ja siirryttäessä kompensoituun maadoitustapaan. Tämän takia ABB on kehittänyt uuden patentoidun maasulkusuojausfunktion, joka pohjautuu monitaajuusadmittanssin mittauksen ja kumulatiivisen admittanssi-osoittimen summaustekniikkaan.

Monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuojausfunktio (MFADPSDE) on uusi suojausfunktio markkinoilla ja sen toiminta ja käyttö ovat siksi vielä vieraita asiakkaille, mikä aiheuttaa paljon kysymyksiä. Erityisesti kysytään miten MFADPSDE-maasulkusuojausfunktio tulisi asetella ja koestaa. Tämän suojausfunktion asettelu ei ole vaikeaa, mutta asettelun koestus on tavallisuudesta poikkeavaa ja siksi haasteellista. Tämä motivoi ABB:ta tarjoamaan tätä insinööritoimintaa.

Työn tarkoituksena on kehittää ABB Medium Voltage Products-yksikölle koestusohjeistus uuteen monitaajuusadmittanssipohjaiseen maasulkusuojaukseen, lisäksi kehittää ohjeistus suunnattujen maasulkusuojausten toisiokoestuskäytännöille.

Työn tarkoitus pyritään saavuttamaan seuraavien kolmen tavoitteen kautta:

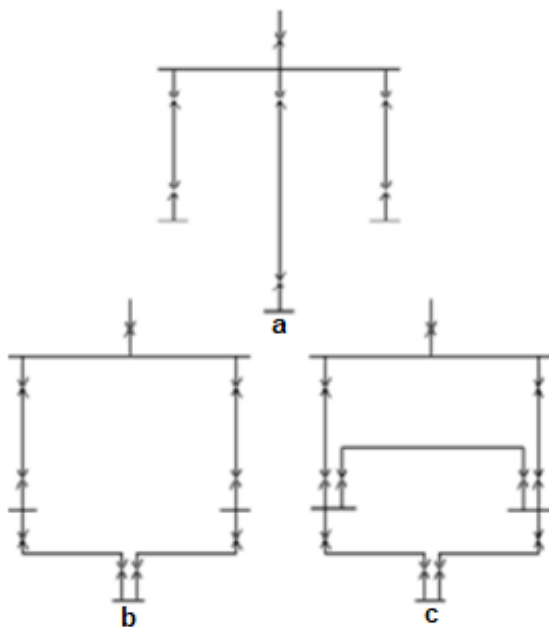
- Ensimmäisenä tavoitteena on yleiskuvan luominen maasulusta ilmiönä keskijänniteverkossa ja eri maadoitustavoissa.
- Toisena tavoitteena on esitellä lyhyesti työn kannalta kyseeseen tulevat suojausperiaatteet, maasulkusuojaus ja relekoestuksen periaatteet.
- Kolmantena tavoitteena on luoda itse ohjeistus MFADPSDE maasulkusuojausfunktio koestusta varten. Luodut ohjeistukset esitetään tämän työn liitteissä.

2 MAASULKU KESKIJÄNNITEVERKOSSA

Sähköverkon rakenne jaetaan käytetyn jännitetason perustella suur-, keski- ja pienjänniteverkkoihin. Suomessa siirtoverkon kuuluu 400, 220 ja 110 kV johdot ja ne muodostavat sähköasemien kanssa koko maan kantaverkon, joka linkittää syöttöasemia ja voimalaitoksia toisiinsa. Keski- ja pienjänniteverkot muodostavat jakeluverkon, jota käytetään sähkön jakeluun sähkönkuluttajille /14/.

2.1 Keskijänniteverkon rakenne ja maadoitus

Suomessa useimmin käytetyt keskijänniteverkkojen jännitetasot ovat 20 kV ja 10 kV, teollisuudessa myös 6 kV. Keskijänniteverkossa pääjännite saadaan kahden vaiheen välistä ja vaihejohtimen ja maan välillä oleva vaihejännite saadaan jakamalla pääjännite $\sqrt{3}$:lla. Keskijänniteverkot voidaan jakaa rakenteensa perusteella avoimiin eli säteittäisverkkoihin, ja suljettuihin eli silmukaverkkoihin ja rengasverkkoihin. Keskijänniteverkkojen periaatteelliset rakennemuodot on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Keskijänniteverkkojen periaatteelliset rakennemuodot: a) säteittäinen verkkomuoto, b) rengasmainen verkkomuoto ja c) silmukoitu verkkomuoto /14/.

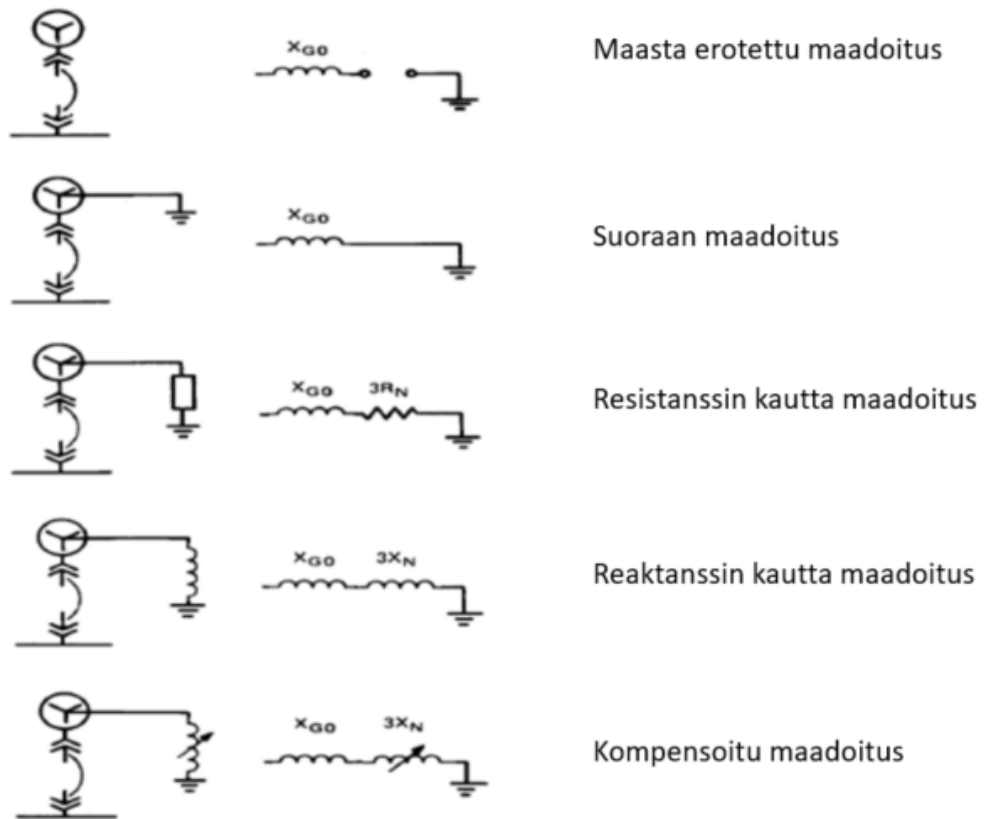
Säteittäisessä verkossa sähkö kulkee vain yhtä reittiä pitkin. Sen etuja silmukoituun ja rengasmaiseen verkkoon nähden ovat yksinkertaisempi jännitteensäätö ja johtosuojaus, pienemmät oikosulkuvirrat ja rakennuskustannukset sekä helpompi vianpaikannus ja jakeluhäiriöiden rajoittaminen /15/.

Silmukoidussa verkossa sähköllä on useita kulkureittejä. Silmukoidun ja rengasmaisen verkon etuja ovat pienemmät energiahäviöt ja jännitteenalenemat. Myös käyttövarmuus on parempi, koska johdon vikaantuessa, sähköä voidaan siirtää asiakkaille verkon terveen osan kautta /15/.

Keskijänniteverkon rakenteessa ja sen komponenttien mitoituksessa on merkittävänä tekijänä verkon päämuuntajan tähtipisteen maadoitustapa. Verkon tähtipisteen maadoittamisella on suuri merkitys verkossa ilmeneviin ylijännitteisiin ja maasulkusuojauksen toteuttamiseen. Keskijänniteverkossa käytetään erilaisia maadoitustapoja, riippuen useista vaikutustekijöistä, kuten maaperän resistiivisyydestä ja varsinkin sähköjakelun luotettavuudesta ja turvallisuuteen liittyvistä tekijöistä. Käytetyt tähtipisteen maadoitustavat jaetaan viiteen ryhmään:

- maasta erotettu verkko
- suoraan maadoitettu verkko
- suuren resistanssin kautta maadoitettu verkko
- reaktanssin kautta maadoitettu verkko
- kompensoitu eli sammutettu verkko /8/.

Suomen jakeluverkoissa useimmiten käytetyt maadoitustavat ovat maasta erotettu ja kompensoitu verkko. Teollisuudessa on käytetty lähes kaikkia yllä mainittuja maadoitustapoja. Kuvassa 2 on esitetty eri tähtipisteen maadoitustavat.



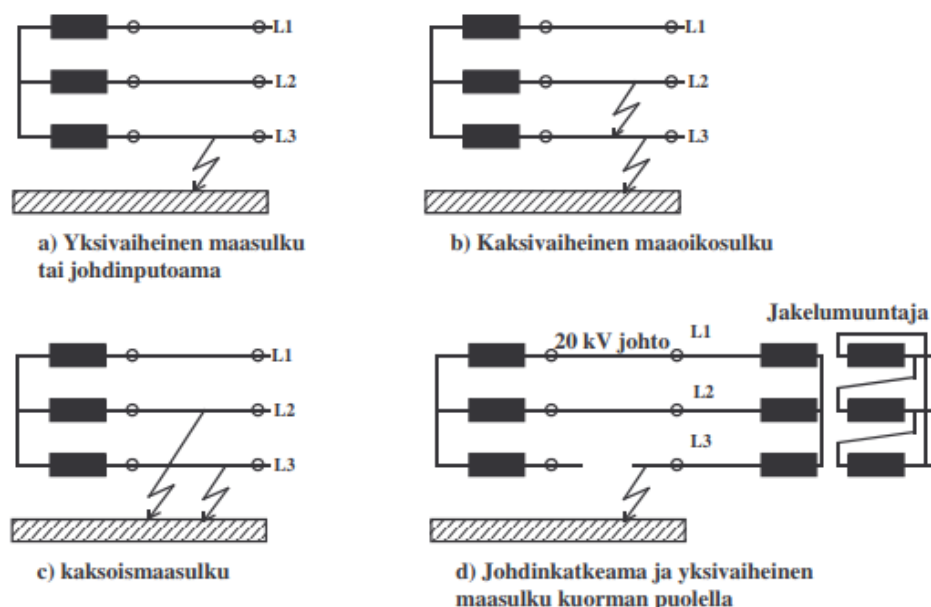
Kuva 2. Muuntajien eri tähtipisteen maadoitustavat /8/.

2.2 Maasulku ilmiönä

Maasulku yleisesti tarkoittaa käyttömaadoittamattoman vaihejohtimen ja maan tai maahan yhteydessä olevan osan välistä eritysvikaa. Käytännössä maasulku syntyy, kun esimerkiksi avojohto on katkennut ja pudonnut maahan tai puun kaatuessa avojohdolle. Suurin osa keskijänniteverkkojen vioista ovat maasulkuja, noin 60...70 %, joista 80 % on yksivaiheisia. Maasulut voidaan luokitella seuraavasti:

- yksivaiheinen maasulku
- kaksoismaasulku (maasulku samanaikaisesti kahdessa eri paikassa verkkoa ja eri vaiheessa)
- kaksivaiheinen maaosikosulku (kaksivaiheinen oikosulku maakosketuksella)
- johdinkatkeama ja yksivaiheinen maasulku kuorman puolella.

Maasulkuilmiö voi syntyä keskijänniteverkon suojamaadoitetussa- ja maadoittamattomassa osassa /1, 15, 16/. Eri maasulkutilanteet on esitetty kuvassa 3.

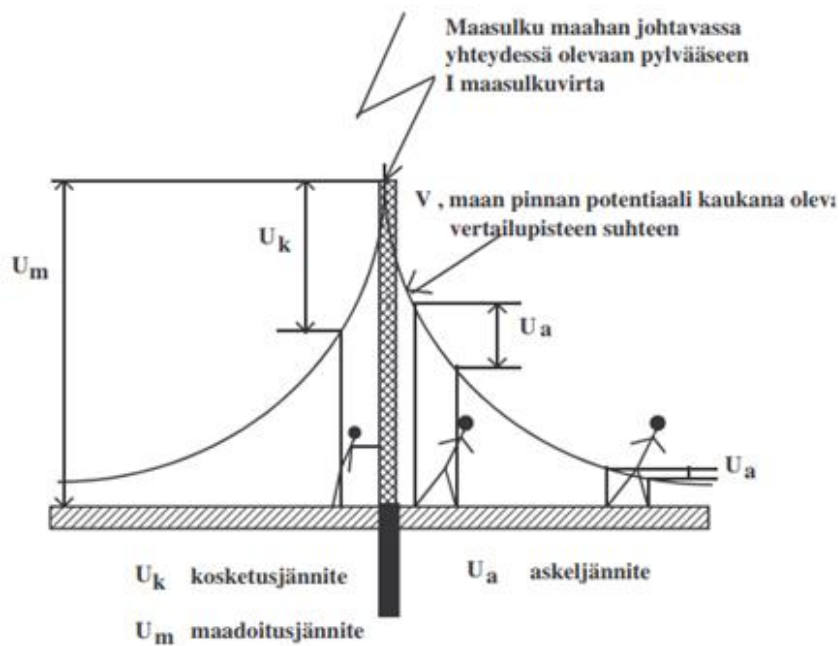


Kuva 3. Maasulkuvikojen luokittelu vikatyypin mukaisesti /15/.

Maasulun sattuessa, suojamaadoittamattomien osien kautta kulkee maasulkuvirta (I_m), mikä aiheuttaa maadoitusjännitteen (U_m) suojamaadoitusresistanssin (R_m) ylitse.

$$U_m = R_m * I_m \quad (1)$$

Maadoitusjännitteen kanssa syntyy kosketus- ja askeljännitteitä, jotka voivat aiheuttaa vaaraa ihmisille **(Kuva 4.)** /1, 16, 17/.



Kuva 4. Maadoitusjännitteen muodostuminen /16/.

Sähköturvallisuusmääräykset määräävät maadoitusjännitteen sallitun ylärajan, joka määräytyy maadoitusten toteuttamistavan, maadoituskohteen ja maasulun yhtämittaisen kestoajan mukaan. Kaavasta 1 nähdään, että maadoitusjännitettä voidaan pienentää pienentämällä joko maasulkuvirtaa tai maadoitusresistanssia /16/.

Jos ihminen koskettaa maasulun aikana suojamaadoitettuja osia, vaikuttaa häneen kosketusjännite (U_k), joka on korkeintaan maadoitusjännitteen (U_m) suuruinen.

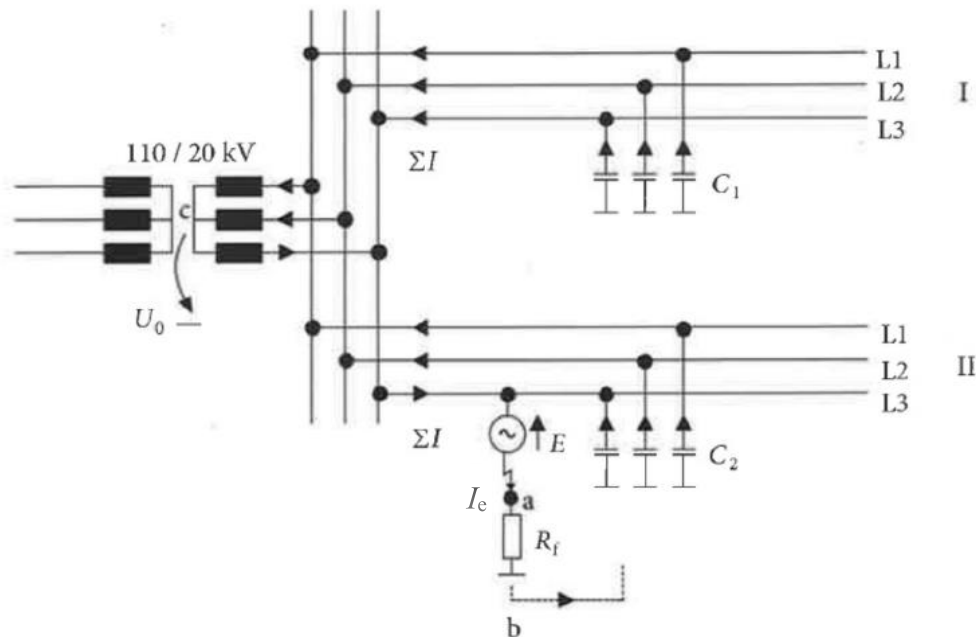
Kun maasulkuvirta leviää maahan maadoituselektrodin ympäristössä, syntyy maaperään potentiaalikenttä. Tämän kentän vaikutuksesta kahden jaloilla kosketeltavan kohdan välillä maasulkupaikan läheisyydessä esiintyy askeljännite (U_a).

Kosketus- ja askeljännite aiheuttavat maasulkukohdan läheisyydessä hengenvaaraa, mikäli ne ovat liian suuria. Niiden selvittäminen laskemalla on kuitenkin hyvin hankalaa. Sen sijaan maadoitusjännite on helposti laskettavissa.

Kosketus- ja askeljännitteitä voidaan pienentää joko parantamalla maadoitusta tai pienentämällä maasulkuvirtaa tai lyhentämällä laukaisuaikaa /17/.

2.3 Maasta erotetun verkon maasulku

Maasta erotettu verkko tarkoittaa verkkoa, jonka muuntajan tähtipistettä ei ole kytketty maahan. Maasta erotetun verkon terveessä tilassa vaihejännitteet maahan nähden ovat symmetrisiä, käytännössä niiden osoitinsumma on lähes nolla. Myös kapasitanssien kautta kulkevat varausvirrat ovat symmetrisiä. Kun maasulku syntyy, vaihejännitteet maahan nähden muuttuvat eli niiden summa poikkeaa nollasta, silloin osa varausvirrasta kulkee vikapaikan kautta muodostaen maasulkuvirran I_e (Kuva 5.) /13, 15/.



Kuva 5. Maasta erotetun verkon maasulun virrat. Vikapaikassa kulkeva vikavirta on $I_e/13/$.

Maasulkuvirta maasta erotetussa verkossa kulkee vikapaikasta maakapasitanssien kautta terveitä vaihejohtimia pitkin syöttömuuntajalle, ja sieltä viallisen vaiheen kautta takaisin maahan (**Kuva 5.**). Nämä maasulkuvirrat ovat kapasitiivisia, koska ne kulkevat johtimien maakapasitanssien kautta. Kunkin lähdön suojausreleet mittaavat lähtönsä kolmen vaiheen summavirran ΣI , virran mittaaminen esitetään tarkemmin kappaleessa 5.2. Kannattaa huomata, että suojausreleen mittaama virta ΣI ja vikapaikan maasulkuvirta (I_e) eivät ole samoja /15/.

Maasulkuvirran (I_e) suuruus itseisarvona ilman vikaresistanssia ($R_f = 0$) voidaan laskea kaavasta:

$$I_e = \sqrt{3} * \omega C_0 U, \text{ missä}$$

C_0 verkon kokonaismaakapasitanssi per vaihe

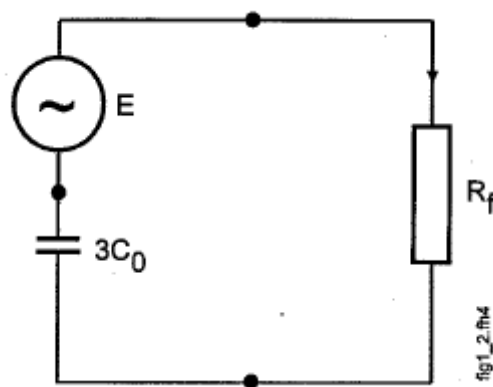
U verkon pääjännite

ω $2 \pi f_n$, $f_n = 50 \text{ Hz}$

(2)

20 kV:n avojohtoverkossa maasulkuvirran suuruus on erittäin pieni, noin 0,067 A/km. Toisaalta keskijännitekaapeleiden tuottama maasulkuvirta on huomattavan suuri, tyypillisesti 2-5 A/km kaapelin rakenteista riippuen. Kaapeleille on olemassa valmiiksi laskettuja taulukoita, joissa kaapelityypin tarkka maasulkuvirran suuruus on kerrottu.

Maasulussa on usein mukana vikaresistanssia R_f , joka vaikuttaa vikavirtaa pienentävästi. Kuvassa 6 esitetään maasta erotetun verkon ekvivalentti sijaiskytkentä.



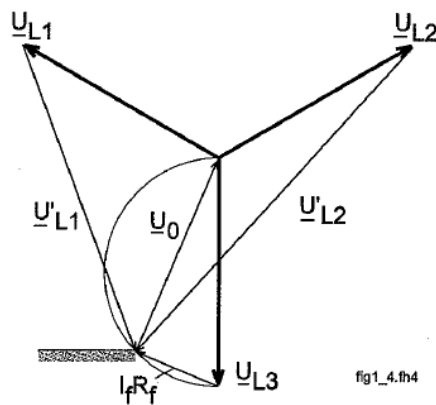
Kuva 6. Yksivaiheisen maasulun ekvivalentti sijaiskytkentä maasta erotetussa verkossa /11/.

Vikavastuksellinen maasulkuvirta (I_{ef}) voidaan laskea lausekkeesta:

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e}{U}R_f\right)^2}} \quad \text{missä,}$$

$$R_f \quad \text{vikaresistanssi (ohmeina)} \quad (3)$$

Maasulun tapahtuessa verkon tähtipisteen ja maan välille syntyy nollajännite U_0 eli jännite, minkä maasulkuvirta aiheuttaa kulkiessaan maakapasitanssin kautta. Maasulun seurauksena vaihejännitteet maahan nähden muuttuvat epäsymmetriseksi (**Kuva 7.**).



Kuva 7. Maasulun aikaisten vaihejännitteiden osoitinpiirros, maasulku vaiheessa L3 /11/.

Kuvan 7 avulla voidaan tarkastella vaihejännitteiden käyttäytymistä yksivaiheisessa maasulussa. Kuvasta nähdään nollajännitteen osoittimen muodostavan vikaresistanssin funktiona puoliympyrän, jonka halkaisijansa on viallisen vaiheen jännitteen osoitin. Vikaresistanssin vaihdellessa nolasta äärettömään, tämä aiheuttaa maapotentiaalin siirtymisen puoliympyrän kaarta pitkin pisteestä U_{L3} verkon tähtipisteeseen. Maasulussa, jossa vikaresistanssi on nolla, nollajännite vian aikana on yhtä suuri kuin vaihejännite. Terve vaihejännite maan potentiaaliin nähden voi olla suurimmillaan noin 105 % pääjännitteestä. Tällainen tilanne syntyy, kun vikaresistanssi on noin 37 % maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista. Nollajännitteen itseisarvo saadaan lausekkeesta /15/:

$$U_o = \frac{U/\sqrt{3}}{\sqrt{1+(3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (4)$$

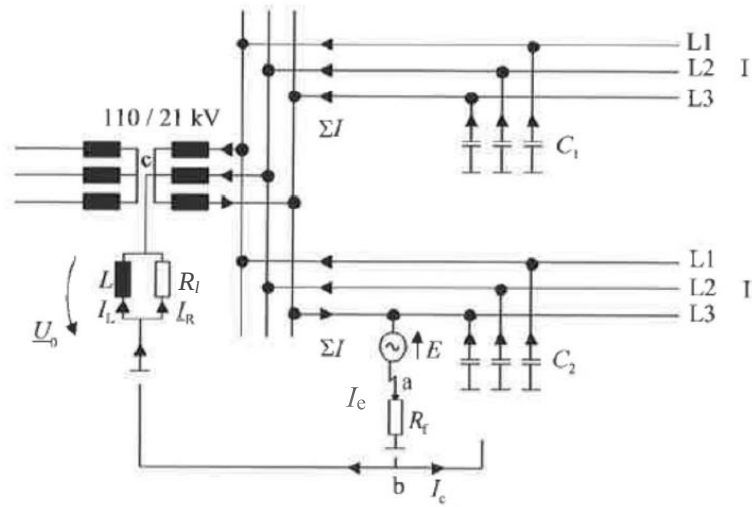
2.4 Kompensoidun verkon maasulku

Kompensoidussa eli sammutetussa verkossa kytketään erillinen kompensointikuristin verkon tähtipisteeseen (Suomessa päämuuntajan KJ-puolen käämi usein D-kytkentäinen, joten kuristin usein maadoitusmuuntajan tähtipisteessä). Kuristimen avulla kompensoidaan verkon kapasitiivista maasulkuvirtaa. Kompensoinnin etuja ovat/16/:

- vikojen itsestään sammumisen todennäköisyys kasvaa
- maasulkuvirta pienenee 80 – 90 %
- komponenttien vauriot vähenevät
- pikajälleenkytkentöjen määrä pienenee 70 – 90 %
- todennäköisyys yksivaiheisten vikojen kehittymisestä vakavammaksi viaksi pienenee, koska vikapaikan lämpöteho on huomattavasti pienempi kuin maasta erotetussa verkossa /19/.

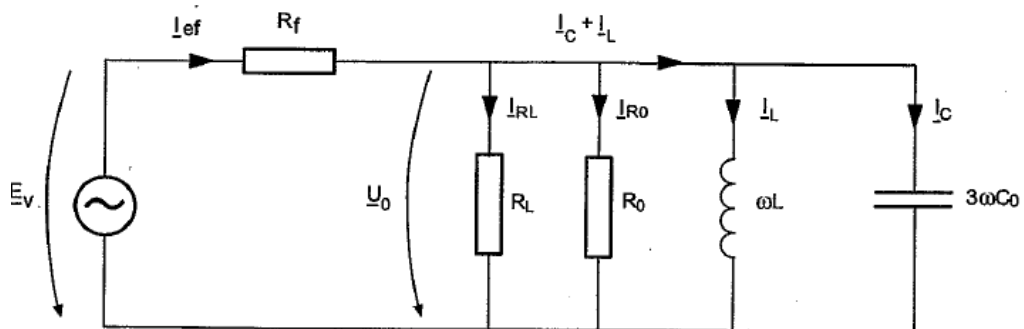
Maasulun sattuessa, muuntajan tähtipisteen ja maan välillä oleva jännite aiheuttaa kompensointikuristimessa kapasitiiviselle maasulkuvirralla I_c vastakkaisen induktiivisen virran I_l , joka kumoaa kapasitiivista maasulkuvirtaa. Verkko on täysin kompensoitu, kun kuristimen induktiivinen reaktanssi on yhtä suuri kuin verkon kapasitiivinen reaktanssi. Kuristimen rinnalle kytketään usein lisäkuormitusresistanssi R_l , jonka tehtävänä on kasvattaa maasulkuvirran pätökomponenttia suunnattujen maasulkusuojien toiminnan helpottamiseksi.

Kuvassa 8 nähdään sammutetun verkon yksivaiheinen maasulku. Maasulkuvirta vian aikana kulkee kahta reittiä pitkin: osa virrasta kulkee kuristimen ja osa terveiden vaiheiden maakapasitanssien kautta. Terveiden vaiheiden kautta kulkee kapasitiivinen maasulkuvirta syöttömuuntajalle, jossa kapasitiivinen virta summautuu induktiivisen virran kanssa. Kompensoitu maasulkuvirta ja lisäkuormitusresistanssin tuottama pätövirta kulkevat viallisen vaiheen kautta vikapaikkaan /13, 15, 16/.



Kuva 8. Kompensoidun verkon yksivaiheinen maasulku /13/.

Kuvassa 8 esitetty tilanne voidaan havainnollistaa sijaiskytkennällä (**Kuva 9**). Sijaiskytkennän avulla voidaan laskea maasulun aikainen vikapaikan vikavirta I_{ef} ja tähtipisteen ja maan välinen nollajännite (U_0).



Kuva 9. Yksivaiheisen maasulun ekvivalentti sijaiskytkentä kompensoidussa verkossa /11/.

Kompensoidun verkon maasulkuvirta (I_{ef}) ja nollajännite (U_0) saadaan lausekkeista:

$$I_{ef} = \frac{U_v}{R_f + \frac{R_0 + R_l}{1 + jR_0(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_l})}} \quad (5)$$

$$U_0 = \frac{-(R_0 + R_l)}{R_f + (R_0 + R_l) + jR_f(R_0 + R_l)(3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_l})} \quad \text{missä,}$$

C_0 verkon kokonaismaakapasitanssi per vaihe

L_l kompensointikuristimen induktanssi

R_f vikaresistanssi

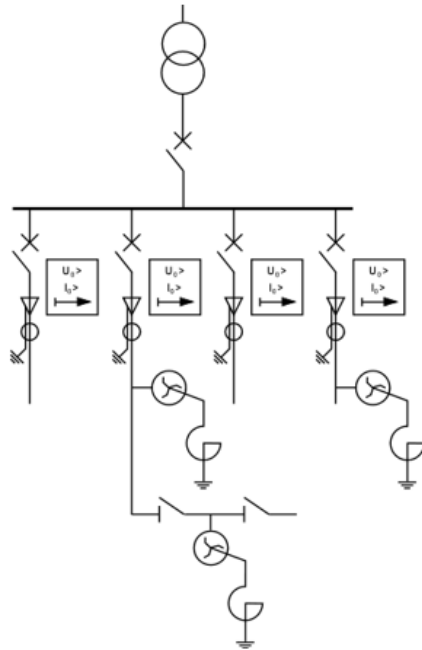
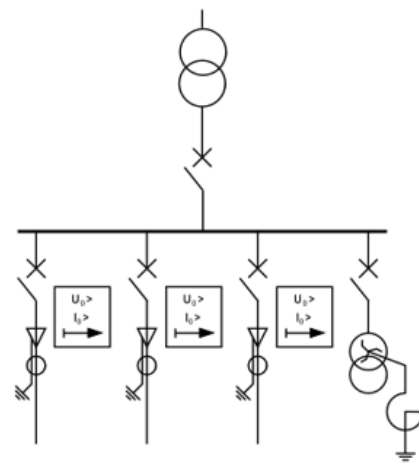
R_l lisäkuormitusresistanssi

R_0 verkon ja kuristimen häviöresistanssit

U_v vaihejännite (6)

Verkon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran suuruus on 20 kV:n avojohdolla noin 0,07 A/km, kaapeleilla tyypillisesti 3-5 A/km /19/.

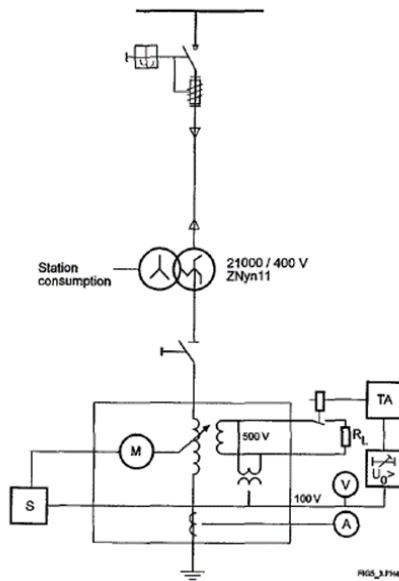
Keskijänniteverkoissa syöttömuuntajan tähtipistettä ei aina ole käytettävissä. Tällöin käytetään Y- tai Z-kytkentäistä maadoitusmuuntajaa, jonka tähtipisteeseen liitetään kompensointikuristin. Jos kompensointikuristin sijaitsee sähköasemalla, kyseessä on keskitetysti kompensoitu verkko. Verkko voidaan kompensoida myös hajautetusti, jolloin kompensointikuristimia sijoitetaan johtojen varsille. Jokainen kuristin mitoitetaan johtonsa tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran mukaisesti. Kuvassa 10 on esitetty esimerkki molemmista maasulkuvirran kompensointitavoista /15/.

Hajautettu kompensointi**Keskitetty kompensointi**

Kuva 10. Maasulkuvirran kompensoinnin toteuttamistavat /6/.

Kuristimet voivat olla jatkuvasäätöisiä, väliottokytkimellä varustettuja tai pikasäätökuristimia. Jatkuvasäätöinen kuristin säätää rautasydämen ilmarakoa portaattomasti ilman, että käämin kierrosluku muuttuu. Kuristin varustetaan moottoriohjaimella ja automaattisäätäjällä. Väliottokytkinsäätöisessä kelassa säädetään induktanssia muuttamalla portaittain käämin kierroslukua. Pikasäätökuristimen toimintaperiaatteena on kytkeä apukäämiin kondensaattoreita, joilla kumotaan osa kuristimen induktanssista /11/.

Kuvassa 11 on esitetty jatkuvasäätöinen kuristin, M on moottori, S on automaattisäädin, R_l on lisäkuormitusresistanssi. Uo-rele ja ohjain TA ohjaavat lisäkuormitusvastusta, V ja A ovat jännite- ja virtamittauksia. Kuvassa 12 on esitetty kompensointikuristin Vaasan Purolan sähköasemalta.



Kuva 11. Jatkuvasäätöinen kuristin /11/.



Kuva 12. Kompensointikuristin, Vaasan Purolan sähköasemalta. 1) kuristin 2) lisävastus.

2.5 Suuren vastuksen kautta maadoitetun verkon maasulku

Suuren vastuksen kautta maadoitetussa verkossa kytketään syöttömuuntajan tähtipisteeseen suuriohminen maadoitusvastus. Maadoitusvastuksella nostetaan maasulkuvirtaa ja samalla pienennetään ylijännitteitä, mitkä syntyvät kytkentä- ja katkaisutilanteista tai katkeilevasta maasulusta. Tällaisessa verkossa on laukaiseva maasulkusuojaus.

Jos maadoitusvastus on valittu niin, että sen tuottama virta on korkeampi kuin verkon kapasitiivinen maasulkuvirta, silloin on mahdollista rajoittaa syntyviä transienttiylijännitteitä 2,5 kertaa normaalin jännitteen huippuarvosta, mikä on etu verrattuna maasta erotettuun verkkoon.

Suuren vastuksen kautta maadoitettua verkkoa käytetään tyypillisesti keski- ja pienjänniteteollisuusverkoissa, joissa sähköjakelun jatkuvuus on tärkeä. Sitä voidaan käyttää myös julkisissa keskijänniteverkoissa, joissa kapasitiivinen maasulkuvirta ei ole suurempi kuin muutama kymmenen ampeeria. Haittapuoli suuren vastuksen kautta maadoitetussa verkossa on suurempi vikavirta maasulun aikana.

Suuren vastuksen kautta maadoitetun verkon tapauksessa maasulkuvirta (I_{ef}) ja nollajännite (U_o) saadaan seuraavista lausekkeista /15/:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{1+(R_e 3\omega C_0)^2}}{\sqrt{(R_f+R_e)^2+(R_f R_e 3\omega C_0)^2}} \frac{U}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

$$U_o = \frac{I_{ef}}{\sqrt{(1/R_e)^2+(3\omega C_0)^2}}, \text{ missä}$$

C_o verkon kokonaismaakapasitanssi per vaihe

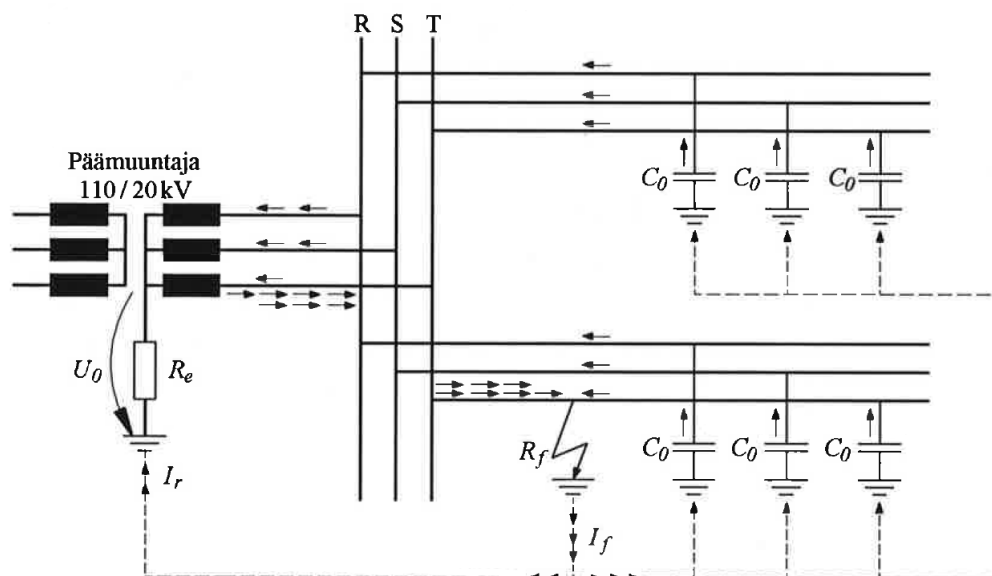
R_f vikaresistanssi

R_e maadoitusresistanssi

U pääjännite

ω $2 \pi f_n$, $f_n = 50\text{Hz}$ verkon nimellistaajuus (8)

Kuvassa 13 nähdään maasulkuvirran muodostuminen suuren vastuksen kautta maadoitetussa verkossa. Nollajännite aiheuttaa maadoitusvastuksessa resistiivisen virran, joka summautuu verkon kapasitiiviseen virtaan.



Kuva 13. Suuren vastuksen kautta maadoitetun verkon yksivaiheinen maasulku /15/.

Pienen vastuksen kautta tai suoraan maadoitettu verkko

Pienen vastuksen kautta maadoitetussa verkossa, verkon tähtipiste on maadoitettu pienen vastuksen kautta. Suoraan maadoitetussa verkossa tähtipisteen maadoitus tehdään ilman lisävastusta. Näissä verkoissa maasulkuvirrat ovat hyvin suuria ja verrattavissa oikosulkuvirtoihin. Suomessa ei käytetä näitä maadoitustapoja keskijänniteverkossa. Lisäksi monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuoja ei sovellu kykeisiin maadoitustapoihin, joten ne on rajattu tämän työn ulkopuolelle.

3 SUOJARELEET

Sähkönjakelujärjestelmissä tapahtuu erilaisia häiriöitä ja katkoksia monista erisistä johtuen. Sähköverkon viat voivat vaarantaa käyttäjien ja sivullisten turvallisuuden (sähköiskun vaara), sekä aiheuttaa sähköjakelujärjestelmien osissa isoja vaurioita, joista seuraa isoja kustannuksia ja käyttökatkoksia. Näistä syistä johtuen, suojarieleillä saavutettava vikojen ja häiriöiden rajoittaminen on erittäin tärkeää sekä sähkölaitokselle että kuluttajille.

Suojareleen tehtävänä sähköjärjestelmässä on tarkkailla jatkuvasti järjestelmän tilaa saatujen mittaustuloksien perusteella. Vian tapahtuessa, releen tehtävänä on itsenäisesti ja nopeasti kytkeä verkon viallinen osa eroon muusta sähköjärjestelmästä. Relesuojauksen periaatesuunnittelun on täytettävä seuraavat pääperiaatteet /4/:

- Suojaukset on suunniteltava toimimaan luotettavasti, käyttövarmasti ja olemaan yksinkertainen.
- Suojaukset on suunniteltava toimimaan selektiivisesti eli vain vikaantunut verkonosa tai komponentti kytketään irti.
- Suojaukset on suunniteltava toimimaan mahdollisimman nopeasti ja tarkasti, jotta vian aiheuttamat vahingot saadaan minimoitua.
- Suojaukset on suunniteltava mahdollisimman kattavaksi, eli mikään verkonosa ei saa jäädä suojauksen ulkopuolelle. Käytännössä jokaisella suojalla tulee olla varasuoja.
- Suojaukset on suunniteltava toimimaan mahdollisimman herkästi, jotta häiriöt havaitaan mahdollisimman hyvin ja aikaisessa vaiheessa.

Suojareleiltä vaaditaan yleensä myös:

- Suojausreleessä on oltava itsevalvontaominaisuus.
- Relesuojaus on voitava koestaa ja huoltaa käyttöpaikalla käytön aikana ilman käyttökeskeytystä /4/.

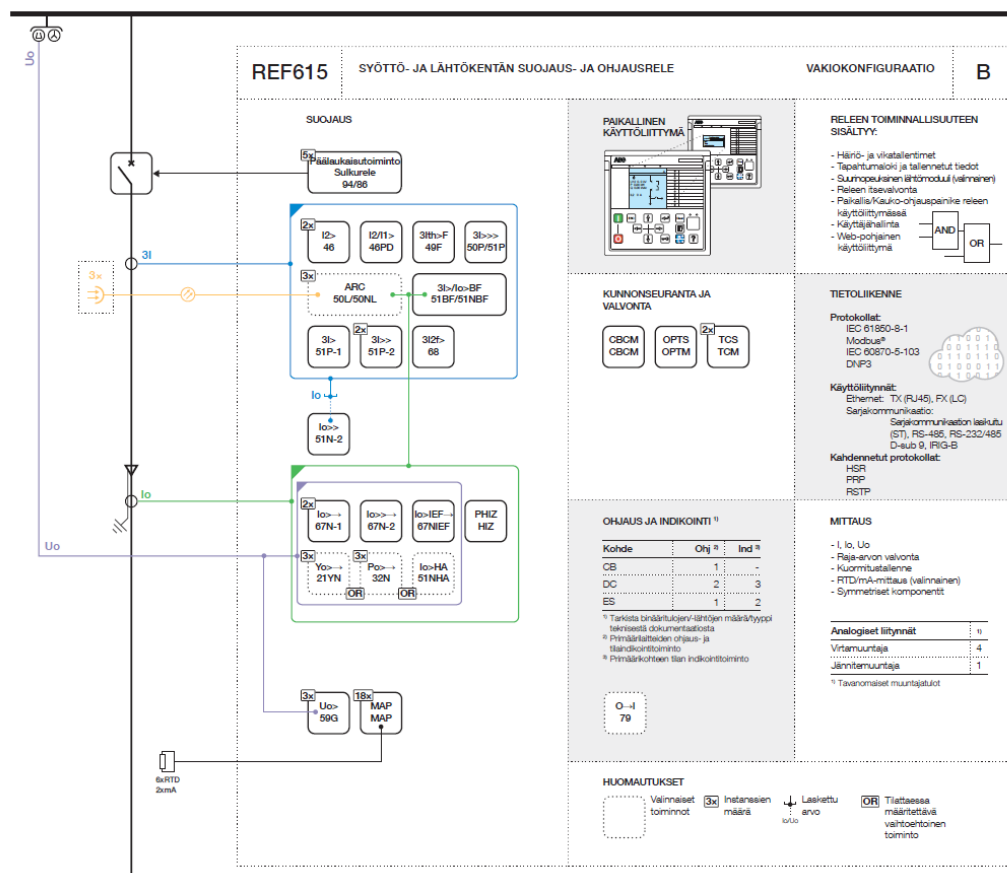
Suojaustavan valinnalla voidaan vaikuttaa suojauksen toimintanopeuteen, jolla on huomattava vaikutus vian synnyttämiin haittoihin. Nopean suojauksen ansiosta jäivät viasta aiheutuvat vaaratekijät ja vahingot sekä verkon termiset rasitukset pieniksi. Suojauksen nopealla toiminnalla pienennetään myös vianjälkeisiä kuormitus-sysäyksiä, jotka yhdessä jännitekuopan kanssa lisäävät häiriön leviämiskä verkon muihin osiin. Suojauksen toimintanopeuteen on siis kiinnitettävä huomiota /1/.

3.1 Suojareletyypit

Ensimmäiset suojareleet tulivat markkinoille 1900-luvun alkupuolella. Siihen aikaan oli jokaista suojaustoimintaa varten oma suojareletyyppi:

- taajuusreleet
- yli- ja alijännitereleet
- suuntareleet
- tehoreleet
- ylivirtareleet toimivat virran ylittäessä jne.

Modernit suojareleet ovat mikroprosessoripohjaisia ja sisältävät useita erilaisia integroitua suojausfunktioita ja toimintoja, joita voidaan käyttää eri käyttötarkoituksiin. Kuvassa 14 on esitetty esimerkiksi modernin suojareleen toiminnoista /18/.



Kuva 14. REF615 vakiokonfiguraation B toiminnallinen yleiskatsaus /9/.

Tässä työssä tarkastellaan vain seuraavia suojareleitä:

1. ABB:n Relion-tuoteperhe (ABB 615-, 620- & 630-suojareleet)
2. ABB:n RIO600 (älykäs elektroniikkalaite).

3.1.1 ABB 615-, 620- & 630-suojareleet

ABB:n 615-, 620- & 630-sarjan tuoteperheet on suunniteltu suojaamaan, ohjaamaan, mittaamaan ja valvomaan sähköjakelujärjestelmien ja teollisuuden kojeistoja ja muita laitteita. Releet on suunniteltu IEC61850-sähköasemien automaatiolaitteiden kommunikoinnin ja automaatiolaitteiden yhteistoimintastandardin mukaisesti. 615- ja 620-releiden rakenne perustuu ulosvedettävään (draw-out) muotoiluun ja kompaktiuuteen, ja releellä on useita asennusvaihtoehtoja. 615-, 620- & 630-sarjan tuoteperheet tukevat erilaisia viestintäprotokollia, kuten IEC 61850 Edition 2, processiväylä IEC 61850-9-2 LE, IEC 60870-5-103, Modbus ja DNP3. Profibus DPV1 – tietoliikenneprotokolla on tuettu protokollamuuntimilla SPA-ZC 302.

Yksinkertaistaen, 615- ja 620-sarja eroaa toisistaan siten, että 620-sarjan tuoteperheessä on enemmän tuloja ja lähtöjä kuin 615-sarjassa. Toiminnallisuudeltaan sarjat ovat samanlaisia.

630-sarja tärkeimmät erot suojauksen osalta ovat analogiakanavien vapaa konfiguroitavuus ja suhteellisten arvojen käyttö asetteluissa /2/.

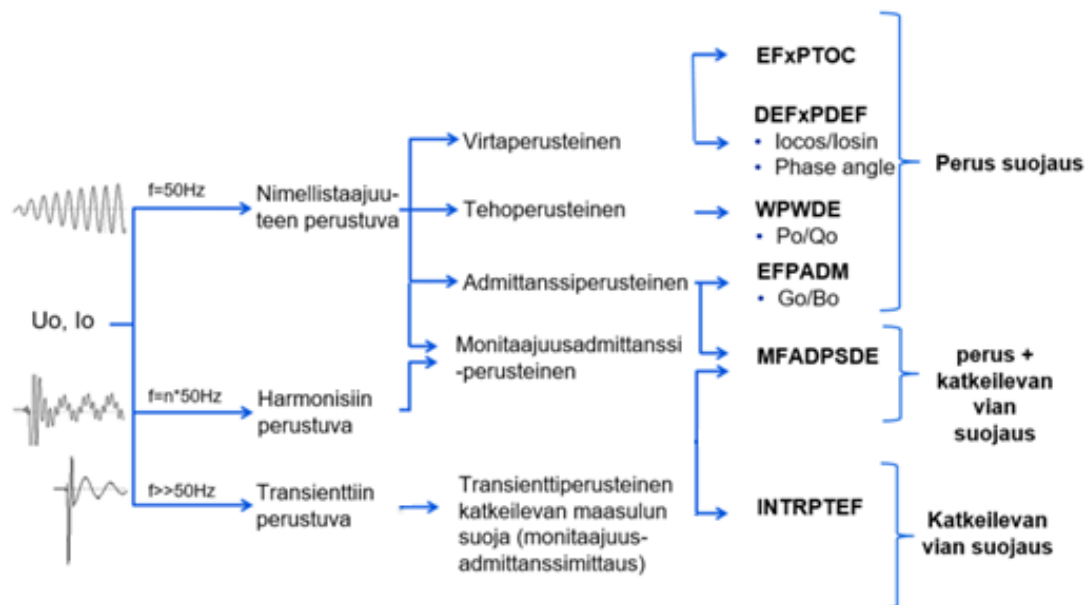
3.1.2 ABB RIO 600

ABB:n RIO600 on suunniteltu laajentamaan suojareleiden digitaalisten ja analogisten tulojen ja lähtöjen määrää, myös toimimaan I/O-laitteena COM600-automaatioasemayksikölle IEC 61850 ja modbus-kommunikaatioiden avulla. RIO600 voidaan käyttää myös vian ilmaisimena ja raportoimaan tehon mittausarvot suoraan releelle tai ylemmän tason järjestelmälle. RIO600 hyväksyy kolmivaiheiset mittasignaalit (jännite ja virta) ja sisältää vikaindikointi- ja mittauslohkoja. RIO600 voidaan käyttää myös itsenäisenä laitteena verkkoautomaatiosovelluksissa. RIO600 on rakennettu teollisuuslaitteistoalustalle, joka tarjoaa saman luotettavuuden, suorituskyvyn ja reaaliaikaisen toiminnollisuuden kuin muut ABB-suojausreleet. Releet kestävät äärimmäisiä lämpötiloja, sähkömagneettisia häiriöitä ja täyttävät alan tiukat standardit /7/.

4 MAASULKUSUOJAUS

Maasulkusuojauksella pyritään rajoittamaan maasulkuvian aiheuttamia vaarajännitteitä, pienentämään laitteiden vauriota ja kytkemään vikaantunut laite tai verkon osan irti niin, että vika ei pääse laajenemaan oikosuluksi tai kaksoismaasuluksi. Maasulkusuojaus suunnittelussa on tärkeää noudattaa kansallisia lakeja ja määräyksiä /6/.

Modernissa suojarелеssä on käytettävissä erilaisia maasulkufunktioita, joita voidaan käyttää erilaisiin käyttökohteisiin ja käyttötarkoituksiin. Kuvassa 15 on esitetty ABB:n Relion-sarjan nollasuureita käyttävät maasulkusuojausfunktiot ja niiden käyttämä mittausperiaate. Toimilohkon nimi, esimerkiksi EFXPTOC, on IEC61850-mallin mukainen nimi virtaperusteiselle maasulkusuojuille. Nimessä x viittaa toimilohkon instanssiin eli portaaseen, esimerkiksi EFXPTOC-lohkosta on käytettävissä kolme itsenäistä instanssia: EFLPTOC (low-porras), EFHPTOC (high-porras) ja EFIPTOC (instantaneous-porras).



Kuva 15. ABB:n Relion-sarjan nollasuureita (I_0 , U_0) käyttävät maasulkusuojausfunktiot ja niiden toimintaperusteet /6/.

Kuvassa 15 esitettyjen maasulkusuojausfunktioiden lisäksi on olemassa suuntaamaton Uo-suojaus (ROVP TOV), jota käytetään kiskonsuojana ja johtolähtöjen varasuojana. Sen toiminta perustuu nimellistajuuden nollajännitteen mittaukseen. Tässä insinööriyössä tutkitaan vain seuraavia maasulkufunktioita:

- suuntaamaton maasulkusuojausfunktio (EFxPTOC)
- suunnattu maasulkusuojaus (DEFxPDEF)
- transientti/katkeileva maasulkusuoja (INTRPTEF)
- monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuojaus (MFADPSDE).

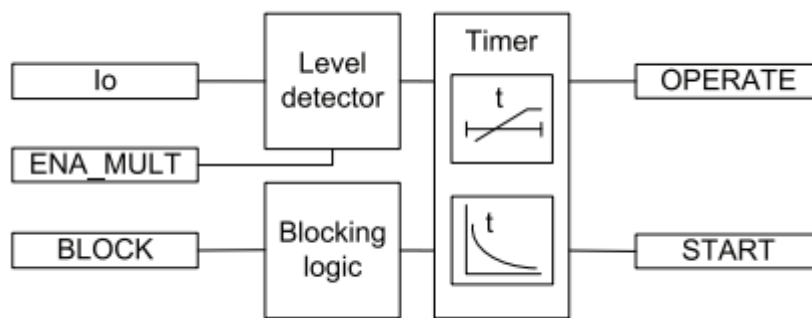
4.1 Suuntaamaton maasulkusuoja

Suuntaamaton maasulkusuojausfunktio EFLPTOC on suunniteltu suojaamaan ja erottamaan maasulut jakeluverkoissa, joissa tähtipiste on erotettu tai maadoitettu kuristimella tai suuriohmisesti. Suuntaamatonta maasulkusuojausfunktiota käytetään, myös mm. pyörivien koneiden suojauksessa. Suuntaamaton maasulkusuojausfunktio havahtuu ja laukaisee, kun nollavirran amplitudi ylittää asetetun rajan. Käytettävissä on kolme eri suojausporrasta, koska monet sovellukset vaativat erilaisia toiminta-aikoja, karakteristikoita ja asetteluja. Suojausportaat ovat /2/:

- Low (EFLPTOC), alempi suojausporras
- High (EFHPTOC), ylempi suojausporras ja
- Instantaneous (EFIPTOC), hetkellisporras (momenttiporras).

EFLPTOC sisältää useita eri toiminta-ajan karakteristikatyyppisiä, jotka mahdollistavat toiminta-ajan automaattisen adaptoinnin mitatut nollavirran amplitudiin. Suojauskonfiguraatiossa EFHPTOC:ia ja EFIPTOC:ia käytetään myös nopeuttamaan maasulkusuojausten toimintaa vakavimmissa suurivirtaisissa maasuluissa, joissa suojauselta tarvitaan nopeampaa laukaisuaikaa; toisaalta suojan virta-asettelu voi olla korkeampi /2/.

Suuntaamattoman maasulkusuojausfunktion (EFxPTOC) periaatteellinen toiminta on esitetty kuvassa 16.



Kuva 16. Suuntaamattoman maasulkusuojausfunktion (EFxPTOC) periaatteellinen lohkokaavio /2/.

Suojauksen toimintasuure on nollavirta, joka määräytyy valituilla nollavirran asetuilla, vaihtoehdot ovat mitattu nollavirta tai laskettu nollavirta. Mitattu nollavirta saadaan tavallisesti kaapelivirtamuuntajan toisiosta, laskettu nollavirta muodostetaan releen sisällä laskemalla yhteen vaihevirrat. Toimintasuure on havahtumisarvon verrannollinen. Jos mitattu arvo ylittää asetetun havahtumisarvon, ”Level detector”-lohko lähettää signaalin ajastimelle (Timer module). Jos ENA_MULT-tulo on aktiivinen, havahtumisarvon asettelu kerrotaan havahtumisarvon Mult-asette- lulla. Kun ajastin aktivoitu, se aktivoi START-lähdön. OPERATE-lähtö aktivoituu, kun ajastin on saavuttanut asettelu- vakioaikaisen laukaisua- jaan tai kään- teisaika- käyrän mukaisen laukaisua- jaan.

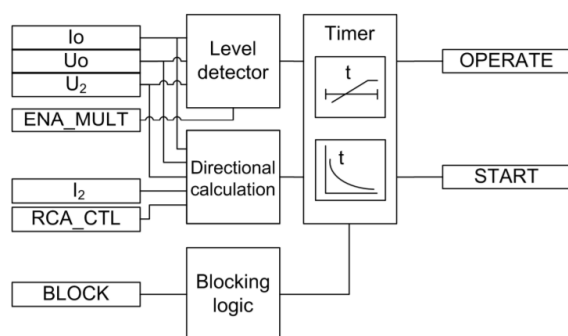
Suojausfunktio toimii kolmella eri vaihtoehdoisella mittaustilalla: ”RMS”, ”DFT” ja huipusta-huippuun. Mittaustila valitaan mittaustilan asetuksista.

Suojausfunktio tukee sekä vakioaika-(DT) että kään- teisaika-karakteristikaa (IDMT) /2/.

4.2 Suunnattu maasulkusuoja

Monissa tapauksissa on vaikea saavuttaa selektiivistä maasulkusuojausta pelkäämään maasulkuvirran amplitudin perusteella (eli suuntaamattomana), tällöin on välttämätöntä käyttää mittauksessa lisäksi kulmamittausta. Tämä toteutetaan, kun ver-
taillaan nollavirran ja polarisoivan suureen välistä vaihekulmaa.

Suunnattu maasulkusuojausfunktio DEFxPDEF on suunniteltu tunnistamaan ja erottamaan maasulut jakeluverkossa ja sähköjärjestelmissä, joissa on erilaisia sähkövoimalaitteita. Suunnattua maasulkusuojausfunktia käytetään sekä maasta erotetussa että kompensoidussa verkossa. Suunnattu maasulkusuojausfunktio havah-
tuu ja laukaisee kun toimintasuureen (virta) ja suunnan määräävän suureen (jännite) amplitudit ylittävät asetellut rajat ja jännitteen ja virran välinen vaihekulma on toi-
mintasektorissa. Käytettävissä on kaksi eri suojausporrasta, low stage (DE-
FLPDEF) ja high stage (DEFHPDEF). Suojauksen toimintaperiaate on esitetty ku-
vassa 17 /2/.



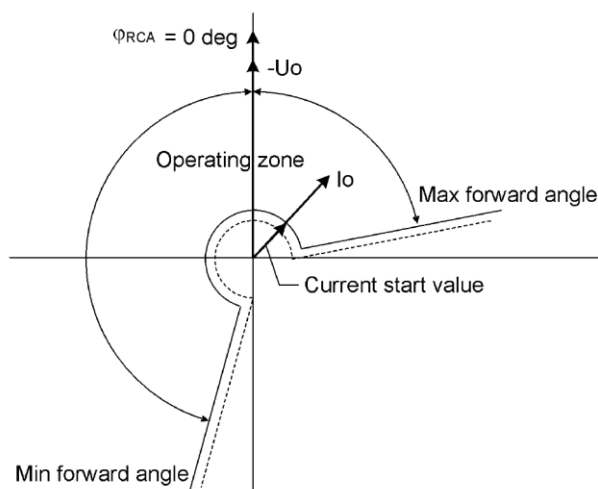
Kuva 17. Suunnatun maasulkusuojausfunktion periaatteellinen lohkokkaavio /2/.

Suunnattu maasulkusuojausfunktio perustuu nollavirran ja nollajännitteen mittaukseen tai vaihtoehtoisesti virran ja jännitteen vastakomponentin mittaukseen. Nolla-
virta ja nollajännite voivat olla joko mitattuja tai laskettuja. Kun nämä suuret ylit-
tävät asetetun havahtumisarvon, ”Level detector” lähettää signaalin ajastimelle (Ti-
mer module). Lisäksi, jos jännitteen ja virran välinen kulma on asettelussa toimin-
tasektorissa, silloin ”Directional calculation” lähettää signaalin ajastimelle. Ajasti-
men aktivoiduttua, START-ulostulo aktivoituu. Kun ajastin on saavuttanut asetel-
lun laukaisuaajan arvon vakioaika (DT)-tilassa tai käänteisaika (inverse time) käyrän

määräämän arvon, tällöin OPERATE-ulostulo aktivoituu. Käänteisaika-moodissa todellinen laukaisuaika riippuu valitusta karakteristikasta, asetteluista ja mitatun nollavirran amplitudin suhteesta aseteltuun /2/.

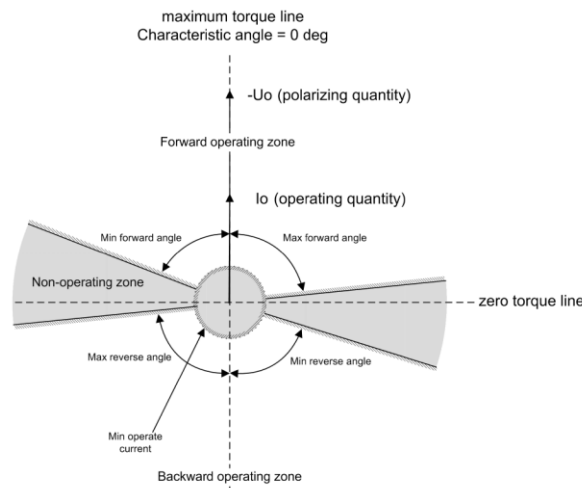
Suojauksen toiminta perustuu joko peruskulmamenetelmään (Phase angle) tai $I_0 \sin/I_0 \cos$ -menetelmään. DEFxPDEF voidaan lisäksi asettaa toimimaan joko myötäsuuntaan (forward) tai vastasuuntaan (reverse).

Peruskulmamenetelmässä asetellaan ensin haluttu peruskulma (RCA): -90 astetta maasta erotetulle verkolle ja 0 astetta sammutetulle verkolle. Toimintasektorille on valittavissa kolme eri toimintamoodia: vapaasti aseteltavat sektorit "Phase angle" ja kiinteästi määritetyt sektorit "Phase angle 80" sekä "Phase angle 88". "Phase angle 80":ssa toimintasektorin maksimikulma (Max forward angle) on kiinteä 80 astetta, kun taas "Phase angle 88":ssa se on 88 astetta RCA-asettelusta. Toimintasektorin minimikulma (Min forward angle) on vapaasti aseteltavissa /2/.



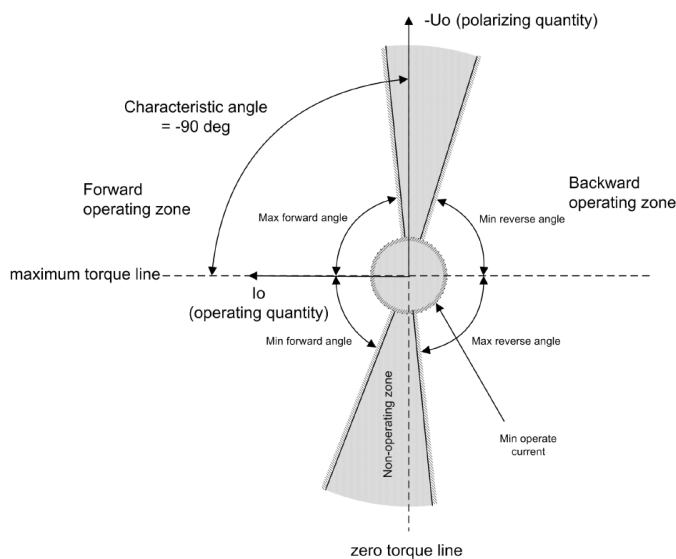
Kuva 18. Suunnatun maasulkusuojausfunktion (DEFxPDEF) vapaasti aseteltava kulmakarakteristika (toimintasektori) /2/.

Kompensoidussa verkossa asetellaan peruskulmaksi (RCA, Characteristic angle) nolla asteetta, koska suojaus mittaa lähinnä maasulkuvirran resistiivistä komponenttia. Kuvassa 19 on esitetty nolla-asteen kulmakarakteristika.



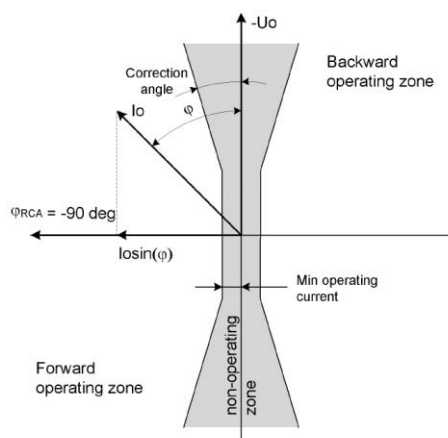
Kuva 19. Suunnatun maasulkusuojausfunktion (DEFxPDEF) kulmakarakteristika, kun peruskulma on nolla astetta. Karakteristika pätee kompensoidulle verkolle /2/.

Maasta erotetussa verkossa käytetään peruskulma-asettelua (RCA) -90 astetta, koska maasulkuvirta on kapasitiivista. Kuvassa 20 on esitetty -90 asteen kulmakarakteristika.

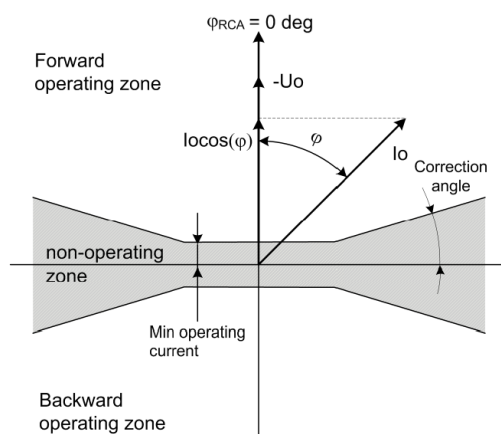


Kuva 20. Suunnatun maasulkusuojausfunktion (DEFxPDEF) kulmakarakteristika, kun peruskulma on -90 astetta. Karakteristika pätee maasta erotetulle verkolle /2/.

$I_0\sin/I_0\cos$ -menetelmä on yleinen suunnatun maasulkusuojausfunktion toimintatapa maasta erotetuissa ja kompensoiduissa verkoissa. $I_0\sin/I_0\cos$ -menetelmässä mitataan joko nollavirran reaktiivinen ($I_0\sin$) – tai resistiivinen ($I_0\cos$) virtakomponentti. Tässä menetelmässä kulmakarakteristikan asettelu riippuu verkon maadoitustavasta. $I_0\sin$ karakteristikkaa käytetään maasta erotetussa verkossa, $I_0\sin$ mittaa nollavirran reaktiivisen komponentin. $I_0\cos$ -karakteristikkaa käytetään kompensoidussa verkossa, $I_0\cos$ mittaa resistiivisen osan nollavirrasta. Kuvassa 21 on esitetty $I_0\sin$ -karakteristikka. Kuvassa 22 on esitty $I_0\cos$ -karakteristikka /2/.



Kuva 21. Suunnatun maasulkusuojausfunktion (DEFxPDEF) $I_0\sin$ -karakteristika /2/.



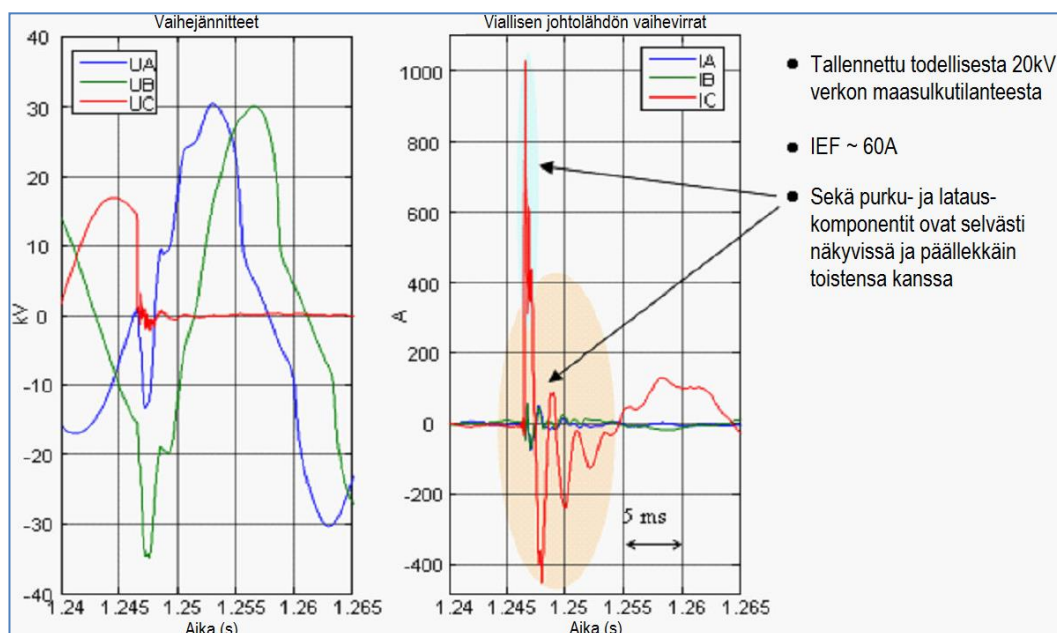
Kuva 22. Suunnatun maasulkusuojausfunktion (DEFxPDEF) $I_0\cos$ -karakteristika /2/.

4.3 Transientti/katkeilevan maasulkuvian suoja

Maasulku aiheuttaa vian syntyhetkellä transienttikomponentin virroissa ja jännitteissä. On olemassa useita tekijöitä, jotka vaikuttavat syntyvän transienttien suuruuteen ja taajuuteen, kuten jännitteen vaihekulma vikahetkellä, vian sijainti, vikavastuksen, johtolähdön ja syöttömuuntajien parametrit. Maasulun tapahtuessa, viallisen vaiheen jännite laskee ja vaiheen kapasitanssiin varautunut energia purkautuu maahan (purkaustransientti). Samanaikaisesti terveiden vaiheiden jännitteet kasvavat ja niihin liittyvät kapasitanssit latautuvat (lataustransientti) /2, 3/.

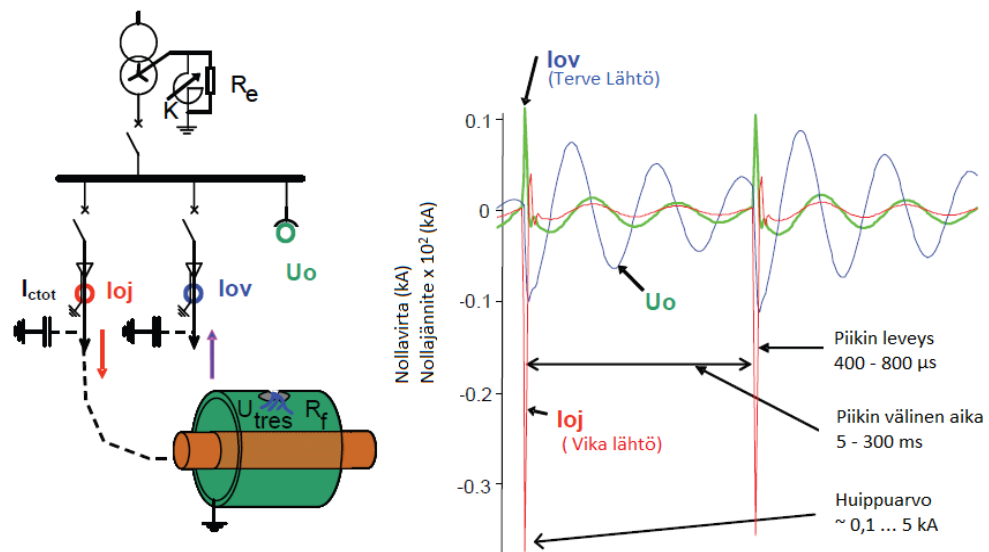
Vikapaikassa vallitseva vikavastus (R_f) vaimentaa voimakkaasti transienttikomponenttia. Tavallisesti selkeä vian alkutransientti liittyykin jäykkiin tai pieniohmisiin maasulkuvikoihin.

Kuvassa 23 on esitetty jännitteiden ja virtojen transientit todellisessa 20 kV verkon maasulkutilanteesta /2, 3/.



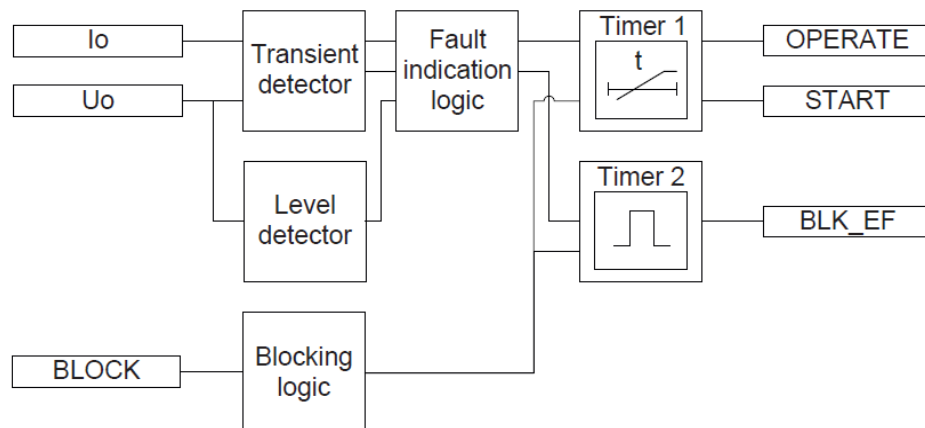
Kuva 23. Maasulun syntyhetkellä mitatut vaihejännitteiden ja vaihevirtojen käyrämuodot, joista nähdään vian syttymishetkellä syntyvä transientti-ilmiö /2/.

Katkeileva maasulku on maasulun erikoistapaus, joka tapahtuu erityisesti kompensoidussa maakaapeliverkossa. Tyypillinen syy katkeilevalla maasululla on kaapelin eristeen heikkeneminen joko mekaanisen rasituksen takia tai eristysmateriaalin ikääntyessä, kun vesi tai kosteus läpäisee kaapelin eristyksen. Tämä heikentää eristyksen jännitekestoisuutta, mikä johtaa sarjaan läpilyöntejä vioittuneessa kaapelissa. Katkeileva maasulku alkaa, kun viallisen vaiheen jännitteen suurus ylittää vikaantuneen eristyksen keston vikapaikassa. Yleensä maasulkuvirta sammuu itsensä kompensointikelan vaikutuksesta vikavirran nollakohdassa. Tämän jälkeen viallisen vaiheen jännite lähtee nousemaan, saavuttaen jälleen vikaantuneen eristyksen kestotaso, jolloin maasulkuvika alkaa toistua 5-300 ms välein. Tästä vian syntymekanismista johtuen, vialle on annettu nimi katkeileva maasulku. Kuvassa 24 on esitetty katkeilevan maasulun aikana mitattujen nollasuureiden ajalliset käyrämuodot. Nähdään, että vika muodostuu nopeista toisiaan seuraavista transienttipiikeistä /2, 3/.



Kuva 24. Katkeilevan maasulun aikana mitatut nollasuureiden (U_o , I_o) periaatteelliset käyrämuodot /2/.

Transientti- ja katkeilevien maasulkuvikojen suojauksessa käytetään INTRPTEF-maasulkusuojausfunktioita. Transientti/katkeileva maasulkusuojausfunktio on suunniteltu havaitsemaan ja erottamaan pysyvät transientti- ja katkeilevat maasulut jakeluverkossa. Suojaus perustuu nollajännitteen ja nollavirran mittaukseen. Suojauksen toiminnan periaatteellinen lohkokaavio on esitetty kuvassa 25.



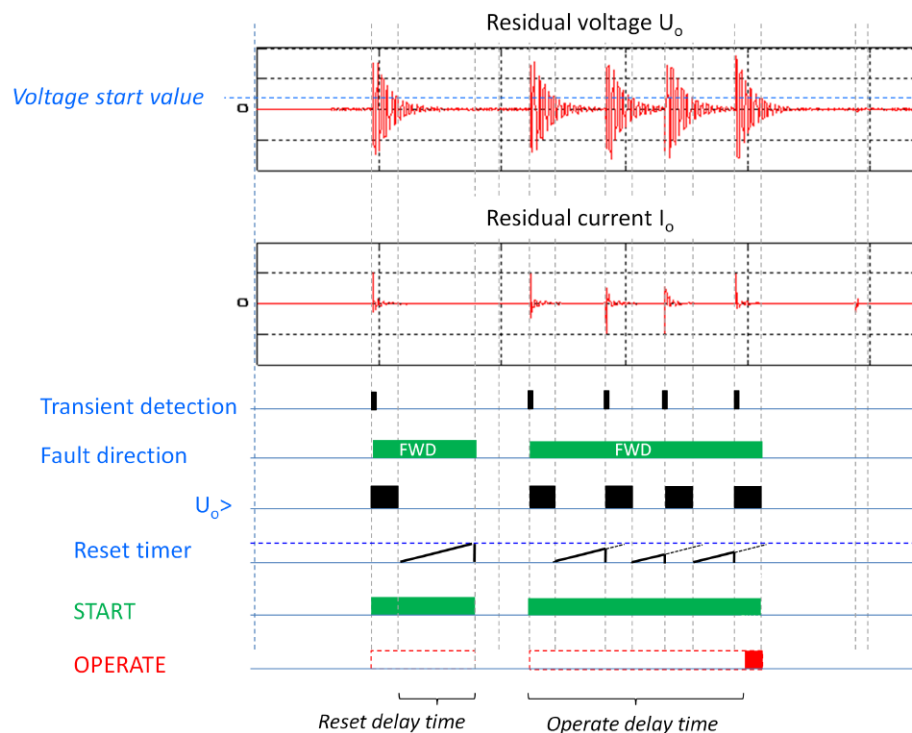
Kuva 25. Transientti/katkeilevan maasulkuvian suojausfunktion periaatteellinen lohkokaavio /2/.

Transientti/katkeilevan maasulkuvian suojausfunktio mittaa nollavirtaa ja nollajännitettä. Nollavirta on aina mitattu, mutta nollajännite voi olla joko mitattu tai las-kettu. "Level detector" seuraa nollajännitteen amplitudia ja vertaa sitä aseteltuun havahtumisarvoon. "Transient detector"-moduulin tarkoitus on havaita transientti-komponentit nollavirrassa ja nollajännitteessä. INTRPTEF-maasulkusuojausfunk-tiolla on kaksi toimintatilaa. "Transient EF"-toimintatilan tarkoituksena on havaita kaikenlaisia maasulkuja, joiden syntyyn liittyy vian alkutransientti. "Intermittent EF"-toimintatilan tarkoituksena on havaita katkeileva maasulku maakaapeliver-kossa. "Fault indication logic"-moduulin tarkoituksena on määrittää vian suunta, toiminta pohjautuu monitaajuusadmittanssimittaukseen ja erityiseen suodatintek-niikkaan /2/.

"Transient EF"-toimintatilassa ajastin (Timer 1) aktivoituu kun transientti on ha-vaittu ja nollajännitteen amplitudi ylittää U_o -havahtumisarvon. Ajastin (Timer 1) pysyy aktivoineena siihen asti, kun nollajännite on yli asetteluarvon ja sen jälkeen vielä asetellun sisäisen palautumisajan (Reset delay time) verran.

"Transient EF"-toimintatilassa OPERATE-lähtö aktivoituu laukaisujan (Operate delay time) jälkeen jos nollajännite ylittää laukaisuhetkellä U_o -havahtumisarvon. Sisäinen palautumisaika (Reset delay time) käynnistyy silloin kun nollajännite las-

kee alle U_o -havahtumisarvon. Laukaisun jälkeen START- ja OPERATE-lähtö palautuvat U_o :n poistuessa (alittaessa U_o -havahtumisarvon). Kuvassa 26 on esimerkki INTRPTEF:n toiminnosta ”Transient EF”-toimintatilassa /2/.



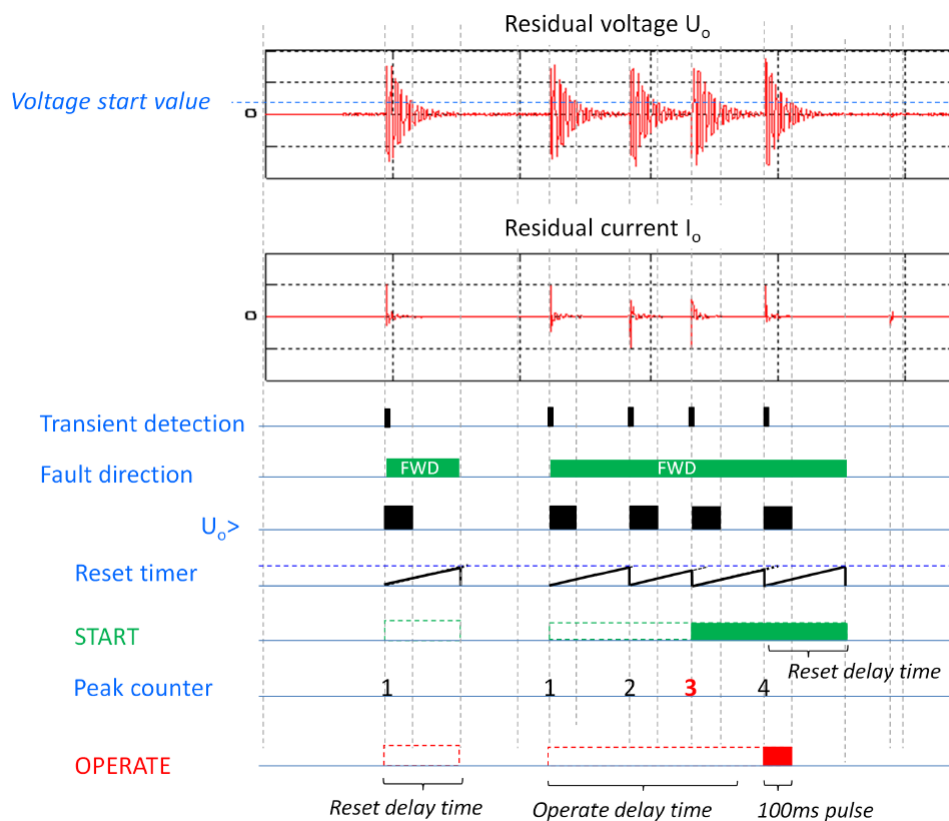
Kuva 26. Esimerkki INTRPTEF:n toimilohkon toiminnasta ”Transient EF”-toimintatilassa katkeilevan maasulun aikana /2/.

”Intermittent EF”-toimintatilassa ajastin (Timer 1) aktivoituu kun transientti on havaittu ja nollajännite ylittää U_o -havahtumisarvon. START-ulostulo aktivoituu vasta kun ”Peak counter” on havainnut tarvittavan määrän transientteja, ilman että funktio ehti palautumaan transienttien välillä (riippuu sisäisen palautumisajan asettelusta). Tällöin ajastin (Timer 1) pysyy aktivoineena niin kauan kuin transientteja esiintyy.

”Intermittent EF”-toimintatilassa OPERATE-lähtö aktivoituu kun:

- havaittujen transienttien määrä ylittää ”Peak counter”-asetetun rajan
- ajastin on saavuttanut laukaisuaajan asettelun
- palautumisjakson aikana havaitaan vielä yksi transientti.

Sisäinen palautumisaika käynnistyy jokaisesta havaitusta transienttipiikistä. Kun OPERATE-lähtö aktivoituu, laukaisusignaali on kiinteä 100 ms pulssi, kun taas START-lähtö palautuu sisäisen palautumisajan jälkeen. Kuvassa 27 esimerkki INTRPTEF:n toiminnosta "Intermittent EF"-toimintatilassa kun "Peak counter"-asettelu on 3 /2/.



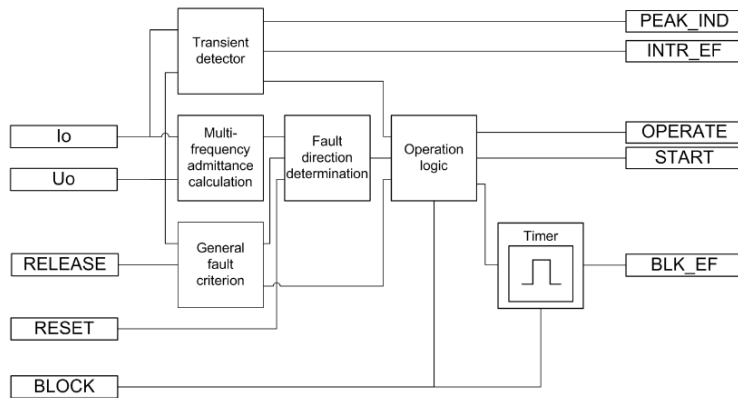
Kuva 27. Esimerkki INTRPTEF:n toiminnosta "Intermittent EF"-toimintatilassa katkeilevan maasulun aikana /2/.

4.4 Monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuoja

Monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuojausfunktio MFADPSDE on tarkoitettu selektiiviseen suunnattuun maasulkusuojaukseen kompensoiduille, maasta erotetuille ja suuren vastuksen kautta maadoitetuille verkoille. Nämä voivat olla joko avojohtoverkkoja tai maakaapeliverkkoja. MFADPSDE kykenee havaitsemaan ns. perusmaasulut, mutta se on suunniteltu olemaan erityisesti varmatoiminen transientti- ja katkeilevien maasulkuvikojen aikana. MFADPSDE-funktioita voidaan käyttää perinteisten DEFxPTOC- ja INTRPTEF-suojausfunktioiden tilalla. MFADPSDE-funktiossa on vian suunnan indikointi sekä suojausalueen että suojausalueen ulkopuolisille vioille. Sisäänrakennettu ”Transient detector” tunnistaa katkeilevat maasulut erottaen ne pysyvistä (”ei-katkeilevista”) maasuluista.

MFADPSDE-toiminta pohjautuu ABB:n patentoimaan monitaajuusadmittanssimittaukseen ja kumulatiiviseen admittanssiosoitimien summaustekniikkaan (CPS = Cumulative Phasor Summing). Tämä konsepti tarjoaa erittäin turvallisen, luotettavan ja selektiivisen maasulkusuojauksen myös silloin, kun nollasuureiden aaltomuodot ovat hyvin vääristyneitä ja sisältävät harmonisia komponentteja. Suojauksen tarkkuus on verrattavissa mm. IoCos/IoSin (DEFxPTOC), Watt/Varmetric (WPWDE) sekä admittanssisuojaukseen (EFPADM).

MFADPSDE-funktiossa on lukitustoiminnallisuus suojattavan lähdön ulkopuolisille vioille, jota voidaan käyttää lukitsemaan suojauskonfiguraatiossa muiden toimilohkojen ulostuloja, ajastimia tai lohkojen koko toimintaa. Lukituksella voidaan esimerkiksi pyrkiä estämään muiden toimilohkojen virheelliset toiminnot katkeilevan maasulun aikana. Suojauksen periaatteellinen toiminta lohkokaaaviona on esitetty kuvassa 28 /2/.



Kuva 28. MFADPSDE-maasulkusuojausfunktion periaatteellinen lohkokkaavio [2].

”General fault criterion”(GFC)-moduuli tunnistaa verkon maasulut seuraamalla nollajännitteen perustaajuisen komponent $\overline{U_0^1}$ amplitudia. Maasulku havaitaan, kun nollajännite ylittää jännitteen havahtumisarvon.

GFC-moduuli ilmoittaa ylityksestä ”Fault direction determination”- ja ”Operation logic”-moduulille.

”Multi-frequency admittance calculation”-moduuli laskee samanaikaisesti monitaajuusadmittanssioittimet käyttäen nollavirran ja nollajännitteen perustaajuisia komponenttia sekä 2., 3., 5., 7., ja 9. harmonista komponenttia. Admittanssin perustaajuinen osoitin saadaan lausekkeesta:

$$\overline{Y_0^1} = \frac{3 \cdot \overline{I_0^1}}{-\overline{U_0^1}} = G_0^1 + j \cdot B_0^1 \quad \text{missä,}$$

$$B_0^1 \quad \text{Perustaajuinen susceptanssi, } \text{Im} [\overline{Y_0^1}]$$

$$G_0^1 \quad \text{Perustaajuinen konduktanssi, } \text{Re} [\overline{Y_0^1}]$$

$$3 \cdot \overline{I_0^1} \quad \text{Nollavirran perustaajuinen osoitin } (= \frac{(\overline{I_A^1} + \overline{I_B^1} + \overline{I_C^1})}{1})$$

$$\overline{Y_0^1} \quad \text{Admittanssin perustaajuinen osoitin.} \quad (9)$$

Harmoninen susceptanssi:

$$Im \left[\overline{Y_0^n} \right] = Im \left[\frac{3 * \overline{I_0^n}}{-\overline{U_0^n}} \right] = j * B_0^n \quad \text{missä,}$$

B_0^n n. harmonisen susceptanssi

$\overline{I_0^n}$ Nollavirran n. harmoninen osoitin

n 2., 3., 5., 7., ja 9. harmoninen

$\overline{U_0^n}$ Nollajännitteen n. harmonisen osoitin

$\overline{Y_0^n}$ Admittanssin n. harmonisen osoitin. (10)

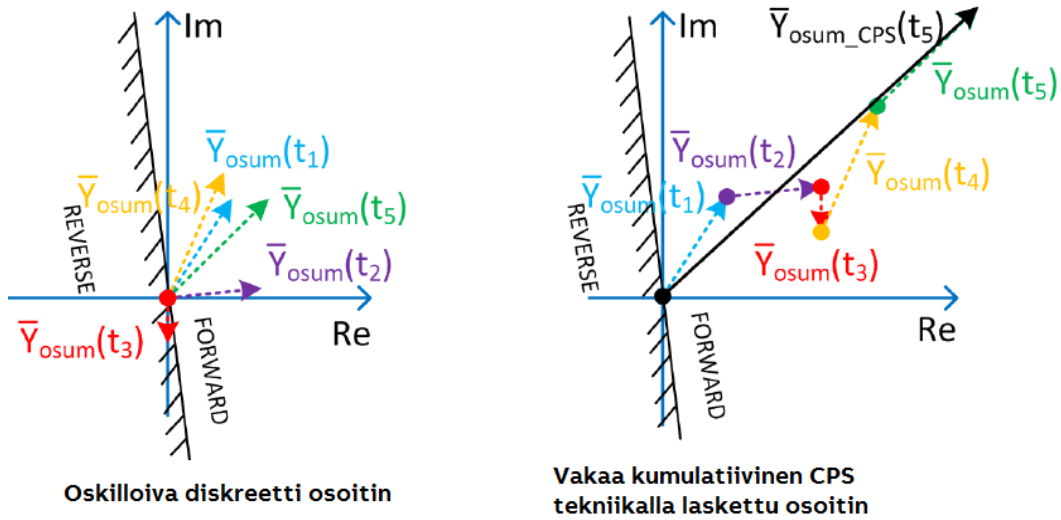
Kun GFC-moduuli on havainnut maasulun, niin vikasuunnan määrittäminen perustuu ”Multi-frequency admittance calculation”-moduulissa laskettuun summa-admittanssiosoitimeen, missä perustaajuinen admittanssiosoitin ja harmoniset susceptanssit summataan vektorimuodossa.

$$\overline{Y}_{osum} = Re \left[\overline{Y_0^1} \right] + j * Im \left[\overline{Y_0^1} + \sum_{n=2}^9 \overline{Y_0^n} \right] = G_0^1 + j * B_{osum} \quad (11)$$

Vikasuunnan laskennassa on käytetty erityistä algoritmisuodatinta ja kumulatiivisesta osoitinsummaustekniikkaa (CPS). Tätä menetelmää hyödynnetään transienttien ja katkeilevien maasulkujen aikana, lisäksi se on pätevä myös ns. perusmaasuille.

CPS-laskennassa summa-admittanssiosoitimet kumuloidaan ajallisesti yhteen kronologisessa järjestyksessä vian aikana. CPS:n konsepti on esitetty kuvassa 29. CPS-laskelma saadaan lausekkeesta /2/:

$$\overline{Y}_{osum_CPS} = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} Re \left[\overline{Y}_{osum}(i) \right] + j * \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} Im \left[\overline{Y}_{osum}(i) \right] \quad (12)$$



Kuva 29. Periaatteellinen kuva kumulatiivisesta osoitinsummaustekniikasta (CPS). Vasemmalla ajallisesti oskilloiva diskreetti osoitin ja oikealla stabiili kumulatiivisen summaosoitintekniikan (CPS) kautta saatava suuntaosoitin /2/.

Nollajännitteen havahtumiskriteeri määrittää monitaajuusadmittanssisuojauksen perusherkkyyden. CPS-laskennan etuna on perustaajuisen komponentin DFT-osoittimen erityinen suodatus, joka mahdollistaa erittäin luotettavan ja turvallisen vikasuunnan määrittämisen vikatyypistä riippumatta, myös katkeilevan maasulkuvian aikana.

Maasulun suunnan määrittystä valvotaan lisäksi aseteltavaan nollavirran amplitudiin perustuvalla moduulilla. Tästä moduulista saadaan erittäin vakavoitu nollavirran estimaatti riippumatta vikatyypistä tai vikavastuksen suuruudesta. Vakavoitu nollavirran estimaatti ($\bar{I}_{0\text{stab}}^1$) saadaan laskettua käyttäen vakavoitua perustaajuisen admittanssin estimaattia ($\bar{Y}_{0\text{stab}}^1$), joka saadaan skaalattua virraksi kertomalla se verkon nimellisellä vaihejännitteellä (U_{PE}). Vakavoitu perustaajuisen admittanssiestimaatti saadaan laskettua hyödyntäen kumulatiivista summaosoitintekniikkaa (CPS) admittanssilaskennassa /22/:

$$\bar{Y}_{0\text{stab}}^1 = \frac{3 \cdot \bar{I}_{0\text{stab}}^1}{-\bar{U}_{0\text{CPS}}^1} = \text{Re}[\bar{Y}_{0\text{stab}}^1] + j * \text{Im}[\bar{Y}_{0\text{stab}}^1] = G_{0\text{stab}}^1 + j * B_{0\text{stab}}^1$$

$B_{0\text{stab}}^1$ Perustaajuisen konduktanssiestimaatin reaali osa

$G_{0\text{stab}}^1$ Perustaajuisen suskeptanssiestimaatin imaginaariosa

$\bar{I}_{0\text{CPS}}^1$ Perustaajuisen nollavirran osoitin, mikä saadaan laskettua hyödyntäen kumulatiivista summaositintekniikkaa (CPS)

$\bar{U}_{0\text{CPS}}^1$ Perustaajuisen nollajännitteen osoitin, mikä saadaan laskettua hyödyntäen kumulatiivista summaositintekniikkaa (CPS) (13)

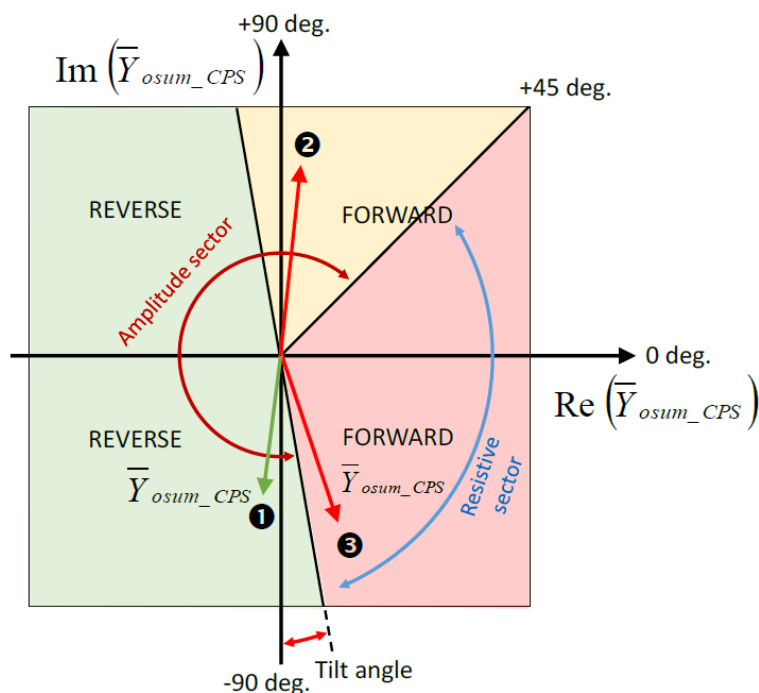
Vakavoitu nollavirran estimaatti saadaan lausekkeesta:

$$\bar{I}_{0\text{stab}}^1 = (G_{0\text{stab}}^1 + j * B_{0\text{stab}}^1) * U_{PE} = I_{0\text{Cosstab}}^1 + j * I_{0\text{Sinstab}}^1$$

$I_{0\text{Cosstab}}^1$ vakavoitu perustaajuisen nollavirran estimaatin reaaliiosa

$I_{0\text{Sinstab}}^1$ vakavoitu perustaajuisen nollavirran estimaatin imaginaariosa. (14)

MFADPSDE-toimilohko voidaan asetella toimimaan joko myötäsuuntaan (forward) tai vastasuuntaan (reverse). Suojauksen laukaisukarakteristika on määritetty säädättävällä laukaisusektorirajalla (**Kuva 30.**), mikä pätee sekä maasta erotetuille ja kompensoidulle verkoille. Tämän ”laajakulmaisen” karakteristikan etuna on, että kompensoidun verkon suojaus toimii oikein myös silloin, kun kompensointikuristin on väliaikaisesti pois päältä. Laukaisusektoriraja asetellaan ”tilt angle”-asetelulla, jolla voidaan huomioida mittausketjun virheet, erityisesti mittamuuntajien mittausvirheet. Tyypillinen asetteluarvo on 5 astetta, mutta arvo tulee aina asetella todellisten mittausvirheiden mukaan /2/.



Kuva 30. MFADPSDE-toimilohkolle pätevä suuntakarakteristika /22/.

- Osoitin 1 kuvaa summa-admittanssiosoitimen suuntaa, kun maasulku tapahtuu suojettavan lähdön ulkopuolella (eli vastakkaisessa suunnassa).
- Osoitin 2 kuvaa summa-admittanssiosoitimen suuntaa, kun maasulku tapahtuu lähdöllä (eli myötäsuunnassa) vikatyypistä riippumatta, kun on kyseessä maasta erotettu verkko. Tulos pätee myös kompensoidussa verkossa, silloin kun harmonisia esiintyy vikasuureissa. Tässä sektorissa maasulun suunnan määrittystä valvova virtaeho perustuu nollavirran stabiloituun amplitudiestimaattiin itseisarvo(Iostab).
- Osoitin 3 kuvaa summa-admittanssiosoitimen suuntaa, kun kompensoidun verkon lähdössä tapahtuu resistiivinen maasulku ilman harmonisia yliaaltoja. Tässä sektorissa maasulun suunnan määrittystä valvova virtaeho perustuu nollavirran stabiloituun resistiivisen komponentin estimaattiin itseisarvo(Iocosstab) /22/.

Edellä kuvattu monitaajuusadmittanssifunktion itsestään mukautuva ominaisuus (toimintasektori, virtaraja) mahdollistaa toiminnan myös, kun kompensointikela ir-

rotetaan (erotetussa verkossa). Toiminta on mahdollista myös kompensoidussa verkossa, jopa ilman rinnakkaisvastusta, jos vikasuureissa on runsaasti harmonisia /22/.

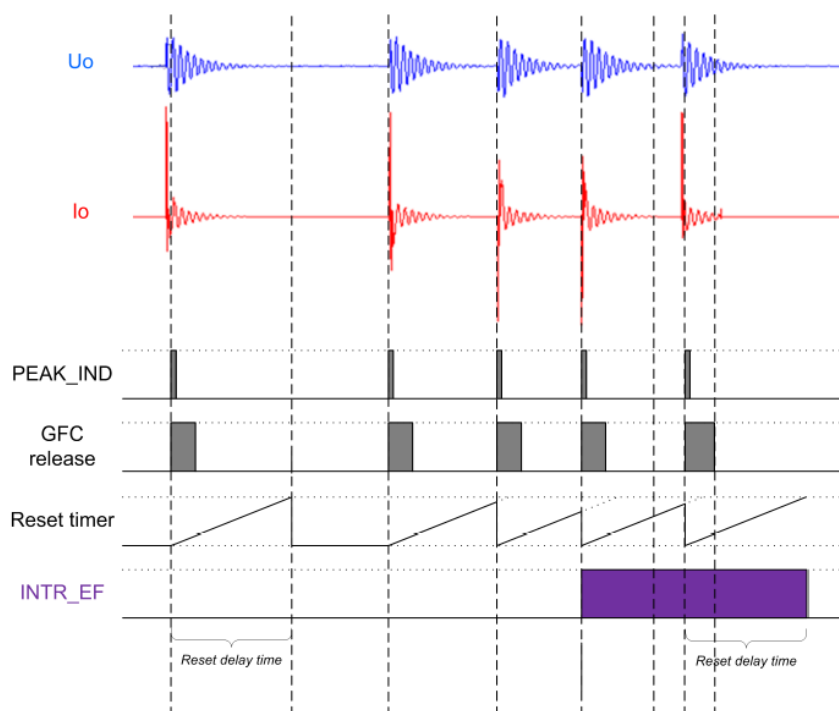
”Transient detector”-moduulin tarkoitus on havaita transienttikomponentit nollavirrassa ja nollajännitteessä. Aina kun transientti on havaittu, ”Transient detector”-moduulia indikoi sen PEAK_IND-ulostulossa.

INTR_EF-ulostulo aktivoituu, kun ”Peak counter” on havainnut asetellun määrän transientteja, ilman että funktio ehtii palautumaan transienttien välillä (riippuu sisäinen palautumisajan asettelusta). Tämä osoittaa katkeilevan maasulun esiintymisen verkossa. Tulee huomioida, että INTR_EF-ulostulo on suuntaamaton, ts. se aktivoituu katkeilevan maasulun aikana sekä viallisessa että terveessä lähdössä, jos funktio näkee transientteja /2/.

MFADPSDE-maasulkusuojausfunktioilla on kolme toimintatilaa (”General EF”, ”Alarming EF” ja ”Intermittent EF”).

”Transient detector”-moduuli vaikuttaa MFADPSDE:n toimintaan ainoastaan (START- ja OPERATE-lähdöt) ”Intermittent EF”-toimintatilassa. Muissa toimintatiloissa (”General EF”, ”Alarming EF”) PEAK_IND- ja INTR_ER-ulostuloja voidaan käyttää esimerkiksi valvontatarkoituksiin.

MFADPSDE:n toimilohkon periaatteellinen toiminta ”Transient detector”-toimintamoodissa on esitetty kuvassa 31 /2/.



Kuva 31. Esimerkki MFADPSDE:n toimilohkon toiminnasta ”Transient detector”-toimintamoodissa. PEAK_IND-ulostulo indikoi havaitut transientit ja INTR_ER-ulostulo tunnistaa katkeilevan maasulun (”Peak counter” asettelu on 3) asetellun piikkilukumäärän jälkeen /2/.

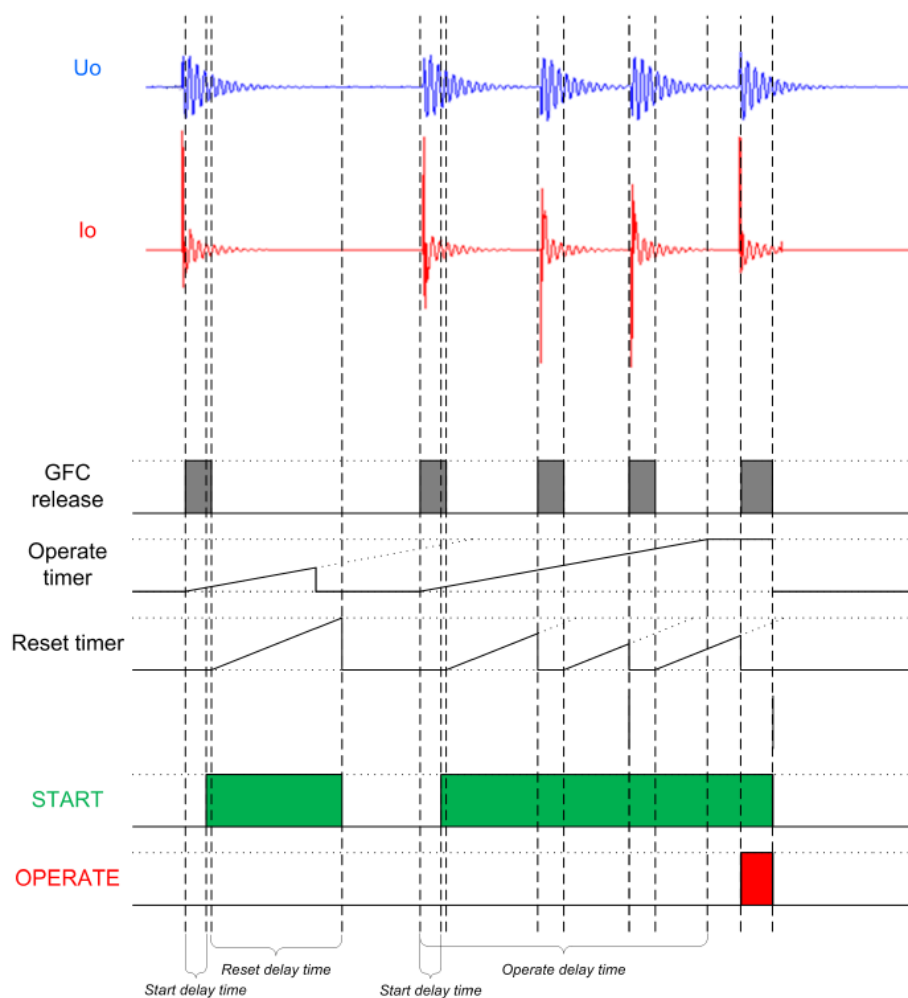
”General EF”-toimintatila soveltuu havaitsemaan kaiken tyyppisiä maasulkuja sekä maasta erotetussa että kompensoidussa verkossa. Nollajännitteen havahtumisarvo määrittää MFADPSDE-funktion perusherkkyyden. ”General EF”-toimintatilassa laukaisuaajan käynnistyy seuraavien ehtojen täyttyessä:

- Maasulku on havaittu ”General fault criterion”(GFC)-moduulilla.
- Vian suunta vastaa ” Directional mode”-asettelua.
- Vakavoitu perustaajuisen nollavirran (itseisarvo(Iostab), Iocosstab) estimaatti ylittää ” Min operate current”-asettelun.

START-ulostulo aktivoituu havahtumisajan kuluttua. OPERATE-ulostulo aktivoituu, kun laukaisuaika on kulunut loppuun ja edellä mainitut ehdot ovat yhä voimassa. Jos vika on ohimenevä ja sammuu itsestään, START-lähtö pysyy aktivoituneena, kunnes palautumisaika on kulunut loppuun.

Laukaisun jälkeen START- ja OPERATE-lähtö palautuvat välittömästi, kun U_o laskee alle asetellun havahtumisarvon.

MFADPSDE:n toimilohkon periaatteellinen toiminta ”General EF”-toimintamoodissa on esitetty kuvassa 32 /2/.

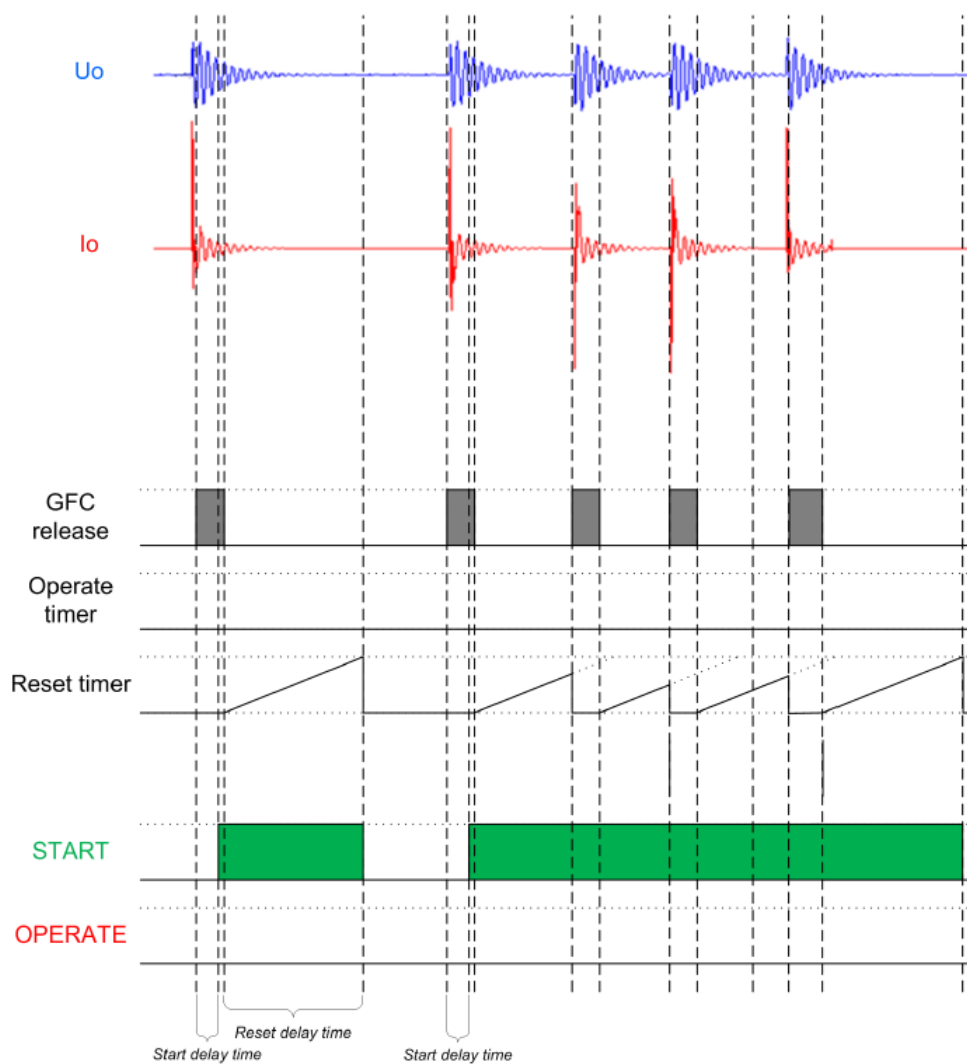


Kuva 32. Esimerkki MFADPSDE:n toiminnosta ”General EF”-toimintatilassa /2/.

“Alarming EF”-toimintatila on kuten ”General EF”, paitsi että toiminta on vain hälyttävä, ts. OPERATE-ulostuloa ei aktivoida ollenkaan. START-ulostulo aktivoituu, kun havahtumisaika on kulunut loppuun. Palautumisaika käynnistyy, kun joku

edellä mainittu ehto ei ole voimassa. Jos vika on ohimenevä ja sammuu itsestään, START-lähtö pysyy aktivoituneena, kunnes Uo-laskee alle asetellun havahtumisarvon ja palautumisaika on kulunut loppuun.

MFADPSDE:n toimilohkon periaatteellinen toiminta ”AlarmingEF”-toimintamoodissa on esitetty kuvassa 33 /2/.



Kuva 33. Esimerkki MFADPSDE:n toiminnosta "Alarming EF"-toimintatilassa /2/.

Tärkein ero ”General EF”- ja ”Alarming EF”-tilojen välillä on se, että ”Alarming EF”-tilassa laukaisua ei anneta, eikä siksi tapahdu laukaisun jälkeistä välitöntä palautumista. ”Alarming EF”-toimintamoodia suositellaan käytettäväksi, kun verkossa olevaa yksivaiheista maasulkua ei haluta laukaista, vaan ainoastaan saada hälytys siitä.

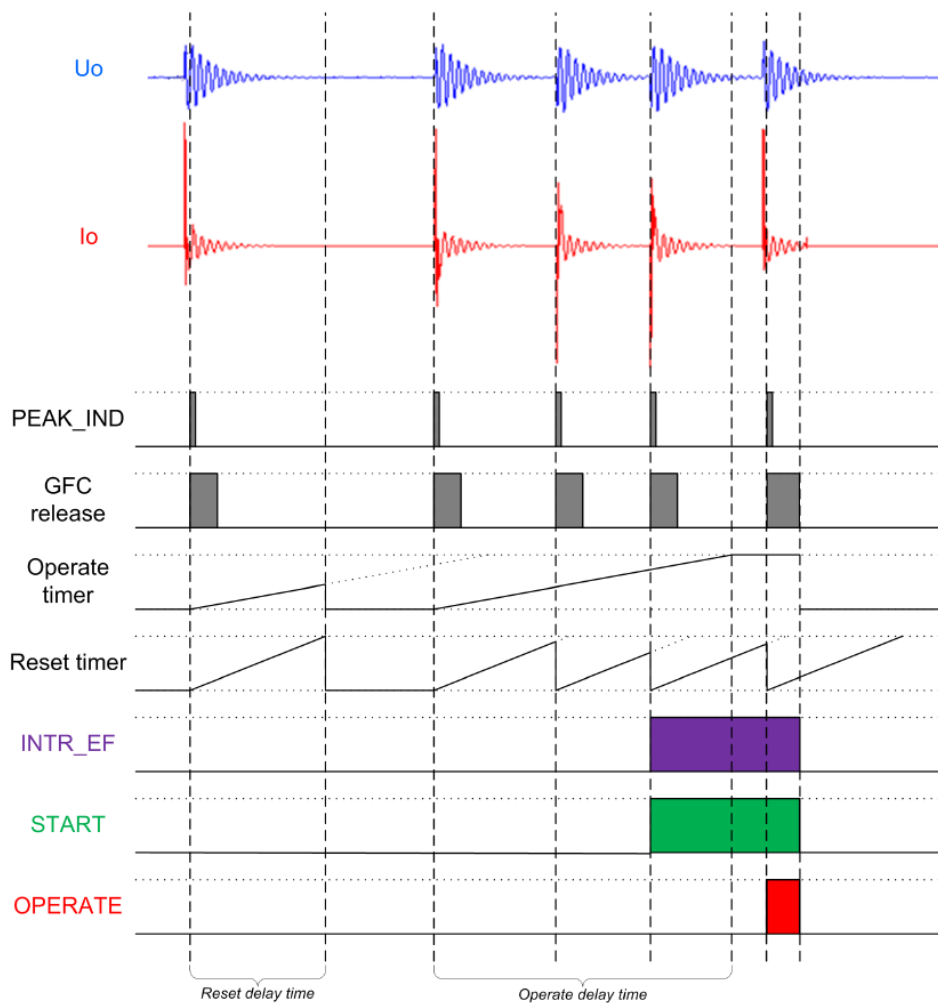
MFADPSDE:n ”Intermittent EF”-toimintatila on suunniteltu erityisesti havaitsemaan katkeilevat maasulut. ”Intermittent EF”-toimintatilassa funktio laukaisee vasta kun ”Peak counter” on havainnut asetellun määrän transientteja toimintasuuntaan. Siitä syystä ”Intermittent EF”-toimintatila ei pysty havaitsemaan ns. pysyviä maasulkuja, koska toiminta edellyttää useiden (>2) vikatransienttien tunnistamisen vian aikana. ”Intermittent EF”-toimintatilan käyttö rajoitettu käytännössä pienohjaisiin katkeileviin maasulkuihin, koska vikavastus vaimentaa tehokkaasti suurempitaajuuksisia virta- ja jännitekomponentteja. ”Intermittent EF”-toimintatilassa ajastin käynnistyy, kun seuraavat ehdot täyttyvät:

- Riittävä määrä transientteja on havaittu ”Transient detector”-moduulilla.
- Maasulku on havaittu ”General fault criterion”(GFC)-moduulilla transientin aikana.
- Vian suunta vastaa ” Directional mode” asettelua.
- Vakavoitu perustaajuuden nollavirran estimaatti ylittää ” Min operate current” asettelun /2/.

START-ulostulo aktivoituu vasta kun Transient detector-moduuli on havainnut tarvittavan määrän, (Peak counter), transientteja ilman, että funktio ehti palautumaan transienttien välillä (riippuu sisäisen palautumisajan asettelusta). Samalla INTR_EF-ulostulo aktivoituu, josta voidaan tunnistaa katkeilevat maasulut erottaen ne muista maasuluista. Ajastin pysyy aktivoineena niin kauan kuin transientteja esiintyy (riippuu sisäisen palautumisajan asettelusta).

OPERATE-lähtö aktivoituu, kun laukaisuaika on kulunut loppuun ja edellä mainitut ehdot ovat voimassa. Palautumisaika alkaa aina alusta, kun havaitaan transientti. Funktio palautuu, jos piikkienvälinen aika on enemmän kuin palautumisaika

tai GFC-moduuli palautuu. Laukaisun jälkeen START- ja OPERATE-lähdöt palautuvat välittömästi, kun GFC-moduuli näkee, että vika on poistunut. ”Intermittent EF”-toimintatilan periaatteellinen toiminta katkeilevan vian aikana on esitetty kuvassa 34 /2/.

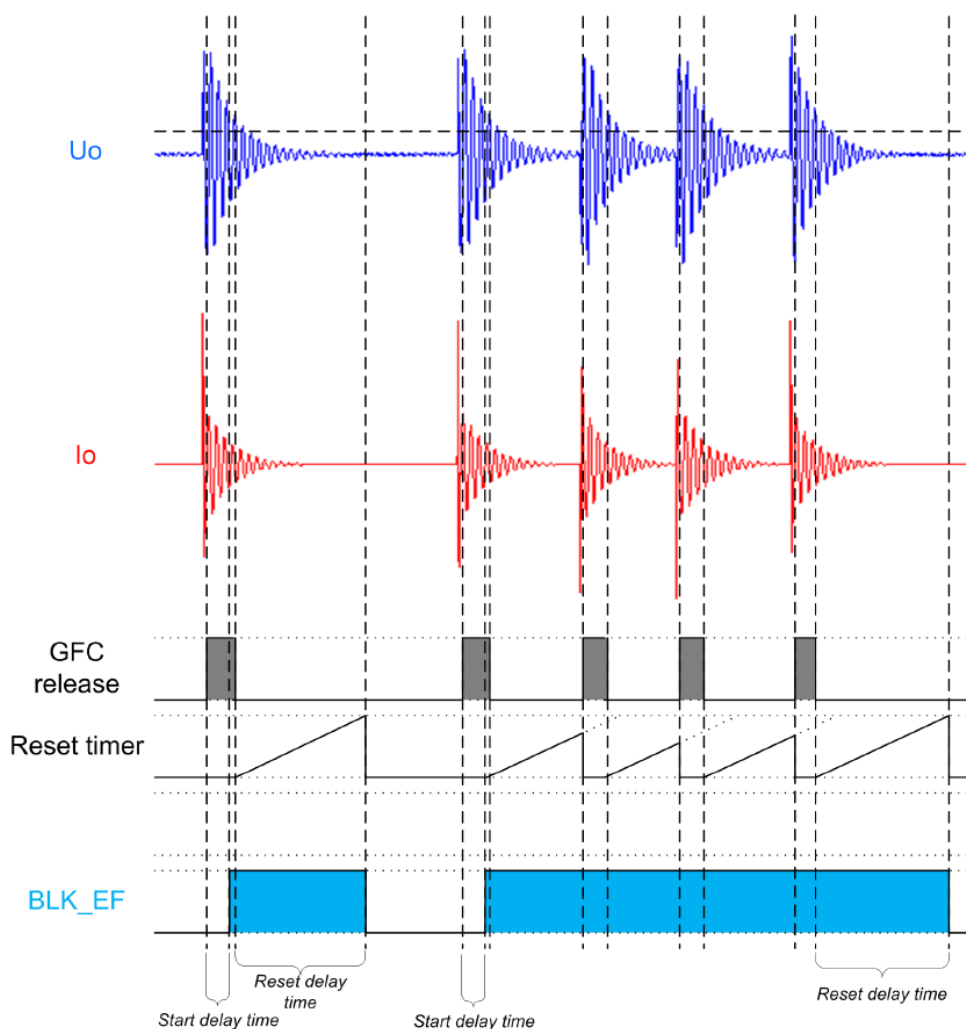


Kuva 34. Esimerkki MFADPSDE:n toiminnasta ”Intermittent EF”-toimintatilassa (”Peak counter” asettelu on 3). PEAK_IND-ulostulo indikoi havaitut transientit ja INTR_ER-ulostulo tunnistaa katkeilevan maasulun asetellun piikkilukumäärän jälkeen /2/.

MFADPSE-toimilohko voidaan lukita käyttäen lohkon lukitussisäänmenoja.: ”Freeze timers”, ”Block all” ja ”Block OPERATE output”. ”Freeze timers”-sisäänmenon aktivointi pysäyttää laukaisuaajastimen siihen arvoon, mihin on päästy ja kun

lukitus poistuu aika jatkaa tästä eteenpäin. "Block all"-sisäänmenon aktivointi lukitsee koko funktion ja nollaa ajastimen. "Block OPERATE"-sisäänmenon aktivointi estää OPERATE-ulostulon aktivoinnin, muuten funktio toimii normaalisti /2/.

MFADPSDE-toimilohkon BLK_EF-ulostulo aktivoituu, kun havahtumisaika on kulunut loppuun (GFC-moduuli havaitsee vian) ja vika nähdään vastakkaisessa suunnassa kuin mikä on suojan aseteltu toimintasuunta. BLK_EF-lähtö nollautuu, kun palautumisaika on kulunut loppuun. BLK_EF-ulostulon periaatteellinen toiminta katkeilevan maasulun aikana on esitetty kuvassa 35.



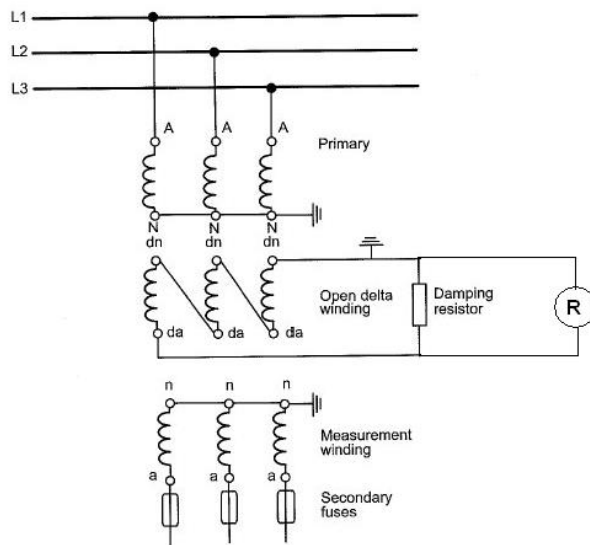
Kuva 35. MFADPSDE-toimilohkon BLK_EF-ulostulon toiminta katkeilevan maasulun aikana /2/.

5 MITTAMUUNTAJAT

Mittamuuntajat ovat jännitteen tai virran mittaukseen tarkoitettuja erikoismuuntajia, joiden pääsiallisena tehtävä on muuntaa päävirtapiirin suureet mitta-alaa pienemmäksi (joissain tapauksessa suuremmaksi), jolloin mitta- ja suojalaitteiden standardointi on mahdollista. Lisäksi mittamuuntajilla saadaan erotettua mittaussiiri päävirtapiiristä ja suojattua mittaussiiri ylikuormituksilta. Mittamuuntajat mahdollistavat myös mittalaitteiden sijoittamisen etäälle mittapiiristä /18/.

5.1 Jännitemuuntajat

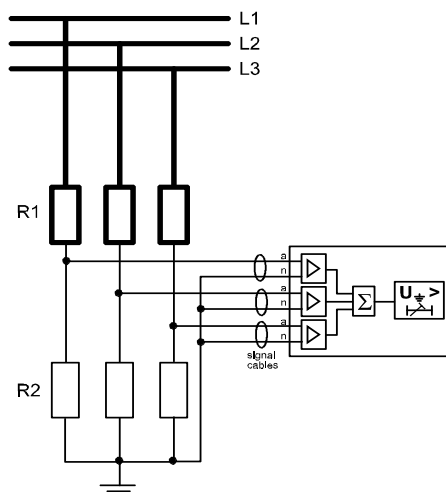
Maasulun tapahtuessa verkon tähtipisteen ja maan välinen jännite, ns. nollajännite U_0 , saadaan mitattua verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn yksivaihemuuntajan toisiokäämistä tai kolmen vaiheen- ja maan välille kytketyn jännitemuuntajien tertiäräkäämien muodostamasta ns. avokolmiokäämityksestä. Avokolmiojännite syntyy vaiheiden ja maan välisten jännitteiden vektorisummasta. Esimerkki jännitemuuntajan avokolmiokäämityksestä on esitetty kuvassa 36. Kuvasta nähdään, että jokaisessa vaiheessa on yleensä erillinen jännitemuuntaja, jossa on yksi ensiö ja kaksi toisiokäämiä. Jotta jännitemittaus toimisi oikein, on tärkeä, että jännitemuuntajien ensiön tähtipiste on maadoitettu. Avokolmiokäämiin on tavallisesti kytketty ferresonarssin vaimennusvastus (Damping resistor). Jännitemuuntajan käämien tyypillinen muuntosuhde 20kV verkossa on $\frac{200kV}{\sqrt{3}} : \frac{100V}{\sqrt{3}} : \frac{100V}{3}$. Tällöin suorassa maasulussa rele näkee 100V suuruisen jännitteen avokolmiokäämissä /11/.



Kuva 36. Nollajännitteen mittaus jännitemuuntajien muodostamasta avokolmiokäämityksestä /11/.

Nollajännite voidaan mitata myös jännitesensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla (**Kuva 37.**). Tällöin rele muodostaa laskennallisen nollajännitteen. (ABB, 2000)

$$\overline{U}_0^1 = (\overline{U}_A^1 + \overline{U}_B^1 + \overline{U}_C^1)/3 \quad (15)$$



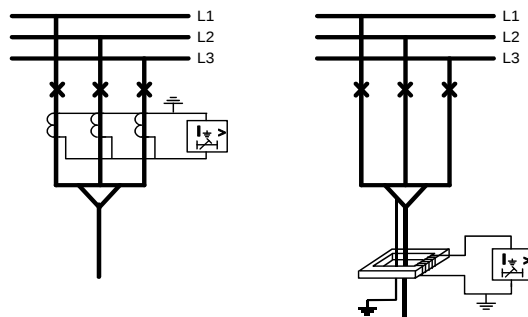
Kuva 37. Nollajännitteen muodostaminen laskennallisesti jännitesensoreilla /8/.

5.2 Virtamuuntajat

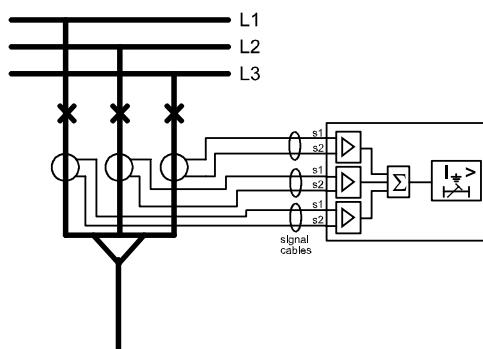
Maasulkusuojauksessa suojareleen toiminta pohjautuu useimmiten tarkkaan nollavirran mittaukseen. Nollavirran mittaukselle on käytännössä kolme eri mittaustapaa:

- vaihevirtojen summa (ns. Holmgren-kytkentä)
- kaapelivirtamuuntaja tai
- laskennallinen vaihevirtojen vektorisumma (vaihevirtojen mittaus joko virtamuuntajilla tai Rogowski-virtasensoreilla).

Kuvissa 38 ja 39 on esitetty nollavirran vaihtoehtoiset mittauskytkentätavat.



Kuva 38. Nollavirran mittaus Holmgren-kytkennällä ja kaapelivirtamuuntajalla /8/.



Kuva 39. Nollavirran mittaus hyödyntäen Rogowski-virtasensoreita /8/

6 RELEKOESTUS

Sähkölaitteita ja -laitteistoja koskevat yleiset vaatimukset on esitetty sähköturvallisuukslaissa seuraavasti:

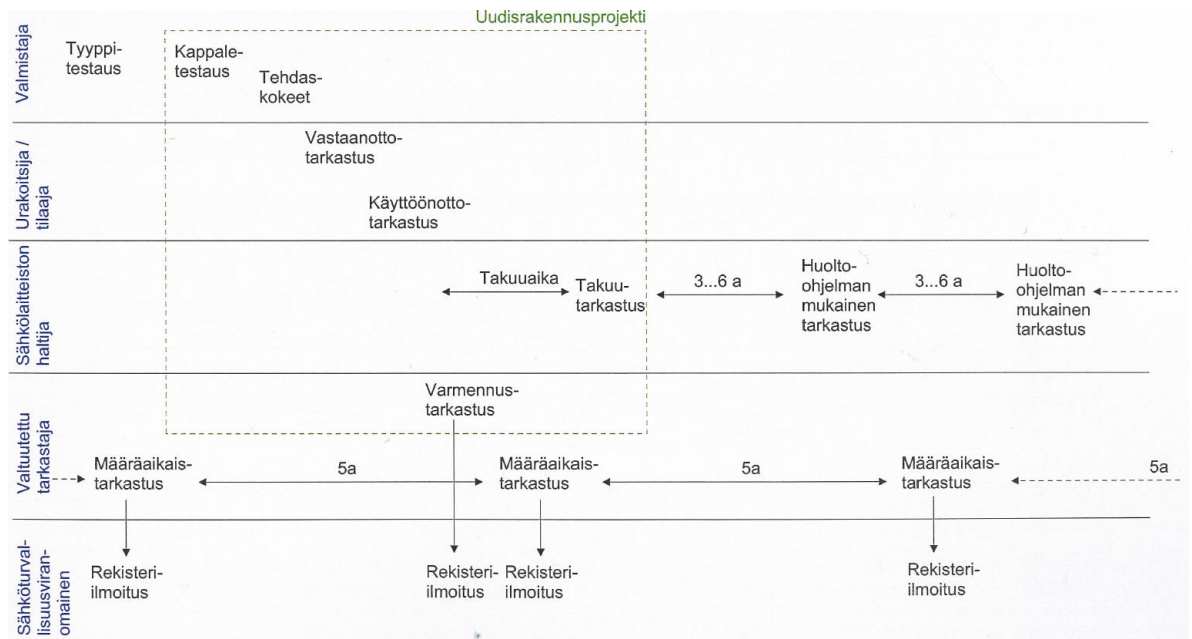
”Sähkölaitteet ja -laitteistot on suunniteltava, rakennettava, valmistettava ja korjattava niin sekä niitä on huollettava ja käytettävä käyttötarkoituksensa mukaisesti niin, että

- 1) niistä ei aiheudu kenenkään hengelle, terveydelle tai omaisuudelle vaaraa;
- 2) niistä ei sähköisesti tai sähkömagneettisesti aiheudu kohtuutonta häiriötä;
- 3) niiden toiminta ei häiriinny helposti sähköisesti tai sähkömagneettisesti. Jos sähkölaite tai -laitteisto ei täytä 1 momentissa säädettyjä edellytyksiä, sitä ei saa saattaa markkinoille, luovuttaa toiselle eikä ottaa käyttöön.” /21/.

Edellä mainitun toteutumiseksi, sähkölaitteistolla on oltava huolto- ja kunnossapito-ohjelma, mikä on esitetty sähköturvallisuukslaissa seuraavasti:

” Sähkölaitteiston haltijan on huolehdittava siitä, että luokien 2 ja 3 sähkölaitteistoille laaditaan sähköturvallisuuden ylläpitävä kunnossapito-ohjelma. Sähkölaitteiston haltija vastaa siitä, että kunnossapito-ohjelmaa noudatetaan. Kunnossapito-ohjelmaa laadittaessa tulee ottaa huomioon sähkölaitteiston käyttöympäristöstä aiheutuvat tarpeet. Muiden sähkölaitteistojen osalta ohjelma voidaan korvata laitteiden ja laitteistojen käyttö- ja huolto-ohjeilla.” /21/.

Relesuojausten tarkastaminen on osa huolto ja kunnossapito-ohjelmaan, kuvassa 40 nähdään mitä erilaisia tarkastuksia tehdään releelle sähköturvallisuukslain mukaisesti.



Kuva 40. Relesuojausten tarkastukset /5/.

Kuvassa 39 määräaikaistarkastus on viiden vuoden välein. Itse relekoestus kuuluu huolto ja kunnossapito-ohjelmaan, joka on 3-6 vuoden välein /5/.

6.1 Käyttöönottokeistus

Suomen sähköturvallisuuslaissa vaaditaan seuraavasti:

”Sähkölaitteisto saadaan ottaa käyttöön vasta, kun käyttöönotto-tarkastuksessa on riittävässä laajuudessa selvitetty, että siitä ei aiheudu 6 §:ssä tarkoitettua vaaraa tai häiriötä. Käyttöönotto-tarkastus on tehtävä myös sähkölaitteiston muutos- ja laajennustöille. Sähkölaitteiston rakentajan tulee huolehtia sähkölaitteiston käyttöönotto-tarkastuksesta. Jos rakentaja laiminlyö velvollisuutensa tai on estynyt huolehtimaan niistä, tulee sähkölaitteiston haltijan huolehtia tarkastuksesta. Sähkölaitteiston rakentajan tulee laatia käyttöönotto-tarkastuksesta sähkölaitteiston haltijan käyttöön tarkastuspöytäkirja vähäisiksi katsottavia töitä lukuun ottamatta.” /21/.

6.2 Määräaikaiskoestus

Suojarelekoestuksen perustarkoitus on löytää suojausjärjestelmästä laitteet, joiden toiminta ei vastaa niille asetettuja vaatimuksia tai ne ovat vioittuneet, jolloin suojaus on täysin toimimaton.

Suojareleistyksen koestamisen tarpeesta kertovat

- kasvaneet virhetoiminnot
- hidastunut tai epätarkka toiminta, joista seurauksena epäselektiivinen suojaus
- tarpeeton toiminta tai jopa suojauksen toimimattomuus vikatilanteessa.
- epäily suojauksen toimivuudesta
- tehdyt muutokset/uusinnat suojausjärjestelmässä, jolloin voidaan varmistaa suojauksen toiminta muutoksen jälkeen /5/.

6.3 Suojareleiden eri koestustavat

Suojareleiden koestustavat voidaan luokitella seuraavasti:

- keinovikakoestus
- ensiökoestus
- toisiokoestus
- toisiorelekoestus
- toimintojen raportointi.

6.3.1 Keinovikakoestus

Keinovikakoestuksessa tehdään primääriverkkoon keinotekoinen vika. Tämän koestustavan etuna on, että se kattaa seuraavat asiat:

- Suojauksen oikea sekä selektiivinen toiminta vikatilanteessa.

- Muiden suojausketjuun kuuluvien laitteiden sekä järjestelmien oikea keskinäinen toiminta vikatilanteessa.
- Mittamuuntajien ja niiden toisiopiirien kunnon tarkistus ja liitoksien kunto
- laukaisu ja hälytyspiirien toiminnan varmistus ja liitoksien kunnon tarkistus.
- Katkaisijan sähköisen sekä mekaaninen kunnon toteaminen ja tarkistus /5/.

Keinovikakoestuksen haittoja ja puutteita:

- Vaatii lähes aina jännitekatkoksen tai erikoisjärjestelyjä.
- Henkilövahinkojen uhka (vika tehdään primääripiiriin).
- Mahdolliset vauriot verkossa tai sen laitteissa koetilanteessa.
- Suojauksen mahdollisesta virhetoiminnoista aiheutuneet häiriöt muussa verkon osassa.
- Koska toimintatesti, vaatii lähes poikkeuksetta lisäkoestuksen tarkempien toiminta-arvojen saamiseksi.
- Soveltuu jakeluverkossa lähinnä vain maasulkusuojausten testaamiseen /12/.

6.3.2 Ensiökoestus

Ensiökoestuksessa käytettävät signaalit syötetään ensiöpiiriin siltä osin kuin se on mahdollista. Esimerkiksi ylivirtarelettä koestettaessa virta syötetään virtamuuntajan ensiöön, käytännössä jännite joudutaan syöttämään toisioon.

Ensiökoestustavan etuja ovat:

- Suojauksen oikea sekä selektiivinen toiminta vikatilanteessa (ylivirtasuojaus).
- Muiden suojausketjuun kuuluvien laitteiden sekä järjestelmien oikea keskinäinen toiminta vikatilanteessa.

- Mittamuuntajien ja niiden toisiopiirien kunnon tarkistus, liitoksien kunto.
- Laukaisu- ja hälytyspiirien toiminnan varmistus, liitoksien kunnon tarkistus
- Katkaisijan sähköisen sekä mekaaninen kunnon toteaminen ja tarkistus /5/.

Ensiökoestuksen haittoja ja puutteita:

- Vaatii aina jännitekatkoksen.
- Henkilövahinkojen uhka (työmaadoitukset, ohjaukset, ...).
- Mahdolliset vauriot verkossa tai sen laitteissa koetilanteessa.
- Suojauksen mahdollisesta virhetoiminnoista aiheutuneet häiriöt muussa verkon osassa.
- koska ensiökoestus on vain toimintatesti, vaaditaan sen lisäksi lähes poikkeuksetta lisäkoestuksia tarkempien toiminta-arvojen saamiseksi.
- Vaatii melko tehokkaat koestuslaitteet.
- Suojauksen selektiivisyys jää testaamatta (vaatii lisätestejä) /12/.

6.3.3 Toisiokoestus

Toisiokoestuksessa signaalit syötetään toisioon. Toisiokoestustavan etuja ovat:

- Voidaan suorittaa normaalin käytön yhteydessä.
- Mittamuuntajien toisiopiirien kunnon tarkistus riviliittimeltä releelle, liitoksien kunnon tarkistus.
- Laukaisu- ja hälytyspiirien toiminnan varmistus joko riviliittimeltä releelle tai mikäli mahdollista toimilaitteelle asti, liitoksien kunnon tarkistus.
- Katkaisijan sähköisen ja mekaanisen kunnon tarkistus, mikäli voidaan suorittaa laukaisu releeltä /5/.

Toisiokoestuksen haittoja ja puutteita:

- Saattaa aiheuttaa häiriöitä sähkönjakeluverkossa.
- Suojauksen mahdollisesta virhetoiminnoista aiheutuneet häiriöt muussa verkon osassa.

- Mittamuuntajien kunto sekä johdotus riviliittimelle usein tarkastamatta.
- Luotettava laukaisupiirien testaus hankalaa, testaus vain mittaamalla.
- Suojauksen selektiivisyys jää testaamatta.
- Sekvenssien ajaminen hankalaa.
- Liitoksien unohtuminen auki / kiinni /5, 12/

6.3.4 Toisiorelekoestus

Toisiorelekoestuksessa otetaan rele irti piiristä ja rele testataan ”pöydällä”. Tämä onnistuu vain releillä, jotka voidaan helposti poistaa kotelostaan (ulosvedettävä) ja testata erillisenä. Tämän koestustavan etuja ovat:

- Voidaan suorittaa normaalin käytön yhteydessä
- Varmistetaan suojareleen kunto ja saadaan koestusarvot.

Toisiorelekoestuksen haittoja ja puutteita:

- Mittamuuntajien kunto sekä johdotus riviliittimelle jää tarkastamatta.
- Luotettava laukaisupiirien testaus hankalaa, testaus vain mittaamalla.
- Suojauksen selektiivisyys jää testaamatta.
- Liitoksien unohtuminen auki / kiinni.
- Katkaisijan sähköinen ja mekaaninen kunto jää tarkastamatta /5/.

6.3.5 Toimintojen raportointi

Toimintojen raportoinnilla tarkoitetaan tässä yhteydessä jatkuvaa käytönaikaista seuranta sekä verkossa esiintyneiden vikojen aiheuttamien reletoimintojen analysointia ja raportointia. Toisin sanoen verkossa luontaisesti esiintyvien vikojen katsotaan vastaavan relekoestusta, kunhan reletoiminnot analysoidaan ja myös raportoidaan riittävän hyvin. Tämän koestustavan etuja ovat:

- Voidaan tulevaisuudessa korvata koetukset liittämällä toimintojen seuranta ja raportointi osaksi kunnossapito-ohjelmaa.
- Suojauksen oikea sekä selektiivinen toiminta vikatilanteessa (suunnatut suojaukset jne.).

- Muiden suojausketjuun kuuluvien laitteiden sekä järjestelmien oikea keskinäinen toiminta vikatilanteessa.
- Mittamuuntajien sekä niiden toisiopiirien kunnan tarkistus, liitoksien kunnan tarkistus.
- Laukaisu- ja hälytyspiirien toiminnan varmistus, liitoksien kunnan tarkistus.
- Katkaisijan sähköisen sekä mekaaninen kunnan toteaminen ja tarkistus.
- Toiminta-arvojen vertailu. mm. laukaisuaikojen ja palutumisajkojen vertailu aikaisemmin saatuihin arvoihin (muutokset katkaisijan toimintaajassa, indikoi mekaanista vikaa jne.) /5, 12/.

Tämän tavan haittoja ja puutteita:

- Vaatii paljon seurantaan, resurssit.
- Vielä ei ole olemassa automaattista seurantajärjestelmää tiedon keräämiseen ja analysointiin suojareleiltä tms.

6.4 Koestuksen kattavuus

Edellä esitetyistä koestustavoista nähdään, että eri tavoilla on erilainen kattavuus, ts. mitä tulee tarkastettua ja mitä ei. Käytännössä ei ole taloudellisesta järkevää pyrkiä 100 % kattavuuteen /12/.

Releen toiminallisuuden testaus tulisi kattaa vähintään seuraavat:

- Virran ja jännitteen mittaaminen on kunnossa.
- Asentotiedot yms. ns. binaaritulot ovat kunnossa.
- Laukaisut ja hälytykset ovat kunnossa.
- Asettelyt, ainakin tärkeimmät ovat kunnossa, ts. rele toimii asettelujensa mukaisesti.

Kannattaa huomata, että jonkin funktion algoritmin yksityiskohtainen testaus ei enää ole järkevää, muuta kuin poikkeustapauksessa. Pitäisi muistaa koestuksesta mahdollisesti aiheutuvat haitat sekä taloudellinen näkökulma eli koestuksen kesto ja hinta /12/.

7 OHJESTUKSEN LUOMINEN

Ohjeistukset on tarkoitettu henkilöille, joilla on kokemusta suunnattujen maasulkusuojiin testauksesta ja Omicron tms. testilaitteen käytöstä. Tämän takia koestusohjeessa ei ole käsitelty jokaista asettelua yksityiskohtaisesti. Ohjeistuksen avulla pyritään selvittämään koestajille, mitkä seikat vaikuttavat suojauksen toimintaan, että hän osaisi koestaa MFADPSDE-maasulkusuojausfunktio oikein.

Ensimmäinen vaikuttava tekijä on mittaussignaalien kytkennät (nollajännitteen ja nollavirran kytkennät). Nämä pitäisi kytkeä oikein, mutta näissä kytkennöissä on erilaisia ominaisuuksia ja kytkentätapoja, mitkä tekevät asian vaikeaksi. Jotta tämä ongelma saadaan ratkaistua, luotiin erillinen kytkentäohje, joka pätee kaikille suunnatuille maasulkusuojauksille.

Toinen tärkeä vaikuttava tekijä on parametrien oikeellisuuden ja toimintakarakteristikan koestaminen oikealla tavalla, sekä transientti- ja katkeilevien vikojen koestaminen. Näissä parametreissa on erilaisia ominaisuuksia ja vaatimuksia, mitä tutkitaan seuraavissa kappaleissa.

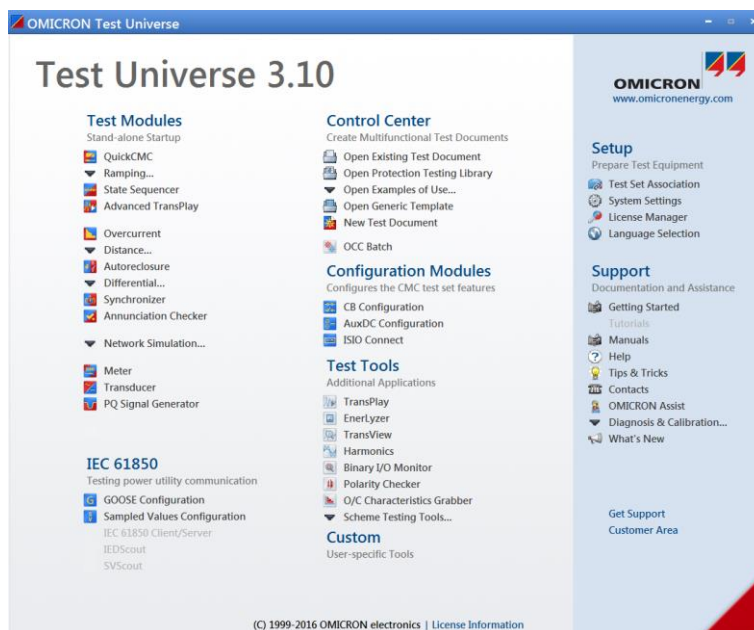
Koestuksessa käytettiin Omicron-koestuslaitetta, mutta luotu MFADPSDE-koestusohje pätee myös muilla koestuslaitteilla, jos niissä on samanlaisia ominaisuuksia kuin Omicron-koestuslaiteessa.

7.1 Omicron-koestuslaite

Omicron CMC 256plus (**Kuva 41.**) on suojausreleiden toisiokoestuslaite, joka pystyy syöttämään eri virtoja ja jännitteitä suojausreleen liittimiin. Lisäksi Omicron-koestuslaite voi mitata suojausreleen toiminta-aikoja binäärituloilla. Tässä koestuslaiteessa on kuusi virtalähtökanavaa ja neljä jännitelähtökanavaa. Koestuslaitteen tarkkuus ja joustavuus mahdollistavat erilaisten testien tekemisen suojausreleelle. Tätä koestuslaitetta ohjataan Omicron Test Universe (OTU)-ohjelman avulla. OTU-ohjelman aloitusnäyttö on esitetty kuvassa 42 /20/.



Kuva 41. Omicron CMC 256plus koestuslaite.



Kuva 42. OTU-ohjelman aloitusnäyttö.

OTU-Ohjelmassa on erilaisia testityökaluja, tämän insinööriyön kannalta vain seuraavat testityökalut käsitellään:

QuickCMC testityökalu (manuaalinen testityökalu):

- samanaikainen kaikkien käytettävissä olevien testisignaalien (enintään 22 kanavan) ohjaus
- jatkuvasyöttö, askel- tai ramppitoiminta kaikilla suureilla
- toiminta-aikamittaus
- vektori- ja impedanssitaso-näkymät.

QuickCMC tarjoaa helppokäyttöisen ja intuitiivisen käyttöliittymän ja tehokkaita toimintoja PC-ohjattujen manuaalisten testien suorittamiseen kaiken tyyppisille suojausreleille /20/.

Ramppitestityökalu (Ramping):

Ramppitestityökalulla saadaan selvitettyä releen asettelujen arvot kuten havahtumis-, laukaisu-, palautumisvirrat ja toimintakarakteristikat, nostamalla suureiden (vaihekulma, jännite tai virta) arvoa portaittain. Testit voidaan suorittaa automaattisesti ja ramppeja pystytään suorittamaan useampia peräkkäin, mikä mahdollistaa sekä yksinkertaisten että monimutkaisten toimintojen testauksen /20/.

Pulssiramppitestityökalu (Pulse Ramping):

Pulssiramppitestityökalu on periaatteessa samanlainen kuin tavallinen ramppitestityökalu, mutta toiminta poikkeaa siinä, että joka askeleen välissä mittasuureet käyvät nollassa /20/.

”State Sequencer”-testityökalu.

”State Sequencer” on joustava toiminta-aikojen mittaamiseen tarkoitettu testityökalu. Toimintatilalla (State) voidaan määritellä jännite- ja virtasysäyksien suuruus, kulma, taajuus ja aika. Useita yksittäisiä toimintatiloja voidaan sijoittaa peräkkäin testisekvenssiksi. Siirtyminen yhdestä tilanneesta seuraavaan voi tapahtua kiinteän ajan kuluttava. Tässä testityökalussa on myös mahdollista ajaa testisekvenssiä silmukassa /20/.

”Advanced TransPlay”-testityökalu

”Advanced TransPlay”-testityökalulla voidaan toistaa Comtrade-formaatissa olevia häiriötallenteita, kuten maasulkutapahtumista taltioituja, joissa esiintyy esim. katkeileva maasulku /20/.

7.2 KytKentäohje

ABB Medium Voltage Products on huomannut, että monilla koestajilla eri puolilla maailmaa on ongelmia ymmärtää miten suunnattujen maasulkusuojien koestuksessa toisiokoestuslaite tulisi kytkeä releelle. Ei ole ymmärretty mitkä ovat oikeat virtojen ja jännitteiden polariteetit eri tilanteissa tai varsinkaan, miten maasulkusuojaus pitää testata, kun käytetään laskennallisia suureita. Lopputuloksena valitetavan usein on ollut, että koestaja on vain vaihdellut kytKentöjä, kunnes tulos on näyttänyt oikealta, tai hän on lähettänyt kysymyksen ABB:n tukipalveluun.

Tässä työssä tehdyn kytKentäohjeen (LIITE 1) tarkoituksena on esittää ja selventää tavat, miten toisiokoestuslaitteen syöttämät signaalit tulee kytkeä suojareleelle eri tilanteissa. Tällaisia tilanteita ovat esimerkiksi mitattujen ja laskennallisten suureiden käyttö, ja niiden eri kombinaatiot.

KytKentäohjeen alussa esitetään, kuinka suojausreleen virta- ja jännitemuuntajan muuntosuhteet voidaan tarkistaa. Tämän jälkeen käydään läpi seuraavat kytKennät:

- mitattu nollavirta suoraan releen tuloon, virtamuuntajan kautta ja Holmgren-kytKentä
- laskettu nollavirta
- mitattu nollajännite
- laskettu nollajännite
- jännitteet prosessiväylän yli (Sampled values).

KytKentäohjeen lopuksi esitetään, miten nämä kytKennät voidaan tarkastaa käyttäen releen WebHMI-vektorinäkymää tai releen häiriötallenteen signaalinäkymää.

KytKentäohje on esitetty liitteessä 1.

7.3 MFADPSDE-toisiokoestusohje

Koestusohje on luotu tässä insinööriyössä tehtyjen mittauksien ja tutkimuksien perusteella. Seuraavassa ei esitellä koestusohjeen yksityiskohtia, vaan pohditaan työprosessia ja käydään läpi lopputuloksia ratkaisujen näkökulmasta.

Teoriaosuuden perusteella monitaajuusadmittanssipohjaisella maasulkusuojausk-sella on neljä tärkeää asettelua mitä pitäisi koestaa, kun käytetään GENERAL- tai ALARMING-toimintatilaa. Nämä asettelut, jotka määrittelevät suojauksen toiminta-
taa ovat:

1. "Voltage start value" määrittelee suojauksen toimintaherkkyuden
2. "Min operate current" määrittelee suojauksen virran havahtumisrajan nimellisjännitteellä
3. "Tilt angle" määrittelee admittanssitoimintasektorin rajat
4. "Operate delay time" määrittelee suojauksen laukaisuaajan.

Kuvassa 43 on esitetty MFADPSDE:n parametrit. Taulukossa 1 esitetään, miten kukin asettelu tulee testattua, sillä jotkut asettelut tulee testattua automaattisesti samalla, kun testataan edellä mainitut asettelut.

REF620 - Parameter Setting					
Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ MFADPSDE1: 1					
✓ Io->Y(1)					
✓ Operation	on	on			
✓ Operation mode	General EF	General EF			
✓ Io signal Sel	Measured Io	Measured Io			
✓ Uo signal Sel	Measured Uo	Measured Uo			
✓ Peak counter limit	2	2		2	20
✓ Start delay time	500	500	ms	30	60000
✓ Reset delay time	30	30	ms	0	60000
✓ Pol reversal	False	False			
✓ Setting Group 1					
✓ Directional mode	Forward	Forward			
✓ Operating quantity	Adaptive	Adaptive			
✓ Voltage start value ❶	0.20	0.20	xUn	0.01	1.00
✓ Min operate current ❷	0.010	0.010	xIn	0.005	5.000
✓ Tilt angle ❸	5.0	5.0	deg	2.0	20.0
✓ Operate delay time ❹	500	500	ms	60	1200000

Kuva 43. MFADPSDE:n parametrit.

Taulukko 1. MFADPSDE: parametrit.

Asettelu	Miten huomioitu koestusohjeessa
Operation mode	Käsitellään koestusohjeessa
Io signal Sel	Kytkentäohjeessa / ei toimi, jos aseteltu väärin
Uo signal Sel	Kytkentäohjeessa / ei toimi, jos aseteltu väärin
Peak counter limit	Koestusohjeessa
Start delay time	Koestusohjeessa, voidaan mitata kuten ”Operate delay time”
Reset delay time	Koestusohjeessa
Pol reversal	Tulee testattua / ei toimi, jos aseteltu väärin
Directional mode	Tulee testattua / ei toimi, jos aseteltu väärin
operating quantity	Koestusohjeessa
Voltage Start value	Koestusohjeessa
Min operate current	Koestusohjeessa
Tilt angle	Koestusohjeessa
Operate delay time	Koestusohjeessa

7.3.1 Voltage start value

Tehtyjen mittausten ja tutkimuksen perusteella todettiin, että ”Voltage start value” (jännitteen havahtumisarvo) voidaan testata useilla testityökaluilla, johtuen tämän asettelun toimintaperiaatteesta. Suojaus havahtuu, kun jännite ylittää jännitteen havahtumisarvoon ja laukaisee vasta laukaisuajan kuluttua.

Tämä toiminta testataan periaatteessa nostamalla jännitettä askelmaisesti. Sopivimmat testityökalut ovat Quick CMC- ja ramppitestityökalu. Kannattaa huomata, että Quick CMC-testityökalulla testaaminen on hitaampaa kuin ramppitestityökalulla, lisäksi ramppitestityökalu suorittaa testin automaattisesti sekä antaa tarkat koestus-

arvot ja tarkistaa, että arvot ovat toleranssin sisällä. Näistä syistä johtuen, koestusohjeessa suositellaan käyttämään ramppitestityökalua. Koestus on esitetty tarkemmin liitteessä 2, kappaleessa 3.1.

7.3.2 Min operate current ja Tilt angle

Koestajat luontaisesti odottavat, että nämä asettelut voi koestaa kuten perusmaasulkusuojan DEFxPDEF virran havahtumisrajan ja toimintakulma-asettelut. Mutta jos käytetään perinteisiä testityökaluja (Quick CMC ja ramppitestityökalu) nostamaan askelmaisesti virtaa tai vaihekulmaa, saadaan väärät koestustulokset. Tämä johtuu ennen kaikkea kumulatiivisen osoitinsummaustekniikan (CPS) laskentatavan käytöstä, mikä tarkoittaa, että suojaus summaa koko ajan admittansseja. Oikea tapa on nollata CPS pitämällä jännite nollana askelten välissä. Tästä syystä pulssiramppitestityökalu on ainoa hyvä tapa ”Min operate current” ja ”Tilt angle” testaamiseen.

Lisäksi huomattiin, että myös väärät koestustulokset saadaan, jos havahtumisaika on aseteltu liian lyhyeksi. Tämäkin johtuu kumulatiivisen osoitinsummaustekniikan (CPS) laskentatavan käytöstä. Esimerkiksi jos testataan ”Tilt angle”-asettelua ja havahtumisaika on asetettu lyhyeksi, suojaus havahtuu hetkelliseksi toimintasektorin ulkopuolella. Tämä ilmiö on selitetty tarkemmin koestusohjeen liitteessä 2.

Edelleen havaittiin, että ”Min operate current” ei ole virran havahtumisraja aina, vaan vain kun U_o on nimellinen ja vaihekulma on nolla astetta tai yli 45 astetta (amplitudi-toimintasektori).

Virran havahtumisraja saadaan seuraavasta kaavasta, jos toiminta on resistiivisellä toimintasektorilla:

$$I_{o \text{ threshold}} = \frac{1}{\cos \varphi} \times \frac{\bar{U}_{o \text{ CPS}}^1}{U_{PE}} \times I_{o \text{ min op.current}} \quad (16)$$

Vastaavasti amplitudi-toimintasektorissa:

$$I_{o \text{ threshold}} = \frac{\bar{U}_{o \text{ CPS}}^1}{U_{PE}} \times I_{o \text{ min op.current}}$$

$I_{o \text{ threshold}}$ virran havahtumisraja

U_{PE} nimellisjännite

$\bar{U}_{0\text{CPS}}^1$ Perustaajuuden nollajännitteen osoitin, mikä saadaan laskettua hyödyntäen kumulatiivista summaosoitintekniikkaa (CPS), eli käytännössä tämä on koestuksen aikana syötetty nollajännite. (17)

Testauksen aikana huomattiin myös, että ”Min operate currentin” minimi asettelu on $0,005 \times I_n$, eli jos I_n 1 A niin ”Min operate current” on 5 mA. Mutta tämä ei pidä paikkaansa, koska MFADPSDE-lohkossa virta pitää aina olla vähintään 1 % nimellisestä, eli edellisessä tapauksessa ”Min operate current” on todellisuudessa 10 mA. Tätä tilannetta ei ole mainittu missään, lisäksi releen teknisessä manuaalissa ei ole annettu virran ja vaihekulman toleransseja. Toleranssien puute ei tietenkään vaikuttaa suojauksen toimintaan, mutta koestajalla on tärkeä varmistaa ovatko koestustulokset oikein.

Liitteessä 2, kappaleissa 3.2 ja 3.3 on esitetty tarkemmin, miten koestetaan ”Min operate current”- ja ”Tilt angle”-asettelut.

7.3.3 Operate delay time

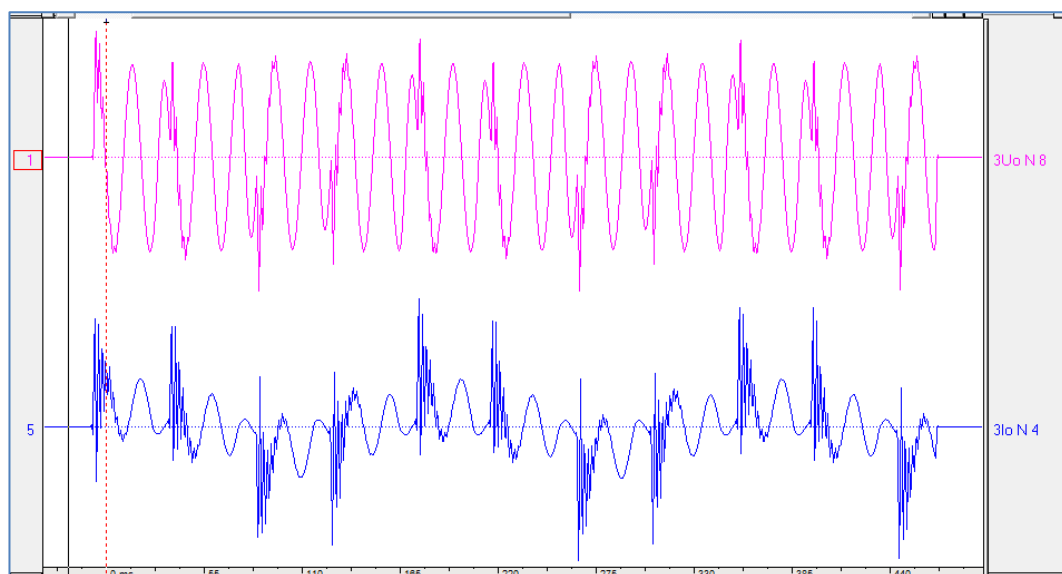
Laukaisuaajan mittaus (”Operate delay time”) on tyyppilinen testaus, joka suoritetaan melkein jokaiselle suojausfunktioille. Yksi yleinen tapa millä tämä asettelu testataan, on ”State Sequencer”-testityökalu. Liitteessä 2, kappaleessa 3.4 on esitetty, miten koestetaan laukaisuaika ”State Sequencer”-testityökalulla.

7.3.4 Katkeilevien vikojen havaitsemiskyvyn tarkastaminen

Monitaajuusadmittanssipohjaisen maasulkusuojauksen suunnittelun lähtökohtana oli erityisesti luotettava ja varma toiminta transientti- ja katkeilevissa maasulkuvioissa. Tämä herättää aina asiakkaissa kysymyksen, miten tämä ominaisuus tulisi testata. Tällä hetkellä maasulkutapahtumista kerätyt tallenteet ovat ainoa tapa, millä suojauksen transientti- ja katkeilevien maasulkuvikojen havaitsemiskyky voidaan

testata. Tämä tarkoittaa sähkölaitosten verkossa tehtyjen katkeilevista maasulkuko-keista saatujen häiriötallenteiden toistamista, esimerkiksi Omicron ”Advanced TransPlay”-testityökalulla.

Tässä työssä tehtyjen mittauksien ja tutkimuksien aikana kohdattiin paljon ongelmia katkeilevien maasulkujen tallenteiden kanssa, mikä johtuu ennen kaikkea siitä, että nämä tallenteet eivät ole säännönmukaisia eivätkä puhtaita häiriötä (toisin sanoen tallenteen virrassa ei ole pelkästään transienttipiikkejä, vaan siellä on muunlaisiakin muutosilmiöitä) (**Kuva 44.**).



Kuva 44. Esimerkiksi katkeilevasta maasulkutapahtumasta.

Kuvassa 44 nähdään nollavirran käyrän piikkien epäsymmetrisyys, joka tekee tuloksien tulkitsemisen hankalaksi. Tästä syystä koestusohjeessa on pyritty avaamaan koestajalle, millainen on hyvä testauksen sopiva katkeilevan maasulun tallenne.

Hyvän katkeilevan maasulkutallenteen kriteerit ovat:

1. Näytteenottotaajuus on oltava vähintään 5 kHz (eli oskilloskoopista otettu tallenne).
2. Vian kestoajan on oltava riittävän pitkä ja siinä on oltava riittävä määrä transienteja testausta varten (esim. vian kesto aika on oltava pidempi kuin suojaus laukaisuaika).

3. Tallenteesta on hyvä tietää taustatiedot: mittausmuuntajien muuntosuhteet, verkon maadoitustapa jne.

Lisäksi koestusohjeessa selvitetään, mitkä ovat katkeilevan maasulun koestuksen tuloksen tulkitsemisen pääpiirteet:

1. Suojaus laukaisee, kun vika on viallisessa johtolähdössä, ts. releen asettelun mukaan myötäsuunnassa.
2. Suojaus ei laukaise, kun vika on vastakkaisessa suunnassa (terveessä lähdössä).
3. Jos MFADPSDE-lähdöt (BLK_EF, INTR_EF ja PEAK_IND) on käytetty suojausreleen konfiguraatiossa, ne suositellaan testattaviksi.

ABB:n suojausreleissä on niin sanotut perinteiset suojausfunktiot, jotka tulevat valmiiksi mukaan suojausreleen konfiguraatioon. MFADPSDE-funktio ei kuulu tähän ryhmään, koska se on valinnainen funktio. Toisin sanoen MFADPSDE-funktio konfiguroidaan erikseen, eikä suunnittelijat usein ymmärrä koestajan tarpeita. Koestuksen kannalta olisi hyvä, että funktion kaikki lähdöt (BLK_EF, INTR_EF ja PEAK_IND) olisi viety ainakin häiriötallentimelle, mahdollisesti myös lähtöreleelle. Jos esimerkiksi PEAK_IND-lähtö on jäänyt konfiguroimatta, on koestajan erittäin vaikea testata ”Peak counter limit”-asettelua.

Tässä työssä varmennettiin yleinen virhe, jonka koestajat usein tekevät. Useat koestajat ajattelevat, että suojauksen katkeilevien maasulkuvikojen havaitsemiskyky voidaan koestaa käyttämällä ”State Sequencer”-testityökalua. Tämä on väärä tapa koestaa, koska ”State Sequencer”-testityökalu ei pysty muodostamaan oikealaisia transienttipiikkejä.

Lisäksi todettiin, että palautumisajalla (”Reset delay time”) on suuri merkitys katkeilevien maasulkujen testaamisessa, varsinkin INTERMITTENT-toimintatilassa. Esimerkiksi, jos asiakkaan palautumisaika on aseteltu 200 ms, niin tallenteessa piikkienvälinen aika pitäisi olla lyhempi, muuten suojausrele ei laukaise.

7.3.5 Koestusohjeen pohdintaa

Koestusohjeen luominen vaati paljon mittauksia ja tutkimuksia, koska kyseessä on ihan uusi suojausfunktio. Testauksen aikana törmättiin sellaisiin ongelmiin ja kysymyksiin, joita ei ole selitetty missään, jolloin lisätietoja oli pakko kysyä MFADPSDE:n suunnittelijoilta. Lisäksi suojauksen kumulatiivisen osoitinsummaustekniikan (CPS) laskentatavan käyttö tekee koestamisen haasteelliseksi, jos verrataan MFADPSDE:n koestusta perinteisten maasulkusuojauksien koestukseen. Koestusohje pyrittiin pitämään helposti ymmärrettävänä ja johdonmukaisena. Tavoitteena oli antaa selkeitä ”tee näin”-ohjeita ja pyrkiä rakentamaan lukijan ymmärrystä menettä liikaa yksityiskohtiin. Ohjeen liitteissä on annettu syvällisempää tietoa sitä haluaville.

8 JATKOKEHITYSAJATUKSET

Työn aikana MFADPSDE-funktion koestuksen haasteet tulivat selkeästi esiin ja näistä syntyi seuraavat jatkokehitysajatukset.

MFADPSDE-funktion konfigurointia varten kannattaisi tehdä oma ohjeistus, missä olisi esitetty mm.

- koestajan tarpeet saada funktion lähtösignaalit kytketyiksi häiriötallentimelle koestamisen helpottamiseksi
- miten BLK_EF ja INTR_EF tulisi käyttää lukitsemaan muita maasulkufunktiota ja ohjaamaan jälleenkytkentöjen käynnistystä.

Katkeilevien vikojen testaukseen voisi kehittää työkaluohjelman. Ohjelmalle pitäisi olla mahdollista antaa nollajännitteen ja nollavirran amplitudit, transienttipiikkien välinen aika sekä tallenteen pituus. Näiden perusteella ohjelma tekee koestusta varten häiriötallenteen. Tärkein asia on, että silloin tallenne olisi säännönmukainen ja koestustulosten tulkinta olisi selkeämpää.

Lisäksi releen suojausfunktioilta olisi hyvä saada lisäinformaatioita, mikä voisi helpottaa koestusta. Tällainen voisi olla esimerkiksi transienttipiikkien laskuri.

9 YHTEENVETO

Työn lähtökohtana oli tutkia miten monitaajuusadmittanssipohjainen maasulkusuojausfunktio tulisi koestaa asianmukaisesti ja luoda tästä ohjeistus. Ennakolta tiedettiin, että koestus on haastavaa, eivätkä relekoestajat ole siinä kovin hyvin onnistuneet. Oikein tehdyssä koestuksessa funktion toiminta ja asettelut tulee testattua tarkoituksenmukaisella tavalla ja riittävän kattavasti. Samalla koestus ei vie kohtuuttomasti aikaa.

Kaikissa koestamisessa peruslähtökohtana on validiteetti (pätevyys, kelpoisuus) ja reliabiliteetti (luotettavuus). Toisen sanoen jokaisessa yksittäisessä testissä mitataan juuri oikea asiaa oikealla menetelmällä (validiteetti) ja saadut tulokset ovat luotettavia ja toistettavissa (reliabiliteetti). Nämä ovat myös tämän työn kulmakiiviä. Työssä opittiin useita tapoja testata MFADPSDE-funktio väärin ja niiden lopputulokset. Esimerkiksi ”Tilt angle”-asettelun testauksessa pulssiramppitestityökalu osoittautui käytännössä ainoaksi validiksi menetelmäksi ja tulokset ovat luotettavia vain, jos havahtumisaika on aseteltu riittävän pitkäksi. Reliabiliteetin kannalta tärkeä oli määritellä myös funktion toleranssit. Työn lopputulokset ovat varmistettu ja todettu odotuksien mukaiseksi, ts. liitteissä annetut ohjeistukset ovat valideja.

Työn tärkeimmät lopputulokset ovat koestusta varten luodut ohjeistukset. Nämä tullaan jakamaan ABB:n sisäisten kanavien kautta ympäri maailman ABB:n koestusta suorittavien yhtiöiden ja asiakkaiden käyttöön, minkä vuoksi ohjeistus on laadittu englanniksi. Työn aikana saatiin useita pyyntöjä tällaisesta ohjeistuksesta. Siksi uskotaan, että tällä työllä on suuri merkitys ja ohjeet tulevat auttamaan ja helpottamaan koestajien työtä.

Työn suorittaminen oli kokonaisuudessaan erittäin mielenkiintoista, mutta samalla sopivan haastavaa. Työ oli erittäin opettavainen kokemus, opin työn aikana erittäin paljon uutta keskijänniteverkon suojauksesta sekä relesuojauksesta että relekoestuksesta. Lisäksi työn aikana opettelin ABB:n uuden monitaajuusadmittanssipohjaisen maasulkusuojauksen toiminnan.

Työn aikataulu oli tiukka, mutta siinä onnistuttiin. Työn vaikein osa oli itse koestusohjeen luominen monitaajuusadmittanssipohjaiselle maasulkusuojausfunktioille, koska funktion toimintaperiaate on uusi ja erilainen. Tämä vaati paljon mittauksia ja tutkimista. Koestajalle tärkeä on myös, miten Omicron tms. toisiokoestuslaite tulee kytkeä releelle eri tilanteissa. Tästä haluttiin luoda oma itsenäinen ohje, koska silloin se pätee kaikille suunnatuille maasulkusuojoille, ei vain MFADPSDE-funktiolle.

Tässä työssä löydettiin releiden teknisistä manuaaleista joitain puutteita ja virheitä, mitkä tullaan korjaamaan ABB:n toimesta. Työn lopuksi on esitetty myös joitain koestukseen liittyviä jatkokehitysajatuksia.

MFADPSDE-funktioon liittyen on lähiaikoina alkamassa myös uusia insinööritöitä, joissa tutkitaan, kuinka admittanssiin perustuvaa maasulkusuojausta voidaan hyödyntää keskijänniteverkossa kohti säävarmempaa verkkoa, kuinka asettelut tehdään ja miten suojaus otetaan käyttöön. Näille töille nyt tehty insinöörityö toimii hyvänä ponnahduslautana.

LÄHTEET

- /1/ ABB Teknisiä tietoja ja taulukoita-käsikirja, 2000.
- /2/ ABB Oy. 2016. 615 series Technical Manual. RE_615_tech_756887_ENm.pdf. Vaasa. Viitattu 1.9.2017.
- /3/ ABB Oy. 2016. Sisäinen materiaali. Kompensoidun kaapeliverkon haasteita maasulkusuojaukselle. Vaasa. DataDataKompensoidun_kaapeliverkon_haasteita_maasulkusuojaukselle_final_revised_mod5.pptx.
- /4/ ABB Oy. 2016. Sisäinen materiaali. Relesuojauksen peruskurssi (6/10/20kV).
- /5/ ABB Oy. 2016. Sisäinen materiaali. KJ/SJ -relesuojausten tarkastaminen. Säty 21.10-2016.pptx.
- /6/ ABB Oy. 2017. Sisäinen materiaali. Maasulkusuojaus. Maasulku.ppt.
- /7/ ABB Oy. 2015. Remote I/O RIO600 Product Guide. RIO600_pg_757487_ENe.pdf. Viitattu 25.8.2017.
- /8/ ABB Oy. 2016. Sisäinen materiaali. MV Protection Relay Applications Earth-Fault Protection. Earth_Fault_Protection_2016.pptx.
- /9/ ABB Oy. 2017. Syöttö- ja lähtökentän suojaus- ja ohjausrele REF615. REF615_pg_758316_FIa.pdf. Viitattu 20.12.2017.
- /10/ Ekovaara, J &- Laiho, Y. 1988. Sähkölaitostekniikan perusteet.
- /11/ Lehtonen, M &- Hakola, T. 1995. Neutral Earthing and power System Protection.
- /12/ Lehesvuo, V. 2017. ABB Oy. Asiantuntija. Keskustelu 15.10.2017. Vaasa.
- /13/ Lakervi, E &- Partanen, J. 2008. Sähköjakelutekniikka.
- /14/ Sähkön siirto- ja jakeluverkot, ei päiväystä. Viitattu 5.9.2017. <http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/3sahkon_siirto_ja_jakeluverkot.pdf>.
- /15/ Rantanen, R. 1995. Maasulun laskennallinen paikantaminen keskijänniteverkossa, Diplomityö.
- /16/ Mäkinen, O. 2017. Sähkönjakelujärjestelmäprojekti. Vaasa. Vaasan ammatti-korkeakoulu. opetusmateriaali.

- /17/ Maasulku, ei päiväystä. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Viitattu 24.11.2017. <http://cna.mamk.fi/public/FJAK/YAMK/Sahk_Jakelu/Materiaalit/maasul.doc>.
- /18/ Mörsky, J. 1993. Relesuojaustekniikka.
- /19/ Nikander, A. 2002. Maasta erotetun ja kompensoidun KJ-verkon maasulkusuojaus. KJ-verkon maasulkusuojaus.pdf. Viitattu 28.7.2017.
- /20/ OMICRON. Testing Solutions for Protection and Measurement Systems. CM-Line-Catalog-ENU.pdf. Viitattu 23.11.2017.
- /21/ Suomen säädöskokoelma. 2016. Sähköturvallisuuslaki. Helsinki.
- /22/ Wahlroos, A &- Altonen, J. Sisäinen materiaali. Compensated neutral networks and multi-frequency admittance protection. Vaasa: ABB Oy. SEAPAC2017DOC_121_Wahlroos_final_revised1.pdf.



ABB Oy, Medium Voltage Products

1MRS758885 EN

Technical Note

Issued: Nov 2017

Revision: A / 14 Nov 2017

Relay connections for testing directional earth-fault protection

Testing guideline

Contents:

1	Scope	2
2	Introduction	3
2.1	Omicron	3
2.2	Relay rated currents and voltages	4
3	Connection for residual/neutral current	8
3.1	Measured I_0	8
3.2	Calculated I_0	11
4	Connection for residual voltage.....	13
4.1	Measured U_0	13
4.2	Calculated U_0	13
4.3	Sampled values	14
5	How to verify connections.....	16
5.1	Web HMI.....	16
5.2	Disturbance recording.....	21
Document history, Disclaimer and Copyrights, Trademarks, Contact information....		23

1 Scope

The present document describes the different ways to connect the Omicron test set to the relay for testing directional earth-fault protection.

First, guidelines are given how to check relay settings of current transformers (CT) and voltage transformer (VT) ratios.

Next, correct connections for I_o and U_o injection are presented with illustrative figures. All possible connections including CBCT, Holmgren connection and calculated I_o / U_o are presented.

Finally, guidelines on how correct connection can be verified by checking the signals either using Web HMI or the relay disturbance record are presented.

The given rules in this document are applicable for 611, 615, 620 and 630 series protection relays.

KEYWORDS: directional earth-fault protection, secondary test, Holmgren connection, current injection, Web HMI.

2 Introduction

When testing directional earth fault protection it's important to have relays connected in the correct way to avoid the problems that can be caused by the wrong connections.

In this document the Omicron secondary test device have been used, but the guidelines are applicable for any secondary test device.

2.1 Omicron

Omicron is a protective relay secondary test device capable of supplying various currents and voltages on the connectors in the device. In addition, the Omicron can control and measure relay operation times with binary inputs and outputs.

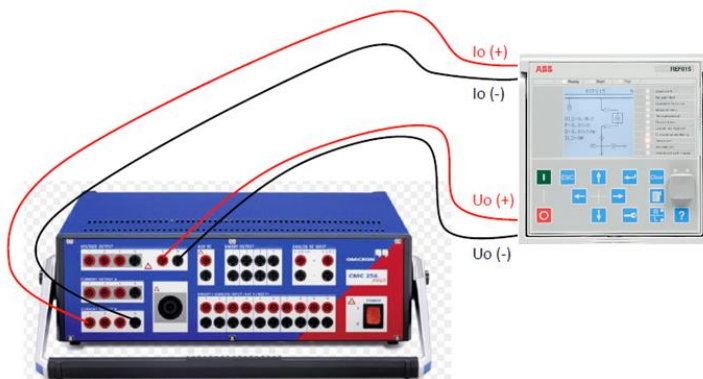


Figure 1. Secondary testing with Omicron.

The device has four voltage outputs, which each of them can be varied separately.

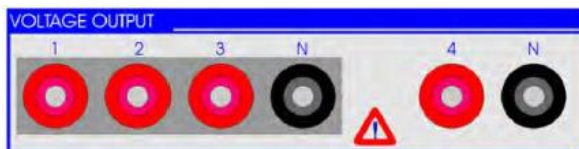


Figure 2. Omicron voltage outputs.

Omicron have six current outputs that can be used simultaneously or in connected parallel.

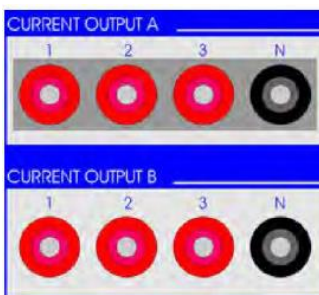


Figure 3. Omicron current outputs.

2.2 Relay rated currents and voltages

When testing directional earth-fault protection, the relay settings for CT and VT rated values must be known.

In 611/615/620 relays, these are under Configuration / Analog inputs, figure 4 shown an example of Current (I_o , CT) settings. Figures 5, 6 and 7 shows current ($3I$, CT), voltage (U_o , VT) and voltage ($3U$, VT), respectively.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ Current (I_o ,CT): 1					
✓ Current (I_o ,CT)					
✓ Primary current		100,0	A	1,0	6000,0
✓ Secondary current		1A			
✓ Amplitude Corr		1,0000		0,9000	1,1000
✓ Reverse polarity		False			
✓ Angle correction		0,0000	deg	-20,0000	20,0000

Figure 4. Example, I_o rated secondary setting in 615 relay.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ Current ($3I$,CT): 1					
✓ Current ($3I$,CT)					
✓ Secondary current		5A			
✓ Primary current		500,0	A	1,0	6000,0
✓ Amplitude corr. A		1,000		0,900	1,100
✓ Amplitude corr. B		1,000		0,900	1,100
✓ Amplitude corr. C		1,000		0,900	1,100
✓ Reverse polarity		False			

Figure 5. Example, $3I$ rated secondary setting in 615 relay.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ Voltage (U_o ,VT): 1					
✓ Voltage (U_o ,VT)					
✓ Secondary voltage		100	V	60	210
✓ Primary voltage		11,547	kV	0,100	440,000
✓ Amplitude corr.		1,000		0,900	1,100

Figure 6. Example, U_o rated secondary setting in 615 relay.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ Voltage (3U,VT): 1					
✓ Voltage (3U,VT)					
✓ Primary voltage		20,000	kV	0,100	440,000
✓ Secondary voltage		100	V	60	210
✓ VT connection		Wye			
✓ Amplitude corr. A		1,000		0,900	1,100
✓ Amplitude corr. B		1,000		0,900	1,100
✓ Amplitude corr. C		1,000		0,900	1,100
✓ Voltage input type		Voltage trafo			

Figure 7. Example, 3U rated secondary setting in 615 relay.

In 630 relays, protection functions have setting for *Base value Sel phase* and *Base value Sel Res*. These refer to BASEPH and BASERES functions, respectively and which are under configuration / Basic IED functions / Analog inputs, see figures 8, 9 and 10. Further AIM module settings must be known see figures 11 and 12.

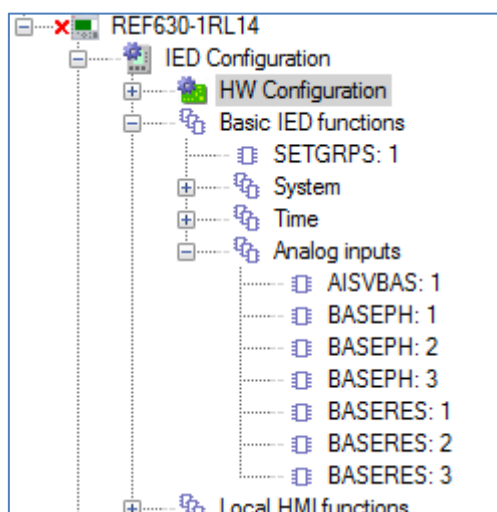


Figure 8. IED Configuration / Basic IED functions / Analog inputs.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ BASERES: 1					
✓ Voltage base Val Res		11,547	kV	0,001	440,000
✓ Current base Val Res		100	A	1	6000
✓ S base value Res		1154,70	kVA	0,05	18000,00

Figure 9. Example of BASERES:1 settings (U_0 and I_0 base values).

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ BASEPH: 1					
✓ Voltage base Val PP		20,00	kV	0,01	440,00
✓ Current base Val Ph		500	A	1	6000
✓ S base value 3Ph		17320,50	kVA	0,05	1800000,00

Figure 10. Example of BASEPH:1 settings (U and I base values).

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ AIM_2					
✓ NAMECH1		CH1			13 characters
✓ InputType1		Current			
✓ ReversePolarity1		No			
✓ CTsec1		5,0	A	0,1	10,0
✓ CTprim1		500	A	1	99999
✓ NAMECH2		CH2			13 characters
✓ InputType2		Current			
✓ ReversePolarity2		No			
✓ CTsec2		5,0	A	0,1	10,0
✓ CTprim2		500	A	1	99999
✓ NAMECH3		CH3			13 characters
✓ InputType3		Current			
✓ ReversePolarity3		No			
✓ CTsec3		5,0	A	0,1	10,0
✓ CTprim3		500	A	1	99999
✓ NAMECH4		CH4			13 characters
✓ InputType4		Current			
✓ ReversePolarity4		No			
✓ CTsec4		1,0	A	0,1	10,0
✓ CTprim4		100	A	1	99999

Figure 11. Example of AIM module settings (Configuration / HW Configuration / AIM), CH1 = IL1, CH2 = IL2, CH3 = IL3, CH4 = Io.

Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ NAMECH7		CH7			13 characters
✓ InputType7		Voltage			
✓ VTsec7		100,000	V	0,001	999,999
✓ VTprim7		20,000	kV	0,001	9999,999
✓ NAMECH8		CH8			13 characters
✓ InputType8		Voltage			
✓ VTsec8		100,000	V	0,001	999,999
✓ VTprim8		20,000	kV	0,001	9999,999
✓ NAMECH9		CH9			13 characters
✓ InputType9		Voltage			
✓ VTsec9		100,000	V	0,001	999,999
✓ VTprim9		20,000	kV	0,001	9999,999
✓ NAMECH10		CH10			13 characters
✓ InputType10		Voltage			
✓ VTsec10		100,000	V	0,001	999,999
✓ VTprim10		11,547	kV	0,001	9999,999

Figure 12. Example of AIM module settings (Configuration / HW Configuration / AIM), CH7 = UL1, CH8 = UL2, CH9 = UL3, CH10 = Uo.

3 Connection for residual/neutral current

Residual/neutral current measurement for the directional earth-fault protection can be realized in different ways:

- Core balance CT (CBCT) connected to the relay I_o -input. Protection is set for “measured I_o ”
- Sum connection of phase currents (Holmgren connection) connected to the relay I_o -input. Protection is set for “measured I_o ”
- Internally calculated sum of phase currents. Protection is set for “calculated I_o ”

In the 630 relays, the selection of using I_o input or calculated I_o is done in the relay configuration (SMAI function blocks).

3.1 Measured I_o

Figure 13 illustrates current injection from Omicron directly to the relay I_o input when CBCT is used.

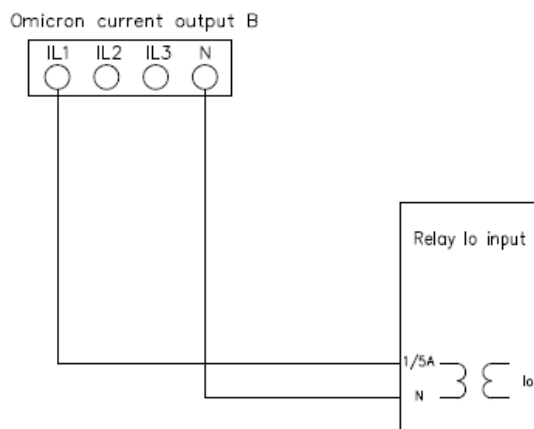


Figure 13. Injection from Omicron directly to the relay I_o input.

Figure 14 illustrates current injection from Omicron through the CBCT.

-  Note the current direction in the CBCT primary!
-  Note the connection of the CBCT secondary terminals (S1, S2) to the relay according to ABB manuals!

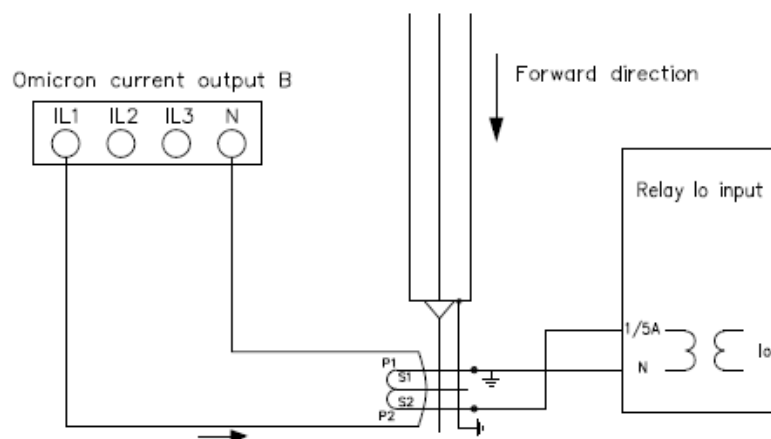


Figure 14. Injection from Omicron through the CBCT.

Figure 15 illustrates current injection from Omicron to the switchgear terminals when Holmgren connection (sum of phase currents connected to relay Io input) is used.

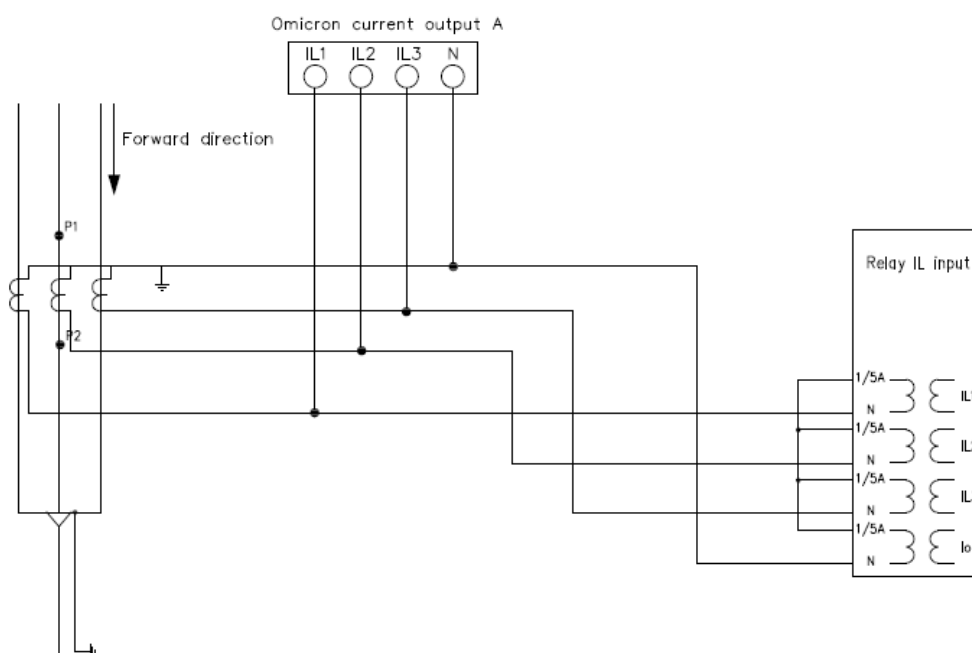


Figure 15. The current injection from the Omicron to relay when using Holmgren connection.

Figure 16 is same as figure 15, but in this connection the current injection has opposite polarity due to the different connections. This connection can be used in the testing, but current injection must be set 180-degree angle, see figure 17.

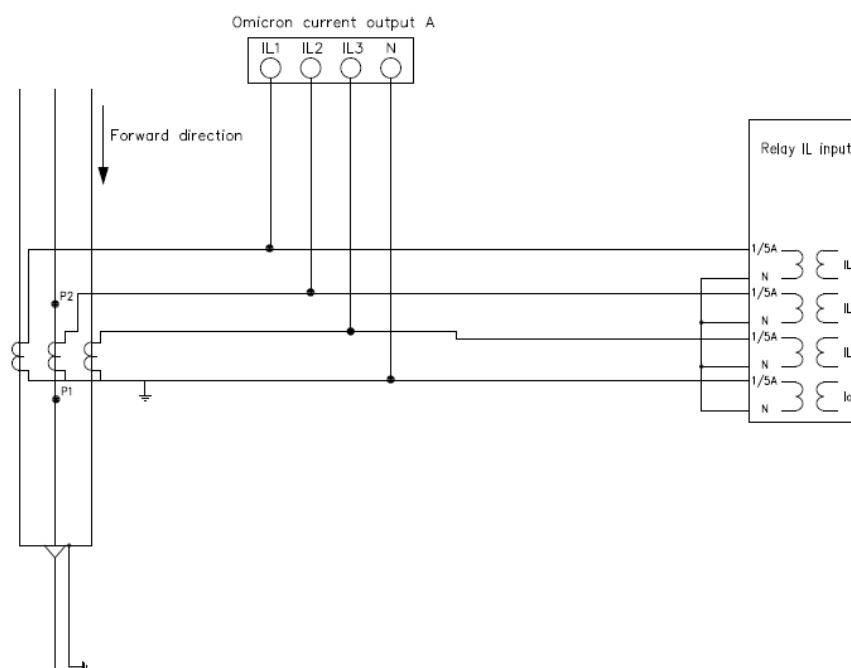


Figure 16. Holmgren connection 180 degree.



Note the opposite polarity can be selected from Omicron analog outputs!

Analog Outputs				
Set Mode	Direct			
V L1-E	100,0 V	0,00 °	50,000 Hz	
V L2-E	0,000 V	-120,00 °	50,000 Hz	
V L3-E	0,000 V	120,00 °	50,000 Hz	
I L1	1,000 A	180,00 °	50,000 Hz	
I L2	0,000 A	-120,00 °	50,000 Hz	
I L3	0,000 A	120,00 °	50,000 Hz	

Figure 17. Example for the injection current in 180 degree from Omicron (refer figure 16 connection).

3.2 Calculated I_o

The residual current is internally calculated from the phase currents according to equation:

$$\bar{I}_o = -(\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C)$$

Therefore the connection must be as shown in following figures. Figure 18 illustrates single phase current injection when calculate I_o is used.

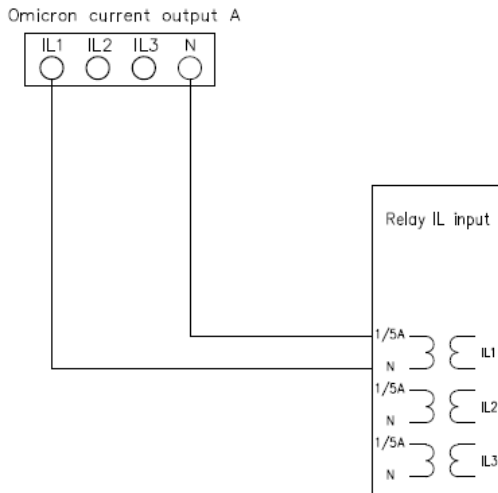


Figure 18. The current injection from the Omicron to relay when using calculated I_o 0 deg.

Figure 19 is same as figure 18, but in this connection the current has opposite polarity. I.e. this connection can be used in the testing, but current injection must be set 180 degree angle.

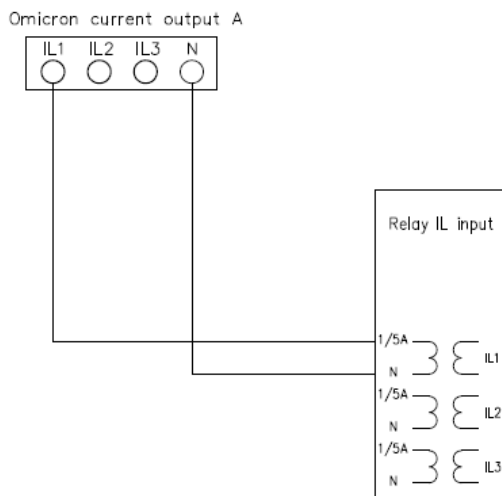


Figure 19. The current injection from the Omicron to relay when using calculated I_o , 180deg.

 Note in case of figure 19 the injection current must be in the opposite polarity!

Analog Outputs			
Set Mode	Direct		
V L1-E	100,0 V	0,00 °	50,000 Hz
V L2-E	0,000 V	-120,00 °	50,000 Hz
V L3-E	0,000 V	120,00 °	50,000 Hz
I L1	1,000 A	180,00 °	50,000 Hz
I L2	0,000 A	-120,00 °	50,000 Hz
I L3	0,000 A	120,00 °	50,000 Hz

Figure 20. Example for the injection current for calculated I_o in 180 degree from Omicron (refer figure 19 connection).

4 Connection for residual voltage

The residual voltage for the directional earth-fault protection can be realized in two ways:

- An open delta voltage is connected to the relay U_o-input. Protection is set for "measured U_o"
- A three phase-to-earth voltages are connected to relay U₁, U₂ and U₃ input, i.e. relay internally calculate U_o from the phase-to-earth. Protection is set for "calculated U_o"

4.1 Measured U_o

Figure 21 illustrates voltage injection from Omicron directly to the relay U_o

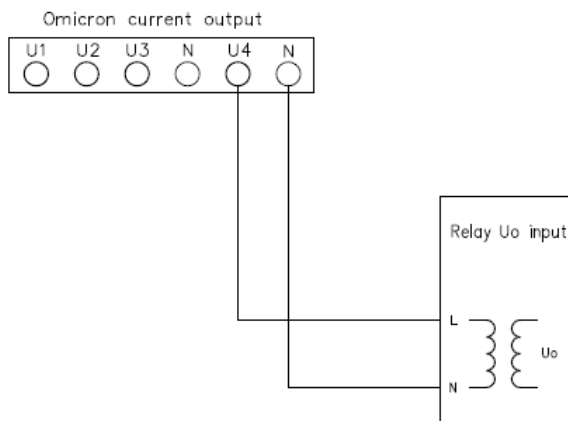


Figure 21. Measured U_o, the voltage injection directly from Omicron to relay U_o input.

4.2 Calculated U_o

Figure 22 illustrates single phase voltage injection when calculate U_o is used.

- i** Note: (3U) voltage transformer connection for 611/615/620 relays must be set "Wye", otherwise (if the connection is "delta") the relay cannot calculate U_o.
- i** Note: in 630 relay voltage transformer connection is from SMAI setting connection type "Ph-N", otherwise the relay cannot calculate U_o.
- i** Note: the magnitude of the voltage is three times the residual voltage setting, because the residual voltage is calculated from the phase-to-earth voltages when the VT connection is selected as "Wye" with the equation:

$$\bar{U}_o = (\bar{U}_A + \bar{U}_B + \bar{U}_C)/3$$

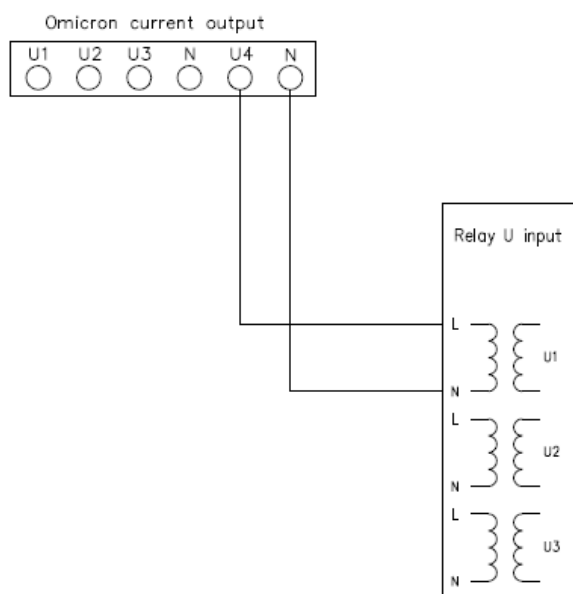


Figure 22. The voltage injection from the Omicron to relay when using calculated U_0 .

4.3 Sampled values

The 615&620 series supports IEC 61850 process bus with sampled values of analog voltages. The measured values are transferred as sampled values using the IEC 61850-9-2 LE protocol which uses the same physical Ethernet network as the IEC 61850-8-1 station bus. The intended application for sampled values is sharing the measured voltages from one relay to other relays with phase voltage based functions and 9-2 support.

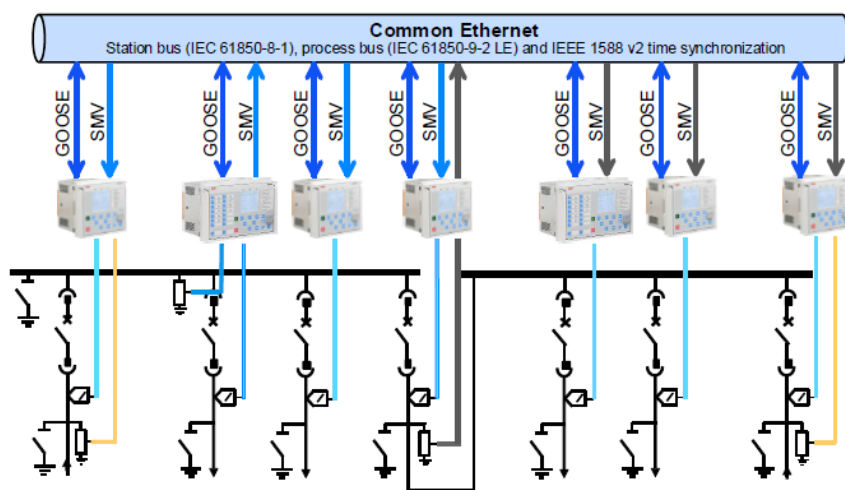


Figure 23. Process bus application of voltage sharing and synchro-check.

When testing relay, which receives voltages as sample measured values (SMV) as illustrates in figure 24, the voltages must injected to the sender which is for measuring the bus voltages. Current is injected to the relay to be tested.

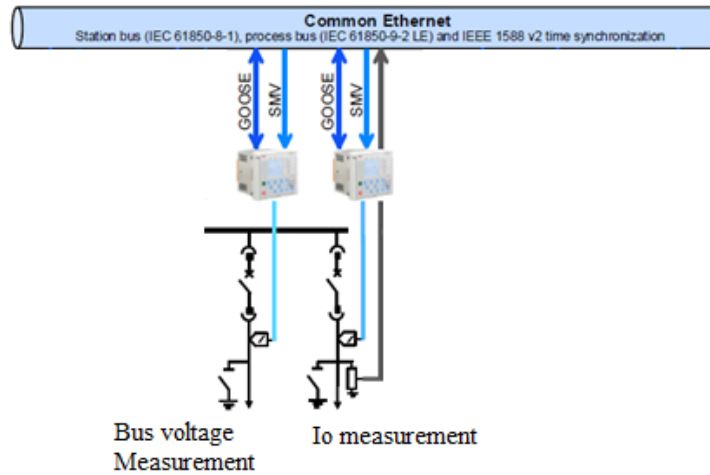


Figure 24. Simplified voltage shearing SMV example.

5 How to verify connections

The different combinations of the current and voltage connections can be verify by checking the signals either using Web HMI or from the disturbance recordings.

5.1 Web HMI

The Web HMI have Phasor diagrams tool, which can be used to verify the correct connection.

Figure 25 shown from where the phasor tool can be found, and figures 26-32 illustrates the correct angles between injected signals, when connections are done correctly.



Figure 25. WebHMI / Phasor diagrams.

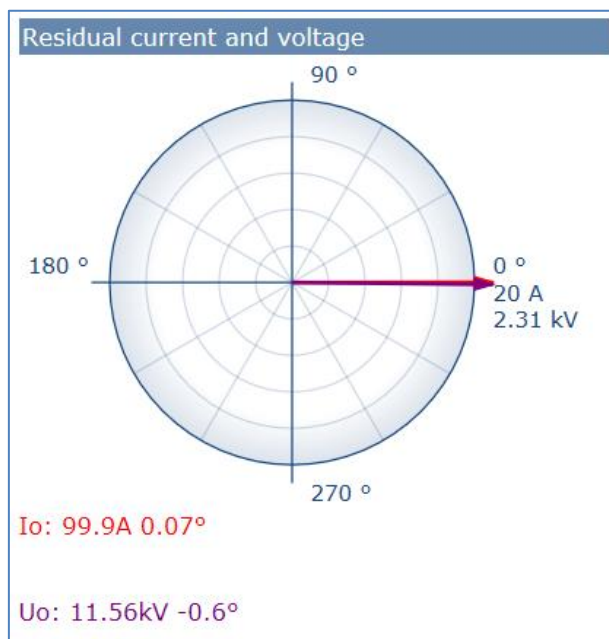


Figure 26. WebHMI showing measured I_o and measured U_o in same phasor angle, relay sees U_o - I_o angle as 0 deg.

i Note if the measurement haven't phase reference the phasor diagrams can show arbitrary angle, see figure 27. However, the point is just to check angle between U_o - I_o .

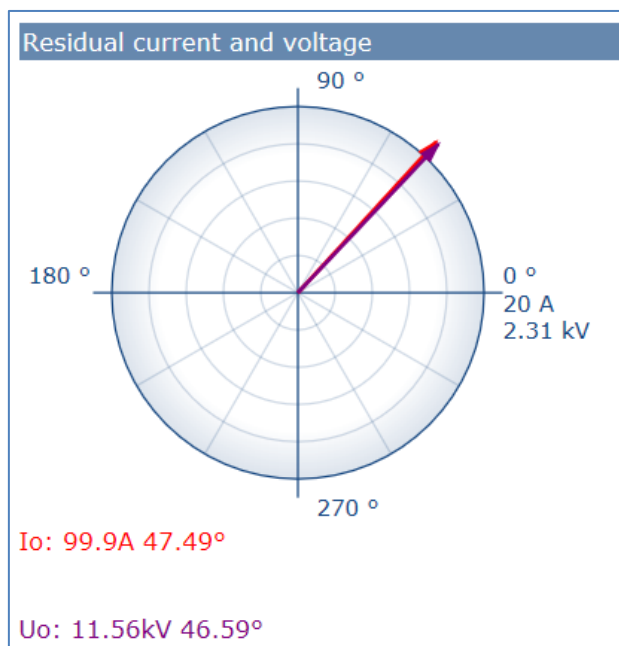


Figure 27. WebHMI showing measured I_o and measured U_o in arbitrary angle.

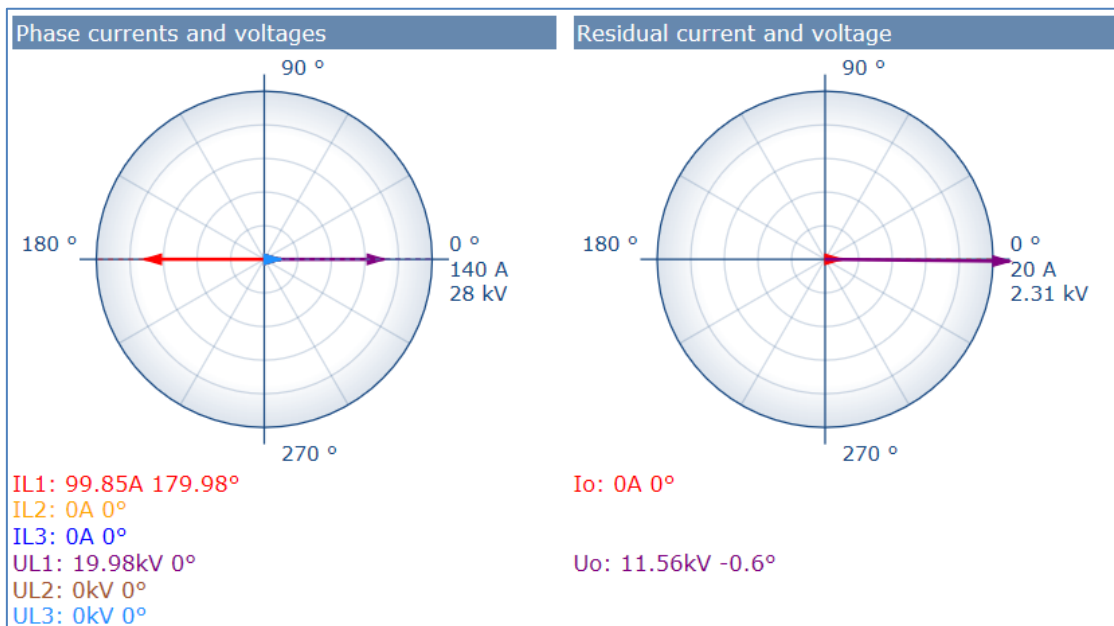


Figure 28. WebHMI showing calculated I_o (I_1) and measured U_o in opposite angle, relay sees U_o -calculated I_o angle as 0 deg.

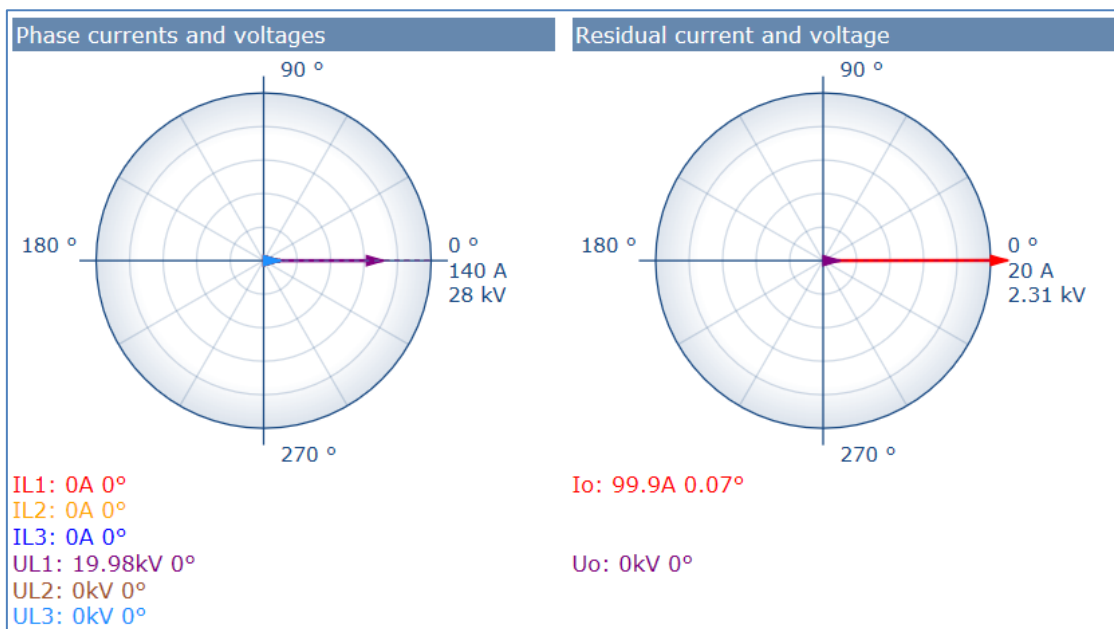


Figure 29. WebHMI showing measured I_o and calculated U_o (U_1) in same phasor angle, relay sees I_o -calculated U_o angle as 0 deg.

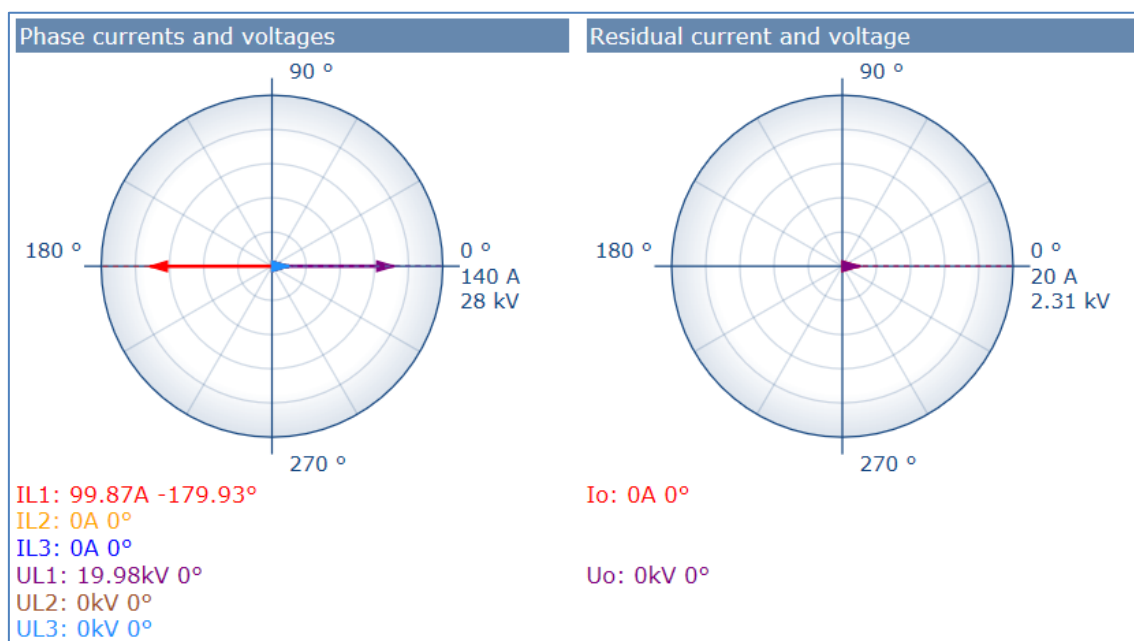


Figure 30. WebHMI showing calculated I_o (I_1) and calculated U_o (U_1) have opposite angle, relay sees calculated I_o -calculates U_o angle as 0 deg.

For unearthed network the phasor diagrams should be as the figure 31.

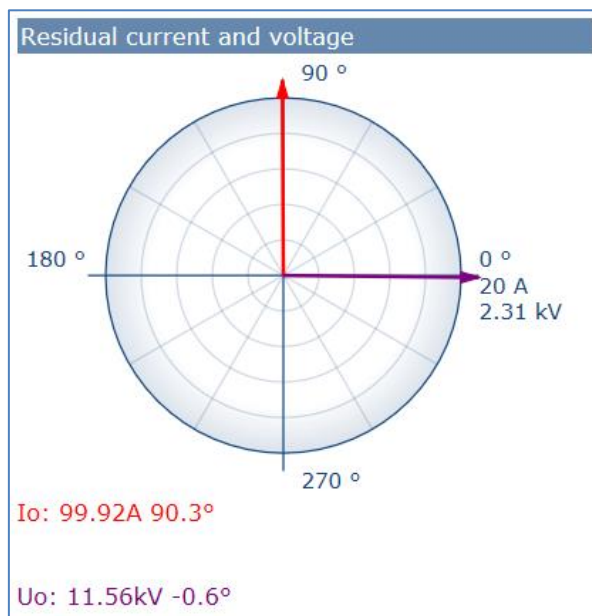


Figure 31. WebHMI showing I_o and U_o in faulty feeder of unearthed network. I_o is leading U_o .

- i** Note if the measurement haven't phase reference the phasor diagrams can show arbitrary angle, see figure 32.

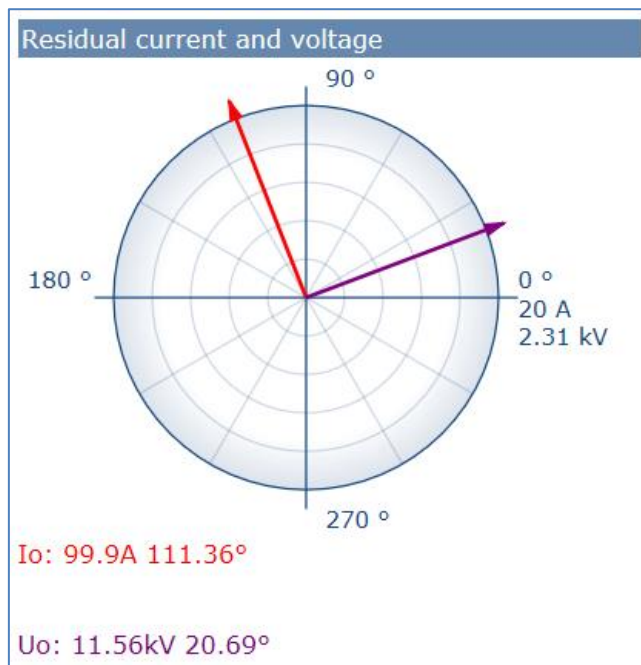


Figure 32. WebHMI showing I_o and U_o in faulty feeder of unearthed network in arbitrary angle.

5.2 Disturbance recording

To verify by using the disturbance recording files, the current and voltage magnitudes wave polarity should be as shown in the following figures.

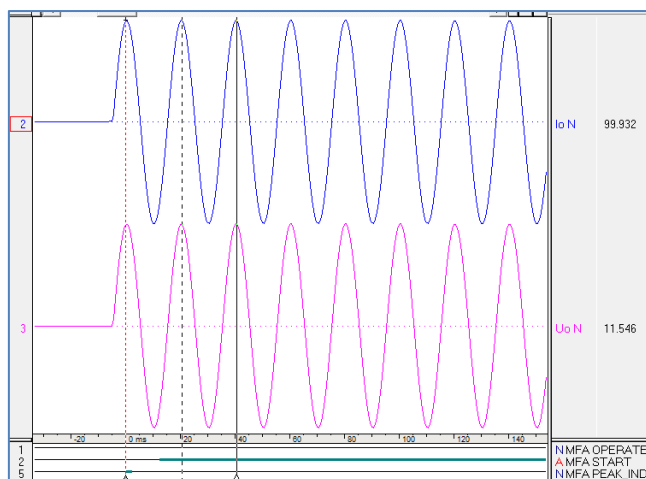


Figure 33. Measured I_o and measured U_o have same polarity in the DR file, relay sees U_o - I_o angle as 0 deg.

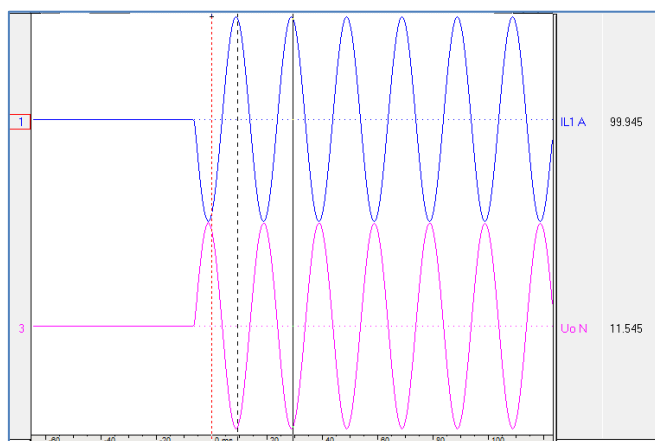


Figure 34. Calculated I_o (I_1) and measured U_o have opposite polarity in the DR file, relay sees U_o -calculated I_o angle 0 deg.

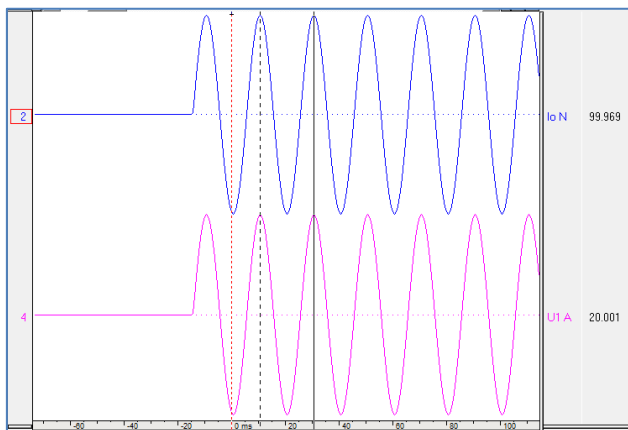


Figure 35. Measured I_o and calculated U_o ($U1$) have same polarity in the DR file, relay sees I_o -calculated U_o angle 0 deg.

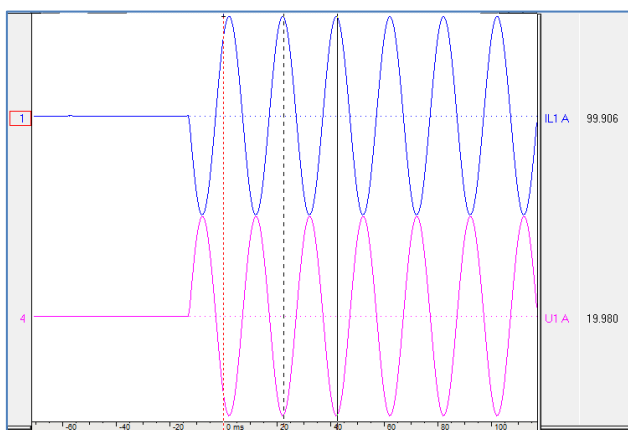


Figure 36. Calculated I_o ($I1$) and calculated U_o ($U1$) have opposite polarity in the DR file, relay sees calculated I_o -calculates U_o angle 0 deg.

For unearthed network the disturbance recording files should be as the following figure.

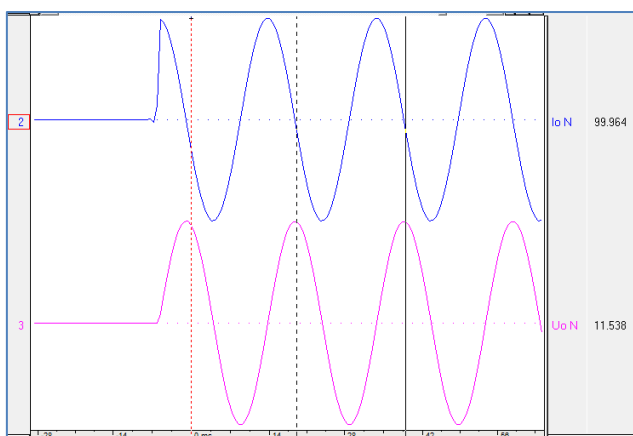


Figure 37. I_o and U_o in faulty feeder of unearthed network. I_o is leading U_o .

Document revision history

Document revision/date	History
A / 14 November 2017	First revision

Disclaimer and Copyrights

The information in this document is subject to change without notice and should not be construed as a commitment by ABB Oy. ABB Oy assumes no responsibility for any errors that may appear in this document.

In no event shall ABB Oy be liable for direct, indirect, special, incidental or consequential damages of any nature or kind arising from the use of this document, nor shall ABB Oy be liable for incidental or consequential damages arising from use of any software or hardware described in this document.

This document and parts thereof must not be reproduced or copied without written permission from ABB Oy, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor used for any unauthorized purpose.

The software or hardware described in this document is furnished under a license and may be used, copied, or disclosed only in accordance with the terms of such license.

Copyright © 2017 ABB Oy

All rights reserved.

Trademarks

ABB is a registered trademark of ABB Group. All other brand or product names mentioned in this document may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.

Contact information

ABB Oy, Medium Voltage Products
P.O.Box 699
Visiting address: Muottitie 2A
FI-65101 Vaasa, FINLAND
Phone: +358 10 22 11
Fax: +358 10 22 41094

<http://new.abb.com/substation-automation>



Technical Note

1MRS758886 EN

ABB Oy, Medium Voltage Products

Issued: Dec 2017

Revision: A / 20 Dec 2017

Testing Multi-Frequency Admittance-Based Protection Function MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Contents:

1	Scope	2
2	Introduction	3
3	Secondary testing, GENARAL EF and ALARMING EF modes.....	5
3.1	Voltage start value	6
3.2	Min operate current	9
3.3	Tilt angle.....	11
3.4	Operate delay time.....	15
4	Secondary testing, INTERMITTENT EF mode.....	17
4.1	Introduction of intermittent earth-fault.....	17
5	Secondary testing with intermittent fault recordings	19
6	Reference list	24
Appendix 1: Min operate current.....		25
Appendix 2: Tilt angle.....		27
Appendix 3: MFADPSDE accuracies		29
Document history, Disclaimer and Copyrights, Trademarks, Contact information....		30

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

1 Scope

The present document describes how to test Multi-frequency admittance-based protection MFADPSDE with Omicron secondary injection test device. This document is intended for persons who already have basic information and some experience on testing directional earth-fault protection.

First, guidelines are given which parameters should be tested when the MFADPSDE use used in the GENARAL_EF or ALARMING_EF-mode. Then, the correct way to test those parameters (*Voltage start value*, *Min operate current*, *Tilt angle* and *Operate delay time*) are presented with illustrative examples.

Finally, guidelines on how to test and verify MFADPSDE capability of detecting intermittent earth fault in both GENARAL_EF and INTERMITTENT_EF- mode are described.

The given rules in this document are applicable for 615, 620 and 630 series protection relays and RIO600 remote I/O device.

KEYWORDS: directional earth-fault protection, secondary test, intermittent earth fault, admittance protection.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

2 Introduction

The multi-frequency admittance-based earth-fault protection function MFADPSDE provides selective directional earth-fault protection for high-impedance earthed networks, that is, for compensated, unearthed and high resistance earthed systems. It can be applied for the earth-fault protection of overhead lines and underground cables.

The multi-frequency admittance protection provides reliable protection against all types of earth faults in a single function, including intermittent and transient earth-faults, and also earth faults with higher fault resistance value.

Based on practical experience of studying the earth-fault protection challenges in practical compensated distribution networks, the residual quantities measured by earth-fault protection are very seldom pure sinusoidal, but they are characterized by ever increasing share of harmonics. Also faults have very often intermittent characteristics, and so the exact waveforms of residual quantities cannot be predicted beforehand.



In this document the Omicron secondary test device have been used, but the guidelines are applicable for any secondary test device if they have same features as Omicron.

Table 1 shows for which of the MFADPSDE settings a testing guidelines are presented in this document. Some settings will become tested automatically as otherwise the function will not work (for example if direction is set to reverse). It is expected that the reader have basic understanding on how to test directional earth-fault protection and can adapt the given guidelines.

Table 1. MFADPSDE settings.

Setting	Guidelines are given	Comment
<i>Operation mode</i>	Yes	
<i>Io signal Sel</i>	No	The document explains testing when using “Measured Io”, see reference /1/ for guidelines for testing when using “Calculated Io”
<i>Uo signal Sel</i>	No	The document explains testing when using “Measured Uo”, see reference /1/ for guidelines for testing when using “Calculated Uo”
<i>Peak counter limit</i>	Yes	
<i>Start delay time</i>	No	Can be measured in same way as the <i>Operate delay time</i>
<i>Reset delay time</i>	Yes	Normally reset delay time is not measured, if set too short, this may result to delayed or no-operation in intermittent tests

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

<i>Pol reversal</i>	No	Assumed to be “False”.
<i>Directional mode</i>	No	Assumed to be “Forward”
<i>Operating quantity</i>	No	Test procedures apply when set for “Adaptive”. The “Amplitude” is used only in unearthed networks, see relay technical manual for detailed information.
<i>Voltage start value</i>	Yes	
<i>Min operate current</i>	Yes	
<i>Tilt angle</i>	Yes	
<i>Operate delay time</i>	Yes	

3 Secondary testing, GENARAL EF and ALARMING EF modes

There are basically four important settings defining the operation of the MFADPSDE function when used to detect a single-phase earth faults (*Operation mode* = General EF or Alarming EF):

1. *Voltage start value:*
 - Defines the basic sensitivity of MFADPSDE. This value must always be set to a value which exceeds the maximum healthy-state zero-sequence voltage value, and taking into consideration of possible network topology changes, compensation coil and parallel resistor switching status and compensation degree variations.
2. *Min operate current:*
 - This setting is used to supervise the directional element of MFADPSDE. I.e. the fault direction determination requires current I_0 to be high enough.
3. *Tilt angle:*
 - Compensates for phase displacement error of CT and VT; recommendation for setting: 5...10 deg. The *Tilt angle* defines the tilting of the operation sector in the admittance plane.
4. *Operate delay time:*
 - Defines the operate time of the MFADPSDE. Not effective in the ALAMING EF-mode.

An example of MFADPSDE settings is presented in Figure 1.

-  Operation mode “General EF” is applicable in all kinds of earth faults in unearthed and compensated networks. It is intended to detect all kinds of earth faults regardless of their type (transient, intermittent or re-striking, permanent, high or low ohmic). The setting *Voltage start value* defines the basic sensitivity of the MFADPSDE function.
-  Operation mode “Alarming EF” is applicable in all kinds of earth faults in unearthed and compensated networks, where fault detection is only alarming.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

REF620 - Parameter Setting					
Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ MFADPSDE1: 1					
✓ Io->Y(1)					
✓ Operation	on	on			
✓ Operation mode	General EF	General EF			
✓ Io signal Sel	Measured Io	Measured Io			
✓ Uo signal Sel	Measured Uo	Measured Uo			
✓ Peak counter limit	2	2		2	20
✓ Start delay time	500	500	ms	30	60000
✓ Reset delay time	30	30	ms	0	60000
✓ Pol reversal	False	False			
✓ Setting Group 1					
✓ Directional mode	Forward	Forward			
✓ Operating quantity	Adaptive	Adaptive			
✓ Voltage start value ①	0.20	0.20	xUn	0.01	1.00
✓ Min operate current ②	0.010	0.010	xIn	0.005	5.000
✓ Tilt angle ③	5.0	5.0	deg	2.0	20.0
✓ Operate delay time ④	500	500	ms	60	120000

Figure 1. Example of MFADPSDE parameter setting.

3.1 Voltage start value

Before testing the relay, rated secondary voltage U_n must be known. This is because the *Voltage start value* –setting in the 615 and 620 relays is given as multiple of this [xU_n]. Figure 2 shows an example of U_o input setting. Reference /1/ gives more detailed information of the settings, also for 630 relay settings, or when using calculated U_o .

REF620 - Application Configuration REF620 - Parameter Setting					
Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ Voltage (Uo,VT): 1					
✓ Voltage (Uo,VT)					
✓ Primary voltage		11.547	kV	0.100	440.000
✓ Secondary voltage		100	V	60	210
✓ Amplitude Corr		1.0000		0.9000	1.1000
✓ Angle correction		0.0000	deg	-20.0000	20.0000

Figure 2. Example of voltage settings for measured U_o -channel (U_o , VT).

For testing *Voltage start value* –setting, either Omicron Quick CMC or Ramping tool can be used. The Ramping tool is recommended as it can be used for automating the test.

i Note: when using Quick CMC, voltage is increased incrementally and slowly.

i Note: relay input voltage withstand values should not be exceeded, see figure 3 as an example.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Voltage inputs	Rated voltage	60...210 V AC
	Voltage withstand:	
	- Continuous - For 10 s	240 V AC 360 V AC
	Burden at rated voltage	<0.05 VA

Figure 3. Voltage inputs technical data in 615/620 relays.

Using Ramping -tool

Follow the next steps when using ramping tool:

- Inject nominal residual current (I_o), or at least *Min operate current*.
- Set angle between current I_o and voltage U_o to 0 deg.
- Ramp up the residual voltage (U_o) until protection function starts/operates

When U_o magnitude exceeds setting *Voltage start value*, the protection will START after set *Start delay time* and OPERATE after set *Operate delay time*. Note that both times begins when fault is detected. For example if both *Start delay time* and *Operate delay time* are set for 500ms, protection will start and operate at the same time. The factory default value for Start delay time = 30ms is recommended in practice.

Example:

Relay is set:

- U_n is 100V in secondary
- *Voltage start value* is $0.2 \times U_n$
- *Start delay time* is 500ms

Setting $0.2 \times U_n$ is $0.2 \times 100V = 20V$ in secondary. I.e. this is the expected voltage value at which relay should start/operate.

Figure 4 shows example of “Ramp 1” settings, where voltage ramp is from 0 to 100 V with step-up voltage delta 50 mV and step-up time (dt) 550 ms. Figure 5 shows result of the ramp test, where voltage has been increased until protection starts/operates.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

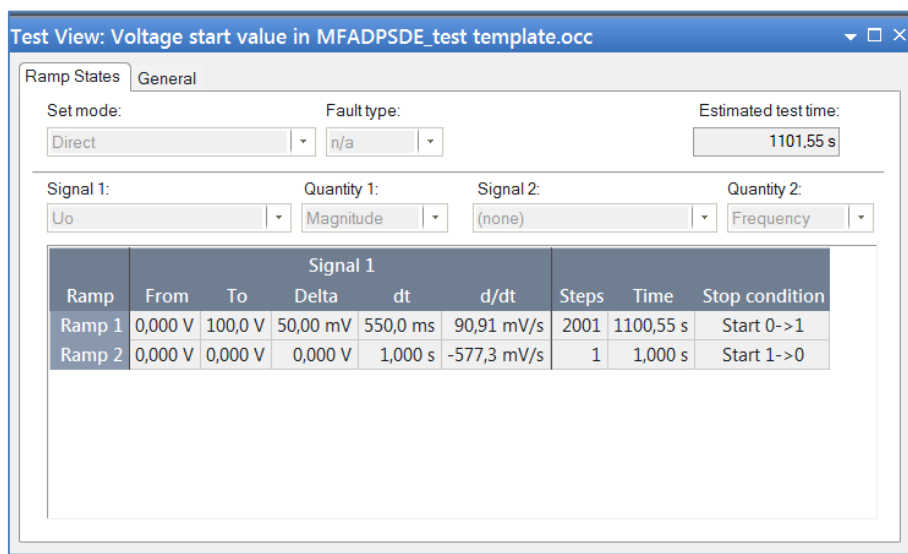


Figure 4. Ramp 1 settings.

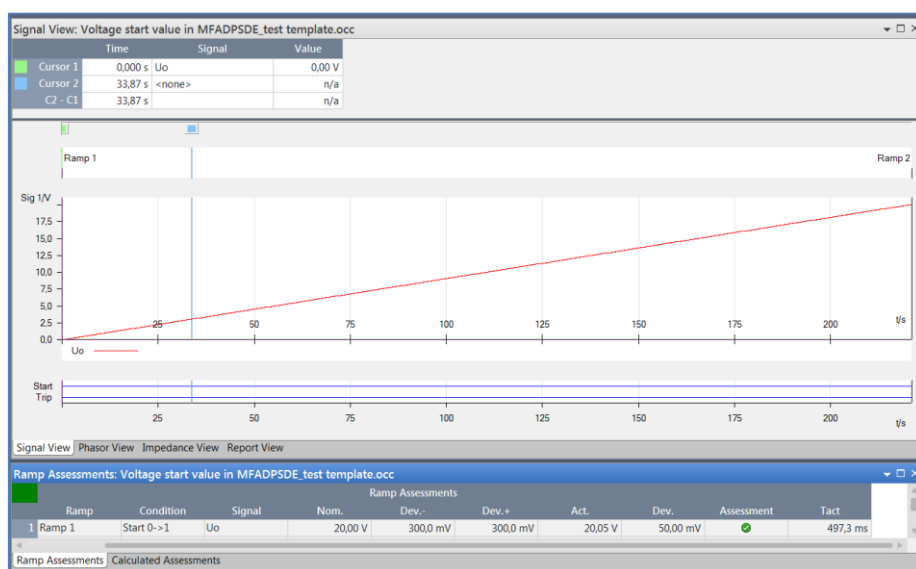


Figure 5. Voltage ramp-up during test.

-  Note: in figure 4 voltage was set to begin from zero, in practise value for example 80% of the *Voltage start value* –setting can be used for making testing faster.
-  Note: ramp step-up time (dt) must be higher than MFADPSDE *Start delay time* –setting assuming that the protection START is connected to stop Omicron test.
-  Note: A small value should be used for the ramp step-up voltage (delta) as it defines the accuracy of the test result. The MFADPSDE function accuracy is 1.5% of the setting or 0.002 xUn, whichever is higher (see figure 6). Therefore, if the *Voltage start value* -setting is for example 0.2 xUn, the accuracy is $0.2 \times 0.015 = 0.003 \text{ xUn}$ and step-up voltage should preferable be set at least 10 times smaller, i.e. 0.0003 xUn.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Characteristic	Value
Operation accuracy	Depending on the frequency of the measured voltage: $f_n \pm 2 \text{ Hz}$
	$\pm 1.5\%$ of the set value or $\pm 0.002 \times U_n$

Figure 6. MFADPSDE operation accuracy.

3.2 Min operate current

In same way as in voltage, the rated secondary current must be known. Figure 7 shown an example for (Io, CT) parameter setting in 615/620 relay:

REF620 - Parameter Setting					
Group / Parameter Name	IED Value	PC Value	Unit	Min	Max
✓ Current (Io,CT): 1					
✓ Current (Io,CT)					
✓ Primary current		100.0	A	1.0	6000.0
✓ Secondary current		1A			
✓ Amplitude Corr		1.0000		0.9000	1.1000
✓ Reverse polarity		False			
✓ Angle correction		0.0000	deg	-20.0000	20.0000

Figure 7. Example of Io channel CT settings (Io, CT).

The *Min operate current* –setting is valid only when residual voltage U_o equals to the nominal voltage. In case of injecting any other voltage than nominal, the injected current must be adjusted due to admittance based calculation of *Min operate current* threshold:

$$I_{o \text{ threshold}} = \frac{\bar{U}_{o \text{ CPS}}^1}{U_{PE}} \times \text{Min operate current}$$

where

$I_{o \text{ threshold}}$ is the expected current value, at which protection operates. This matches setting value *Min operate current* taking into account the admittance based calculation

$\bar{U}_{o \text{ CPS}}^1$ is accumulated fundamental frequency residual voltage phasor (in practice: injected residual voltage), and

U_{PE} is the system nominal phase-to-earth voltage value (U_n).



Note: in addition, current must always exceed 1% of relay rated secondary current.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

MFADPSDE uses ABB's patented phasor calculation concept called as "Cumulative Phasor Summing" or CPS. The accumulation of phasors results into unique filtering effect to the oscillating discrete DFT-phasors. This results in certain time delay to reach the final value of operation quantity, when testing minimum operation current threshold. This is especially the case if current amplitude is slowly increased to final value.



Note: in *Min operate current* testing the voltage U_o must drop to zero between each step-up for resetting the cumulative phasor summing (CPS). Otherwise, the cumulated history will make relay to see current smaller than what it is in each step.

This is the reason why Pulse ramping tool is recommended. If Quick CMC would be used, it would end up current value somewhat higher than the real setting, unless injection is cut for short time (over *Reset delay time* –setting).

Test with pulse ramping

For testing with pulse ramping tool follow the next steps:

- Inject nominal residual voltage (U_o), or at least *Voltage start value*.
- Set angle between current I_o and voltage U_o to 0 deg.
- Pulse-ramp up the residual current (I_o) until protection function starts/operates.

Example:

Relay is set:

- I_n is 1A in secondary
- *Min operate current* is $0.02 \times I_n$
- *Start delay time* is 500ms
- *Reset delay time* is 30ms
- $U_{PE} = \bar{U}_{o\,CPS}^1 = 100V$ (i.e. injected U_o equals nominal voltage)

Setting *Min operate current* = $0.02 \times 1A = 20mA$, this the expected current value for relay to operate.

$$I_{o\,threshold} = \frac{100V}{100V} \times 20mA = 20mA$$

Figure 8 shows pulse ramp settings, starting from 0 to 400 mA with step-up current 1 mA, reset time 550 ms and fault time 1 s. Figure 9 shows test results.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

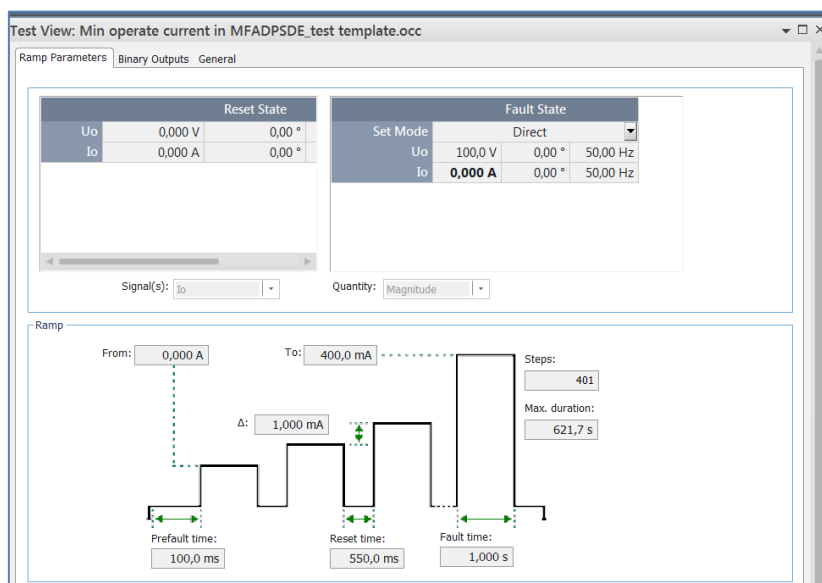


Figure 8. Current ramp settings.

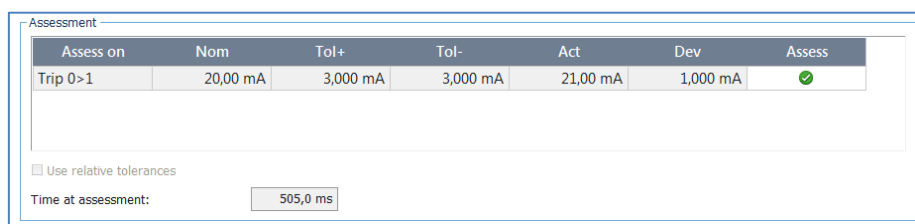


Figure 9. Test result.

-  Note: in figure 8 example case, current was set to begin for zero, in practise value for example 80% of settings makes testing faster.
-  Note: the “Reset time” in ramp settings should be 50ms higher than the MFADPSDE *Reset delay time* -setting, and the ramp step-up current delta should be 1mA.
-  Note: if testing with voltage not nominal or current angle not zero, then previous example results does not apply. See appendix 1 for details.

3.3 Tilt angle

The operation characteristic of MFADPSDE is defined by tilted operation sector as illustrated in figure 10. The characteristic provides universal applicability, that is, it is valid both in compensated and unearthen networks, also if the compensation coil is temporarily switched off. The tilt of the operation sector is defined with setting *Tilt angle* to compensate the measurement errors of residual current and voltage transformers. The typical setting value of 5 degrees is recommended, but it should always reflect the actual maximum expected measurement errors.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

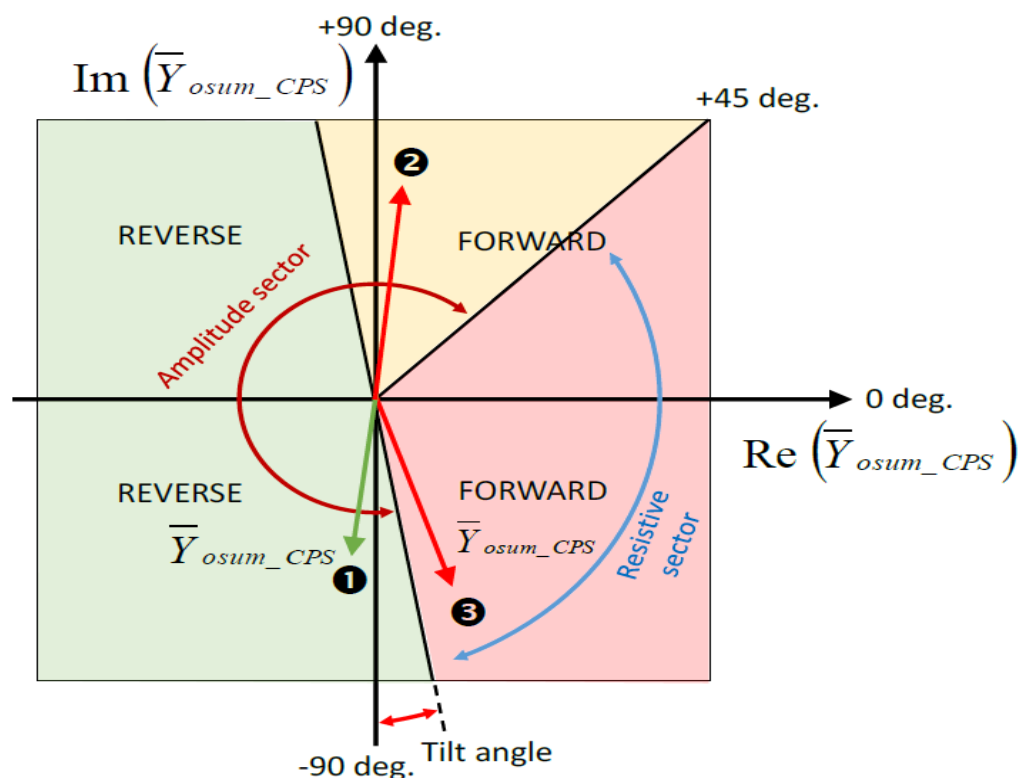


Figure 10. Illustration of the directional characteristics of the MFADPSDE.

i Exactly as in testing the *Min operate current*, also the *Tilt angle* should be tested only with pulse ramping tool because of the cumulative phasor summing (CPS).

Using pulse ramping

For testing by using pulse ramping tool follow the next steps:

- Inject nominal residual voltage and current
- Pulse-ramp the angle between current and voltage stating from no-operation angle towards the operating zone until protection function starts/operates.

Example for testing *Tilt angle* -setting at positive phase angle of the characteristics:

Relay set as:

- In is 1A in secondary
- Un is 100V in secondary
- *Tilt angle* is 5 deg → expected result +95 deg.
- *Start delay time* is 500 ms

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Figure 11 shows pulse ramp settings, start from 120 to -90 deg. with step-up angle -1 deg., reset time 550 ms and fault time 1 s. Figure 12 shows test result.

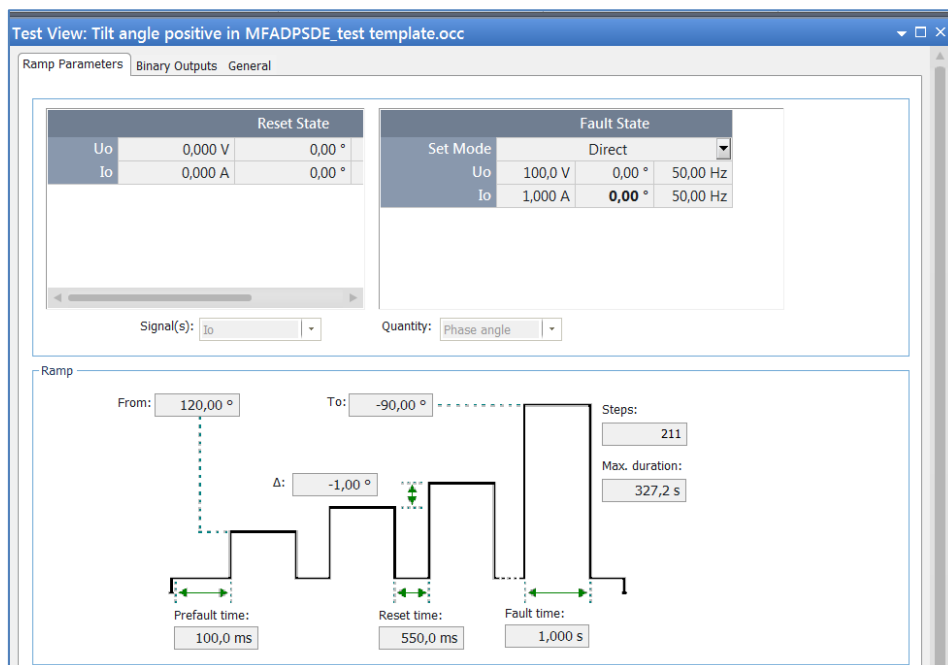


Figure 11. Angle ramp settings.

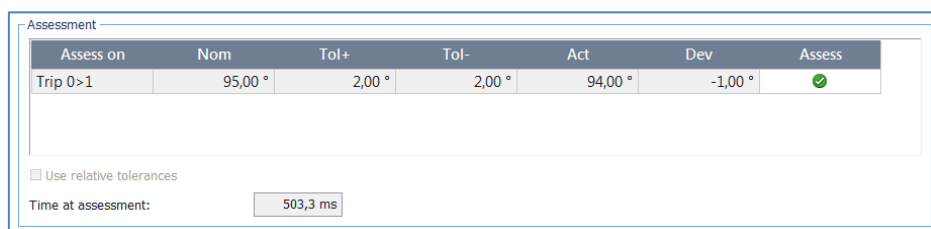


Figure 12. Test result.

Example for testing “tilt angle” setting at negative phase angle of the characteristics:

Relay set as:

- In is 1A in secondary
- Un is 100V in secondary
- Tilt angle is 5 deg → expected result -85 deg.
- Start delay time is 500 ms

Figure 13 shows pulse ramp settings, start from -100 to 90 deg. with step-up angle -1 deg., reset time 550 ms and fault time 1 s. Figure 14 shows test result.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

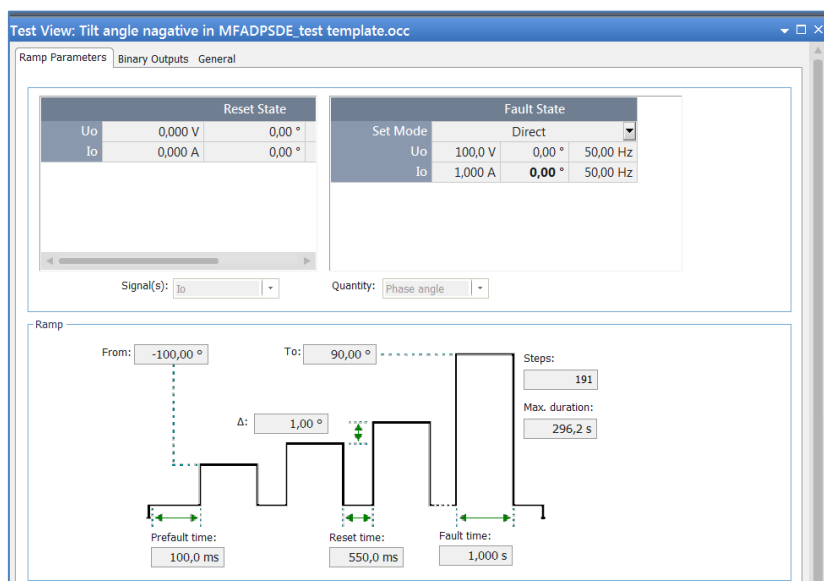


Figure 13. Angle ramp settings.

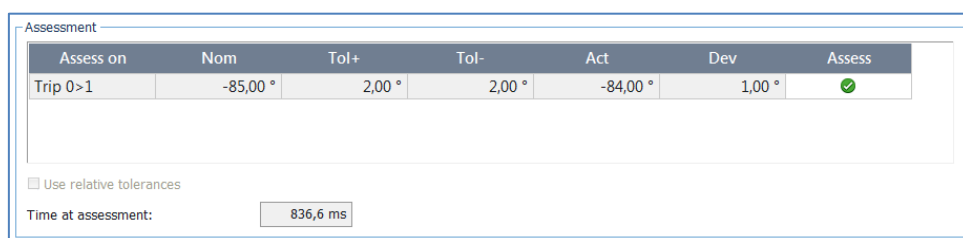


Figure 14. Test result.



Note: the *Start delay time* –setting should preferably be at least 500ms. This due the fact that when current is switched ON, it causes 1 cycle time fluctuation in the relay DFT based phase angle calculation and results to temporary protection start in case too short *Start delay time* is used. See Appendix 2 for full details.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

The phase angle of sum admittance phasor applied in MFADPSE can be monitored from Monitored data of MFADPSDE (see figure 15):

→ MFADPSDE1 → Monitored data → ANGLE

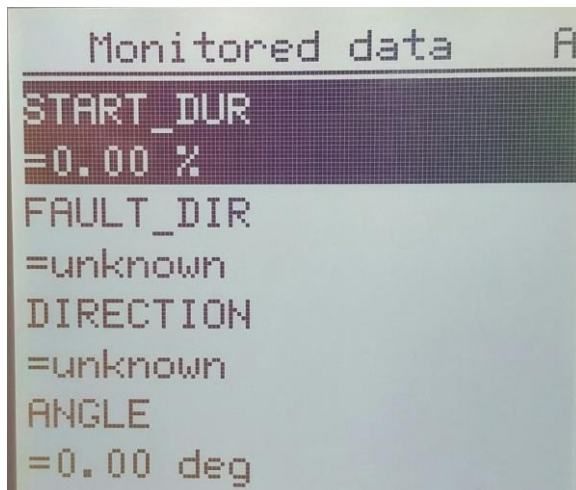


Figure 15. MFADPSDE1 / Monitored data / ANGLE.

Note that this is a cumulative phase angle, i.e. if angle is changed without of resetting CPS in between, the shown value does not necessary equal to the angle of injected current and voltage due to inherent slowness created by the Cumulative Phasor Summing.

3.4 Operate delay time

i Note: When using ALARMING EF-mode the function will only start, but not operate. Therefore, in this mode, the *Operate delay time* is not tested.

For testing *Operate delay time* -setting use state sequencer test tool and follow the next steps:

- State 1:
 - Inject nominal voltage
 - Io-Uo angle 0 deg.
 - Trigger is 1s for example.
- State 2:
 - Inject nominal voltage
 - Inject nominal current
 - Io-Uo angle 0 deg.
 - Trigger (time of state 2) must be higher than MFADPSDE *Operate delay time*.
- State 3:
 - Inject nominal voltage
 - Io-Uo angle 0deg.
 - Trigger is 1s for example.

Figure 16 shows example settings for State sequencer. Figure 17 and 18 shows test results.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Table View: State Sequencer in MFADPSDE_test template.occ									
	1			2			3		
Name	State 1			State 2			State 3		
U _o	100,0 V	0,00 °	50,000 Hz	100,0 V	0,00 °	50,000 Hz	100,0 V	0,00 °	50,000 Hz
I _o	0,000 A	0,00 °	50,000 Hz	1,000 A	0,00 °	50,000 Hz	0,000 A	0,00 °	50,000 Hz
Trigger		1,000 s			1,000 s			1,000 s	

Figure 16. State sequencer settings.

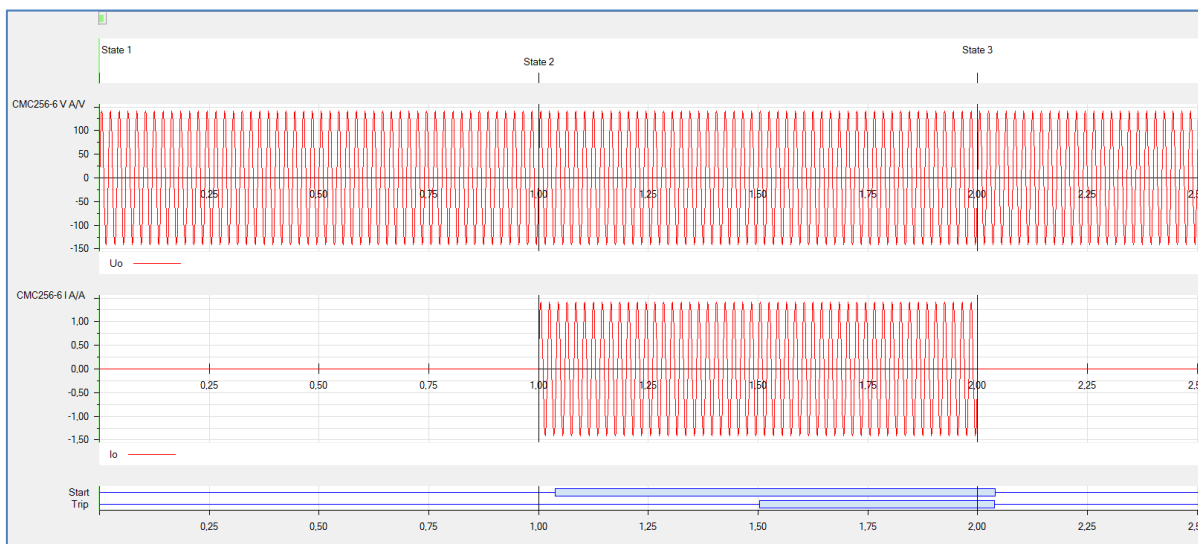


Figure 17. Time signal view.

Time Assessments: State Sequencer in MFADPSDE_test template.occ									
	Name	Ignore before	Start	Stop	Tnom	Tdev-	Tdev+	Tact	Tdev
1	Operate time		State 2	Trip 0>1	500,0 ms	20,00 ms	20,00 ms	503,2 ms	3,200 ms

Figure 18. Test result.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

4 Secondary testing, INTERMITTENT EF mode

When the MFADPSDE is used in the INTERMITTENT EF mode, it is recommended to first set for GENERAL EF mode and test the *Voltage start value*, *Min operate current* and *Tilt angle* as described earlier in this document. Then mode is changed back to INTERMITTENT EF and function can be tested with intermittent earth-fault test recordings, as described in the next section (section 5).

If required, it can be tested that operation mode is INTERMITTENT EF by just injecting nominal current and voltage at 0 deg angle. In the intermittent mode, the function will not operate for this kind of “basic” earth-faults.

4.1 Introduction of intermittent earth-fault

Intermittent earth fault is a special type of fault that is encountered especially in compensated networks with underground cables. A typical reason for this type of fault is the deterioration of cable insulation either due to mechanical stress or due to insulation material aging process where water or moisture gradually penetrates the cable insulation. This eventually reduces the voltage withstand of the insulation, leading to a series of cable insulation breakdowns. The fault is initiated as the phase to-earth voltage exceeds the reduced insulation level of the fault point and mostly extinguishes itself as the fault current drops to zero for the first time, as shown in figure 19. As a result, very short transients, that is, rapid changes in the form of spikes in residual current (I_o) and in residual voltage (U_o), can be repeatedly measured. Typically, the fault resistance in case of an intermittent earth fault is only a few ohms.

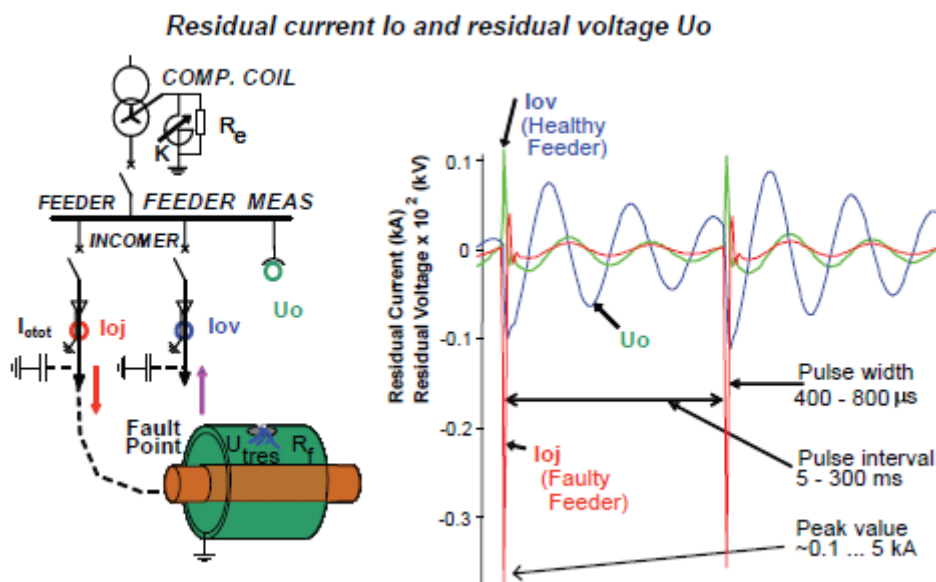


Figure 19. Typical intermittent earth-fault characteristics.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

MFADPSDE is capable of detecting faults with dominantly fundamental frequency content as well as transient, intermittent or re-striking earth faults

The “Transient detector module” in MADPSDE is used for detecting transients in the residual current and zero-sequence voltage signals. Whenever transient is detected, this is indicated with the PEAK_IND output. When the number of detected transients equals or exceeds the *Peak counter limit* -setting (without the function being reset, depending on the *Reset delay time* -setting), INTR_EF output is activated. This indicates detection of re-striking or intermittent earth fault in the network. Transient detector affects the operation of MFADPSDE (START and OPERATE outputs) when operation mode is “Intermittent EF”. For other operation modes, (“General EF”, “Alarming EF”), PEAK_IND and INTR_EF outputs can be used for monitoring purposes. The operation of the Transient detector is illustrated in figure 20.

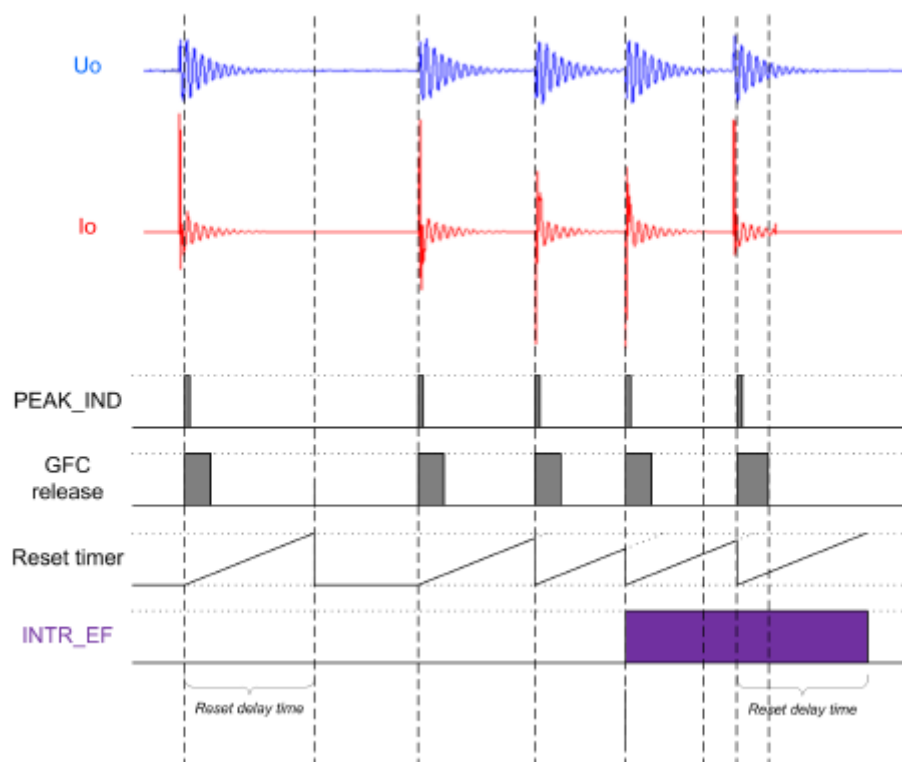


Figure 20. Example of operation of Transient detector: indication of detected transient by PEAK_IND output and detection of re-striking or intermittent earth fault by INTR_EF output (setting Peak counter limit = 3).

5 Secondary testing with intermittent fault recordings

The only valid way to test the MFADPSDE capability of detecting intermittent earth fault is to use disturbance recordings (DR) which has been recorded from real-life intermittent faults. These disturbance recordings, stored in Comtrade format (**C**ommon format for **T**ransient **D**ata **E**xchange for power systems) is played back to current and voltage signals using the Omicron Advanced Transplay tool.

 Note: If Omicron State Sequencer tool would be used, the MFADPSDE most likely will not operate as expected due the fact that real-life transients cannot be simulated accurately with the State Sequencer.

Characteristics of a good DR file for testing

1. Sampling rate must be preferable 5 KHz or higher
2. Fault duration time must be high enough and have enough intermittent peaks for the testing purpose e.g. fault duration time must exceed protection operation delay time
3. It is recommended to have basic background information of the file (CT and VT ratio, network earthing arrangement etc.)

What should be tested?

MFADPSDE capability of detecting intermittent earth fault should be tested as follows:

1. Protection trips correctly when fault is on the correct direction (faulty feeder).
2. Protection does not trip when fault is on the opposite direction (healthy feeder)
3. If the MFADPSDE outputs (BLK_EF, INTR_EF and PEAK_IND) are used in relay configurations, those are recommended to be tested.

 Note: in the following examples, PEAK_IND in the relay configuration was connected to a signal output relay with 10ms pulse timer. Without pulse timer, the activation time of the PEAK_IND is too short for reliable output relay operation.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Importing and scaling a DR-file

First, import the disturbance (DR) file to the Advanced Transplay tool and scale the signal magnitudes (current and voltage) to adapt with relay CT and VT rated secondary. Figure 21 shows from where to import the DR file and figure 22 shows from where the magnitudes can be scaled.

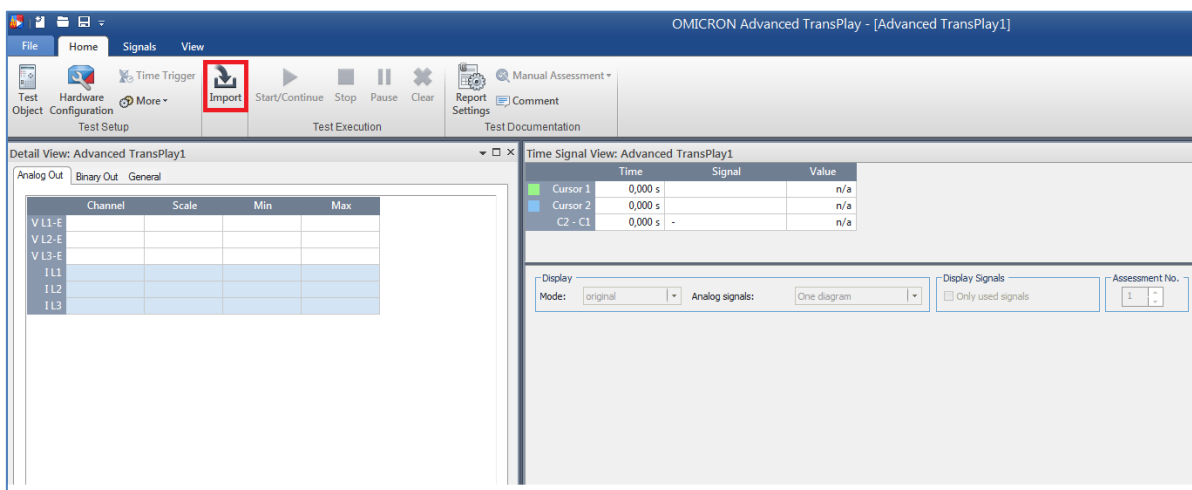


Figure 21. From where to import the DR file.

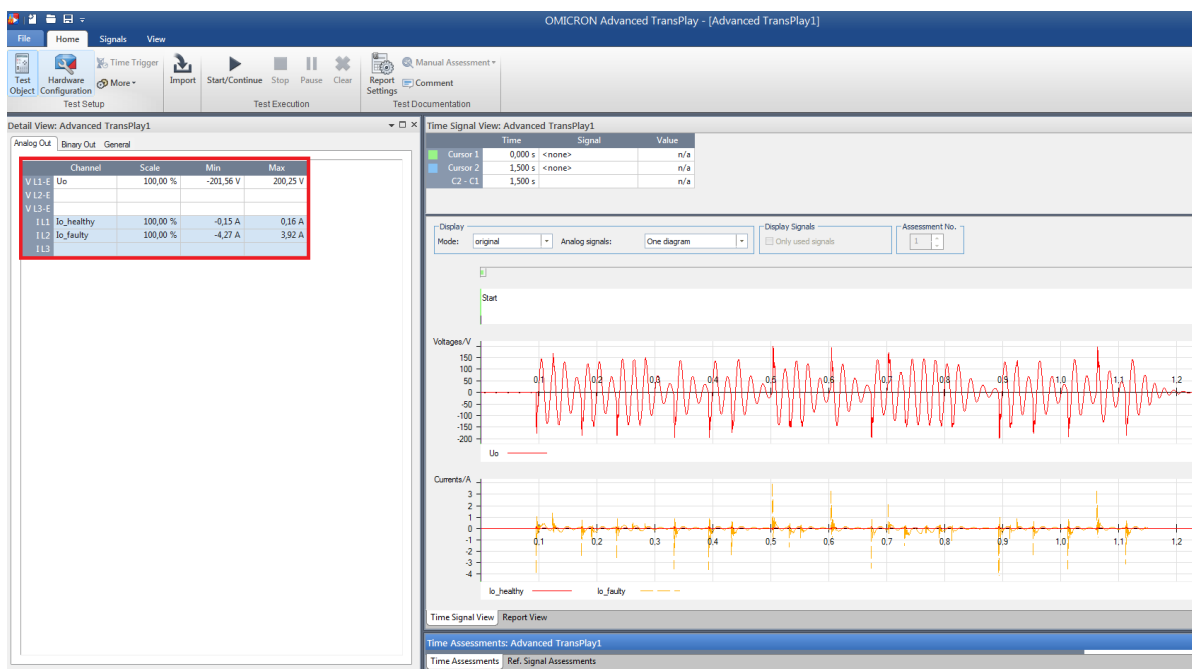


Figure 22. From where the magnitude can be scaled.



Note: if the peak values of the signal exceeds the Omicron output capability, an error message will appear and both signal magnitudes must be decreased with same ratio. For example, if Uo magnitude is decreased to half, also Io magnitude must be decreased to half in order to maintain same admittance.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Example for testing General_EF mode with intermittent earth fault

Test presented earlier in this document can be considered to be enough when using General EF-mode. However, if the operation of the function is required to be tested also by simulating an intermittent fault, then for verifying the correct operation follow the next steps:

1. Check that protection starts and operates when tested with a faulty feeder recording (assuming recording is long enough, and current, voltage etc. settings are exceeded).
2. Check that protection does not start/operate when testing with healthy feeder recording (or faulty feeder recording with opposed current polarity).
3. Function detects peaks (if PEAK_IND output is available).



Note: To keep the operate timer activated between current spikes during the intermittent earth fault, *Reset delay time* should be set higher than the maximum time interval between current peaks. Otherwise, protection can reset between spikes depending on the voltage magnitude. The recommended setting is at least 300 ms.

The operation can be verified from either Omicron time signal view (figure 23) or relay DR file (figure 24).

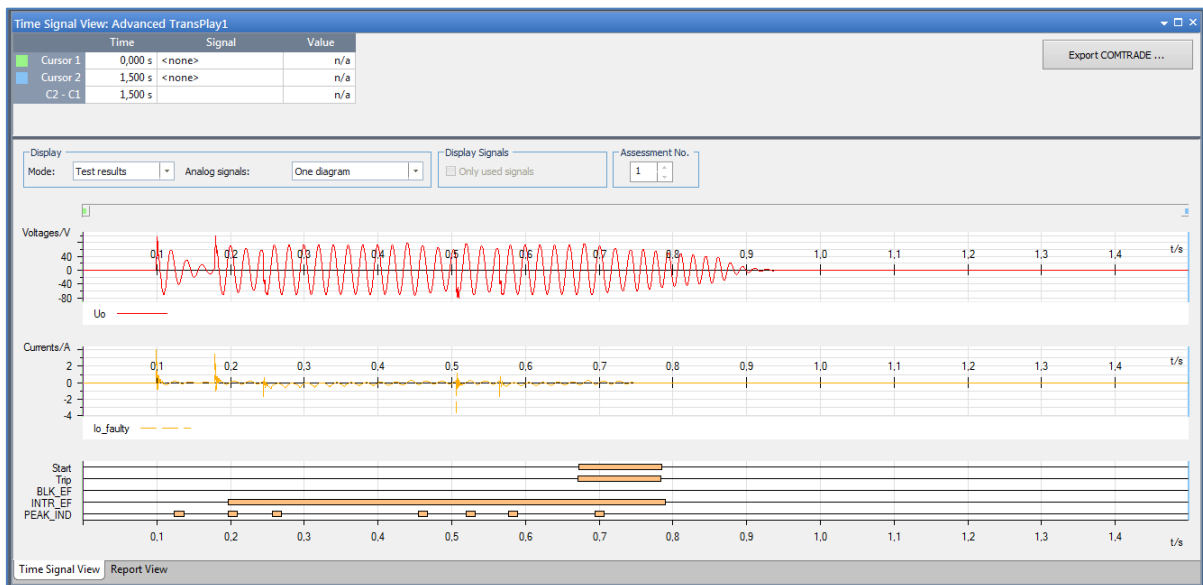


Figure 23. Omicron time signal view.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

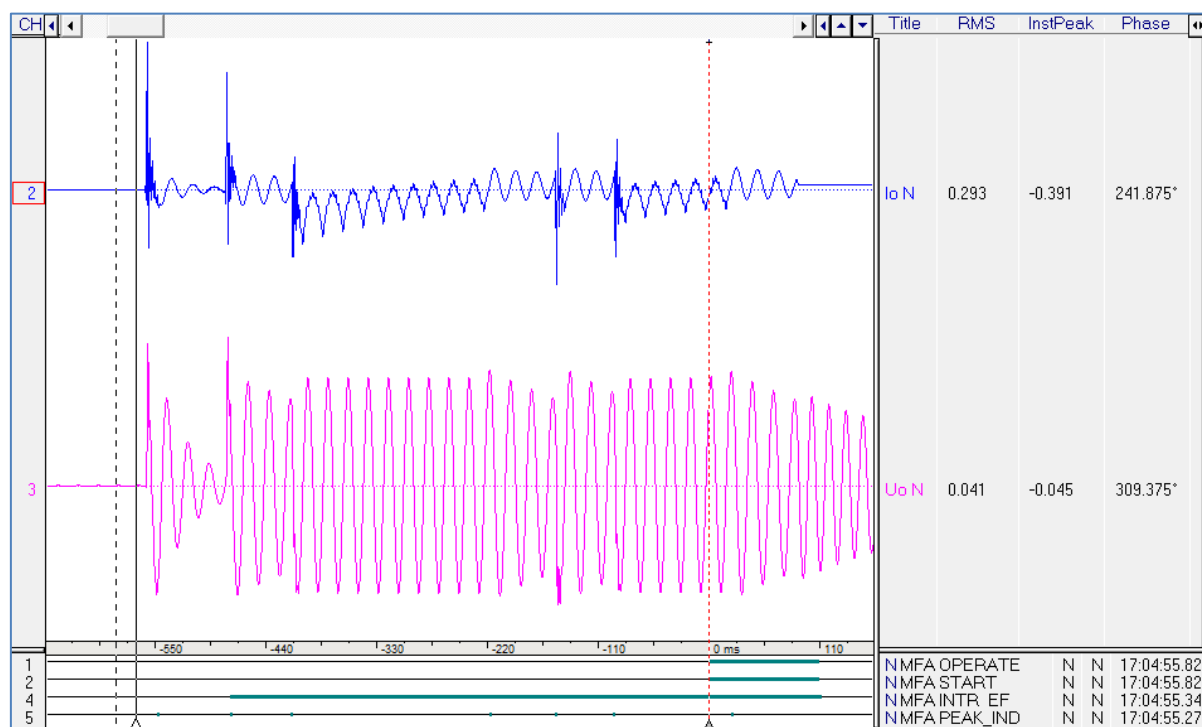


Figure 24. Relay DR file.

Example for testing Intermittent_EF mode with intermittent earth fault

As in General_EF mode import the DR file and scale it. For verifying the correct operation follow the next steps:

1. Check that when protection starts the “INTR_EF activate in the same time.
2. Start and INTR_EF are activated when number of detected peaks equals to “Peak counter limit” setting.
3. Check that protection does not start/operate when testing with healthy feeder recording (or faulty feeder recording with opposed current polarity).



Note: To keep the operate timer activated between current spikes during the intermittent earth fault, *Reset delay time* should be set higher than the maximum time interval between current peaks. The recommended setting is at least 300 ms.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

The operation can be verify from either Omicron comrade (figure 25) or relay DR file (figure 26).

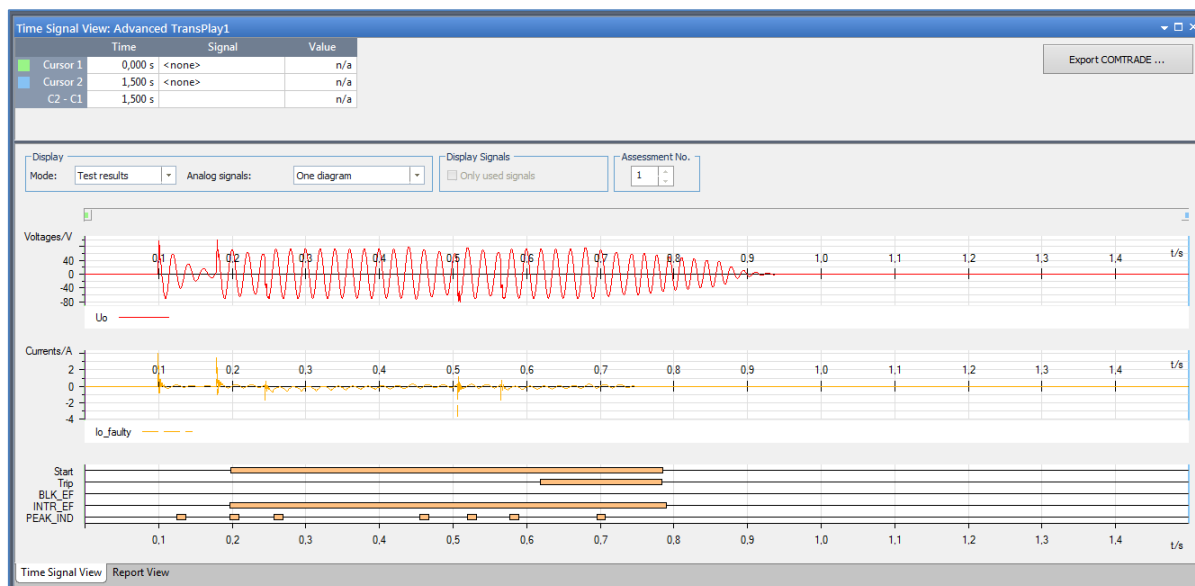


Figure 25. Omicron time signal view.

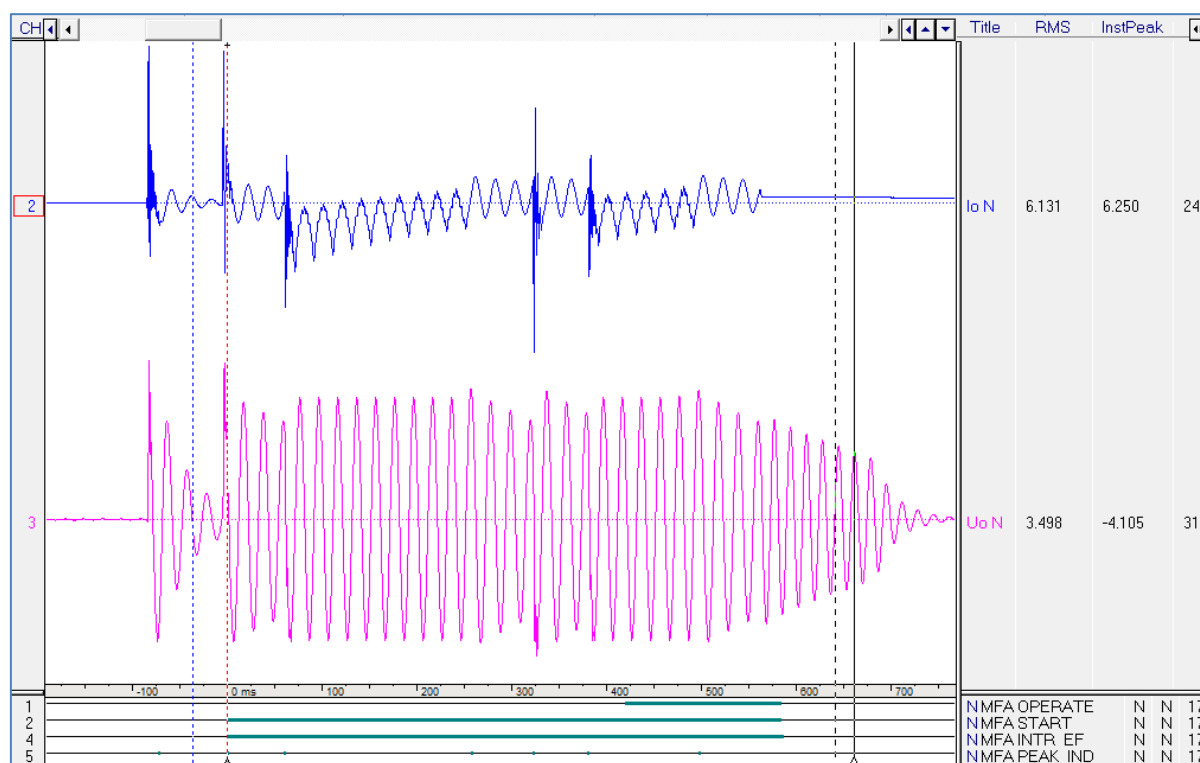


Figure 26. Relay DR file.

6 Reference list

- /1/ 1MRS758885 EN. Relay connections for testing directional earth-fault protection. Technical note. ABB Medium Voltage Products 2017.

Appendix 1. Min operate current

Testing with zero angle

In case of the injected voltage is not nominal but angle between current and voltage is zero, the current threshold can be calculated as follows:

$$I_{o\ threshold} = \frac{\bar{U}_{o\ CPS}^1}{U_{PE}} \times \text{Min operate current}$$

where

$I_{o\ threshold}$ is the expected current value, at which protection operates. This matches setting value *Min operate current* taking into account the admittance based calculation

$\bar{U}_{o\ CPS}^1$ is accumulated fundamental frequency residual voltage phasor (in practice: injected residual voltage), and

U_{PE} is the system nominal phase-to-earth voltage value (U_n).



Note: in addition, current must always exceed 1% of relay rated secondary current.

Example:

$I_n = 1A$ and $U_n (U_{PE}) = 100V$ in secondary

Min operate current is $0.02 \times I_n$

$$I_{o\ threshold} = 0.02 \times 1A = 0.02A$$

Injected voltage is 60V ($\bar{U}_{o\ CPS}^1$)

$$I_{o\ threshold} = \frac{60}{100} \times 0.02 = 0.012A = 12mA$$

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Testing with angle is +45 degree or higher (amplitude area)

When the angle is +45 or higher the function operates based on the amplitude. Therefore, the current threshold is same as when testing at 0 deg.

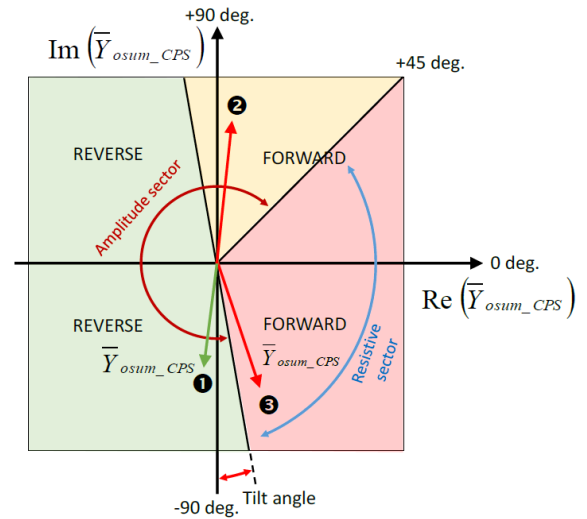
Testing with angle is below +45 degree (resistive area)

If angle is less than +45 degree, the function operates based on the resistive part of the injected current.

The current threshold can be calculated as follows

$$I_{o\ threshold} = \frac{1}{\cos \varphi} \times \frac{\bar{U}_{o\ CPS}^1}{U_{PE}} \times \text{Min operate current}$$

i Note: in addition, current must always exceed 1% of relay rated secondary current.



Example

$I_n = 1A$ and $U_n = 100V$ in secondary

Injected voltage is 100V, angle is -20 deg

Min operate current is $0.02 \times I_n$, i.e. 0.02A in secondary.

$$I_{o\ threshold} = \frac{1}{\cos(-20deg)} \times \frac{100V}{100V} \times 0.02A = 0.0213A$$

i Note: the protection accuracy in the resistive sector, at non-zero angle, is a result of current, voltage and angle measurement accuracies. Especially the accuracy of the angle measurement is significant at higher angle values.

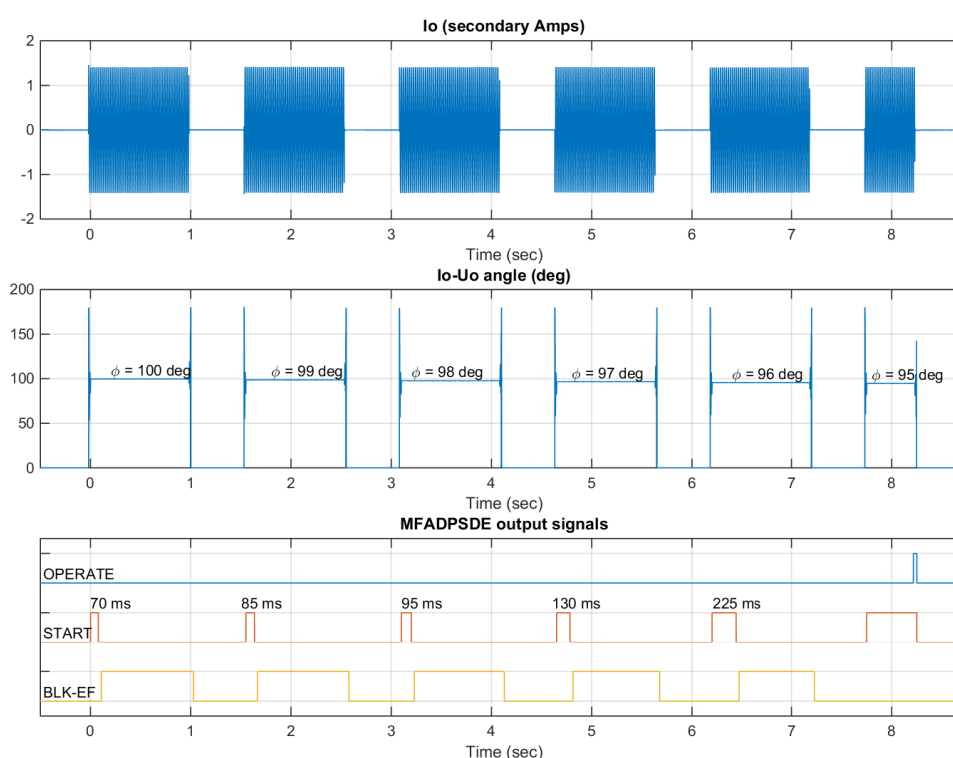
Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

Appendix 2. Tilt angle testing

When the tilt angle is tested by injecting voltage and current to the relay in certain phase angle, then switching on the signals causes 1 cycle time fluctuation in the relay phase angle measurement. I.e. measurement has 1 cycle settling time. This together with the cumulative phasor summing algorithm (CPS) can cause temporary protection starting if the *Start delay time* is set low and the tested angle is near the tilt angle.

The following figure shows an example test, where angle was increased from 100 deg to 95 deg (expected angle for protection to operate was 95 deg) with the Omicron pulse ramp tool.



The top most graph shows the current injection. Middle graph shows the calculated fundamental component (DFT) phase angle between current and voltage (angle measurement is forced to zero when current is below 1% of rated). The lowest graph shows MFADPSDE signals. In this test the *Start delay time* was set to 30ms for illustrating the temporary start of protection.

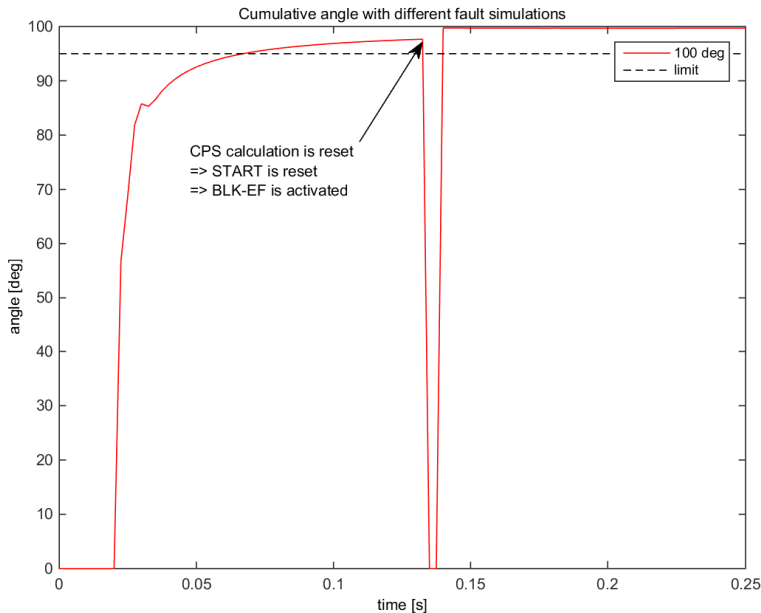
From the figure high angle fluctuation at begin and end of each current injection step can be seen. In the first current injection at 100 deg angle, protection started for 70ms time. At smaller angles, the start remained active longer time until at 96 deg test it was 225ms. In all these tests, after the temporary starting the protection recognized fault as backward (START was reset and BLK_EF signal was activated).

In the last test (95 deg) protection started and operated as expected.

Testing MFADPSDE with Omicron

Testing guideline for secondary testing

The next figure shows calculated cumulative angle in 100 deg test. At the begin of current injection the cumulative angle begins from zero and takes some time before it goes outside of the limit (95 deg) and before protection to reset CPS calculation. As a result, this causes above explained temporary start of the protection.



i Note: The above presented test results cannot be generalized for all testing or real-life earth-faults. The presented test results is just to illustrate possible source of error in Omicron secondary test if the *Start delay time* (used to stop the test) is set to too low value. Depending on the current and voltage angles when signals are switched on, the cumulative angle can also begin from out-of-zone value.

Appendix 3. MFADPSDE accuracies

Only voltage measurement and operation time accuracies are defined in the relay technical manual.

Voltage start value

Technical manual gives accuracy as $\pm 1.5\%$ or $\pm 0.002 \times U_n$, whichever is higher. I.e.

- accuracy is $\pm 1.5\%$ of setting at setting $0.14 \times U_n$ or higher
- accuracy is $\pm 0.002 \times U_n$ at setting $0.13 \times U_n$ or below

In order to evaluate MFADPSDE test results, the accuracies given below for the *Tilt angle* and *Min operate current* settings can be used. These are derived by applying DEFxPDEF accuracies.

Tilt angle

Angle measurement accuracy is ± 2 degree (from DEFxPDEF technical data).

Min operate current

Current measurement accuracy in the DEFxPDEF is defined as $\pm 1.5\%$ or $\pm 0.002 \times I_n$. However, as the MFADPSDE operation is based on the calculation of admittance and resistive part of the current, the current threshold accuracy depends on current, voltage and phase angle measurement accuracies.

To simplify, when testing current threshold at 0 deg angle, or on the amplitude sector and injecting at least $0.14 \times U_n$ voltage, the current threshold accuracy can be defined as $\pm 3.0\%$ or $\pm 0.002 \times I_n$.

I.e. current threshold accuracies are ($U \geq 0.14 \times U_n$, angle = 0 deg or on the amplitude sector)

- accuracy is $\pm 3.0\%$ of setting at setting $0.07 \times I_n$ or higher
- accuracy is $\pm 0.002 \times I_n$ at setting $0.07 \times I_n$ or below

Document revision history

Document revision/date	History
A / 20 December 2017	First revision

Disclaimer and Copyrights

The information in this document is subject to change without notice and should not be construed as a commitment by ABB Oy. ABB Oy assumes no responsibility for any errors that may appear in this document.

In no event shall ABB Oy be liable for direct, indirect, special, incidental or consequential damages of any nature or kind arising from the use of this document, nor shall ABB Oy be liable for incidental or consequential damages arising from use of any software or hardware described in this document.

This document and parts thereof must not be reproduced or copied without written permission from ABB Oy, and the contents thereof must not be imparted to a third party nor used for any unauthorized purpose.

The software or hardware described in this document is furnished under a license and may be used, copied, or disclosed only in accordance with the terms of such license.

Copyright © 2017 ABB Oy

All rights reserved.

Trademarks

ABB is a registered trademark of ABB Group. All other brand or product names mentioned in this document may be trademarks or registered trademarks of their respective holders.

Contact information

ABB Oy, Medium Voltage Products
P.O.Box 699
Visiting address: Muottitie 2A
FI-65101 Vaasa, FINLAND
Phone: +358 10 22 11
Fax: +358 10 22 41094

<http://new.abb.com/substation-automation>