Konsta Rinne

Generaattorisuojan toisiotestauksen kehittäminen

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Sähkötekniikan diplomityö
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO
Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö
Tekijä: Konsta Rinne
Tutkielman nimi: Generaattorisuojan toisiotestauksen kehittäminen
Tutkinto: Diplomi-insinööri
Oppiaine: Sähkötekniikka
Työn valvoja: Kimmo Kauhaniemi
Työn ohjaaja: Markus Hattara
Työn tarkastaja: Hannu Laaksonen
Valmistumisvuosi: 2025 **Sivumäärä:** 100 + 4

TIIVISTELMÄ:
Generaattori on sähköjärjestelmässä tehotasapainon kannalta tärkein ja samalla arvokkain komponentti; tämän vuoksi sen suojaaminen erilaisilta vioilta ja epänormaaleilta käyttötilanteilta on kriittistä, sillä ne voivat vaikuttaa generaattorin suorituskykyyn ja lyhentää sen elinkaarta. Tyypillisiä generaattorivikoja ovat sähköisten, termisten ja mekaanisten rasitusten aiheuttamat käämiviat. Nämä voivat ilmetä oikosulkuina, ylikuormituksina tai käämien katkeamisena. Suojaustoimintojen tulee olla herkkiä vian havaitsemiseen, mutta samaan aikaan suojauksien tulee olla vakaita ulkoisten vikojen suhteen. Tarpeeton suojalaitteiden toiminta halutaan estää, koska se voi olla haitallista verkon stabiiliudelle, taloudelle tai sähkön laadulle.

Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia VEO Special Application -yksikön tarpeisiin, kuinka ABB:n REX640- ja REX615-mallin suojareleiden suojausfunktioita voidaan koestaa generaattorisuojaussovelluksissa hyödyntäen Omicron CMC356-koestuslaitetta. Omicron Protection Testing Library (PTL) tarjoaa valmiita testipohjia useiden valmistajien suojareleille, mutta niiden tehokas käyttö edellyttää koestajalta syvällistä ymmärrystä relelogiikasta ja suojattavasta kohteesta sekä testattavista suojaustoiminnoista. Työ keskittyy generaattorin suojauksessa käytettyihin suojausfunktioihin, ja keskeisenä tavoitteena on luoda valmis Omicron Control Center (OCC) -tiedosto käyttäen apuna Extended RIO tiedostomuotoa. Lisäksi kehitetään yleinen toimintamalli relekoestuksen suorittamiseksi VEO:n tehdasympäristössä.

Työssä käsitellään generaattorin roolia sähköjärjestelmässä, ja pyritään avaaman generaattorisuojauksessa käytettyjen suojausfunktioiden toimintaa sekä näiden toisiokoestamista erilaisissa vikatilanteissa. Lisäksi esitellään käytetyt testimoduulit, joita käytetään testipohjan rakentamiseen. Lopuksi tarkastellaan relekoestuksen kehitysmahdollisuuksia VEO:n tehdasympäristössä. Tehdashyväksyntätesteillä, engl. factory acceptance test (FAT), varmistetaan laitteiston toiminnallisuus ennen toimitusta. FAT-testit toteutetaan valmistajan tai asiakkaan määrittelemässä testausympäristössä, ja niiden tarkoituksena on varmistaa kojeistokaapin rakenteen ja asennusten vastaavuus suunnitelmiin sekä suojareleiden, mittaus-, hälytys-, ohjaus- ja merkinantopiirien oikea toiminta.

Diplomityön tuloksena kehitettiin automatisoitu testipohja generaattorisuojauksen koestamiseen Genset-projekteissa. Testitiedosto suunniteltiin mahdollisimman tehokkaaksi ja käyttäjäystävälliseksi hyödyntäen tuttuja testimoduuleita, jotta koestuksen voisi suorittaa kuka tahansa VEO:n koestajista. Lisäksi koestusprosessia selkeytettiin loogisella kansiorakenteella ja laadittiin tarkistuslista, jonka avulla varmistetaan suojareleiden yhdenmukainen koestus kaikissa yksikön projekteissa.

AVAINSANAT: Generaattorisuojaus, Omicron, suojarele, suojaustoiminto, tahtigeneraattori, testausprosessi

UNIVERSITY OF VAASA
School of Technology and Innovations
Author: Konsta Rinne
Title of the Thesis: Development of generator protection and secondary testing
Degree: Master of Science in Technology
Major: Electrical Engineering
Supervisor: Kimmo Kauhaniemi
Instructor: Markus Hattara
Evaluator: Hannu Laaksonen
Year: 2025 **Number of pages:** 100 + 4

TIIVISTELMÄ:
In terms of power balance the generator is the most important and valuable component in the power system; therefore, it is critical to protect it from various faults and abnormal operating conditions, because these can affect its performance and shorten its life cycle. Typical generator faults include winding failures caused by electrical, thermal, and mechanical stresses. They may manifest as short circuits, overloads or broken winding. Protection functions must be sensitive enough to detect faults, while also being stable against external disturbances. Unnecessary operation of protection devices should be avoided, as it can negatively impact grid stability, economics or power quality.

The purpose of this master's thesis, for the needs of VEO Special Application team, was to investigate how the protection functions of ABB's REX640 and REX615 protection relays can be tested in generator protection applications using the Omicron CMC356 testing device. The Omicron Testing Library (PTL) provides ready-made testing templates for protection relays from various manufacturers, but effective use of these templates requires the tester to have a deep understanding of relay logic, the protected object and the protection functions being tested. This thesis focuses on protection functions used in generator protection, with a key objective of creating a ready-to-use Omicron Control Center (OCC) file utilizing the Extended RIO file format. Additionally, a general operating model for performing relay testing in VEO's factory environment is developed.

This thesis discusses the role of the generator in the power system and aims to explain the operation of protection functions used in generator protection, as well as their secondary testing under various fault conditions. Additionally, the test modules used to build the test templates are presented. Finally, the development opportunities for relay testing in VEO's factory environment are examined. Factory Acceptance Tests (FAT) are used to verify the functionality of the equipment before delivery. FAT tests are conducted in to ensure that the structure and installation of the switchgear cabinet comply with the design, and that the protection relays, measurement, alarm, control and signaling circuits operate correctly.

As a result of this master's thesis, an automated test template was developed for testing generator protection in Genset projects. The test file was designed to be as efficient as efficient and user-friendly as possible by utilizing familiar test modules, allowing any of VEO's testers to carry out the testing.

AVAINSANAT: Generator protection, Omicron, protection relay, protection functions, synchronous generator, testing process

Sisällys

1 Johdanto 11

1.1 Työn rajaukset 11

1.2 Työn rakenne 12

2 Generaattori sähköjärjestelmässä 13

2.1 Tahtigeneraattori 13

2.2 Sijaiskytkentä 14

2.3 Generaattorin magnetointi 15

2.4 Generaattorin tahdistaminen 17

2.5 Generaattorin säätö ja tehotasapaino 19

2.5.1 Tehotasapaino 21

2.5.2 Stabiilisuus 23

2.6 Mittamuuntajat 26

2.7 Suojareleet 27

2.8 Generaattorin relesuojaus 29

2.9 Generaattorivikoihin varautuminen 30

3 Generaattorin suojaustoiminnot 32

3.1 Differentiaalisuojaus 32

3.2 Ylivirta- ja ylikuormitussuojaus 33

3.3 Staattorin maasulkusuojaus 35

3.4 Roottorin maasulkusuojaus 38

3.5 Ali-impedanssisuojaus 39

3.6 Vinokuormitussuojaus 40

3.7 Alimagnetointisuojaus 41

3.8 Ylimagnetointisuojaus 43

3.9 Alijännitesuojaus 44

3.10 Ylijännitesuojaus 45

3.11 Taajuussuojaus 45

3.12 Takateho 46

3.13 Epätahtikäyttösuojaus 46

3.14 Tahaton kytkentä verkkoon 48
3.15 Katkaisijavikasuojaus 49
4 Tehdaskoestuksen vaatimukset ja käytetyt testilaitteet 50
4.1 Toimintakokeet ja toiminta-arvojen testauksesta 52
4.2 Omicron CMC 356 52
4.3 Omicron Test Universe 54
4.3.1 Omicron Control Center 55
4.3.2 OCC-joukko 56
4.3.3 QuickCMC 57
4.3.4 Ylivirtamoduuli 58
4.3.5 Ramppaus 60
4.3.6 Tilasekvenssit 61
4.3.7 Differentiaalisuojan määrittely 62
4.4 RIO ja XRIO 64
4.5 Toleransseista 66
5 Suojausfunktioiden testaus 67
5.1 Ylivirtasuojaus (51) 68
5.2 Jännitesuojien koestaminen (27, 59) 69
5.3 Taajuussuojaus (81) 70
5.4 Vinokuormitussuoja (46) 71
5.5 Terminen ylikuormitussuoja (49T) 72
5.6 Nollajännitesuojaus (59N) 73
5.7 Suunnattu maasulkusuojaus (67N) 73
5.8 Staattorin 100% maasulkusuojaus (64TN) 76
5.9 Roottorin maasulkusuoja (64R) 77
5.10 Jänniteriippuvainen ylivirtasuojaus (51V) 77
5.11 Katkaisijavikasuoja (50BF) 78
5.12 Tahaton kytkentä verkkoon (27/51) 79
5.13 Ali-impedanssisuojaus (21) 79
5.14 Alimagnetointisuojaus (40) 81

5.15 Epätahtisuojaus (78PS) 82
5.16 Differentiaalisuojaus (87) 85
5.17 Takatehosuojaus (32) 88
5.18 Ylimagnetointisuojaus (24) 89
5.19 Sulakevian valvonta (60) 91
6 Testausprosessin kehittäminen 92
6.1 Suojareleen koestaminen 92
6.2 Tarkastuslista 92
6.3 Testitiedostojen käyttö 93
6.4 FAT koestustiedostot 94
7 Johtopäätökset 96
Lähteet 98
Liitteet 101
Liite 1. Suojausfunktioiden teknillisiä arvoja 101
Liite 2. Ylivirtasuojauksen koestuksesta 102

Kuvat

Kuva 1. Generaattorin sisäinen yksivaiheinen sijaiskytkentä. $\bar{E}$ on sähkömotorinen voima, $\bar{Z}$ sisäinen impedanssi ja $\bar{U}_N$ liitinjännite. 14

Kuva 2. Voimalaitoksen verkossa pysymisen vaatimukset erilaisilla liittymispisteen taajuuksilla ja jännitteillä (Fingrid, 2025, s.57). 20

Kuva 3. Yksinkertaistetun voiman siirtojohdon sijaiskytkentä (Elovaara & Laiho, 1988, s. 91). 22

Kuva 4. 100 % staattorin maasulkusuojaus, R_f on maasulkua kuvaa vikavastus ja R_N on generaattorin maadoitusvastus. (ABB, 2024). 37

Kuva 5. Roottorin maasulkusuojauksen toteuttaminen ABB:n REK510 virtainjektiolaitteella. (ABB, 2024) 39

Kuva 6. Synkronisen generaattorin suorituskykykäyrä (ABB, 2024). 43

Kuva 7. Epätahtisuojan asettelut RX-koordinaatistossa (ABB, 2024). 47

Kuva 8. Omicron CMC356 -testilaitteen etupaneeli (Omicron, n.d.). 53

Kuva 9. Omicron Control Center suoritus rakenne (Omicron, n.d.). 55

Kuva 10. QuickCMC testausmoduuli. 58

Kuva 11. Overcurrent -moduuli. 59

Kuva 12. Ramping -moduuli. 60

Kuva 13. State Sequence -moduuli. 62

Kuva 14. Diff Configuration -moduulilla tarkistetaan differentiaalisuojan mittaukset. 63

Kuva 15. Differentiaalisuojan suojauskäyrän koestaminen Diff Operating Characteristic -testimoduulilla. 64

Kuva 16. XRIO linkitys jännitteiden toisioarvoihin. 66

Kuva 17. Jännite- ja kaapelivirtamuuntajan kytkentä suunnatussa maasulkusuojauksessa (ABB, 2024). 74

Kuva 18. Konfiguroitavat toimintasektorit vaihekulmaominaisuudessa (ABB, 2024). 75

Kuva 19. Suunnattu maasulkusuojan testaaminen Overcurrent -moduulilla. 76

Kuva 20. Jännitteen slope karakteristika kertoo virran havahtumisarvon tietyllä jännitteellä. 77

Kuva 21. Alimagnetointi käyrä muodostuu generaattorin tahtireaktanssin X_d ja generaattorin muutosreaktanssin X_d' mukaan. Siirtymä, (engl. *Displacement*) asettelulla voidaan tuoda suojaukseen lisää selektiivisyyttä. (ABB, 2024) 81
Kuva 22. Epätahtitilan havaitseminen ABB:n suojareleissä. 82
Kuva 23. Advanced TransPlay -moduuli. 83
Kuva 24. Epätahtisuoja epätahtihavahtuminen ja laukaisun toteaminen. 84
Kuva 25. Diff Configuration -moduulilla tarkistetaan differentiaalisuojan mittaukset. 86
Kuva 26. Differentiaalisuojan suojauskäyrän koestaminen Diff Operating Characteristic -testimoduulilla. 87
Kuva 27. Virran ja jännitteen osoitin vektorit osoitindiagrammissa. Vasemmalla neg. P ja oikealla neg. Q. 89
Kuva 28. FAT koestuskansion rakenne 95
Kuva 29. Ylivirtasuojauksen ominaislaukaisukäyrä Omicronin Overcurrent moduulilla. 103

Taulukot

Taulukko 1. Generaattorin viat ja suojaustarpeet (Häsä, 2009, s. 14). 30
Taulukko 2. Generaattorin suojauksessa käytettäviä suojausfunktioita (ABB, 2024). 68
Taulukko 3. Suojausfunktioiden teknillisiä arvoja (ABB, 2024). 101
Taulukko 4. ANSI- ja IEC-käänteisaikakäyrien vakiot (ABB, 2024). 102

Lyhenteet

C_E	Maakapasitanssi
E	Sähkömagneettinen voima
f_k	Käämityskerroin
f_m	Mitattu taajuus
f_n	Nimellistaajuus
I_1	Virran myötäkomponentti
I_2	Virran vastakomponentti
I_0	nollavirta
I_b	Vakavointivirta eli biasvirta
I_d	Erovirta eli differentiaalivirta
I_r	Magnetointivirta
$\mathrm{I_{ref}}$	Referenssi virta
I_S	Virtasettelu
J_1, J_2	Virtalähde
k	Aikakerroin
L	Itseinduktanssi
N	Käämin kierrosluku
P	Pätöteho
P_r	Magnetointiteho
R_f	Vikavastus
S	Näennäisteho
S_n	Nimellisnäennäisteho
U_r	Magnetointijännite
U_n	Nimellisjännite
U_0	nollajännite
X	Reaktanssi
X_d	Tahtireaktanssi
x_d	Suhteellinen taktireaktanssi
X'_d	Muutosreaktanssi

φ	Vaihekulma
φ_i	Virran vaihekulma
φ_u	Jännitteen vaihekulma
Φ_m	Magneettivuo
θ	Lämpötilakuvaaja
θ_{amb}	Ulkolämpötilakuvaaja
$\tau 1$	Lyhyt lämpenemisaikavakio
$\tau 2$	Pitkä lämpenemisaikavakio

ANSI	*American National Standards Institute*, Amerikkalainen standardointijärjestö
AVR	*Automatic Voltage Regulator*, Automaattinen jännitteen säätäjä
CT	*Current Transformer*, Virtamuuntaja
FAT	*Factory Acceptance Test*, Tehdashyväksyntätestaus
HMI	*Human-Machine Interface*, Käyttöliittymä ihmisen ja koneen välillä
I/O	*Input/Output*, Sisääntulo / Ulostulo
IDMT	*Inverse Definite Minimum Time*, Käänteisesti määräaikainen aikaviive
IEC	*International Electrotechnical Commission*, Kansainvälinen sähkötekniikan standardointijärjestö
IP	*Internet Protocol*, Internet-protokolla
LPCT	*Low Power Current Transformer*, Elektroninen virtamuuntaja
PSS	*Power System Stabilizer*, Lisästabilointipiiri
PTL	*Protection Testing Library*, Suojauksen testikirjasto
RCA	*Relay Characteristic Angle*, Suojareleen kulmakarakteristiikka
RIO	*Relay Interface by Omicron*, Omicronin releen käyttöliittymä
TMS	*Time Multiplier Setting*, Aikakertoimen asetus
VT	*Voltage Transformer*, Jännitemuuntaja
XRIO	*eXtended Relay Interface by Omicron*, Omicronin laajennettu releen käyttöliittymä

1 Johdanto

Numeeristen suojareleiden testaus on muuttunut entistä monimutkaisemmaksi uusien suojausvaatimusten ja relevalmistajien kehitystyön myötä. Jokaisen suojareleen toiminta on kuitenkin varmistettava loppuasiakkaalle, jotta voidaan todeta vaatimusten mukainen suojausten toiminta.

Työn tavoitteena on perehtyä generaattorin suojaukseen ja sen toisiotestaukseen tehdasympäristössä. Työ keskittyy ABB:n REX640- ja REX615-suojareleisiin sekä niiden suojaustoimintoihin. Koska lähtötilanteessa ei ollut olemassa selkeää testausprotokollaa, työssä pyritään selventämään toimintatapoja, mitä suojareleiden testauksessa tulee ottaa huomioon testausprosessin aikana. Lisäksi tavoitteena on kehittää VEO:n käyttöönottotiimin Omicron-testitiedostojen käyttöä siten, että testausprosessi olisi mahdollisimman yhtenäinen automatisoidun testitiedoston avulla.

Omicron tarjoaa testiprotokollakirjaston, josta voidaan hyödyntää valmiita Omicron Control Center (.occ) -tiedostoja, jotka käyttävät XRIO-tiedostomuotoa. Kyseisille suojareleille ei kuitenkaan ole vielä olemassa valmiita pohjatiedostoja, minkä vuoksi suojausten testaaminen on tällä hetkellä työlästä. Tämän työn päätavoitteena onkin luoda valmis tiedosto, johon voidaan tuoda kaikki suojausfunktioiden parametrit XRIO-tiedoston avulla ja suorittaa testaus mahdollisimman automaattisesti.

1.1 Työn rajaukset

Tässä työssä käsitellään generaattorisuojausta ja sen toisiotestausta. Tavoitteena on luoda testialustapohja, jota voidaan kehittää jatkuvasti uusien ominaisuuksien ja suojaustoimintojen myötä. Visiona on rakentaa testikirjasto, joka sisältää eri suojareleille valmiita testitiedostoja. Näitä tiedostoja voitaisiin mahdollisesti hyödyntää myös eri suojausten välillä. Tavoitteena on ettei yrityksenä keskityttäisi suuriin, monimutkaisia Omicron-tiedostoihin, vaan suojaustoiminnot jaettaisiin pienempiin osiin jolloin suojauksien koestustiedostot olisi helpommin muokattavissa. Koestusta suunnitellessa,

olisi siis käytössä monia eri yksittäisiä moduulitiedostoja, suurien epätäydellisten testitiedostojen sijaan. Samalla pyritään selvittämään voitaisiinko mahdollisesti hyödyntää Omicronin *Bach*-työkalua koestusten loppuun saattamiseksi. Työssä käytetään Omicronin CMC 356 testilaitetta, ja tarkasteltavana suojareleinä ovat ABB:n REX640 ja REX615-mallit.

1.2 Työn rakenne

Luku 2 käsittelee tahtigeneraattoria ja sen taustalla olevaa teoriaa osana tehotasapainoa sähköjärjestelmässä. Luvussa käydään yleisesti läpi generaattorin magnetointia, tahdistukseen liittyviä seikkoja sekä tehotasapainoa ja stabiilisuutta sähköjärjestelmässä. Myös suojareet ja mittamuuntajat esitellään tässä luvussa. Luku 3 käsittelee generaattorissa esiintyviä vikatyyppejä ja niihin liittyviä suojausperiaatteita. Suojaustoiminnot pyritään käymään läpi yleisellä tasolla. Luku 4 käsittelee Omicron CMC testilaitteistoa sekä OCC -tiedostossa käytettyjä testimoduuleita ja pyritään selkeyttämään tiedoston rakennetta sekä rajaehtoja suojauksen toiminnalle. Luvussa 5 käydään läpi suojaustoimintojen testausta Omicronilla ja kertoa mitä eri testimoduuleita voidaan hyödyntää suojauksen koestuksessa. Luvussa 6 tarkastellaan testikirjaston sisältöä ja kuinka suojareleiden toisiokoestus voitaisiin tulevaisuuteen VEO:lla suorittaa. Luvussa esitetään myös tiedostot, joita FAT -koestuskansiossa tulee olla suojareleiden koestuksen jälkeen. Luku 7 kokoaa työn keskeiset havainnot ja johtopäätökset.

2 Generaattori sähköjärjestelmässä

2.1 Tahtigeneraattori

Tahtigeneraattori on sähkökone, jossa voimakoneen mekaaninen teho muutetaan sähkötehoksi, jonka se luovuttaa sähköverkkoon. Roottori pyörii samalla nopeudella staattorin pyörivän magneettikentän kanssa. Roottori voidaan toteuttaa sähkökäytöstä riippuen sylinterinmuotisena umpinapakoneena, avonapakoneena, kestomagneettikoneena tai synkronisena reluktanssikoneena. Yleisimpiä sähkövoimalaitoksissa käytettäviä tahtigeneraattoreita ovat avo- ja umpinapaiset generaattorit, joiden voimakoneina käytetään joko vesi-, höyry- tai kaasuturbiineja. Varavoimalaitoksissa käytetään usein dieselgeneraattoreita.

Avonapaisia koneita hyödynnetään hitaasti pyörivissä voimalaitoksissa, kuten vesivoimalaitoksissa tai muissa käyttökohteissa, joissa koneelta vaaditaan alhaista pyörimisnopeutta. Umpinapaisia koneita käytetään nopeammin pyörivissä laitoksissa, kuten höyry- ja kaasuturbiinivoimalaitoksissa. (Pahkala 2015, s. 6; Suni 2018, s. 36-37).

Tahtigeneraattorin tehot vaihtelevat tyypillisesti välillä 10 kVA—1500 MVA ja jännitteet 400 V—30 kV. Voimalaitoksissa käytetyt generaattorit ovat lähes poikkeuksetta kolmivaihekoneita ja kytkentätapana on yleensä tähtikytkentä. (Aura & Tonteri, 1998, s. 346).

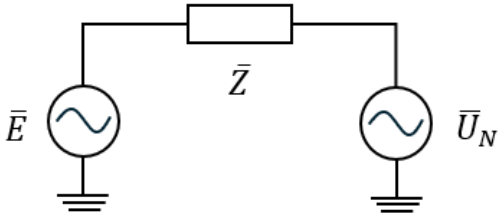
Tahtigeneraattorin toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon ja pyörivään magneettikenttään. Kun generaattorin roottoria pyöritetään voimakoneen avulla, muuttuu staattorikäämejä lävistävä päävuo Φ_m ajallisesti staattorikäämeihin nähden. Päävuo indusoi induktiolain mukaisesti staattorin käämeihin sinimuotoisen kolmivaiheisen lähdejännitteen E, jota nimitetään päälähdejänniteeksi. Lähdejännitteen suuruus voidaan laskea yhtälöllä

$$E = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} \cdot f_k \cdot f \cdot N \cdot \Phi_m, \quad (1)$$

missä f_k on käämityskerroin, f on taajuus, N on staattorin vaihekäämin sarjaan kytketyt johdinkiertymät ja Φ_m yhden magneettinavan päävuo, joka on sama kuin staattorin vyyhden maksimi- eli huippuvuo. Yhtälöstä voidaan nähdä, että tasaisella pyörimisnopeudella, lähdejännitteen tehollisarvo riippuu vain magneettivuon suuruudesta eli roottorin magnetointivirrasta, kun kaikki muut muuttujat ovat perustaajuiselle jännitteelle vakiota. Käämityskerroin on staattorikäämin käämitystavasta riippuva vakio, joka kuvaa eri staattorilovissa olevia saman vaiheen käämikierrosten yhteisvaikutusta (Suni, 2018, s. 37)

2.2 Sijaiskytkentä

Voimansiirtoverkon komponentteja ja rakenneosia voidaan verkkolaskennassa kuvata sijaiskytkentöjen avulla laskennan helpottamiseksi. Tahtigeneraattoreista voidaan symmetrisyytensä vuoksi esittää sähköisesti yksivaiheisen sijaiskytkennän avulla kuvan 1 mukaisesti. (Suni, 2018, s. 38)



Kuva 1. Generaattorin sisäinen yksivaiheinen sijaiskytkentä. $\bar{E}$ on sähkömotorinen voima, $\bar{Z}$ sisäinen impedanssi ja $\bar{U}_N$ liitinjännite.

Sähkömotoriseen voimaan vaikutetaan koneen magnetointivirtaa muuttamalla, sillä kuvan 1 sisäinen impedanssi oletetaan vakioksi. Koneen sisäisen impedanssin perusarvo saadaan yhtälöllä

$$\bar{Z} = R + jX_d, \tag{3}$$

missä Z on koneen sisäinen impedanssi, R on koneen resistanssi ja X_d on koneen tahtireaktanssi. Tavallisesti koneen resistanssi jätetään huomioonottamatta. Reaktanssin perusarvo ohmeina saadaan yhtälöllä

$$X_d = x_d \cdot \frac{U_n^2}{S_n}, \tag{4}$$

missä x_d on suhteellinen tahtireaktanssi, S_n on koneen nimellisteho ja U_n on koneen nimellisjännite. Suhteelliset arvot ilmaistaan yleensä pu (*per unit*) eli suuretta verrataan ennalta määrättyyn perusarvoon. (Aura & Tonteri, 1998, s. 133)

2.3 Generaattorin magnetointi

Tyhjäkäynnissä generaattorin staattorin ja roottorin magneettikentät ovat tarkalleen vastakkaiset. Tahtigeneraattori toimii tyhjäkäynnissä, kun staattorin on kuormittamaton, eli silloin kun staattorin eli ankkurin virta on nolla. Lisättäessä voimakoneen tehoa, pyrkii voimakoneen momentti kasvattamaan generaattorin roottorin pyörimisnopeutta yli verkkotaajuutta vastaavan pyörimisnopeuden. Tällöin lähdejännitteen ja verkon jännitteen osoittimien suunnat eroavat toisistaan, jolloin staattorin käämeissä alkaa kulkemaan virta. (Suni, 2018, s. 38) Tahtikoneeseen synnytetään magnetointivirran avulla magneettikenttä eli päävuo, joka roottorin mukana pyöriessään indusoi ankkurikäämiin tarvittavan päälähdejännitteen. Kuten aiemmin todettiin, päälähdejännite on suoraan riippuvainen magneettivuon suuruudesta. Käämiin muodostumaa magneettivuota voidaan tarkastella itseinduktanssin avulla yhtälöllä

$$\Phi = \frac{L \cdot I}{N}, \tag{5}$$

L itseinduktanssi, I on virta ja N on käämien kierroslukumäärä. Yhtälöstä nähdään virran vaikutus magneettivuon suuruuteen. (Aura & Tonteri, 1998, s. 134)

Magnetointijärjestelmän päätehtävänä on syöttää roottorin käämityksiin tasavirtaa jolla roottorin magneettikenttä saadaan aikaiseksi. Se koostuu automaattisesta jännitteen säätimestä sekä itse magnetointilaitteistosta. Magnetointijärjestelmällä muunnetaan virran ja jännitteen muoto ja suuruus generaattorille sopivaksi. Jännitteensäätäjän (engl. *Automatic Voltage Regulator*, AVR) tehtävänä on säätää generaattorin tuottamaa loistehoa käyttäen referenssinään joko generaattorin liitinjännitettä tai liittymispisteen jännitettä.

Tahtikoneet voidaan jakaa magnetointimenetelmien mukaisesti harjallisiin ja harjattomiin tahtikoneisiin. Harjallisessa tahtikoneessa tuodaan magnetointivirta I_r hiiliharjojen ja messingistä tai teräksestä tehtyjen liukurenkaiden avulla pyörivään roottorikäämiin. Harjallisissa koneissa tahtikoneen magnetoimisteho P_r lasketaan yhtälöllä

$$P_r = U_r \cdot I_r, \tag{6}$$

missä U_r on magnetoimisjännite ja I_r on magnetointivirta. Harjallinen magnetointi voidaan toteuttaa tasa- tai vaihtosähkölähteen avulla. Tasasähkölähteet voidaan asentaa samalle akselille tai täysin erillisenä tasasähkölähteenä. Magnetoimisvirtaa säädetään muuttamalla magnetointigeneraattorin kehittämää jännitettä U_r saaden näin aikaan muutoksen pääkoneen magnetointivirrassa. Vaihtosähkölähteisessä magnetoinnissa magnetointivirtaa säädetään tasasuuntaustekniikan avulla sopivaan arvoon. Magnetointiteholähteenä voi toimia ulkoinen vaihtosähkölähde tai itse pääkone. (Aura & Tonteri, 1998, s. 135)

Harjattomassa tahtikoneessa on pääkoneen kanssa samalla akselilla erillinen ulkonapainen vaihtosähkögeneraattori magnetointikoneena. Ulkonapakoneessa

magneettinavat ovat seisojassa eli staattorissa ja käämitys, johon lähdejännite indusoituu, on pyörijässä eli roottorissa. Magnetointigeneraattorin kolmivaiheisessa staattorikäämityksessä kehittyvä vaihtojännite tasasuunnataan diodisillan avulla tasajännitteeksi, joka vaikuttaa pääkoneen napa- eli magnetoimiskäämiin syöttäen siihen magnetointivirtaa. Pääkoneen magnetointia säädetään tässäkin yhteydessä magnetointivirtaa säätämällä. Virta otetaan vaihtosähkölähteestä säätäjän välityksellä. (Aura & Tonteri, 1998, ss. 349-350)

Alimagnetoituna generaattori ottaa verkosta loisvirtaa magnetoinnin säilyttämiseksi, jolloin puhutaan että kone kuluttaa loistehoa. Vastaavasti ylimagnetoituna kone tuottaa verkkoon loistehoa. Jännitteensäätäjässä on yleensä ali- ja ylimagnetointi rajoittimet, joiden tehtävänä on ylläpitää riittävä generaattorin magnetointivirta sekä estää generaattorin ja generaattorimuuntajan ylimagnetointi rajoittamalla magnetointivirtaa. Rajoittimien rinnalla toimii suojarele, joka laukaisee tarvittaessa generaattori- ja magnetointikatkaisijan mikäli kone on liikaa ali- tai ylimagnetoitu. (Fingrid, 2025, ss. 68-70; ABB, 2024)

Generaattorin magnetointikatkaisijalla irrotetaan generaattorin magnetointilaitteisto. Mikäli jännitteen säätäjän tai magnetointilaitteiston syöttöä ei katkaista, pyrkii se tuottamaan magnetointivirtaa generaattoriin tämän hidastuessa tahtikäytön poistuessa. Yleensä generaattori katkaisija ja magnetointikatkaisija kytketään yhtäaikaisesti auki, mikäli vika ilmenee järjestelmässä.

2.4 Generaattorin tahdistaminen

Tahdistamiseen käytetään pääsääntöisesti automaattisia tahdistimia. Niiden tehtävänä on varmistaa, että generaattori kytketään verkkoon sallituissa olosuhteissa. Generaattorikatkaisija on katkaisija, jonka kautta generaattori liitetään toiseen sähköjärjestelmään. Kytkentä voidaan suorittaa, kun generaattorikatkaisijan ylioleva jännite on lähellä nollaa, jolloin kytkentävirta pysyy mahdollisimman pienenä, mikä vähentää sähköverkon tehoheilahteluita. Tähän tilanteeseen päästään suorittamalla

määrättyjä sääntöjä tahdistettavassa koneistossa. Näitä säätötoimenpiteitä sekä katkaisijan sulkemista oikealla hetkellä kutsutaan tahdistamiseksi (Aura & Tonteri, 1998, s. 353).

Tahtigeneraattorin nimensä mukaan tulee olla tahdissa verkon kanssa. Tämä tarkoittaa sitä, että generaattorin ja verkon:

- taajuudet tulee olla samat,
- jännitteiden tasot ovat yhtenevät,
- vaihejärjestys on identtinen,
- ja vaihekulmat ovat synkronisia.

Tahtigeneraattorin taajuutta säädetään muuttamalla sen pyörimisnopeutta. Kun oikea pyörimisnopeus on saavutettu, generaattorin jännite nostetaan verkon tasolle lisäämällä magnetoimisvirtaa. Vaikka pyörimisnopeuden kasvattaminen nostaa jännitettä, nopeus tulisi säätää kohdalleen ennen magnetoinnin lisäämistä. (Haukilahti ja muut, 2004, s. 61; Aura & Tonteri, 1998, s. 353)

Tahdistuksen onnistumiseksi generaattorin ja verkon jännitteiden on oltava paitsi saman suuruiset, myös ajallisesti samassa vaiheessa. Kun nämä ehdot täyttyvät, generaattorin ja verkon välinen tehokulma on pieni, eikä kytkentähetkellä synny merkittäviä virtapiikkejä. Tällöin tahtikone ei syötä eikä ota sähköä verkosta, mikä tekee kytkennästä turvallisen ja lähes häiriöttömän.

Mikäli mitatut jännitteet eroavat toisistaan, tahtigeneraattori joutuu kiihdyttämään tai hidastamaan verkon tahtiin, jolloin se joko ottaa tai tuottaa loisvirtaa verkkoon aiheuttaen verkon tehon heilahteluita. Teho heilahtelut vaikuttavat kaikkiin verkon käyttäjiin verkon vahvuudesta riippuen.

Verkon ja generaattorin tahdistamiseen käytetään yleisesti automaattisia tahdistimia (AVR) tai erilaisia suojareleiden tahdistin sovelluksia. Näiden avulla säädetään

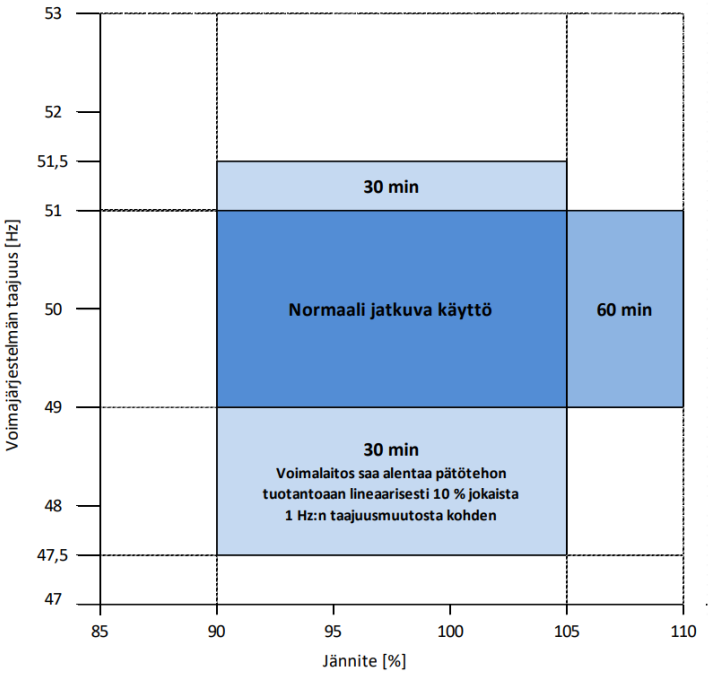
generaattorin jännite ja pyörimisnopeus oikeiksi, sekä suljetaan katkaisija oikealla hetkellä automaattisesti. Tahdistus voidaan myös suorittaa manuaalisesti, jolloin käyttäjä säätää eri pyörimissuuntamittareiden avulla verkon ja generaattorin taajuudet ja jännitteet sallituille rajaehdoille, jonka jälkeen katkaisijan kiinniohjaus voidaan suorittaa painonappien avulla. (Lehtelä & Korpinen, 2007, s. 7; ABB, 2024)

Katkaisijan sulkeminen on yleensä toteutettu niin, että generaattorilla on kytkentähetkellä hieman korkeampi taajuus kuin verkolla. Näin varmistetaan ettei kone ota verkosta loisvirtaa (ABB, 2024).

2.5 Generaattorin säätö ja tehotasapaino

Sähköjärjestelmät altistuvat sekä pienille että suurille häiriöille sähkökäyttöjen aikana. Pieniä kuormanvaihteluita tapahtuu jatkuvasti, ja sähköjärjestelmän on kyettävä sopeutumaan ja kestämään nämä muuttuvat olosuhteet, kuten suuret verkon häiriöt, erilaiset vikatilanteet, suurten generaattoreiden tippuminen verkosta sekä erilaiset verkon kytkentämuutokset. Sana stabiilisuus kuvaa sähköjärjestelmän kykyä pysyä synkronisessa tasapainossa stabiileissa käyttöolosuhteissa ja palata tasapainotilaan häiriön jälkeen. (Anderson, 1998, s. 854)

Tahtigeneraattorivoimalaitoksen on myös pystyttävä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti myös jännitteen ja taajuuden poiketessa nimellisarvoista. Fingrid määrittelee voimalaitosten järjestelmäteknisissä vaatimuksessaan (2024), että voimalaitoksen on pystyttävä toimimaan jatkuvasti ja normaalisti, kun liittymispisteen jännite on 90-105 % normaalista käyttöjännitteestä ja taajuus on 49,0–51,0 Hz. Kuvassa 2 on esitetty voimalaitoksen verkossa pysymisvaatimukset.



Kuva 2. Voimalaitoksen verkossa pysymisen vaatimukset erilaisilla liittymispisteen taajuuksilla ja jännitteillä (Fingrid, 2025, s.57).

Jos liittymispisteen jännite, taajuus tai molemmat poikkeavat edellä mainituista arvoista, on voimalaitoksen pysyttävä kytkeytyneenä verkkoon vähintään kuvassa 2 määritellyn ajan mukaisesti. Voimalaitos voi alentaa pätötehontuotantoaan lineaarisesti 10 % jokaista 1 Hz:n taajuusmuutosta kohden, kun taajuus alittaa 49,0 Hz. (Fingrid, 2025, ss. 56-57)

Järjestelmän ja generaattorin stabiilisuutta voidaan parantaa käyttämällä lisästabilointipiiriä (engl. *Power System Stabilizer*, PSS), joka on jännitteensäätäjän niin sanottu lisätoiminto. Sen tarkoituksena on vaimentaa matalataajuisia tehoheilahteluja, jotka voivat esiintyä sekä laitostason paikallisina heilahteluina että sähköjärjestelmien alueiden välisinä vaihteluina. Heilahteluiden tarkastelussa puhutaan säädön toimintatilasta, joka voidaan jakaa: vakiopätötehosäätöön, taajuussäätöön, vakioloistehosäätöön tai vakiojännitesäätöön.

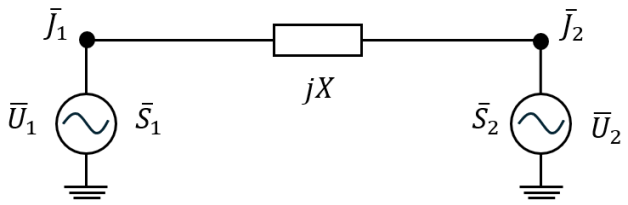
Vakiopätötehon säädöllä varmistetaan, että verkkoon syötettävä pätöteho pysyy tasaisena, jolla varmistetaan että jännitetaso pysyy vakaana. Tahtigeneraattoreissa pätötehoa säädetään muuttamalla voimakoneen vääntömomenttia (Aura & Tonteri, 1998, s. 355). Taajuussäädössä voimalaitos säätää pätötehoaan sähköjärjestelmän taajuuden mukaan ennalta määritetyn statiikan perusteella. Näin voimalaitos tukee toiminnallaan sähköjärjestelmän taajuuden ylläpitoa (Fingrid, 2025, s. 64). Vakioloistehon säädössä varmistetaan ettei voimalaitos tuota verkkoon liiallista loistehoa, kuormittaen näin sähköjärjestelmän kaapeleita ja muuntajia. Mikäli verkko on alimagnetoitunut ja jännite laskee kapasitiivisen loistehon vuoksi, generaattorin magnetointia lisätään, jotta jännitetasot saadaan yhteneviksi. Loistehon säädöllä pyritään pitämään verkon jännite vakaana syöttämällä siihen joko induktiivista tai kapasitiivista loistehoa. Induktiivista loistehoa säädetään lisäämällä generaattorin ylimagnetointia, kun taas kapasitiivista loistehoa säädetään vähentämällä magnetointia eli alimagnetoimalla konetta. (Aura & Tonteri, 1998, s. 355)

2.5.1 Tehotasapaino

Mikäli tehotasapaino syystä tai toisesta häiriintyy riittävästi, esimerkiksi verkkovian seurauksena, koneen pyörimisnopeus muuttuu, kone joutuu epätahtikäyttöön eli putoaa tahdista. Suojauksen on laukaistava kone pois verkosta vaurioitumisen estämiseksi. Koneiden kykyä pysyä tahtikäytössä kutsutaan niiden stabiiliudeksi. Kysymyksellä on keskeinen merkitys suurvoimansiirrossa, koska stabiilisuushäiriöt saattavat helposti levitä koko verkkoa koskevaksi.

Koneiden tahdista putoaminen saattaa tapahtua hitaana liukumisena (staattinen stabiilisuus) tai nopeana muutoksena suuren vian seurauksena (dynaaminen stabiilisuus). Tahdista putoaminen eli stabiilisuuden menettäminen voi tapahtua paitsi yksittäisellä koneella myös kahden verkon välillä. Tällöin tavallisesti suojareleet laukaisevat verkkojen välisen yhdysjohdon ja muodostuu kaksi verkkoa, jossa stabiilisuuden säilyminen puolestaan riippuu ensisijassa verkkojen välisestä tehon siirrosta. (Elovaara & Laiho, 1988, ss. 89-92)

Lisätään aikaisempaan kuvaan 2 virtalähteet J1 ja J2, ja tarkastellaan johdon kuormaa reaktanssin avulla.



Kuva 3. Yksinkertaistetun voiman siirtojohdon sijaiskytkentä (Elovaara & Laiho, 1988, s. 91).

Suurjännitejohdoissa reaktanssin arvo on johtimen resistanssia merkittävämpi, joten se voidaan jättää huomiotta laskennan helpottamiseksi. Lähdevirtalähteillä J_1 ja J_2 kuvataan solmupisteisiin tulevia ja lähteviä virtoja ja X on johdon reaktanssi. Tehonsiirtoa tarkasteltaessa voidaan johdon virrat ja siirtyvät kompleksiteho saada yhtälöillä

$$\bar{J}_1 = \frac{\bar{U}_1 - \bar{U}_2}{jX},$$
$$\bar{J}_2 = \frac{\bar{U}_2 - \bar{U}_1}{jX} \tag{7}$$

$$\bar{S}_1 = \bar{U}_1 \cdot \bar{J}_1^{\,*}$$
$$\bar{S}_2 = \bar{U}_2 \cdot \bar{J}_2^{\,*} \tag{8}$$

Virran kompleksikonjukaatilla saadaan pätötehon suunta positiiviseksi, kun energia virtaa kuormalle. Sijoitetaan virta kompleksitehon yhtälöön

$$\bar{S}_1 = \bar{U}_1 \left(\frac{\bar{U}_2^{\,*} - \bar{U}_1^{\,*}}{jX} \right),$$
$$\bar{S}_2 = \bar{U}_2 \left(\frac{\bar{U}_1^{\,*} - \bar{U}_2^{\,*}}{jX} \right). \tag{9}$$

Valitaan jännitteen $\overline{U}_1$ suunta perussuunaksi eli oletetaan $\overline{U}_1 = U_1\angle 0°$ ja $\overline{U}_2 = U_1\angle\delta$. Näin saadaan näennäistehon yhtälöt muotoon

$$\bar{S}_1 = -\frac{\overline{U}_1{}^2}{jX} + \frac{\overline{U}_1\,\overline{U}_2{}^*}{jX} = j\frac{\overline{U}_1{}^2}{X} + \frac{\overline{U}_1\,\overline{U}_2\cos\delta + \overline{U}_1\,\overline{U}_2\sin\delta}{jX},$$
$$\bar{S}_2 = -\frac{\overline{U}_2{}^2}{jX} + \frac{\overline{U}_2\,\overline{U}_1{}^*}{jX} = j\frac{\overline{U}_2{}^2}{X} + \frac{\overline{U}_1\,\overline{U}_2\cos\delta - \overline{U}_1\,\overline{U}_2\sin\delta}{jX}. \quad (10)$$

Kun erotetaan näennäistehon reaaliosa ja imaginääriosa toisistaan, saadaan järjestelmän pätötehojen ja loistehojen yhtälöiksi

$$P_1 = -P_2 = \frac{U_1 \cdot U_2}{X}\sin\delta \quad (11)$$

$$Q_1 = \frac{U_1{}^2}{X} - \frac{\overline{U}_1\,\overline{U}_2\cos\delta}{X},$$
$$Q_2 = \frac{U_2{}^2}{X} - \frac{\overline{U}_1\,\overline{U}_2\cos\delta}{X}. \quad (12)$$

Pätötehon yhtälö 11 on niin sanottu tehokulmayhtälö. Yhtälö määrittää johdossa siirtyvän pätötehon määrän, joka on riippuvainen johdinten jännitteestä, johdon reaktanssista ja jännitteiden välisestä kulmasta. Suurin teoriassa mahdollinen pätöteho saavutetaan kun tehokulman $\delta = 90°$. Kovin suureen kulmaeroon ei kuitenkaan voida mennä loistehorajoitusten vuoksi. Tavallisesti kahden solmupisteen välinen kulmaero on suurimmillaan n. 10°. (Elovaara & Laiho, 1988, ss. 91-92; Suni, 2018, ss. 23-24)

2.5.2 Stabiilisuus

Tehokulmayhtälö on tapana kirjoittaa kiinteinä pysyvinä jännitteitä käyttäen. Kiinteitä jänniteitä ovat esimerkiksi generaattoreiden sähkömotoriset voimat (smv), jotka aikaansaadaan magnetointivirralla. Smv:n suuruuteen voidaan vaikuttaa

magnetointivirtaa säätämällä. Tehoyhtälöstä saadaan generaattorin verkkoon syöttämä teho yhtälöllä

$$P = \frac{U \cdot E}{X_d + X_j} \sin \delta \,, \tag{13}$$

missä U on verkon pääjännite, E on koneen sähkömotorinen voima, X_d on koneen tahtireaktanssi, X_j on johdon reaktanssi ja δ on jännitteiden $\bar{E}$ ja $\bar{U}$ välinen vaihekulma. Generaattori saa syöttämänsä pätötehon voimakoneestaan. Generaattorin häviöt on oletettu pieniksi, joten siirtyvä sähköteho on yhtä suuri kuin voimakoneen antama mekaaninen teho. Kun halutaan kasvattaa verkoon siirtyvää tehoa, tulee generaattorin turbiinin tehoa lisätä. Tällöin generaattori pyrkii luonnostaan kiihtymään, mikä merkitsee kulman kasvamista. Koneen stabiili alue on 0° ja 90° välillä. Tahtikäytöstä johtuen kone ei käytännössä pääse kiihtymään, mutta vaihekulman lähestyessä 90° generaattorin syöttämä pätöteho kasvaa. Kulman ylittäessä 90°, alkaa generaattorin syöttämä teho laskea, josta seuraa jatkuva koneen kiihtyminen jolloin kone putoaa tahdista. Generaattorin kykyä pysyä tahdissa jännitteiden ja tehojen muuttuessa kutsutaan staattiseksi stabiiliudeksi.

Verkon taajuus pienenee tehon tarpeen kasvaessa. Tällöin verkon ja generaattorin välinen vaihekulma (delta) kasvaa, jolloin generaattori syöttämä teho P verkkoon kasvaa yhtälön 14 mukaisesti. Jos generaattorin voimakoneen tehoa ei lisätä, hidastuu myös verkkoon liitetyn generaattorin pyörimisnopeus verkon määräämän taajuuden mukaan. Yksittäiselle koneelle voidaan stabiilissa tilassa ilmaista lauseke

$$\frac{dP}{d\delta} > 0, \tag{14}$$

sillä tehonmuutos järjestelmässä tulee olla positiivinen. Tätä ehtoa hyödyntämällä voidaan johtaa verkon tahdistavan tehon yhtälö

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{U \cdot E}{X_d + X_j} \cos \delta \,, \tag{15}$$

mistä voidaan huomata, että tahdistavan tehon ollessa negatiivinen, teho pienenee kulman kasvun seurauksesta ja kone alkaa kiihtyä tukeakseen verkkoa. Generaattorin ja verkon välinen kulma alkaa jatkuvasti kasvamaan ja kone joutuu epätahtitilaan. Epätahtitilassa generaattori toimii vuoron perään moottorina ja generaattorina, jolloin tehon amplitudi kasvaa suureksi generaattorin tehon ollessa välillä negatiivinen ja välillä positiivinen. Kone tulee tällöin irrottaa verkosta mahdollisimman nopeasti vaurioitumisien estämiseksi. (Elovaara & Laiho, 1988, ss. 89-105; Suni, 2018, s. 23)

Stabiilisuutta vaarantavia heilahteluita syntyy verkkovikojen kuten oikosulkujen yhteydessä. Sähköjärjestelmän stabiilisuuden tarkastelussa suojareleiden asettelulla ja katkaisijan toiminta-ajoilla on suuri merkitys. Stabiilisuuden säilyminen riippuu näin ollen oleellisesti suojareleiden asetteluista ja toimintanopeudesta sekä katkaisijoiden toiminta-ajoista.

Staattinen stabiilisuus olettaa, että koneen siirtyminen kuormitustilasta toiseen tapahtuu hitaana ilmiönä. Tehokulman muutoksesta seuraa tietty tehon muutos, joka pitää generaattorin verkon kanssa tahtikäytössä. Muutos ei ole kuitenkaan välitön, sillä generaattoria synkronoiva voima on elastinen, johtuen generaattorin ja voimakoneen muodostaman liike-energiavaraston eli inertian vaikutuksesta. Dynaamisella stabiilisuudella viitataan järjestelmän kykyä ylläpitää tahtikäyttöä taajuus- ja jännitehäiriöiden jälkeen. Jos häviöt jätetään huomioonottamatta, voimakoneen antama teho on yhtäsuuri kuin verkkoon menevä teho. Kuitenkin muutostilassa osa turpiinin tehosta menee pyörivien massojen liike-energian kasvattamiseen. Tämä ilmiö mahdollistaa järjestelmän palautumisen esimerkiksi pikajälleenkytkentöjen jälkeen (Elovaara & Laiho, 1988, ss. 98-105)

2.6 Mittamuuntajat

Virtamuuntaja muuntaa pääpiirin virran pienemmäksi toisiopuolella oleville suoja- ja mittalaitteille nimellismuuntosuhteen mukaan. Muuntosuhde määräytyy virtamuuntajan ensiö- ja toisio arvosta. Virranmittaukseen voidaan käyttää perinteisiä induktiivisia virtamuuntajia tai enemmän yleistyviä Rogowskin keloja sekä elektronisia virtamuuntajia (engl. *Low Power Current Transformer*, LPCT). Yleisesti käytetään induktiivisia virtamuuntajia, joiden toisiokäämityksen suuruus- ja tarkkuus luokat vaihtelevat mittavan virran ja käyttötarkoituksen mukaan. Rakenne tyypeiltään ne voivat olla mm. sisään - tai ulos asennettavia. Kaapeliverkoissa käytetään paljon reikävirtamuuntajia maasulkuvirtojen havaitsemiseen. Näitä kutsutaan myös nimellä kaapelivirtamuuntaja. Samassa virtamuuntajassa voi olla monta erilaista sydäntä, esimerkiksi mittaussydän ja suojaussydän. Suojaussydämien tarkkuus vaatimukset ovat alhaisempia verrattuna mittaussydämiin. Standardeissa virtamuuntajille on annettu tarkkuusluokat, jotka määritellään virta- ja kulmavirheen sekä yhdistetyn virheen avulla. Suojaustarkoituksiin valmistetuissa virtamuuntajissa on tarkkuusluokkaa kuvaavan numeron jälkeen kirjan P. (Elovaara & Haarla, 2011, ss. 198-215)

Virtamuuntajien ensiö- ja toisiovirroille on standardisoitu mitoitusarvot. Yleisimmät käytetyt mitoitusvirta-arvot ovat 10 – 15 – 20 – 30 – 50 – 75 A sekä näiden kymmenkerrannaiset. Tavallisimmin käytetty toision mitoitusvirta on ollut 5 A, mutta nykyään käytetään 1 A toisiota. Tämä johtuu siitä, että taakat ovat nykyään pienemmät elektronisten ja digitaalisten suojareleiden yleistymisen myötä. 1 A toisio, mahdollistaa myös toisiolaitteiden sijoittamisen etäämmälle virtamuuntajista, sillä toisiokaapeleissa kuluva teho kasvaa mitä suurempi on etäisyys. (Elovaara & Haarla, 2011, ss. 198-215)

Virtamuuntajien tärkein ominaisuus suojauksen kannalta on kyky mitata virtaa oikosulkutilanteessa. Suuret hetkelliset virran tehollisarvot voivat kyllästyttää virtamuuntajaa ja siksi on tärkeää mitoittaa virtamuuntajat huolellisesti järjestelmän nimellisvirtojen sekä suojarelevalmistajan vaatimusten mukaan. (Elovaara & Haarla, 2011, ss. 198-215)

Jännitemuuntaja muuntaa muuntajan muuntosuhteen mukaisen jännitteen mittaustarkoituksiin mittareille sekä suojaustarkoitukseen suojareleille. Jännitemuuntajat jaetaan virtamuuntajien tavoin mittaukseen ja suojaukseen tarkoitettuihin jännitemuuntajiin. Ne myös jaetaan eri tarkkuus luokkiin määriteltyjen jännite- ja kulmavirheiden mukaan. (Elovaara & Haarla, 2011, ss. 215-223)

Jännitemuuntajan mitoitusjännite on valittava IEC:n mukaan verkon nimellisjännitteen mukaiseksi. Vaiheiden väliin kytkettävän ensiökäämin mitoitusjännite ilmoitetaan pääjännitteenä. Vaiheen ja maan väliin tai tähtipisteen ja maan väliin kytkettävän ensiökäämin tapauksessa mitoitusjännite ilmoitetaan vaihejännitteenä, esimerkiksi 20 000:√3 V. Yleisin Suomessa käytettävä toisiojännite on 100 V ensiökäämin ollessa kytkettynä vaiheiden väliin tai verkon tähtipisteeseen tai maanväliin. Vaiheen ja maan väliin kytketty ensiökäämin suositeltava mitoitusjännite toisiokäämille on 100:√3 V ja avokolmiokäämille 100:3 V. (Elovaara & Haarla, 2011, ss. 215-223)

Jännitemuuntajat voivat olla induktiivisia tai kapasitiivisia. Induktiivisia jännitemuuntajia käytetään yleisesti alle 245 kV käyttöjännitteillä ja kapasitiivista tätä suuremmilla jännitetasoilla. Samalla jännitemuuntajan sydämellä voi olla useampia mittaus- ja suojauskäämejä joista mittauskäämiä käytetään mittareille, suojauskäämiä suojareleiden jännitteen mittaukseen ja avokolmiokäämiä maasulkusuojauksen toteutukseen. (Elovaara & Haarla, 2011, ss. 215-223)

2.7 Suojareleet

Suojarele (engl. *protection relay*), on mittaava rele, joka on suojareleistyksen ja samalla koko suojausjärjestelmän osa (Elovaara & Haarla, 2011, s. 335). Relesuojauksen päätehtävänä on vikojen havaitseminen ja vika-alueen rajoittaminen mahdollisimman pieneksi. Suojareleiden toiminta perustuu toisiopiiristä mitattuihin jännitteen ja virran arvoihin, joiden avulla suoritetaan jopa monimutkaisia osoitin laskentoja riippuen käytetyistä suojausfunktiosta (Hirvonen, 2023, ss. 33-34). Relesuojauksen

toiminnallisuus tulee olla selektiivistä, riittävän nopea ja herkkä, niin että vaarat, vauriot, häiriöt ja haitat jäävät kohtuullisen. Tämän lisäksi verkon stabiilisuus tulee säilyä kaikissa olosuhteissa. Relesuojauksen tulee myös olla käyttövarma ja mahdollisimman yksinkertainen käytettävyyden kannalta (Mörsky, 1992, s. 15).

Suojareleet eivät yksin pysty suoriutumaan järjestelmän suojauksesta, vaan ne tarvitsevat rinnalleen muita komponentteja. Tällaisia ovat mittamuuntajat, katkaisijat, apuenergialähteet, hälytys- ja raportointikeskukset sekä mittaus, laukaisu- ja tiedonsiirtoyhteydet (Mörsky, 1992, s. 16).

Mittamuuntajat, eli virta- ja jännitemuuntajat, muuntavat sähköverkon primäärisuureet, virran ja jännitteen, suojareleille sopivaan muotoon. Mittamuuntajat mahdollistavat mittauspiirin erottamisen päävirtapiiristä, jolloin mittalaitteet voidaan sijoittaa etäälle suojattavasta kohteesta.

Katkaisija on sähköverkon primääripiirin osa, jolle suojareleet antavat sulku- ja avauskoskettien avulla toimintaohjeita. Katkaisija suorittaa kaikki tarvittavat kytkentätoimenpiteet sille määritetyssä kohdassa sähköverkkoa. Suojareleen tehtävänä on ohjata apuenergialähteestä saatavalla apujännitteellä katkaisijan auki- tai kiinnikytkentäkelalle oikea-aikaisesti pitkin laukaisu- tai kiinniohjauspiiriä. (Mörsky, 1992, s. 16)

Nykyisessä sähköjärjestelmässä käytetään numeerisia suojareleitä, missä mikroprosessorit hoitavat suojausalgoritmit. Yhdellä numeerisella suojareleellä voidaan suorittaa useita eri mittaus-, suojaus- ja ohjaustoimenpiteitä. Näin ollen kytkennät kojeistoissa ja ohjaustauluissa yksinkertaistuvat sekä tilaa säästyy.

Suojareleen itse laitteisto- että ohjelmistoelementtien modulaarinen rakenne helpottaa suojareleen sovelluttamista erilaisten suojaus- ja ohjausjärjestelmien toteuttamiseen koko järjestelmän elinkaaren ajan. Suojareleeseen voidaan lisätä toiminnollisuuksia

ohjelmallisesti ja fyysisesti lisäämällä erilaisia signaalituloja ja -lähtöjä riippuen laitteen I/O resursseista. (ABB, 2024; Hirvonen, 2023, s. 35)

Numeeristen suojareleiden asettelut tehdään ohjelmallisesti hyödyntäen eri valmistajien konfiguraatio työkaluja tai tarvittaessa kojeen HMI:ltä painikkeiden avulla. Suojareleen asettelut ja toiminnallisuuden konfigurointi voidaan tehdä etukäteen, jolloin suojareleen vaihto tai koestaminen nopeutuu (Hirvonen, 2023, s.35).

2.8 Generaattorin relesuojaus

Sana suojausjärjestelmä (engl. *protection system*) rajataan standardin SFS 60050-448 mukaan suojalaitteisiin, mittamuuntajiin, johdotukseen, laukaisupiiriin, teholähteisiin sekä mahdollisiin tiedonsiirtojärjestelmiin ja jälleenkytkentäautomatiikkaan. Katkaisijat luetaan osaksi sähkönsiirto- ja jakelujärjestelmää, mutta ilman suojausjärjestelmän tekemiä mittaus- ja ohjaustoimintoja ei katkaisija voi toimia. Suojauksen tarkoitus on havaita viat ja epänormaalit olosuhteet voimajärjestelmässä, jotta viat voidaan selvittää tai epänormaalit olosuhteet saadaan loppumaan. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 335)

Tahtigeneraattorit ovat erikokoisia, eikä kaikkia generaattoreita ole suojattu samalla tavalla. Generaattorien kytkentä verkkoon vaihtelee suorasta kiskokytkennästä ja generaattorimuuntaja eli blokkimuuntaja kytkennän väliltä. Myös generaattoreiden maadoitus tavat vaihtelevat tapauskohtaisesti. Nämä kytkentätavat vaikuttavat suuresti muun muassa maasulkusuojauksen toteutukseen. (Häsä, 2009, s. 17; Elovaara & Haarla, 2011, p. 374)

Isoimmat ja kalliimmat generaattorit ovat yleensä suojattu paljon laajemmin kuin pienemmät. Generaattorin relesuojauksessa käytettävää laitetta voidaan nimittää suojausyksiköksi tai generaattorin monitoimireleeksi (engl. *multifunction generator protection relay*) (Elovaara & Haarla, 2011, s. 374). Seuraavassa luvussa 3 käsitellään tarkemmin tahtigeneraattorissa esiintyviä erilaisia vikoja sekä mitä eri suojaustoimintoja käytetään näiden vikojen havaitsemiseen.

Generaattorin suojaus- ja ohjaustoiminnot on suunniteltu releessä suojaamaan sekä verkkoon suoraan kytkettyä generaattoria että blokkimuuntaja kytkettyjä generaattoreita. Generaattori on sähköjärjestelmässä tärkein ja samalla kallein komponentti; siksi generaattoria halutaan suojata monenlaisilta vioilta ja epänormaaleilta käyttötilanteilta, jotka voivat vaikuttaa sen suorituskykyyn ja elinkaareen. Tärkeimpiä generaattorivikojen luokkia ovat sähköiset, termisen ja mekaanisen rasituksen aiheuttamat käämiviat. Nämä voivat ilmetä oikosulkuina, ylikuormituksina tai käämien katkeamisena. Muita vikoja ovat esimerkiksi vaiheiden väliset viat, maasulut, staattorin ja roottorin viat, ylijännitteet ja ylimagnetointi.

2.9 Generaattorivikoihin varautuminen

Sanna Häsän (2009, s. 14) diplomityössä on esitelty sisäisiä ja ulkoisia generaattorivikoja. Sisäiset viat ovat staattorissa, roottorissa tai magnetointipiirissä esiintyviä vikoja, kun taas ulkoisiin vikoihin luetaan verkossa, blokkimuuntajassa tai turbiinin säädössä esiintyvät viat. Vika saattaa myös olla sisäisten ja ulkoisten vikojen yhteisvaikutus. Taulukossa 1 on esitetty generaattorin vikoja ja suojaustarpeita.

Taulukko 1. Generaattorin viat ja suojaustarpeet (Häsä, 2009, s. 14).

SISÄISET VIAT		**ULKOISET VIAT**		
Staattorissa	**Roottorissa**	**Verkko ja muuntaja**	**Turbiini ja jännitesäätäjä**	**Lisäksi**
Oikosulku	Magnetointipiirivika	Epäsymmetrinen kuorma	Takateho	Epätahtikytkentä
Ylivirta	Maasulku	Epätahtikäyttö	Ylijännite	Jännitemittauspiirivika
Kierrossulku	Ylijännite	Maasulku	Alijännite	Generaattorikatkaisijavika
Maasulku	Alimagnetointi	Oikosulut	Ylitaajuus	Laakerivirta
	Ylimagnetointi	Ylikuormitus	Alitaajuus	Jäähdytysjärjestelmävika
	Ylivirta	Alitaajuus	Ylimagnetointi	Tulipalo
	Kierrossulku	Tehon heilahtelu	Ryntäys	

Suojarele suojaa generaattoria, turbiinia ja generaattorimuuntajaa sähköisiltä vioilta, ehkäisten täten mahdollisia mekaanisia vaurioita. Suojauslaitteiden käytön laajuus ja suojauksen vaativuus tulee aina tarkastella tapauskohtaisesti arvioiden koneelle aiheutuvat riskit ja keskeytyskustannukset eri kokoisille koneille ja laitoksille. Liiallinen suojauslaitteiden käyttö aiheuttaa turhia kustannuksia ja tämän lisäksi järjestelmän virheherkkyys kasvaa, jolloin lisätään järjestelmän häiriölähteitä (Mörsky, 1992, s. 141).

3 Generaattorin suojaustoiminnot

Suojausfunktioiden tulee olla herkkiä vian havaitsemiseen, mutta samaan aikaan suojauksien tulee olla epäherkkiä ulkoisten vikojen suhteen. Suojalaitteiden tarpeeton toiminta halutaan estää, koska se voi olla haitallista verkon stabiiliudelle, taloudelle tai sähkön laadulle. Pienet generaattorit ja epätahtikoneet halutaan vian sattuessa irrottaa verkosta mahdollisimman nopeasti, jotta vian kesto sekä laajuus jäävät mahdollisimman pieniksi. Myös jälleen kytkentöjen onnistumiseksi pienemmät generaattori olisi hyvä kytkeä irti verkosta tapauskohtaisesti, jotteivat ne aiheuta ylimääräisiä tehoheilahteluita verkkoon. Suuret ja saarekekäytössä operoivat generaattorit pyritään pitämään verkossa mahdollisimman pitkään verkon stabiiliuden kannalta (Vieri, 2015, s. 30).

Seuraavissa tämän luvun alaluvuissa käsitellään eri vikatilanteissa käytettyjä suojaustoimintoja yleisesti. Tarkempi tarkastelu käydään läpi myöhemmin luvussa 5.

3.1 Differentiaalisuojaus

Differentiaali- eli erovirtasuojausta käytetään generaattorisuojauksen staattorin oikosulkusuojana, ja se on useimmiten generaattorin ensisijainen oikosulkusuojaus. Koneen sisäisten vikojen mahdollisuus on suhteellisen pieni. Kustannuksiin ja tuotantohäviökustannuksiin liittyvät seuraukset ovat kuitenkin usein vakavia, mikä tekee differentiaalisuojauksesta tärkeän suojaustoiminnon. Staattorissa tapahtuvat oikosulut, eli käämisulut, halutaan havaita mahdollisimman nopeasti, sillä vaiheiden väliset oikosulut aiheuttavat normaalisti suuria vikavirtoja. Suurten oikosulkuvirtojen virtavoimat ovat voimakkaita, jotka voivat vahingoittaa staattorikäämityksen lisäksi muita koneen komponentteja sekä aiheuttaa mahdollisesti räjähdyksiä ja tulipaloja. (Mörsky, 1992, ss. 145-148)

Virta mitataan molemmin puolin staattoria, ja oikosulku on tapahtunut jossain virtamuuntajien välillä, jos näiden mitatut virrat eroavat toisistaan. Tämä mittaus

perustuu Kirchoffin virtalakiin, jonka mukaan solmupisteeseen tulevien virtojen summa on yhtä suuri kuin lähtevien virtojen summa (Vieri, 2015, s. 51).

Differentiaalisuojan toiminta-alueita tarkastellaan vakavointikäyrällä, joka esittää releen laukaisuun johtavan erovirran (engl. *differential current*) ja vakavointivirran (engl. *bias current*) suhdetta. Eli mitä suurempi virta suojauskohteen läpi kulkee, sitä suurempi erovirta vaaditaan laukaisuun. Vakavointikäyrällä (tai tarkemmin sanottuna vakavointikertoimella) pyritään kompensoimaan virtamuuntajien kyllästymisestä aiheutuvaa näennäistä erovirtaa, joka voi johtua vikaantuneesta virtamuuntajasta tai sen kyllästymisestä. Vakavointikertoimella määritetään suojauksen toimintaherkkyys. (Järvinen, 2022, s. 30).

3.2 Ylivirta- ja ylikuormitussuojaus

Ulkopuolisten ja sisäisten ylivirtojen aiheuttamien oikosulkujen varalta generaattori tulee varustaa oikosulkusuojauksella ja ylikuormitussuojalla. Suuntaamattomalla ylivirtasuojalla saadaan suojausjärjestelmän oikosulkusuojaukseen selektiivisyyttä ja se toimii yleisesti differentiaalisuojan varasuojana, mutta sillä on myös rooli maasulkujen havaitsemisessa. Yleensä generaattorin virran mittaus otetaan generaattorin tähtipistepuolelta, jolloin ylivirtasuojaus havahtuu generaattorin sisäisten oikosulkujen aikana – myös generaattorin ollessa irti verkosta. Sisäisillä oikosuluilla tarkoitetaan staattorin kierrossulkuja eli vaiheiden sisäisiä oikosulkuja. (Häsä, 2009, ss. 24-25) Ylivirtasuojausta käytetään myös generaattoreiden epänormaaleissa ylikuormitus käytöissä suojaamaan generaattoria nopeissa ylikuormitustilanteissa, joissa ylikuormitussuojaus ei ehdi toimia (ABB, 2024).

Roottorin ylivirran syynä voi olla mm. häiriöt generaattorin jännitteen säädössä, magnetointikäämien kierrossulku tai käyttövirhe. Myös verkossa tapahtuneet häiriöt voivat johtaa roottorin ylikuormittumiseen generaattorin syöttäessä verkkoon loistehoa verkkojännitteen tukemiseksi. Staattista magnetointia käytettäessä on magnetointipiiri varustettava kaksiportaisella ylivirtasuojalla. Ylivirtasuojan pikalaukaisu toimii

oikosulkusuojana ja vakioaikainen aikalaukaisu suojaa roottoria ylipitkältä sysäysmagnetoinnilta. Suurilla generaattoreihin suositellaan ylivirtasuojan lisäksi ylikuormitussuojaa kaksi portaisena, joista ensimmäistä käytetään hälyttävänä toimintona. Vastaavasti pyörivää harjatonta magnetointia käytettäessä ei itse roottorin piiriin voida kytkeä ylikuormitussuojaa. (Mörsky, 1992, s. 142)

Ylikuormitussuojalla suojataan staattorin käämitystä liialliselta virran kuormituksesta aiheutuvalta lämmöltä. Kun tahtikonetta ylikuormitetaan, sen käämityksen lämpötila nousee, mikä aiheuttaa heikennyksiä eristykseen. Eristyksen heikentyminen lisää oikosulkujen ja maasulkujen riskiä. (Vieri, 2015, s. 44).

Ylikuormitussuojan toimintakäyrä on käänteisaikahidasteinen, joka voi perustua suoraan lämpötilanmittaukseen generaattorista tai laskennalliseen lämpötilaan virran tehollisarvoista. Suojareleelle tuodaan generaattorin lämpötila-antureista mittaustieto resistiivisten komponenttien tai milliampeeri lähettimien avulla. Nämä mittaustulot prosessoidaan releellä RTD/mA -tuloissa. Vastaavasti laskennallisesti suoja laskee ylilämpenemisen lämpötilan kuvaajan mukaisesti mitatuista virran arvoista. Suojareleen ylikuormitussuojaus toimii myös automaatiojärjestelmän varasuojana, sillä varsinkin suurissa generaattoreissa lämpötilan automaattinen valvonta ja kaukomittaus toteutetaan sopiviin kohtiin sijoitettujen lämpötila-antureiden avulla. Valvottavia kohteita ovat staattoriurat, laakeripesät ja kannatuslaakerin osat. Myös jäähdytysväliaineen lämpötiloja sekä jäähdytysveden virtausta valvotaan automaationavulla. (ABB, 2024)

Jänniteriippuvainen ylivirtasuoja osallistuu myös ylivirta- ja oikosulkutilanteisiin pienillä jännitteillä. (Vieri, 2015, s. 47). Oikosulun sattuessa esimerkiksi koneen navoissa, laskee generaattorin jännite ja samalla magnetointi niin alas, että oikosulkuvirta pienenee nopeasti alle ylivirtasuojan havahtumisarvon. Ilmiö johtuu generaattorin tahtireaktanssista (X_d), jonka synnyttämää jatkuvaa vikavirtaa ei havaita tavallisella ylivirtafunktiolla. (ABB, 2023; Mörsky, 1992, s. 143)

Joissain tapauksissa automaattinen jännitesäätäjä (AVR) voi edes auttaa ylläpitämään suuria vikavirtoja ohjatessaan generaattorin magnetointijärjestelmää. Jos AVR on pois käytöstä tai sen toiminnassa ilmenee sisäinen vika, pienet vikavirrat voivat jäädä muilta suojilta huomaamatta. Yleisesti jänniteriippuvainen ylivirtasuoja toimii selektiivisesti ylivirtasuojan varasuojana, mutta sen tietyt ominaisuudet parantavat suojausjärjestelmän herkkyyttä. Esimerkiksi ns. jänniterajoitetussa (engl. *voltage restrained*) menetelmässä säädetään ylivirtasuojauksen herkkyyttä tekemällä ylivirran havahtumisarvosta verrannollinen napajännitteen arvoon. Virran havahtumisarvo vaihtelee siis napajännitteen mukaan asetetun jännitteen ylä- ja alarajan välillä, jolloin suojan toiminnalle vaaditaan pienempi vikavirta. (ABB, 2024)

3.3 Staattorin maasulkusuojaus

Kaikilla generaattoreilla tulisi olla staattorin oikosulku- ja maasulkusuojaus. Käämin eriste voi pettää ylijännitteen, mekaanisen vaurion tai kuumenemisen seurauksena. Staattorin oikosulku aiheutuu käämin eristeen pettämisestä, mikä aiheuttaa valokaaren vaiheiden välille tai vaiheen ja rungon välillä. Jos eriste pettää vaihekäämin ja rungon välillä, seurauksena on maasulku, joka on yleisempi vika kuin oikosulku. (Elovaara & Haarla, 2011, s.374).

Mekaaninen ja generaattorin ylilämmöstä johtuva kuormitus heikentää staattorikäämin eristystä, mikä voi lopulta aiheuttaa maasulun käämin ja staattorin sydämen välille. Vikavirran suuruus maasulun aikana riippuu generaattorin maadoitustavasta. Yleensä generaattorin maadoitus hoidetaan nollapisteen resistanssivastuksen avulla, joka mitoitetaan siten, että se rajoittaa suurinta maasulkuvirtaa 5–10 ampeerin välillä.

Staattorin maasulkusuojaus, joka kattaa 95 % käämityksestä, on suunniteltu havaitsemaan maasulkuvikoja generaattorin staattorinkäämeissä. Tämä suojaus toteutetaan mittaamalla nollajännite tai nollavirran perusaaltoa, tai käyttämällä näiden yhdistelmää. Suojausalue ulottuu käämityksen alkupäästä noin 95 % sen

kokonaispituudesta, jättäen generaattorin tähtipisteen lähellä olevat käämiosuudet suojausalueen ulkopuolelle. (Babu, 2019)

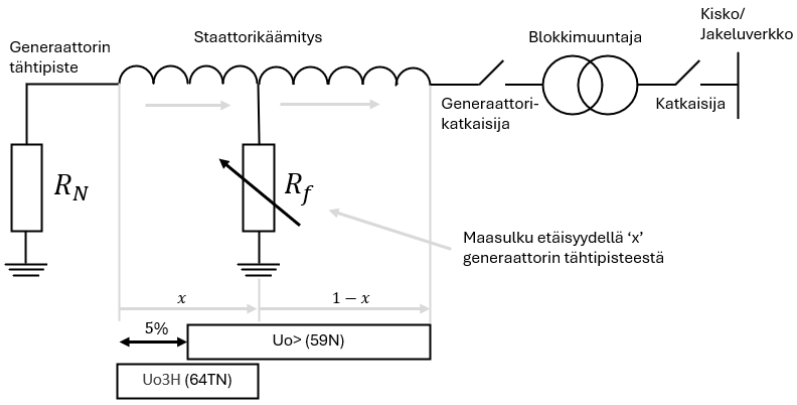
Blokkimuuntaja toteutuksissa käytetään nollajänniteperiaatetta, jolloin generaattorin nollajännite voidaan mitata jännitemuuntajan avokolmiokytkennästä, muuntajan nollapisteestä tai laskennallisesti pääjännitemittauksesta. Maasulkusuojaus voidaan toteuttaa myös herkällä maasulkuvirtamittauksella, kaapelivirtamuuntajan summavirtamittauksella. Maasulkuvirta voidaan tällöin mitata generaattorin tähtipisteessä tai maadoitusresistanssin läpi kulkevasta nollavirrasta tai summavirtaperiaatteella generaattorin molemmin puolin asetelluista kaapelivirtamuuntajista. (Vieri, 2015, s. 38)

Kiskoyhdistetyissä generaattoritoteutuksissa, missä useita generaattoreita on kytketty samaan kiskoon ilman blokkimuuntajaa, käytetään suunnattua maasulkusuojausta. Tämä on tärkeää, sillä maasulun aiheuttama nollajännite näkyy yhteisessä kiskossa kaikilla generaattoreilla, jolloin paikallista nollajännitettä on vaikea määrittää. Suunnattu maasulkusuojaus mahdollistaa maasulun suunnan ja sijainnin määrittämisen, mikä on tärkeää, kun kiskoa syötetään useasta suunnasta (Siemens, 2024). Nollajännitesuojausta voidaan käyttää tässä tapauksessa kiskon maasulkujen havaitsemiseen. Jotta suojausjärjestelmä olisi selektiivinen, tulee suunnatun maasulkusuojauksen havaita ja poistaa vika ennen nollajännitesuojaa, jos maasulku tapahtuu generaattorissa.

Lähellä generaattorin tähtipistettä tapahtuvissa maasuluissa nollajännite U_0 menee nollaan, jonka seurauksena nollajännitteeseen ja maasulkuvirtaan perustuva suojaus ei toimi. 100 %:n staattorin maasulkusuojaus saadaan toteutettua kolmanteen yliaaltoon perustuvalla staattorin maasulkusuojauksella (ABB, 2023). Kolmatta yliaaltoa synnyttää generaattorin napojen muoto. Kun maasulku syntyy, staattorikäämityksessä loiskapasitanssien suhde muuttuu, koska yksi kapasitansseista oikosulkeutuu maasulun vaikutuksesta. Tästä johtuen tähtipisteessä mitattu kolmas yliaalto pienenee, kun taas generaattorin liittimissä mitattu kolmas yliaalto suurenee. Kolmas yliaalto muodostaa

niin kutsutun nollajärjestelmän ja voidaan täten havaita tähti-kolmio -kytketyllä jännitemuuntajalla tai laskemalla nollajärjestelmä vaihejännitteistä (Häsä, 2009, s. 67).

Kuvassa 4 on esitetty 100%:nen maasulkusuojaus toteutettu nollajännitteen perustaajuussuojauksella, sekä kolmanteen jännitteen harmoniseen yliaaltoon perustuvalla suojauksella.



Kuva 4. 100 % staattorin maasulkusuojaus, R_f on maasulkua kuvaa vikavastus ja R_N on generaattorin maadoitusvastus. (ABB, 2024).

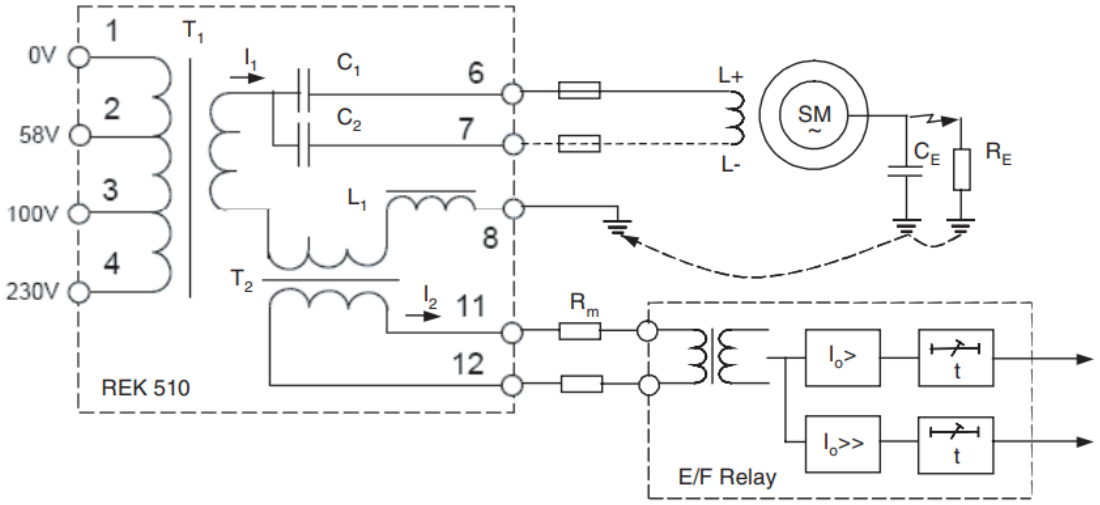
Vioittuneen staattorikäämityksen aiheuttama nollajännitteen suuruus vähenee kohti maadoituspistettä, joten sen nollajännitteen havaitseminen kiskonpuolen jännitemuuntajalla muuttuu vaikeaksi. Tällöin maasulkujännitteen suuruus ei välttämättä riitä nollajännitesuojalle, joka kattaa suurimmillaan 95 % generaattorin maasulkusuojauksesta. Kolmatta yliaaltoa muodostuu lähes kaikissa vanhemmissa generaattoreissa napojen epäsymmetrian seurauksena. Kolmannen yliaallon jännitesuojaus toimii alijänniteperiaatteella eli suojaus havahtuu, kun mitattu kolmas yliaalto alittaa asetetun kynnysarvon. Koska kolmannen yliaallon jakauma vaihtelee generaattorikohtaisesti, suojausasettelut voidaan määrittää luotettavasti vain ensiökokein, jolloin napajännite mitataan suoraan generaattorin käämeistä. Nollajännitemittauksen lisäksi voidaan mitata maadoitusvastuksen kautta kulkevaa maasulkuvirtaa ylivirta periaatteella (ABB, 2024).

Kolmatta harmonista yliaaltoa tulee esiintyä generaattorin pyöriessä vähintään 1% verran nimellisestä jännitteestä, jotta suojaus toimii luetettavasti. Ilmiö saattaa osoittautua haastavaksi, joidenkin uusien generaattoreiden kohdalla, sillä tarkkaan mallinnettuihin staattorikäämityksiin ei kolmatta yliaaltoa muodostu riittävästi. Tämän lisäksi suojauksen toiminta tulee estää käynnistys ja seisontatiloissa. (ABB, 2024).

3.4 Roottorin maasulkusuojaus

Tahtigeneraattorin roottorin magnetointikäämitys on maasta erotettu tasavirtajärjestelmä. Magnetointikäämityksen ja roottorin välinen eristys voi altistua epänormaalille mekaaniselle tai termiselle rasitukselle, johtuen esimerkiksi tärinästä ja ylivirrasta sekä jäähdytysjärjestelmäviasta, aiheuttaen näin generaattoriin maasulun syntymisen riskin (ABB, 2007, ss. 4-6). Yksi maasulku ei yleensä vaikuta generaattorin toimintaan eikä vaurioita sitä, mutta se lisää toisen maasulun syntymisen riskiä. Ensimmäisessä maasulussa tapahtunut eristysvastuksen merkittävä pieneneminen tulee havaita järjestelmässä mahdollisimman tarkasti. Kaksoismaasulun aikana osa roottorin magnetointivirrasta oikosulkeutuu eristysvikakohtien kautta, minkä seurauksena ilmavälivuohon tulee epäsymmetriaa, jolloin roottori alkaa värähdellä, mikä kuumentaa sitä (Elovaara & Haarla, 2011, s.375).

Roottorin maasulkusuojauksessa käytetyt menetelmät vaihtelevat valmistajan ja suojattavan kohteen mukaan. Tavallisesti käytettyjä menetelmiä ovat potentiometri- , tasavirtasyöttö- ja vaihtovirtasyöttömenetelmä. Näiden lisäksi nykyään voidaan käyttää kanttiaaltoon perustuvaa menetelmää (Anderson, 1998, ss. 729-731). Perusajatuksena on, että syötetään roottorin ja maanvälille jännitettä ja maasulun synnyttämä vikavirtaan pyritään havaitsemaan järjestelmässä. Kuvassa 5 on esitetty ABB:n kehittämän virtainjektiolaitteen REK510 toimintaperiaate vaihtosähkösyöttömenetelmällä.



Kuva 5. Roottorin maasulkusuojauksen toteuttaminen ABB:n REK510 virtainjektiolaitteella. (ABB, 2024)

Virtainjektiolaitteessa apuvaihtojännite muodostaa pienen latausvirran, joka kulkee kondensaattoreiden C_1 ja C_2, harjojen kosketusvastusten ja maakapasitanssi C_E kautta maahan. Normaalikäytössä kenttäpiirin ja maan välillä kulkee hyvin pieni vuotovirta maakapasitanssin kautta. Vikatilanteessa kenttäpiiri joutuu suoraan kosketukseen maan kanssa vikavastuksen R_E kautta. Virtamuuntaja T_2 vahvistaa vikavirtaa I_2 releen virtakanaville, jolloin haitalliseksi muodostunut roottorin maasulkuvirta voidaan havaita ja ryhtyä toimenpiteisiin. Tavallisesti suojaus on kaksiportainen, missä ensimmäinen on hälyttävä ja toinen laukaiseva porras. (ABB, 2024)

3.5 Ali-impedanssisuojaus

Ali-impedanssisuojauksen käyttö on erityisen tarpeellista tapauksissa, joissa oikosulkuvirta voi laskea nimellisen kuormitusvirran alle niin nopeasti, että ylivirtasuojaus ei ehdi havaitsemaan sitä (Vieri, 2015, s. 49). Ali-impedanssisuojalla pyritään yleisesti suojaamaan generaattorin ja blokkimuuntajan välistä aluetta. Sen tarkoituksena on suojata kiskoa ja blokkimuuntajan alajännitepuolta sekä generaattorin käämityksiä oikosulkujen varalta. Erityisesti turbogeneraattoreissa, joilla on suuri

tahtireaktanssi, voi jatkuva oikosulkuvirta olla nimellisvirtaa pienempi, jolloin ylivirtasuoja ei havaitse vikaa (Mörsky, 1992, s. 143).

Impedanssi mitataan jännitteen ja virran myötäkomponenteista, joiden avulla impedanssi lasketaan Ohmin lain avulla. Jännite mitataan yleensä generaattorin napajännitteestä, generaattorin verkon puoleiset jännitemuuntajat, ja virta generaattorin tähtipisteen puolelta. Hyödyntäen osoitinlaskentaa, rele havahtuu, kun mitatuista jännitteen ja virran tehollisarvoista laskettu impedanssi laskee asetellun impedanssi arvon alapuolelle. (ABB, 2024)

3.6 Vinokuormitussuojaus

Vinokuormitussuojaus eli epäsymmetriasuoja suojaa generaattoria liian suurelta vinokuormalta eli tilanteissa, joissa esiintyy liian paljon virran vastakomponenttia I_2 (engl. *negative-sequence*). Koneissa virran vastakomponentti aiheuttaa päävuota vastaan pyörivän magneettivuon, eli pyörrevirtoja, jotka voivat aiheuttaa eristykselle vaarallisen jännitteen koneen roottoriin sekä paikallista ylikuumenemista, tärinää ja kipinöintiä roottorikäämitykseen (Peltoniemi, 2016, s. 23; Mörsky, 1992, s. 41).

Vinokuormitusta voivat aiheuttaa esimerkiksi oikosulut ja niistä johtuvat vioittuneet käämitykset, verkon epäsymmetria ja käynnistys sekä generaattorin irrotustilanteen synnyttämät yliaallot (ABB, 2024). Suurimmat vinokuormitukset esiintyvät yksi- ja kaksivaiheisten oikosulkujen yhteydessä, mutta myös normaalit kaksivaiheiset kuormitukset aiheuttavat verkon virtaan ja jännitteeseen vastakomponenttia. Suojausta voidaan myös käyttää havaitsemaan johtimien katkeamisia sekä vikojen ja napaisuusongelmien havaitsemiseen virtamuuntajissa. (Mörsky, 1992, s. 41; Häsä, 2009, s. 30)

Generaattorin kuormitus on epäsymmetrinen ja siksi vasta- ja nollakomponentteja esiintyy generaattoripiirissä myötäkomponentin lisäksi. Suojareleet laskevat myötä-, vasta- ja nollakomponentit yhtälöillä

$$\bar{I}_1 = \frac{\bar{I}_A + a\bar{I}_B + a^2\bar{I}_C}{3} \tag{16}$$

$$\bar{I}_2 = \frac{\bar{I}_A + a^2\bar{I}_B + a\bar{I}_C}{3} \tag{17}$$

$$\bar{I}_0 = \frac{\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C}{3} \tag{18}$$

missä $\bar{I}_1$ on virran myötäkomponentti, $\bar{I}_2$ on virran vastakomponentti ja $\bar{I}_0$ on virran nollakomponentti. Kun käynnissä olevalle koneelle syötetyt jännitteet muuttuvat epäsymmetrisiksi, myötäkomponentin virta pysyy muuttumattomana, mutta virran vastakomponenttia ilmenee epäsymmetrian vuoksi järjestelmässä. Esimerkiksi jos epäsymmetrisen tilan aiheuttaa avoin piiri missä tahansa vaiheessa, niin virran vastakomponentti virtaa vastakkaiseen suuntaan kuin tilannetta edeltänyt kuormitusvirta. Myötä- ja vastakomponentin virrat yhdessä muodostavat $\sqrt{3}$ kertaisen virran terveissä vaiheissa sekä nollajohdossa. (Csanyi, 2024)

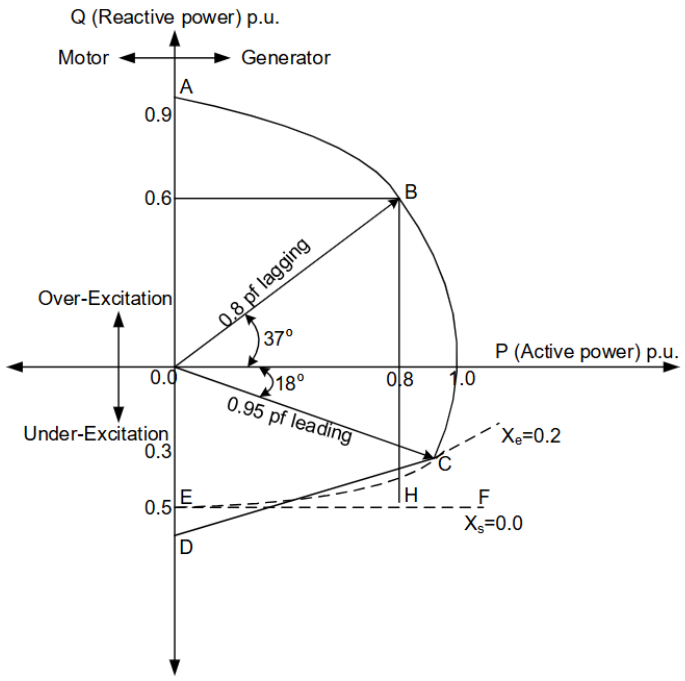
Virran vastakomponentit kulkevat staattorikäämien läpi indusoiden jännitteen vastakomponentin roottorin käämeihin. Tämä voi johtaa suureen roottorivirtaan, joka vaurioittaa roottorin käämitystä. Indusoituneen virran taajuus on noin kaksinkertainen syöttötaajuuteen verrattuna. Pintailmiön vuoksi indusoitunut virta, jonka taajuus on kaksinkertainen syöttötaajuuteen verrattuna, kohtaa suuren roottorin resistanssin, mikä johtaa liialliseen kuumenemiseen jopa vaihevirroilla, jotka ovat pienempiä kuin tahtikoneen nimellisvirta. (ABB, 2024)

3.7 Alimagnetointisuojaus

Normaalisti tahtigeneraattorin roottori ja sen roottorikäämin luoma magneettikenttä sekä staattorinkäämin luoma magneettikenttä pyörivät tahtinopeudella. (Elovaara & Haarla, 2011, s. 376). Alimagnetointitilassa generaattorin loisteho on melkein täysin

kapasitiivista, ja tällöin stabiiliuden menettämisen riski on suuri, jonka seurauksena tahtigeneraattori voi pudota tahdista. Alimagnetoituna staattorissa ja roottorissa esiintyy voimakkaita virta- ja jännitesysäyksiä sekä kuumenemista. Alimagnetointitilanne syntyy, kun generaattorin magnetointi ei enää riitä, vaan generaattorin loisteho menee niin paljon kapasitiiviselle puolelle, että vaarana on stabiilisuuden menettäminen. Alimagnetointitilaan joutuminen voi aiheutua magnetointikatkaisijan aukeamisesta, magnetoinnin katkeamisesta, viallisesta jännitteen säädöstä tai verkossa tapahtuvasta jännitteen noususta. (Vieri, 2015, s. 55 & Pahkala, 2015, s. 12-27).

Automaattisen jännitteensäätimen tai magnetointijärjestelmän vika voi aiheuttaa magnetoinnin täydellisen menetyksen. Liukurenkaiden oikosulku laskee magnetointijännitteen nollaan. Tämä aiheuttaa magnetointivirran asteittaisen pienenemisen ja lopulta magnetoinnin menetyksen. Myös kenttäpiirin avoin piiri aiheuttaa magnetoinnin menetyksen. Nämä ovat tyypillisiä esimerkkejä, jotka aiheuttavat alimagnetointia tahtikoneissa (ABB, 2024). Kuvassa 6 on esitetty synkronisen generaattorin suorituskykykäyrä.



Kuva 6. Synkronisen generaattorin suorituskykykäyrä (ABB, 2024).

Kuvan 6 suorituskykykäyrä kuvaa koneen alimagnetointikykyä. Generaattorin tahtikäytön heikentyessä eli kuormituksen lisääntyessä tulee magnetointia lisätä, jotta kone pysyy sille annetuissa arvoissa. Alimagnetointisuoja suojaa tahtikoneita epävakaalta toiminnalta, joka johtuu magnetoinnin menetyksestä. Osittainen tai täydellinen magnetoinnin menetys aiheuttaa loistehon oton verkosta koneeseen, ja järjestelmän reaktanssi muuttuu negatiiviseksi koneen liittimistä katsottuna. Tällainen reaktanssin putoaminen voidaan havaita mittaamalla järjestelmän impedanssi (ABB, 2024). Alimagnetointisuojaus tulisi lukita verkon lähioikosuluissa ja staattorijännitteen puuttuessa, koska nämä eivät ole magnetointipiirin vikoja (Mörsky, 1992, s. 163).

3.8 Ylimagnetointisuojaus

Ylimagnetointisuojausta käytetään suojaamaan generaattoria ja tehomuuntajia magneettivuon liialta tiheydeltä ja magnetointikäämin kyllästymiseltä. Ylimagnetoituna generaattorin magneettivuossa hajavuon määrä lisääntyy, joka voi johtaa voimakkaisiin hystereesi- ja pyörrevirtahäviöihin. Nämä aiheuttavat generaattorissa ylilämpenemistä

laminoimattomissa osissa (ABB, 2024). Yksinkertaistettuna ylimagnetointia esiintyy tilanteissa, joissa magnetointijännitteen ja taajuuden suhde on liian korkea (Vieri, 2015, s. 57). Ylijännite, alitaajuus tai näiden yhdistelmä johtaa liialliseen vuontiheyteen eli ylimagnetointitilaan.

Generaattorin ylijännitekestävyys pienenee sitä mukaa, kun taajuus pienenee. Muun muassa saarekekäyttötilanteissa generaattorin pyörimisnopeuden lasku suurentaa magneettivuontiheyttä jos generaattorin napajännite pysyy vakiona. Taajuuden pienentyessä magneettivuon tiheys kasvaa, mikä aiheuttaa rautasydämen magneettisen kyllästymisen ja nopean lämpenemisen (Vieri, 2015, s. 59).

3.9 Alijännitesuojaus

Liiallinen loistehon kulutus (liiallisen induktiivisen kuormituksen, suurten induktiomoottoreiden käynnistyksen tai vikatilanteen yhteydessä) voi johtaa generaattorin napajännitteen laskuun. Alijännitettä voi myös esiintyä jännitesäätäjän virheellisen toiminnan vuoksi. Alijännitteellä ei generaattorin kannalta ole negatiivista vaikutusta, mutta pienemmät jännitteillä operoiva kone kuluttaa enemmän virtaa samalla kuormituksella, mikä voi johtaa vastaavasti lämpenemiseen. (ABB, 2023)

Alijännitesuoja suojaa generaattoria jännitesäätölaitteiston toimintahäiriöltä, säätölaitteen manuaaliohjauksen virheiltä, ylikuormituksesta johtuvista alijännitteiltä sekä verkkohäiriön yhteydessä esiintyviltä alijännitteiltä. (Peltoniemi, 2016, s. 26)

Alijännitesuojausta voidaan käyttää generaattorissa ali-impedanssisuojan varasuojana, mutta usein sitä pidetään hälyttävänä suojana. Generaattorisuojauksessa sitä käytetään ainoastaan pumppuvoimalaitoksissa (Häsä, 2009, s. 31). Jos suoja on laukaiseva, sen lukitustuloon tulee tuoda ulkoinen lukitus esimerkiksi mittauspiirin toisiojännitteen kadotessa. Lukitustulo voidaan tuoda binääritulona mittausvarokkeen apukoskettimesta tai sisäisestä varokkeen itsevalvontalogiikasta.

3.10 Ylijännitesuojaus

Generaattori saattaa tarvita ylijännitesuojausta käyttötaajuisia ylijännitteitä vastaan. Staattorikäämityksen eristeet voivat vioittua ylijännitteen synnyttämän lämmön vuoksi, jolloin kone on ylimagnetointitilassa. Ylijännitetilassa myös voimakoneen nopeus kasvaa, jolloin voi syntyä mekaanisia vaurioita (Elovaara & Haarla, 2011, s. 360, 376).

Ylijännitettä aiheuttavat magnetointi ja jännitesäätäjän häiriöt, voimakoneen ryntäys turbiinisäätäjän häiriöiden seurauksena, verkon kuormituksen katoaminen ja muut verkkohäiriöt sekä tyhjäkäyvän johdon kapasitanssit. Ylijännitesuojauksen ei tule toimia liian nopeasti, jotta jännitesäätäjällä on aikaa toimia esimerkiksi kuormanpudotuksen yhteydessä (Peltoniemi, 2016, s. 25).

3.11 Taajuussuojaus

Taajuussuojalla mitataan generaattorin jännitteen taajuutta, ja sen laskiessa liian pieneksi tai noustessa liian suureksi suoja lähettää laukaisukäskyn eteenpäin (Vieri, 2015, s. 60). Alitaajuutta esiintyy, kun generaattoria ylikuormitetaan tai sähköjärjestelmässä on jokin vika, jolloin generaattorin teho ei riitä kattamaan tarvittavia verkon kuormituksia. Tällöin generaattoria tulee kiihdyttää (Vieri, 2015, s. 60). Alitaajuus on vaarallinen turbogeneraattorin turpiinin siivekkeille värähtelyiden takia johtaen haurastumiseen. Alitaajuus saattaa myös häiritä generaattorin jäähdytysjärjestelmää (Mörsky, 1992, s. 155).

Ylitaajuutta esiintyy, jos verkon kuormitus putoaa eli verkossa on ylituotantoa tai generaattorin jännitesäätäjä on vioittunut (Vieri, 2015, s. 60). Ylitaajuussuojaus toimii generaattorin ryntäyssuojana generaattorikatkaisijan ollessa kiinni.

Koska nykyreleisiin saadaan monta eri taajuusporrasta, sen ensimmäinen tehtävä on hälyttävänä suojana ilmoittaa käyttäjälle taajuuden heilahtelu. Suuret taajuuden

muutokset halutaan kuitenkin poistaa, jotta ne eivät vaikuta liikaa verkon toimintaan. Normaalikäytön aikana taajuuspoikkeama kertoo verkon häiriöistä.

3.12 Takateho

Takatehosuojaus on tarkoitettu höyry- ja vesiturpiineille tai yleisesti sähköjärjestelmälle moottorikäyttöjen varalta. Suojausta pidetään yleensä osana generaattorin suojausjärjestelmää, koska se käyttää sähköisiä suureita takatehon havaitsemiseen järjestelmässä. Generaattorille moottorikäyttö ei ole haitallista vaan sillä pyritään suojaamaan voimakoneita. (Anderson, 1998, ss. 737-738)

Takatehosuojalla pyritään estämään generaattorin moottorikäytöt eli tilanteet, joissa generaattori ottaa verkosta virtaa ja alkaa toimimaan moottorina. Tällöin generaattorin magnetointivirran suunta muuttuu staattorikäämityksessä, ja kone pyrkii pyörittämään voimakonetta aiheuttaen turbiinikoneistoon tärinää ja ylikuumenemista tahattoman turbiinin pyörityksen seurauksena. Takatehosuoja mittaa verkosta generaattoriin päin menevää tehoa ja laukaisee, mikäli teho ylittää asetteluarvorajan (Peltoniemi, 2016, s. 31).

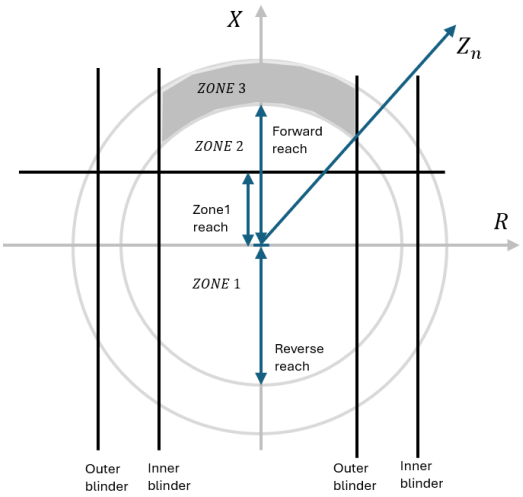
3.13 Epätahtikäyttösuojaus

Riippuen verkon olosuhteista ja sitä syöttävistä generaattoreista, dynaamiset muutokset kuten kuorman pudotukset, erilaiset kytkentätoimet kuten jälleenkytkennät tai oikosulut, joita ei kytketä pois riittävän nopeasti, voivat aiheuttaa tehon heilahteluita. Nämä pätötehoheilahteluista johtuvat verkon epästabiilit tilat voivat johtaa generaattorin jättämän kasvuun ja napajakojättöön tai generaattorin ylikuormitukseen (Häsä, 2009, s. 32). Epätahtitilannetta edeltää generaattorin roottorin magneettivuon ja staattorin magneettivuon merkittävä kulmapoikkeama. Tahdista pudotessa tapahtuvien heilahtelujen aikana tehon ja virran suunta on välillä generaattoriin päin. Kone toimii siis välillä generaattorina ja välillä moottorina. (Mörsky, 1992, s. 163; Tziouvaras & Hou, 2004, ss. 6-11)

Epätahtikäynti on yleensä mahdollinen, kun generaattori operoi alimagnetointialueella. Alimagnetoinnista puhuttiin aikaisemmin alaluvussa 3.7. Epätahtikäynti saa aikaan voimakkaita virta- ja jännitesysäyksiä niin staattorissa kuin roottorissa sekä paikallista kuumenemista generaattorissa. Lisäksi se aiheuttaa merkittävää mekaanista rasitusta turpiinin ja generaattorin akselille sekä perustuksille. (Mörsky, 1992, ss. 162-163)

Epätahtikäyttösuojauksella tahtigeneraattori saadaan irrotettua verkosta mahdollisimman nopeasti epätahti- ja tehoheiluntatilanteissa generaattorikohtaisesti. Toiminnan tulee olla riittävän nopea, jottei epätahti vaurioita koneen osia tai aiheuta heilahtelua muualle verkkoon.

Epätahtisuojalla voidaan suojata samanaikaisesti generaattoria, blokkimuuntajaa sekä verkossa tapahtuvia impedanssiheilahteluilta määriteltyjen havahtumisalueiden (engl. *zone*) avulla. Kuvassa 7 on esitelty periaatekoordinaatisto epätahtisuojan asettelualueista.



Kuva 7. Epätahtisuojan asettelut RX-koordinaatistossa (ABB, 2024).

Epätahtisuojalle asetellaan mho-impedanssiympyrä, jonka alaosassa Zone 1 (lähellä Reverse Reach -rajaa), tunnistaa varhaisen tahdinmenetyksen generaattorin puolella. Tämä on yleensä kriittisempi muihin alueisiin verrattuna. Zone 2 on tämän mho-ympyrän yläosassa (lähellä Forward Reach -rajaa), joka tunnistaa tahdin menetyksen verkon suuntaan. Forward Reach määrittelee, kuinka pitkälle suoja näkee verkkoon päin ja Reverse Reach, eli generaattorin suojausetäisyys asetellaan tahtireaktanssin mukaan. Zone 3 voidaan määrittää verkossa tapahtuvien epätahtitilanteiden varalle, missä generaattori on edelleen aktiivinen. Inner – ja Outer blinder alueet kulkevat impedanssikulman suuntaisesti ja määrittelevät alueen, jossa suojaus aktivoituu impedanssin liikkuessa sen sisällä tietyn ajan. (ABB, 2024)

Alimagnetointitapauksessa generaattori ottaa verkosta loistehoa ja rele mittaa impedanssin kuvan 7 esittämän ympyrän sisään. Normaalitilanteessa impedanssin osoitin on koordinaatiston 1. neljänneksessä. Epätahtitilanteessa, missä magnetointijärjestelmä on toiminnassa, suojareleen mittaama impedanssi on ajoittain ympyrän sisällä ja tätä sisällä oloaikaa epätahtisuojan integraattori summaa aseteltuun rajaan saakka (Mörsky, 1992, s. 164). Epätahtikäytössä impedanssin muutos on niin nopea, ettei alimagnetointisuoja tai ali-impedanssisuoja ehdi toimia. Jos impedanssivektori kulkee määrittely alueen läpi ja poistuu koordinaatiston vastapäiseltä puolelta, rele havaitsee epätahtitilanteen ja kasvattaa sisäistä laskuriaan. Kun impedanssi taso ylitysten määrä saavuttaa asetellun arvon, rele lähettää generaattorin automaatiojärjestelmälle pysäytys käskyn sekä auki ohjaus komennon generaattorikatkaisijalle.

3.14 Tahaton kytkentä verkkoon

Generaattori saattaa kytkeytyä verkkoon tahattomasti esimerkiksi käyttövirheen, virheellisen tahdistuksen, ohjauspiirin toimintahäiriön tai näiden yhdistelmän seurauksena. Verkkoon kytkeytyessään tahdistamaton tahtigeneraattori voi aiheuttaa suhteellisen suuren kuormituksen ympäröivään verkkoon, mikä voi johtaa tehotasapainon epävakauteen järjestelmässä. Äkillinen suuri kytkentävirta aiheuttaa

myös mekaanista ja termistä rasitusta generaattoriin ja generaattorin kaapeleihin sekä muihin laitoksen komponentteihin.

Jos generaattori yritetään kytkeä verkkoon tahdistamatta, alkaa se hetkellisesti käyttäytyä epätahtimoottorina, jonka kolmivaiheinen virta kehittää roottoriin nimellisvirtaa suuremman kuormitusvirran, joka aiheuttaa äkillisen termisen rasituksen roottoriin ja staattorin käämitykseen. Mekaanisia rasituksia ja vauriota voi syntyä pyörivän voimakoneen eri osiin ja koska voitelu- ja öljypumput eivät ole toiminnassa generaattorin ollessa pysähdyksissä, niin öljyn puute voi rikkoa koneen laakereita ja vaihteistoa. (ABB, 2024)

Suojaustoimintona tahaton kytkentä verkkoon toimii ylivirtasuojauksen tavoin generaattorin ollessa pois käytöstä. Suoja tulee blokata generaattorin normaalikäytön aikana, jolloin suojaus ei aiheuta selektiivisyysongelmia ylivirta- ja ylikuormitustilanteissa.

3.15 Katkaisijavikasuojaus

Katkaisijavikasuojalla valvotaan generaattorikatkaisijan aukiohjauskykyä. Käytännön ja taloudellisista syistä suojaukseen ei tarvita kahta katkaisijaa, vaan komponenttien suojaus toteutetaan ylemmällä suojaustasolla. Jos suorele vikatilanteessa ei onnistu aukaisemaan generaattorikatkaisijaa, generaattori saadaan erotettua verkosta blokkimuuntajan yläjännitepuolen katkaisijan avulla. Näin varmistetaan se että vikaantuneen generaattorin synnyttämät tehoheilahtelu ja yliaallot eivät vahingoita muita kiskoon kytkettyjä generaattoreita tai muita verkossa olevia komponentteja. (ABB, 2024)

Katkaisijavikasuoja mittaa järjestelmässä päävirtoja ja nollavirtoja. Jos laukaisukäskystä huolimatta katkaisija jää kiinnitilaan niin laukaisukäsky välitetään järjestelmän ylemmän tason katkaisijalle, jolloin vian leviäminen laajemmalle saadaan estettyä.

4 Tehdaskoestuksen vaatimukset ja käytetyt testilaitteet

Tehdashyväksyntätestien (engl. *Factory Acceptance Test*, FAT) tarkoituksena on varmistaa laitteiston toiminnallisuus tehdasympäristössä ennen toimitusta. FAT -testit suoritetaan yleensä valmistajan tai asiakkaan määrittelemässä testausympäristössä. Tehdastestit luetaan osaksi valmistusprosessia, jolloin tuotantoprosessissa syntyneisiin virheisiin voidaan reagoida ennen tilaajan hyväksyntää. Tilaaja varmistaa, että tilattu kokonaisuus vastaa tilaus- ja suunnitteluvaiheen teknisiä vaatimuksia ja spesifikaatioita ennen tuotteen toimitusta. Huolellisella tehdastestauksella voidaan säästää merkittävästi aikaa ja resursseja työmaavaiheessa sekä asiakkaan että toimittajan näkökulmasta, sillä mahdolliset ongelmakohdat on jo ratkaistu tai otettu huomioon etukäteen.

FAT-koestuksen tarkoitus on varmistaa, että kojeistokaapin rakenne ja asennus sekä relesuojaus-, mittaus-, hälytys-, ohjaus-, merkinanto-, ym. piirien toiminta vastaavat suunnitelmia ja spesifikaatioita. Suojareleet ja mitta-arvomuuntimet asetellaan kohteen lopullisilla asetteluilla. Suojareleiden käytössä oleville suojaustoiminnoille, mitta-arvomuuntimien käytössä oleville mittaustoiminnoille, mittamuuntajille ja aikareleille tehdään täydellinen, käyttöönottokoestusten mukainen koestus. Kaapin sisäisten piirien toiminta tarkastetaan toimintakokeilla.

Suojausjärjestelmän osalta FAT-testaus pitää sisällään muun muassa seuraavia toimenpiteitä (Markus Hattara, haastattelu, 6.5.2025; VEO, 2025):

- Työn aikaisen sähkötyöturvallisuuden valvojan määrittäminen
- Relekaapin silmämääräinen tarkistaminen
- Kojeiden sijoitus on suunnitelmien mukainen
- Laitteiden tyypin ja valmistusnumeron tarkastus
- Laitekonfiguraation tarkastus
- Laitekonfiguraation lataus
- Asetteluiden tarkastaminen
- Suojareleen toiminnallinen testaus testilaitteella
- Suojareleen analogia- ja binaaritulojen sekä binaariulostulojen tarkistus

- Suojareleen toiminnallisuuden tarkastaminen (laukaisu- ja ohjauskäskyt)
- HMI tapahtuma listan tarkistus
- LED indikaatioiden tarkistus
- Suojareleen häiriötallenteen asetteluiden ja toiminnan tarkastus
- Muiden ohjaustaulun/kojeiston virta- ja jännitemittaus piirien tarkistus
- Releen IP-asettelut ja väyläsignaalien testaus
- Piirikaavioiden ja suojauskaavion tarkastus ja mahdolliset korjaukset
- Liitinruuvien kiinnitys on tarkastettu pistokokein

Lähtökohtaisesti tilaaja laatii omat laitteistoon kohdistuvat vaatimukset. Asiakas FAT-testaukset suoritetaan yhdessä tilaajan ja mahdollisen loppuasiakkaan kanssa valmistellun testiprotokollan mukaan. Yleensä tilaaja valvoo tätä prosessia. Näin voidaan kartoittaa riski- ja ongelmakohtia ennen työmaavaiheeseen siirtymistä. Myös mahdolliset muutos- ja korjaustyöt voidaan suorittaa vaivattomammin tässä vaiheessa.

Sähkötyöturvallisuuden valvojasta työkohteessa määräyksellä nimetään kyseiseen työkohteeseen sähkötyöturvallisuuden valvoja. Sähkötyöturvallisuuden valvoja vastaa siitä että valtioneuvoston asetuksessa sähkö- ja käyttötöistä 1435/2016 esitettyjä sähkötyöturvallisuuden olennaisia turvallisuusvaatimuksia noudatetaan. Sähkötyöturvallisuuden vastuualueet ovat standardin SFS 6002 mukaisia (VEO, 2022). Projektipäällikkö vastaa valvojan määrittämisestä toimittamalla työn aikaisen sähkötöiden johtajan työmaalla dokumentin, johon listataan kaikki kohteessa työskentelevät henkilöt, yrityksen nimi, puhelin numero ja nimikirjoitus. Ensimmäisenä listalla oleva henkilö toimii työn valvojana hänen ollessa paikalla. Hänen poissa ollessa tulee listassa seuraavan henkilön ottaa valvojan rooli. Tehdaskoestus siivessä ei tule työskennellä yksin sähköisku vaaran takia. (Markus Hattara, haastattelu, 6.5.2025)

Kommunikaation määrittämiseen kuuluu laitteen Internet-protokolla (IP) asettelut, sekä väyläkommunikaation määrittäminen yhdessä automaatiosuunnittelijan tai kaukokäyttöhenkilön kanssa. Releen kommunikaatioprotokollasta riippumatta,

suojareleiden väyläkoestus voidaan suorittaa pakottamalla releen oikea signaali releen näytöstä, konfiguraatiotyökalulla tai nettikäyttöliittymästä. Suositeltavaa on kuitenkin myös todeta oikean suojausfunktion toiminta toisiotestien avulla, sekä esimerkiksi mittausdatan tulee tarkistaa vähintään syöttämällä toisiopiiriin virtaa ja jännitettä.

4.1 Toimintakokeet ja toiminta-arvojen testauksesta

Suojausreleen toimintakokeilla pyritään varmistamaan suojareleen oikea toiminta. Testauksissa varmistutaan siitä, että suojarele käyttäytyy suunnitellulla tavalla. Toimintakokeilla voidaan tarkoittaa esimerkiksi sitä että varmistutaan siitä, että suojausfunktiot jotka ovat laukaisevia, avaavat oikeat koskettimet oikean suuruisilla virran ja jännitteen arvoilla, sekä suojausfunktiot, joiden tehtävä on vain hälyttää, eivät suorita muita toimenpiteitä kuin hälytyksen valvomoon rajatilanteista.

Suojausfunktioiden toiminta-arvojen testaamisella tarkastellaan suojien raja-arvoja. Toiminta-arvojen testauksessa testataan suojan toiminta- ja havahtumisarvoja. Näin varmistutaan suojareleen asetteluiden oikeellisuudesta, sekä varmistutaan että suojausparametrit on aseteltu suojareleelle oikein.

Suojausfunktioiden testaamiseen löytyy merkittävä määrä erilaisia koestuslaitteita. Suojareleiden automaattinen koestus voidaan suorittaa käyttämällä Omicron CMC 356 -testilaitteita, mihin tämän työ keskittyy.

4.2 Omicron CMC 356

Suojareleiden toisiotestauksissa käytetään Omicron Electronics GmbH:n valmistamaa koestuslaitetta CMC 356. CMC 356 -testauslaite soveltuu useilta ominaisuuksiltaan hyvin monipuoliseen suojareleiden ja muiden sähköisten komponenttien kuten mittalaitteiden toiminnan toisiotestaukseen. Laite tukee IEC 61850 -protokollaa, jolloin sillä voidaan suorittaa kyseiseen standardiin pohjautuvien laitteiden testausta. GOOSE viestintä

tarjoaa yhteensä 360 virtuaalituloa vastaanottajana ja 360 virtuaaliulostuloa lähettäjänä. Kuvassa 8 on CMC356 -testilaitteen etupaneeli.

Kuva 8. Omicron CMC356 -testilaitteen etupaneeli (Omicron, n.d.).

Generaattoriyhdistelmäpistokkeella voidaan helposti liittää 3 virta ja 3 jännitekanavaa. Kuvasta 8 voidaan huomata harmaat alueet jännite ja virtakanavien sekä yhdistelmäpistokkeen kohdalla. Tämä tarkoittaa sitä että vain toinen näistä syöttötavoista voi olla aktiivisena. Yhdistelmäpistoke on dominoiva, joten sen ollessa kytkettynä muut harmaalla olevat alueet eivät syötä. Lisävirtaa voidaan syöttää virtakanavasta B.

CMC 356 virtakanavilla voidaan syöttää 6 kertaa 32 ampeerin virtaa, ja rinnakkaiskytkennällä kokonaisvirraksi saadaan 64 ampeerin maksimi virta kolmelle vaiheelle. Tyypillinen virhe luvataan laitteelle pienemmäksi kuin 0,05 prosentin luokkaa. Jännitettä voidaan syöttää vaihekohtaisesti aina 300 volttiin asti ja pääjännitteillä voidaan kahden vaiheen välinen jännite nostaa aina 600 volttiin. Virran ja jännitteen suureista voidaan säätää taajuutta, kulmaa sekä amplitudia. Paneelin lähdöt on suojattu ylikuormitukselta, oikosuluilta sekä ylikuumenemiselta logiikan sekä sisäisten sulakkeiden avulla.

Omicron 356:ssa on 10 binaarituloa (5 potenttiaaliryhmää), joilla voidaan testata jännitteen tai koskettimien muutosta säätöpiireissä. Tulot voidaan asetella, joko

potenttiaalivapaiksi tai DC kynnysjänniteverrannaisiksi koskettimiksi (engl. *treshold voltage*). Binaariulostuloja on yhteensä neljä, joiden transistori ohjatut koskettimet ovat vapaasti kontrolloitavissa eri testimoduuleissa. AUX DC tasajännitesyötöllä voidaan syöttää väliaikaisesti testattavalle laitteelle apujännitettä aina 264 VDC asti ja AUX DC mittaustulolla voidaan tarkastella esimerkiksi antureiden toimintaa 0 – 20 mA välillä.

4.3 Omicron Test Universe

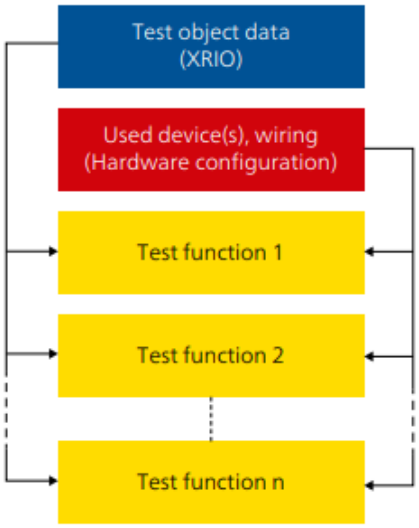
Omicron Test Universe -ohjelmistolla hallitaan CMC365 testilaitteen ominaisuuksia. Test Universe pitää sisällään laajan valikoiman sovellukseen optimoituja testimoduuleita, joiden avulla voidaan testata suojaus- ja mittauslaitteiden toiminnallisuutta kokonaisvaltaisesti. Käyttäjä voi hyödyntää Omicronin Electric:n laajaa suojaustestikirjastoa PTL tai luoda itse testisuunnitelmia laitteen testaukselle. Test Universe tarjoaa monenlaisia automatisoituja testausmahdollisuuksia erityisissä testimoduuleissa, jotka on suunniteltu yksittäisten testauskohteiden toimintojen, kuten ylivirtasuojan, distanssisuojan tai differentiaalisuojan testaukseen. Moduuleissa voidaan tarkastella graafisesti ylivirtasuojien ominaiskäyriä, distanssisuojan havahtumisalueita impedanssitasossa, sekä differentiaalisuojan vakavointivirran Ibias ja erovirran Idiff suhteesta muodostettua laukaisukäyrää. Testituloksien tarkastelu voidaan toteuttaa visuaalisesti näiden määrittelyjen mukaan, jolla voidaan varmistua suojan oikeasta toiminnasta. Testimoduuleita on saatavilla myös energiamittareille, mittamuuntimille ja verkkoanalysaattoreille.

Tässä työssä käytetään Test Universe -ohjelmiston versioita 4.31. Tämä versio on valittu, koska sillä voidaan hallinnoida yhtiön vanhempia omicron testilaitteita. 4.40 versiosta ylöspäin olevat ohjelmisto versiot eivät Omicronin verkkosivujen mukaan ole enää yhteensopivia vanhempien Omicron CMC 254 testilaitteiden kanssa. Testiohjelmisto pitää sisällään monia testimoduuleita, joilla voidaan erikoistua eri suojausfunktioiden testaukseen. Moduuleita löytyy kaiken kaikkiaan 22 kappaletta ja niiden ominaisuuksia voi tarkastella Omicron Electronics verkkosivuilta. Tässä luvussa tarkastellaan

myöhemmin testimoduuleita QuickCMC, Ramping, State Sequencer, Overcurrent, Diff Configuration ja Diff Operating Characteristics.

4.3.1 Omicron Control Center

Omicron Test Universe -ohjelmistomoduulit tarjoavat kattavat toiminnot perinteiseen laitteistojen testaukseen. Omicron Control Center (OCC) mahdollistaa niiden yhdistämisen testikokonaisuuksiksi yhteen asiakirjaan, joita voidaan helposti muotoilla, ylläpitää ja jakaa eteenpäin. Omicron Control Center -asiakirjoja voidaan helposti käyttää mallipohjina samoille tai samankaltaisille testiobjekteille. Testi funktio voidaan suorittaa uudelleen samoilla parametreilla, kopioida toiseen tiedostoon tai muokata olemassa olevaa testimoduulia tarpeiden mukaan. Määritetyt testiobjektin ja testilaitteen asettelut suoritetaan kuvan 9 mukaisessa järjestyksessä.



Kuva 9. Omicron Control Center suoritus rakenne (Omicron, n.d.).

OCC-asiakirja pitää sisällään seuraavia elementtejä. Testiobjektin, (engl. *Test Object*), tiedot määritellään XRIO-muodossa jonka tiedot voidaan syöttää manuaalisesti tai tuoda hyödyntäen XRIO -tiedostoja. XRIO-muunnin muuntaa suojareleiden asetukset ja

asettelutiedot suoraan releestä testiohjelmistoon. Näin usean samankaltaisen suojan toisiotestaaminen on tehokkaampaa, jos samoja testimoduuleita voidaan hyödyntää.

Testilaitteen lähtöjen ja tulojen sekä johdotusliitäntöjen tietojen konfiguroinnissa ja määrittelyssä käytetään *Hardware Configuration* -työkalua. Määrittelyt ovat näkyvissä koko testisuunnitelman ajan kaikille sen alapuolisille testitoiminnoille ja -moduuleille.

Upotettujen testimoduulien määrä ja tyyppi riippuvat suoritettavista testeistä ja testattavasta testiobjektista. Testit mukautuvat automaattisesti muuttuneisiin testiobjektin asetuksiin, jotka voidaan määritellä *Test Object* -asetuksissa. *LinkToXRIO*-teknologian avulla käyttäjällä on pääsy kaikkiin releparametreihin – mukaan lukien käyttäjän määrittämät lisäasetukset – ja hän voi käyttää näitä parametreja eri testipisteiden luomiseen ja arviointiehdotusten määrittämiseen.

Omicron Control Center valmiit tiedostot pitävät sisällään muun muassa erilaisia grafiikoita ja testiohjeita, jotka ohjaavat testaajaa testausprosessin läpi testimääritysten mukaisesti käyttäen *Pause Module*, *Text View*, *ExeCute* moduuleita.

Käyttäjän määrittelemät testipisteet arvioidaan ja raportoidaan automaattisesti määriteltyjen toleranssien mukaan. Testauksen jälkeen muodostetaan automaattisesti testiraportti joka sisältää kaikki testitulokset tarkassa muodossaan. Testiraporttia voidaan muokata esimerkiksi organisaation tai asiakkaan vaatimusten mukaisesti ja ne voidaan toimittaa eteenpäin PDF-, RTF-, TXT-, CSV- ja XML-muodossa. (Omicron, n.d.)

4.3.2 OCC-joukko

Omicronin OCC-joukko (engl. *OCC Batch*) -työkalulla voidaan kontrolloida useita Control Center (OCC) tiedostoja. Yksittäisten OCC -tiedoston määrittäminen saattaa muodostua sekavaksi, joten suojien testaukseen kannattaa joskus hyödyntää useita Control Center -pohjia. Esimerkiksi vaativimpien suojien testaamiseen voidaan hyödyntää joitain valmiita

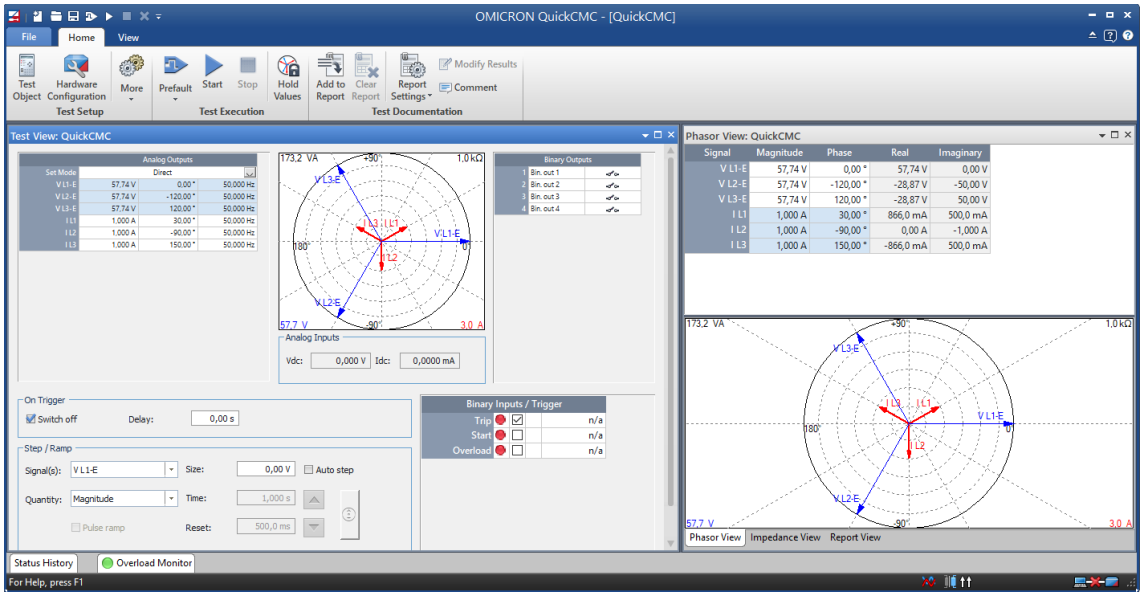
PTL:n tiedostoja tai muokata olemassa olevia pohjia ilman pohjan korruptoitumisen vaaraa.

Omicronin testikirjasto (engl. *Protection Testing Library*, PTL) tarjoaa ennalta määritettyjä testimallipohjia yli 500 suojareleelle eri valmistajilta. Käyttäjä voi ladata testimallit, muokata niitä ja tarvittaessa räätälöidä ne omiin tarpeisiinsa sopivaksi. Omicronin teettämän tutkimuksen mukaan täysin automatisoitujen testimallien ja -pohjien käyttö voi lyhentää testausaikaa jopa 70 % verrattuna manuaaliseen testaukseen.

Testipohjiin voidaan syöttää suojareleiden asetukset ja suojausparametrit joko manuaalisesti tai automaattisesti relevalmistajan konfigurointiohjelmistosta. Lisäksi XRIO-parametrimuuntimet mahdollistavat mallien mukauttamisen yksilöllisiin testausvaatimuksiin.

4.3.3 QuickCMC

QuickCMC on tietokoneohjattu manuaalinen testausohjelmisto, jota käytetään Test Universen -käyttöliittymän avulla suojareleiden, mittamuuntimien ja muiden sähköisten komponenttien toiminnallisuuden testaamiseen. Se sisältää monipuoliset analogia ulostulo- ja mittaustoiminnot, vikatilalaskennan, askel- ja ramppiominaisuuden sekä testauksen raportoimisominaisuuden. QuickCMC:n avulla testisignaaleja voidaan ohjata tarkasti, ja binaaritulojen laukaisuaikoja tai tilanmuutoksia voidaan tarkastella ajallisesti erillisisessä binaarituloikkunassa. Syötettyjä analogia tuloja voidaan tarkastella impedanssitasossa sekä virran ja jännitteen osoitindiagrammissa. QuickCMC testi-ikkuna on esitetty kuvaa 10.



Kuva 10. QuickCMC testausmoduuli.

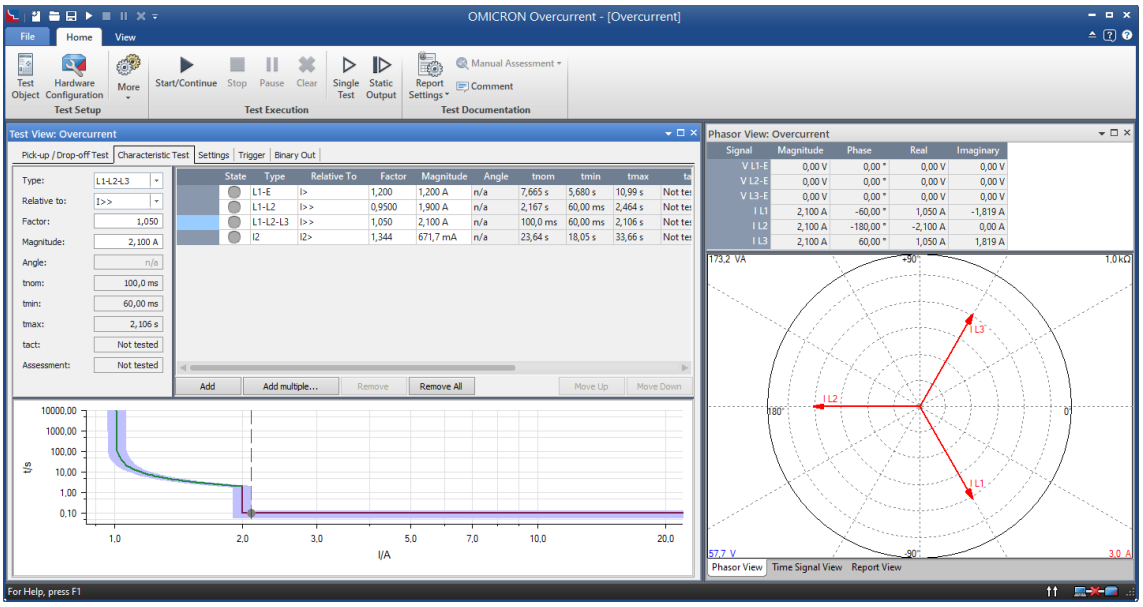
QuickCMC avulla voidaan helposti varmistaa testilaitteen ja testattavan laitteen välisen kytkennän oikeellisuus ennen varsinaisen koestuksen aloittamista. Testauksen alkuvaiheessa suojareleen mittakanaviin voidaan syöttää nimelliset virran ja jännitteen toisioarvot (kuvan 10 vasen yläreuna), joiden avulla tarkistetaan suojareleen muuntosuhteiden oikeellisuus. Ensiö- ja toisioarvot on hyvä tarkistaa releen näytöltä.

Lisäksi kannattaa todeta laukaisukoskettimien toiminta ennen testimoduulien suorittamista. Tämä nopeuttaa testausprosessia ja vähentää virheiden riskiä, kun mahdolliset ongelmat havaitaan ja korjataan jo alkuvaiheessa.

4.3.4 Ylivirtamoduuli

Ylivirtamoduuli (engl. *Overcurrent module*) on suunniteltu automaattiseen suunnattujen ja suuntaamattomien ylivirtasuojien ja releiden testaamiseen, sisältäen laukaisuaikojen ja suureiden raja-arvojen havahtumis- sekä päästöarvojen tarkastelun. Overcurrent testimoduuli laskee ja määrittelee asetteluiden perusteella laukaisukäyrät automaattisesti. Esimerkiksi suunnatun ylivirtasuojauksen tarkastelussa joustavan suuntaavien rajojen määrittelyn ansiosta se soveltuu hyvin maasulkusuojien

ominaisuuksien testaukseen jatkuvuustilassa. Kuvassa 11 on esitetty Overcurrent -moduulin testi-ikkuna.



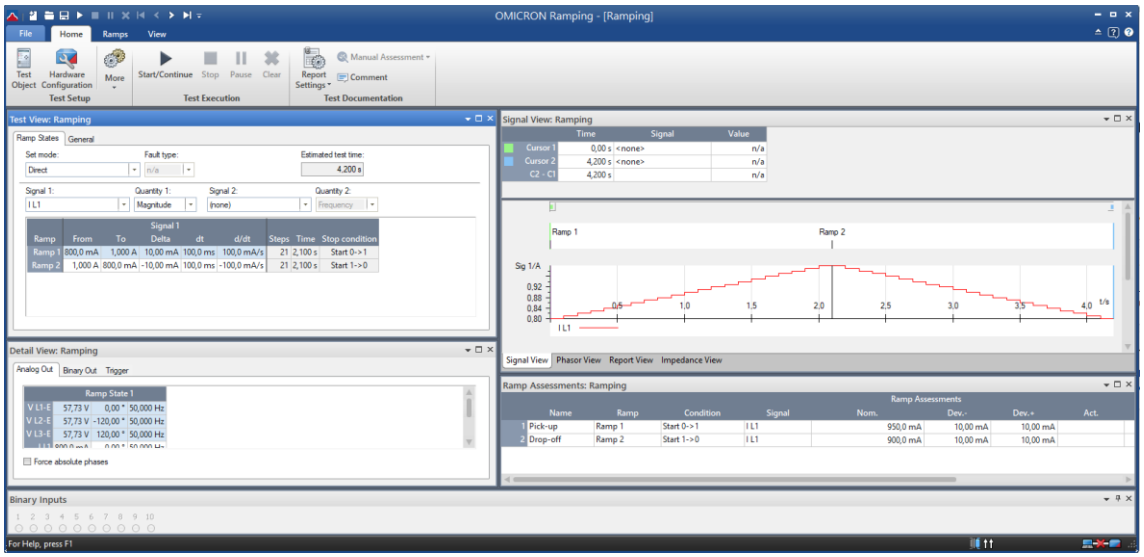
Kuva 11. Overcurrent -moduuli.

Moduuli tukee siis suunnattujen suojien sektorin määrittelyä ja minkä tahansa määrän vaihe- ja summavirtaelementtejä, sekä myötä-, vasta- ja nollaelementtejä. Jokaisen elementin toimintakäyrä voidaan valita erikseen ja toiminta-aikoja sekä suojauksen suuntaa voidaan tarkastella graafisesti RIO:ssa.

Ylivirtaan perustuvat suojausfunktiot voidaan testata Omicronin Overcurrent sovellutuksen avulla. Overcurrent -moduuli mahdollistaa sekä suunnattujen että suuntaamattomien ylivirtafunktioiden manuaalisen tai automaattisen testauksen. Testaus voidaan suorittaa vakio- ja käänteisaikatoimisille suojausfunktioilla, lämpenemiskäyräominaisuuksilla toimiville suojaukselle sekä mukautetuille käyräominaisuuksille. Lisäksi moduuli sopii vakiotilaisten suunnattujen maasulkuvirtojen suunnanmäärityksien testaamiseen.

4.3.5 Ramppaus

Ramppaus moduulin (engl. *Ramping module*) avulla voidaan toteuttaa visuaalinen ramppaus. Moduuli mahdollistaa automaattisen ramppijaksojen testauksen halutuille vaiheille. Rampilla voidaan ajaa kahta ramppia samanaikaisesti signaali 1 ja signaali 2 avulla. Näin voidaan esimerkiksi muuttaa vaiheen suuruutta ja kulmaa samanaikaisesti tai kasvattaa kahden eri vaiheen suuruutta eri tahdissa. Moduulissa voidaan määrittää rajattomalle määrälle sekvenssejä kynnysarvoja, kuten minimihavahtuminen tai vaihtohystereesi, esimerkiksi suojausfunktion havahtuma- ja päästösuhteeseen liittyen. Ramppaus voidaan toteuttaa jännitteen ja virran suuruuden, taajuuden tai kulman muutoksilla. Kuvassa 12 on esitetty *Ramping* -moduulin testi-ikkuna.



Kuva 12. Ramping -moduuli.

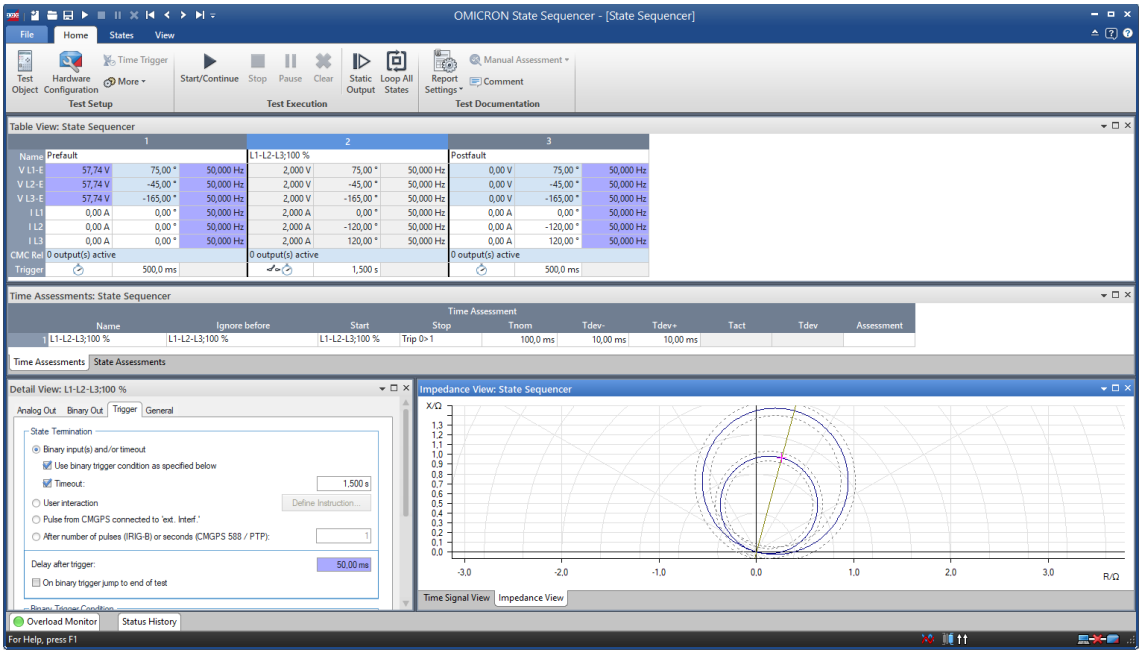
Ylöspäin suuntautuvalla rampilla testataan releen havahtumisarvo, joka asetellaan yleensä alkamaan 0,8-kertaisena releen asetteluarvosta ja loppumaan 1,2-kertaisena asetteluarvosta. Näin saadaan testiaikaa lyhennettyä ja katettua koko releen toleranssialue. Alaspäin suuntautuvalla rampilla testataan releen päästöarvo. Kuvan 12 Delta määrittää rampin askelkoon, joka tulee asetella suojan toleranssien mukaan. Askeleen kesto *dt* tulee olla pidempi kuin releen havahtumisaika. Jos moduulia käytetään

laukaisukoskettimen koestukseen, askeleen keston on oltava pidempi kuin laukaisuaika. (Omicron, 2015, s. 19)

Moduuli soveltuu erityisesti jänniteriippuvaisten suojausfunktioiden, kuten jännite- ja taajuussuojien, havahtumisrajojen koestukseen. Suojareleen testikoskettimesta saatu havahtumistieto (*start*) mahdollistaa rampin hetkellisen jännitearvon tarkastelun liipaisuhetkellä. Näin suojausfunktion oikea asetteluarvo voidaan todeta. Tuloksia voidaan tarkastella joko muuntajan ensiö- tai toisioarvoina tai suhteellisina jännitteen ja virran arvoina. Moduuli soveltuu myös suunnattujen ylivirtasuojien havahtumisrajoja tarkasteluun.

4.3.6 Tilasekvenssit

Tilasekvenssimoduuli (engl. *State Sequencer module*) on suunniteltu toiminta-aikojen ja loogisten aikasekvenssien määrittämiseen. Tilaan (engl. State) voidaan määritellä lähtöolosuhteet eli virran ja jännitteen arvot sekä binaarilähtöjen tilat. Seuraavaan tilaan siirrytään kun määritetyt ehdot täyttyvä. Tilojan voidaan yhdistää peräkkäin muodostaen täydellisen testisekvenssin. Siirtyminen tilasta toiseen voi tapahtua kiinteän ajan jälkeen, manuaalisella syötteellä, CMC:n binaaritulojen laukaisutilojen jälkeen tai eri aikaleima protokollien liipaisun jälkeen (PTP-, GPS- tai IRIG-B). Sekvenssin silmukointi sekä yksittäisten tilojen staattinen syöttö on myös mahdollista (engl. *Static Output*). Kuvassa 13 on State Sequencer -moduulin testi-ikkuna.

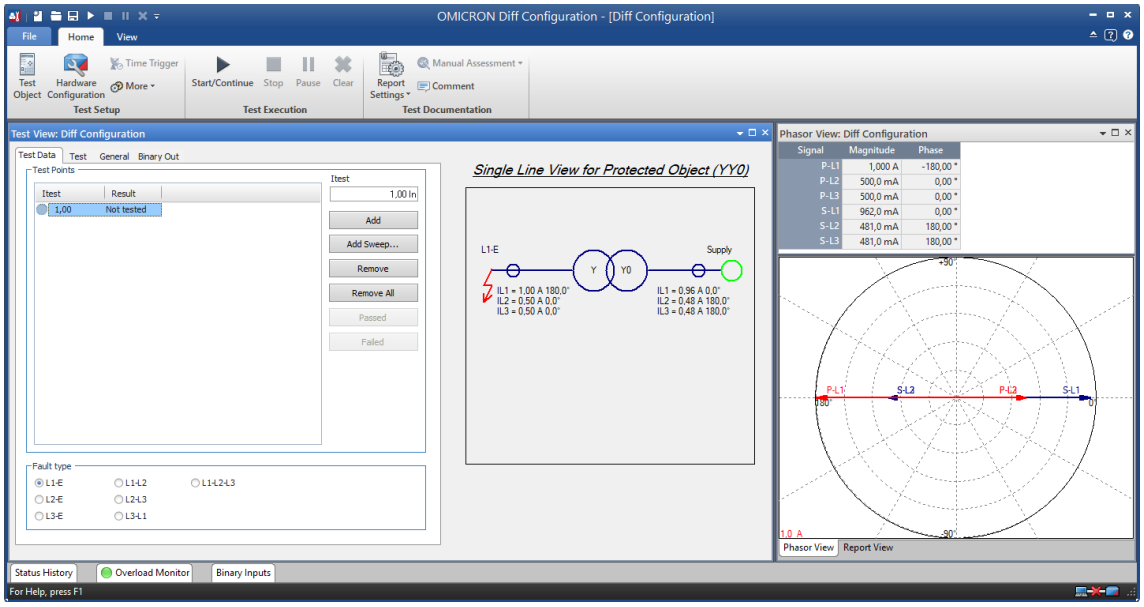


Kuva 13. State Sequence -moduuli.

Laukaisuaikojen tarkasteluun käytetään ”*Time Assessments*” -ikkunaa (kuvassa 13 keskellä). Yksittäiset vasteajat ja toleranssit voidaan määrittää jokaiselle tarkasteltavalle mittausehdolle, mikä mahdollistaa lähes täysin automaattisen tulosten arvioinnin. Jos mitattu aikasuure on toleranssien sisällä, testi on hyväksytty; muuten se on hylätty. Aikamittauksen lisäksi voidaan tarkistella binaaritulojen tilaa ”*State Assessments*” -ikkunan avulla. Tilan arviointi on positiivinen, jos siinä määritellyt tilat esim. suojareleen koskettimen tilat, jotka on kytketty CMC:n binaarituloihin, ovat loogisesti totta tietyn tilan eli ”*state*” ajan. ”*Time Signal View*” -ikkunassa voidaan tarkistella analogia ja binaaritulojen sekä binaariulostulojen tilaa tietyillä ajan hetkillä.

4.3.7 Differentiaalisuojan määrittely

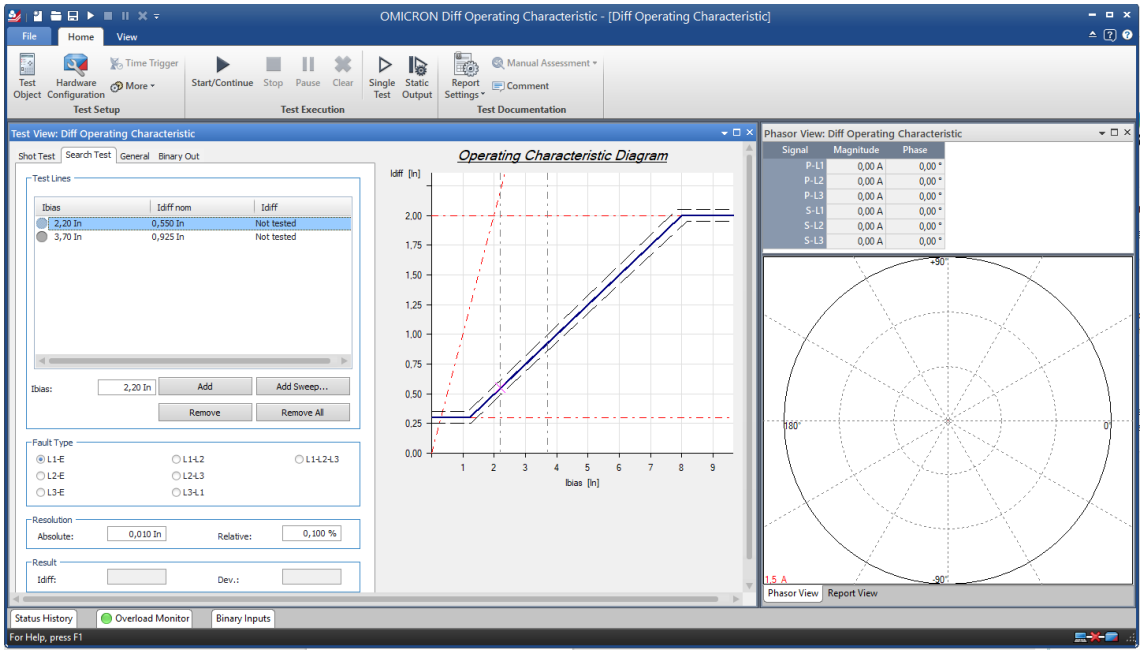
Differentiaalisuojan määrittelymoduuli (engl. *Diff Configuration*) avulla voidaan tarkastaa, että differentiaalisuojan parametrit ovat aseteltu oikein ja virtakanavien johdotuksen kytketty suunnitelmien mukaan. Kuvassa 14 on esitetty *Diff Configuration* -moduulin testi-ikkuna.



Kuva 14. Diff Configuration -moduulilla tarkistetaan differentiaalisuojan mittaukset.

Differentiaalisuojausta voidaan tarkastella moduulilla yksi-, kaksi- tai kolmivaiheisena. Testin käynnistyttyä, käyttäjän tulee tarkistaa kuormitusvirran suuruus releen differentiaalisuojan mittaamista arvoista, sekä varmistaa ettei rele näe erovirtaa. Mikäli erovirta ei ole nolla tai suojarele laukaisee, niin tulee tarkistaa testin ja suojareleen parametriasettelut ja suorittaa testi uudelleen.

Differentiaalisuojauksessa kuormitusvirran suuruus vaikuttaa erovirta laukaisun herkkyyteen. Mitä suurempi kuorma järjestelmässä sitä suurempi erovirta tarvitaan differentiaalisuojan havahtumiseen. Differentiaalisuojan laukaisukäyrän testaamiseen käytetään *Diff Operating Charectics* -moduulia. RIO funktiossa määritetty toimintakäyrä voidaan koestaa eri kuormitusvirran arvoilla ja etsiä kuormitusvirtaa vastaava erovirta. Kuvassa 15 on esitetty *Diff Operating Characteristic* -moduuli.



Kuva 15. Differentiaalisuojan suojauskäyrän koestaminen Diff Operating Characteristic -testimoduulilla.

Kuvasta 15 voidaan nähdä alemman - sekä toisen portaan eli välittömän portaan vakavointikäyrä. Koestettavat kuormitusvirran ja tätä vastaava erovirta, saadaan selvitettyä *Search Test* -välilehdellä. Koska esimerkiksi ABB REX640 suojareleen virtakanavien jatkuva virtakestoisuus on 20 ampeeria, niin on suositeltavaa tarkistaa differentiaalisuojan laukaisevien koskettimien oikea toiminta esimerkiksi QuickCMC avulla ennen differentiaalisuojan testausta (ABB, 2024).

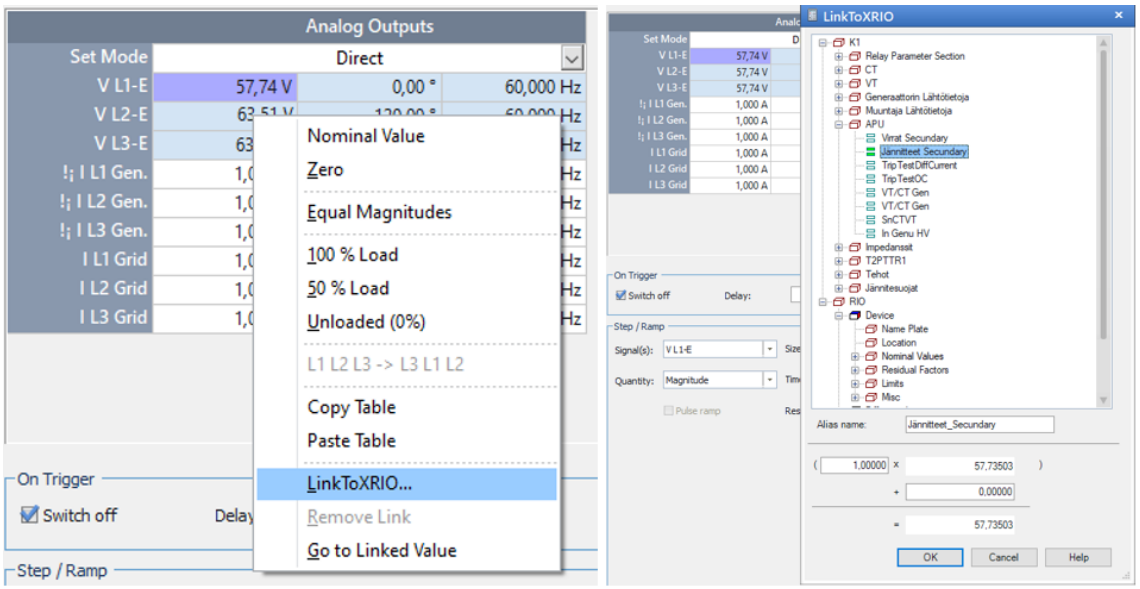
4.4 RIO ja XRIO

Omicronin RIO käyttöliittymä kehitettiin tarpeesta löytää yhtenäinen tietomuoto eri relevalmistajien suojareleiden parametreille. Sen avulla voidaan eri valmistajien toiminnallisesti saman tyyppisten suojareleiden testaus samankaltaisilla testausmenetelmillä Test Universe -ohjelmistossa. RIO-osiossa käyttäjä pääsee moduulikohtaisiin asetteluikkunalle, missä voidaan määritellä tietyn testimoduulin käyttämät testiobjektin parametrit. (Omicron, 2014, s. 5-8)

XRIO tarkoittaa laajennettua RIO -tiedostoa, jonka avulla käyttäjä voi muodostaa parametrilinkityksiä eri testi moduuleiden välille. Mikäli XRIO -tiedoston parametrit muuttuvat, muuttuvat ne automaattisesti myös koestusohjelmistossa. Näin voidaan lisätä releteestauksen automaatiota huomattavasti. (Omicron, 2014, s. 5-8)

Test Object toiminnallisuuteen säilötään kaikki koestettavan laitteen tiedot. Yksittäinen tieto on parametri ja joukko parametreja muodostaa lohkon. Lohko voi sisältää myös alalohkoja. Tiedosto rakenne on saman tyylinen kuin tietokoneen tiedostojärjestelmä kansiorakenne. Test Object jaetaan Custom- ja RIO-osioon, missä Custom osiossa parametreja käytetään relekohtaisen asetuksen tai XRIO -muuntimen apuparametrien määrittämiseen. Custom-osiossa käyttäjä voi myös määrittää omia parametreja ja lisätä niihin yhtälöitä. RIO-osion parametrit edustavat testiobjektin asetuksia eri testimoduuleihin. (Omicron, 2014, s. 5-8)

Link to XRIO -toiminnolla voidaan liittää XRIO -tiedostosta haluttu arvo OCC -testidokumenttiin. Näin saadaan automaattisesti päivitettyä testimoduulin arvoja, jos XRIO -tiedoston data muuttuu. Kuvassa 16 on esitetty XRIO arvojen linkitys testimoduuliin.



Kuva 16. XRIO linkitys jännitteiden toisioarvoihin.

4.5 Toleransseista

Koestustuloksille sallitaan relevalmistajan ilmoittamat toleranssit. Laukaisu- ja mittaustarkkuuteen vaikuttavat suojausfunktion laskentalogiikan, taajuuden heilahtelu, käytettävät lähtökoskettimet ja testilaitteen vasteaika. ABB REX640 mallin suojareleen suojausfunktioiden teknillisiä arvoja on esitetty liitteen 1 taulukossa. Toleranssi asettelut voidaan linkittää RIO tiedostoon kerätyistä tiedoista. Suojausfunktioiden maksimi laukaisuaikaviive pitää sisällään myös lähtökoskettimen viiveen.

Omicronin testilaitteen CMC 356 vasteajat binaarituloille ovat manuaalin mukaan 100 mikrosekuntia. Näin ollen testilaitteen vasteajat osoittautuvat olemattoman pieniksi suojareleen koestukseen nähden. Omicronin inputtien näytteenottotaajuus on 10 kHz ja näiden vasteaika on 100 mikrosekunnin luokkaa. Omicron CMC 356 testilaitteen manuaalissa maksimi reagointiajaksi luvataan 220 µs:a, joka on olemattoman pieni suojareleen koestuksen kannalta. (Omicron, 2014)

5 Suojausfunktioiden testaus

Tässä luvussa tarkastellaan tehdaskoestuksien testitiedostojen käyttöä generaattorin suojareleen koestuksessa. Suositeltavaa on käyttää valmiita Omicronin PTL occ-tiedostoja, mutta pohjat eivät aina täysin sovellu suojauksen koestamiseen. Suojausfunktiot ja järjestelmät muuttuvat yhä haastavammiksi relekoestajan näkökulmasta. Käyttöönottotarkastuspöytäkirjat tulee hyväksyttää tarkastajan ja asiakkaan toimesta ja mikäli ei toisin sovita niin jokaisen suojausfunktion toiminta tulee varmistaa loppuasetteluineen. Tämän luvun tarkoituksena on antaa eri vaihtoehtoja tehdaskoestusten suorittamiseen.

Omicron Control Center avulla voidaan siis luoda yhdistelmiä monenlaisista eri testitiedostoista. Tuloksena voidaan testata suojareleen suojaustoiminnot yhden tiedoston avulla. Tässä luvussa käsitellään tärkeimpiä testimoduuleita ja pyritään luomaan testitiedostopohja generaattorisuojauksien testaukseen. Katsotaan kuinka XRIO -tiedostoja voidaan hyödyntää parametrien tuomiseen suojareleestä. Link to XRIO toiminnolla voidaan parametrit linkittämään testimoduuleihin, jolloin parametri muutokset releelle voidaan tuoda helposti XRIO -tiedoston avulla.

Pohjana käytetään ABB:n suojarelettä REX640 generaattorisovellutusta. Generaattorisuojauksessa käytettyjä funktioita on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Generaattorin suojauksessa käytettäviä suojausfunktioita (ABB, 2024).

IEC61850	IEC60617	ANSI	Funktion kuvaus engl.	Funktion kuvaus
PHxPTOC	3I>	51	Three-phase non-directional overcurrent protection	Kolmivaiheinen suuntaamaton ylivirtasuoja
PHPTOV	3U>	59	Three-phase overvoltage protection	Kolmivaiheinen ylijännitesuoja
PHPTUV	3U<	27	Three-phase undervoltage protection	Kolmivaiheinen alijännitesuoja
DOPPDPR	P>/Q>	32	Reverse power/directional overpower protection	Takatehosuojaus
UEXPDIS	X<	40	Three-phase underexcitation protection	Kolmivaiheinen alivirityssuoja/alimagnetointisuojaus
MNSPTOC	I2>	46	Negative-sequence overcurrent protection for machines	Negatiivis sekvenssin ylivirtasuoja koneille
T2PTTR	3Ith>	49	Three-phase thermal overload protection, two time constants	Kolmivaiheinen lämpöylikuormitussuoja, kaksi aikavakiota
FRPFRQ	f>/f<	81	Frequency protection	Taajuussuojaus
EFLPTOC	Io>	51N	Non-directional earth-fault protection low stage	Suuntaamaton maasulkusuojaus
DEFLPDEF	Io>->	67N	Directional earth-fault protection low stage	Suunnattu maasulkusuojaus
ROVPTOV	Uo>	59N	Residual overvoltage protection	Jäännösylijännitesuoja
PHPVOC	3I(U)>	51V	Three-phase voltage-dependent overcurrent protection	Kolmivaiheinen jännitteestä riippuva ylivirtasuoja
OEPVPH	U/f>	24	Overexcitation protection	Yliviritysuoja/Ylimagnetointisuojaus
MPDIF	3dI>G	87G	Stabilized and instantaneous differential protection for machines	Stabiloitu ja välitön differentiaalisuojaus koneille
UZPDIS	Z<	21	Three-phase underimpedance protection	Kolmivaiheinen ali-impedanssisuojaus
CCBRBRF	3I>/Io>BF	50BF	Circuit breaker failure protection	Katkaisijan vikasuojaus
OOSRPSB	OOS	78PS	Out-of-step protection with double blinders	Epätahtisuojaus
GAEPVOC	U<,I>	27/50	Accidental energization protection	Tahaton kytkentä verkkoon suojaus

5.1 Ylivirtasuojaus (51)

Ylivirtasuojaus testataan syöttämällä suojareleen virtakanaviin virtaa, tarkastetaan havahtumisarvo sekä suojan laukaisuaika. Jokaisen portaan havahtumisarvo voidaan tarkistaa erikseen jokaisen portaan kohdalla ottamalla alemman virta-asettelun ylivirtasuojat pois päältä. Havahtumisarvon tarkastamiseen voidaan hyödyntää overcurrent moduulin Pick-up/Drop-off testiä tai ramping -moduulia, ja tarkastelemalla koestus havahtumiskoskettimen tilaa.

Ylivirtasuojauksen havahtuminen otetaan yleensä ensimmäisestä ylivirtaportaasta ja muista portaista tarkistetaan laukaisuaika. Laukaisuajat tarkastellaan Overcurrent moduulilla, missä koestuspisteet asetellaan käyrän taitekohtiin, kohtiin missä seuraavan portaan toimintavirta kriteerit astuvat voimaan. Ylivirtasuojan koestuksesta lisää liitteessä 2.

5.2 Jännitesuojien koestaminen (27, 59)

Jännite- ja taajuussuojien koestamiseen voidaan hyödyntää Ramping ja State Sequencer moduuleita. Esimerkiksi U< alijännitteen koestaminen aloitetaan toteamalla portaan raja-arvot ramping moduulilla. Koestus toteutetaan kahden rampin avulla, missä ensimmäinen ramppi alkaa nimellisjännitteestä ja loppuu suojan havahtumiseen tai määritettyyn jännitetasoon. Toisen rampin tarkoituksena on tarkastella suojan päästöarvo eli raja-arvoa missä suoja ei enää havaitse vikaa. Toinen ramppi alkaa välittömästi ensimmäisen jälkeen nostaen kolmivaiheista jännitettä taas kohti nimellisjännitettä ja loppuu kun havahtumiskosketin tai nimellisjännite saavutetaan.

Ramp assessments ikkunassa tarkastellaan havahtumisarvoja. Act. -sarakkeeseen raportoidaan havahtumisarvo, jota verrataan käyttäjän määrittelemään Nom. -sarakkeen arvoon. Jos havahtumisarvo on määrittelyarvojen sisällä niin moduuli ilmoittaa käyttäjälle koestuksen onnistuneeksi.

Kun havahtumisraja on todettu, niin suojausportaan laukaisuaikaa voidaan tarkastella state sequencerin avulla. Käyttäjä voi määritellä alkutilan nimellisjännitteen arvoilla, jonka jälkeen siirrytään vikatilanteeseen missä jännite on äkkiseltään noussut tai laskenut suojauksen havahtumisasettelun yli. Vikatilan alusta mitataan aikaa aina laukaisukoskettimen indikointiin saakka, jolloin saadaan suojausportaalle laukaisuaika. Time assessments ikkunassa määritetty nimellistoimintaikaa verrataan mitattuun aikaan jolloin saadaan todettua suojan oikea aikatoiminnallisuus.

5.3 Taajuussuojaus (81)

Taajuussuojat voidaan koestaa jännitesuojien tapaan ramppaamalla ensin havahtumisrajat taajuussuojausportaille. Ylitaajuussuojaun tapauksessa vaihejännitteiden taajuttaa rampataan ylös kohti havahtumis rajaa ja tarkastellaan havahtumiskoskettimen indikointia. Ylöspäin suunnattu ramppi sekvenssi pysäytetään havahtumiskoskettimen aktivoituessa, jonka jälkeen käynnistetään tästä taajuuden havahtumisarvosta alaspäin suuntautuva ramppi ja tarkastellaan havahtumiskoskettimen päästöarvoa. Sama voidaan todeta alitaajuussuojalle missä rampit ovat vastakkaissuuntaiset. Jännitemittauspiirin vian aikana alitaajuussuoja lukitaan, joten lukituksen toiminta tulee myös varmistaa koestuksen yhteydessä. Näiden jälkeen voidaan tarkastella taajuussuojien aikatoiminnallisuutta state sequncer moduulin avulla. Jännitesuojien tapaan voidaan asetella ensimmäinen tila lähelle ali- ja ylitaajuussuojien havahtumisrajoja, jonka jälkeen tehdään vikatila, missä laukaisukoskettimen toiminta-aika mitataan vikatilan alkuhetken ja laukaisukoskettimen indikoinnin väliltä.

Jännitekavavista mitattu taajuus käsitellää suojausfunktion taajuuden tunnistusmoduulissa, missä suojauslohkolle voidaan valita sen toiminta taajuusraja-arvojen ylitysten havaitsemiseen yli- tai alitaajuustilanteissa. Suojan toiminta voi myös perustua taajuusgradientin tunnistukseen, jolloin suoja tunnistaa taajuuden positiivisen tai negatiiven muutosnopeuden df/dt suhteena. Taajuusgradienttitoiminto mittaa siis taajuuden muutosnopeutta, eli kuinka nopeasti taajuus muuttuu ajan suhteen. Tätä asettelua käytetään enemmän äkillisten kuorman pudotustilanteissa esimerkiksi sähköasemien eroonkytkentäsuojauksessa missä verkkoa syötetään tasasuuntaajilla.

Taajuusraja-arvo asettelun aikatoiminnallisuudessa tulee ottaa huomioon suojan sisäinen viive. ABB REX640 technical manualissa mainitaan, että vakioaikainen ali- ja ylitaajuussuojaus toimii äkillisissä <0.2 Hz sekä suuremmissa <5 Hz/s muutoksissa luvatulla tavalla. Näiden rajojen ulkopuolissa tapauksissa laukaisuaikaan saattaa tulla 100 ms ylimääräinen viive. Tapaukset missä verkon taajuus tippuisi äkillisesti yli 5 hertsiä

sekunnissa, ovat epätodennäköisiä (ABB, 2024). Taajuussuojan tarkka laukaisuaika saavutetaan siis pienten taajuusmuutosten avulla. Siksi testauksessa vikatilaa edeltänyt tila tulee asetella lähellä havahtumisarvoa.

5.4 Vinokuormitussuoja (46)

Vinokuormasuojaus perustuu vaihevirtojen vastakomponentin laskennalliseen mittaukseen. Laukaisukäyrä on yleensä käänteisaikainen mutta myös vakioaikainen laukaisu on mahdollinen. Koneille suunnatussa vinokuormitussuojauksessa voidaan ABB:n suojareleissä valita kahden käänteisaikakäyrän väliltä: Inverse Curve A ja Inverse Curve B. Käänteisaika käyrä A:n toiminta-aika $t[s]_A$ määritellään yhtälöllä

$$t[s]_A = \frac{k}{\left(\frac{I_2}{I_r}\right)^2}, \tag{19}$$

missä k on koneen aikakerroin, I_2 mitattu virran vastakomponentti ja I_r nimellisvirta. Käänteisaika käyrän B toiminta-aika $t[s]_B$ saadaan yhtälöllä

$$t[s]_B = \frac{k}{\left(\frac{I_2}{I_r}\right)^2 - \left(\frac{I_S}{I_r}\right)^2}, \tag{20}$$

missä I_S on aseteltu virran aloitusarvo. Koneen aikakerroin -asetusparametri vastaa koneen vastakomponentti aikavakiota, joka on yhtä suuri kuin koneen I_2^2t-vakio, mikä on koneen valmistajan ilmoittama (ABB, 2024).

Vinokuormitussuojaus testataan RIO Overcurrent moduulilla. Käyrämuoto asetellaan Overcurrent Protection Parameters ikkunassa, missä elementtityypiksi valitaan Negative Sequence. Laukaisukäyrämuoto tulee tarkistaa Tripping Characteristic sarakkeessa. Määrittelyjen jälkeen voidaan avata Overcurrent moduuli missä syötetään kahdelle vaiheelle virtaa, jolloin vastakomponenttia esiintyy kuormittamattomassa vaiheessa.

Laukaisuaika tarkastellaan tact-sarakkeessa ja verrataan tätä aikaa laukaisukäyrän määrittelemään aikaan. Koestus suoritetaan vähintään kahdella virta arvolla, jotta laukaisukäyrän muoto voidaan todeta oikeaksi.

5.5 Terminen ylikuormitussuoja (49T)

Terminen ylikuormitussuojan tarkoituksena on rajoittaa liian suurten kuormitusvirtojen synnyttämää lämpöä muuntajassa tai generaattorissa. Kun operoidaan yli nimellisvirran, niin tämän synnyttämä lämpö voi vahingoittaa esimerkiksi eristyksiä. Lämpeneminen on sitä nopeampaa, mitä enemmän virtaa kulkee systeemissä. Terminen lämpötilan nousu muuntaja suojille, mitä käytetään myös generaattorin suojauksessa, lasketaan yhtälöllä

$$\Delta\theta = \left[p \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^2 \cdot T_{ref}\right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau 1}}\right) + \left[(1-p) \cdot \left(\frac{I}{I_{ref}}\right)^2 \cdot T_{ref}\right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau 2}}\right), \quad (21)$$

missä $\Delta\theta$ on lämpötilan nousu (°C), I on suurin mitattu vaihevirta TRMS arvo, $\mathrm{I_{ref}}$ on suojattavan komponentin nimellisvirta, $\mathrm{T_{ref}}$ on jatkuvan tilan virran lämpötila-asettelu (°C), p on lyhyen aikavakion painotuskerroin, $\Delta\mathrm{t}$ on lämpötilan mittaukseen käytetty steppi aika, $\tau 1$ on lyhyt lämpenemis- ja jäähtymisaikavakio ja $\tau 2$ on pitkä lämpenemis- ja jäähtymisaikavakio. Muuntajan todellinen lämpötila θ lasketaan lisäämällä ympäristön lämpötila laskettuun lämpötilaan yhtälöllä

$$\theta = \theta\Delta + \theta_{amb}, \quad (22)$$

missä θ on muuntajan todellinen lämpötila ja θ_{amb} on ympäristön lämpötila. Ympäristön lämpötila θ_{amb} voidaan arvioida asetteluiden avulla (vakioasettelu 40°C), tai se voidaan mitata releen RTD tulojen avulla käyttäen esimerkiksi PT100 mittausta.

Kun lämpötila saavuttaa asetteluarvon niin suoja lähettää laukaisukomennon eteenpäin. Laukaisukäyrän muodostaminen täytyy tehdä Omicron XRIO Scripting avulla, millä

voidaan muodostaa erilaisia funktioita käyttäen Microsoft VB.Net -kieltä. Funktiota voidaan kutsua RIO asetteluissa, kunhan kaikki parametrit on aseteltu tiedostolle. On suositeltavaa käyttää valmiita suojaukselle suositeltuja Omicron occ -tiedostoja. Ylikuormitussuojan testaaminen onnistuu helposti laukaisukäyrän määrittämisen jälkeen Overcurrent -moduulilla.

5.6 Nollajännitesuojaus (59N)

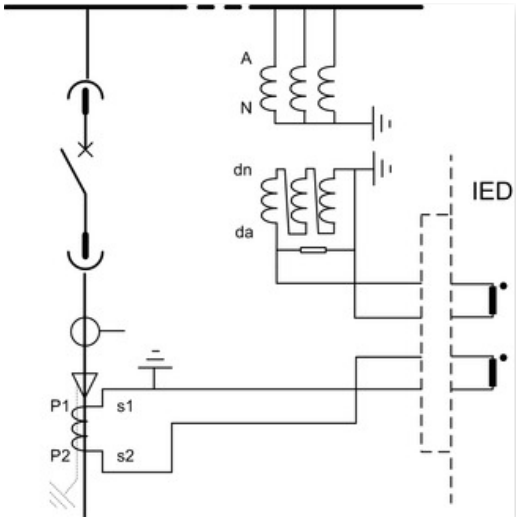
Nollajännitesuojaus voidaan toteuttaa suojareleillä laskennallisesti vaihejännitteiden jäännösjännitemittauksena tai suorana nollajännitemittauksena, joko jännitemuuntajan avokolmioista tai nollapisteen nollajännitemuuntajasta. Koestus suoritetaan samalla tavalla kuin muutkin jännitesuojat, mutta testauksessa tulee ottaa huomioon jännitekanavien kytkentä.

Rele mittaa tyypillisesti nollajännitettä avokolmiokytkennästä. Tämä tarkoittaa sitä että nollajännite suorassa maasulussa nousee aina pääjännitteen tasolle. Esimerkiksi 20 kV:n jännitemuuntajan merkinnällä, 20 kV/√3 : 100 V/√3 : 100 V/3, suorassa maasulussa antaa toisiossa 100 V ja ensiössä 11,547 kV. ABB:n suojat käyttävät nollajännitteen vastavektoria $-U_0$ maasulkujännitteen vektorilaskennassa. Tämä tulee tarkemmin käsittelyyn suunnatun maasulkusuojauksen tapauksessa.

5.7 Suunnattu maasulkusuojaus (67N)

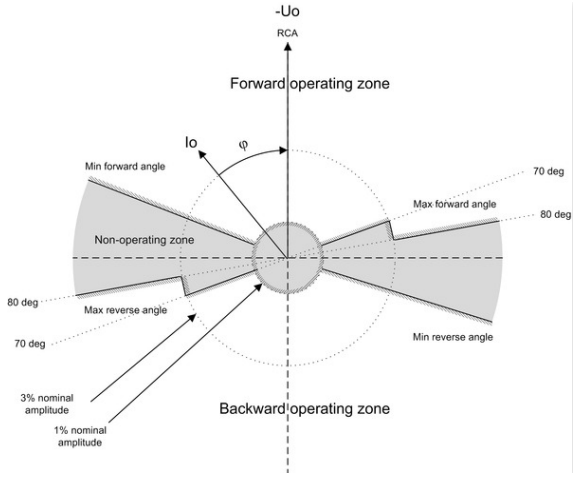
Suunnattu maasulkusuojaus toimii ylivirta suojauksen tavoin, mutta edellä mainittu U_0 jännitteen suuruus ja suunta vaikuttavat myös suojauksen toimintaa. Suunnattu maasulkufunktio mittaa summavirtaa ja nollajännitettä sekä näiden välistä kulmaa. Suunnatulla maasululla saavutetaan järjestelmässä enemmän selektiivisyyttä käyttämällä kulmakarakteristikaa, $I_0 \sin \delta$ ja $I_0 \cos \delta$ moodeja. Suunnattu maasulkusuojaus voidaan koestaa helposti Overcurrent moduulin avulla, missä RIO tiedoston kulmakarakteristikaa voidaan tarkastella.

Koestajan tulee tarkistaa kytkentöjen oikeellisuus asetteluihin nähden, jotta suunnattu maasulkusuojaus pystyy havaitsemaan vikavirran suunnan. Kuvassa 17 kuvataan, miten mittamuuntajat voidaan kytkeä suojareleeseen.



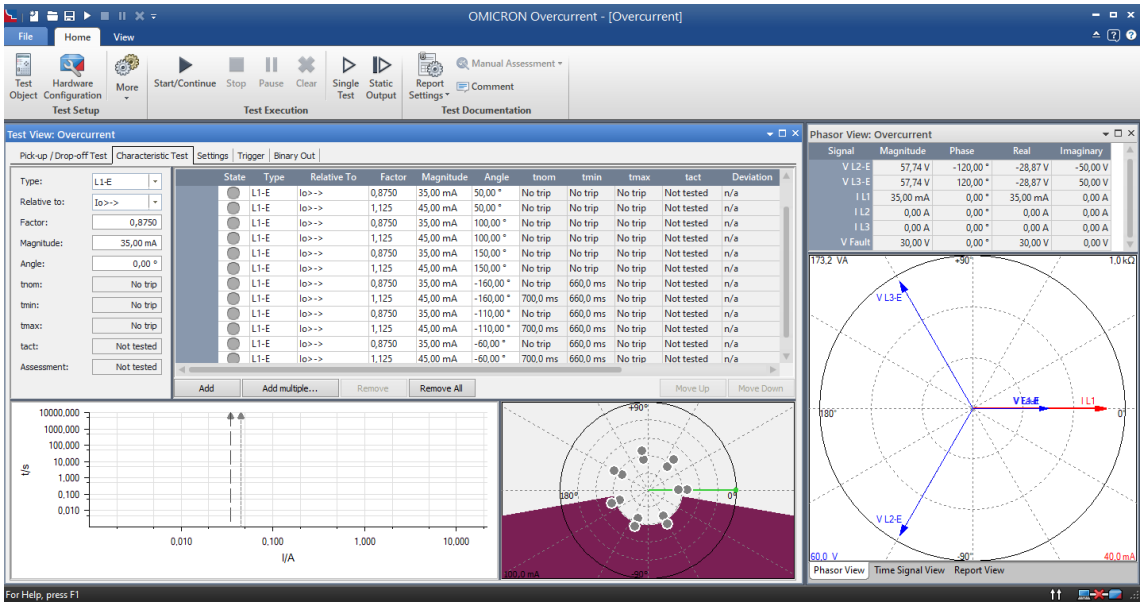
Kuva 17. Jännite- ja kaapelivirtamuuntajan kytkentä suunnatussa maasulkusuojauksessa (ABB, 2024).

Kuvasta voidaan nähdä, että U_0 mittaus suunnatussa maasulkusuojauksessa toteutetaan nollajännitteen vastavektorin mittauksena releelle. Tämä tarkoittaa sitä, että kaapelivirtamuuntajan ja jännitemuuntajan avokolmion napojen on vastattava toisiaan vikavirran suunta huomioiden kuvan 18 mukaisesti. (ABB, 2024).



Kuva 18. Konfiguroitavat toimintasektorit vaihekulmaominaisuudessa (ABB, 2024).

Maasulun ollessa suojattavalla johdolla tai suojattavalla alueella, mitattu nollavirta on 90 asetta edellä negatiivista nollajännitettä ($-U_0$). Mikäli maasulku on taustaverkossa tai suojattavan alueen ulkopuolella, nollavirta on 90 astetta jäljessä $-U_0$:aa. Suojarele toimii jos osoitin I_0 on kulmakarakteristika alueella, summavirran I_0 ja nollajännitteen U_0 mitattu arvo on suurempi kuin asettelu arvot. Koestuksessa tulee ottaa huomioon suojausfunktion RCA kulma (Relays Characteristic Angle) sekä suojauksen suuntaus (Directional mode: Forward/Reverse) asettelut kuvan 18 mukaiseksi. Tähän voidaan käyttää RIO overcurrent toimintoa. Suunnatun maasulkusuojauksen testaus Omicronin RIO Overcurrent ohjelmistossa alla olevan kuvan 19 mukaisesti.



Kuva 19. Suunnattu maasulkusuojan testaaminen Overcurrent -moduulilla.

5.8 Staattorin 100% maasulkusuojaus (64TN)

Staattorin 100% maasulkusuojaus toteutetaan mittaamalla generaattorin maadoituspisteeseen liitetyn nollajännitemuuntajaan indusoituvaa kolmatta yliaaltoa. Generaattori tuottaa normaali käytössä jännitteen kolmatta yliaaltoa, johtuen generaattorin staattorin epäsymmetriasta. Mikäli tämä jännite katoaa, niin indikoi se maasulkua generaattorin tähtipisteen ja virtamuuntajan välillä. Tähän ei normaalit ylivirtaan perustuvat suojat havahdu sillä virtaa ei esiinny kaapelivirtamuuntajissa.

Kolmannen yliaaltosuojan testaus toteutetaan syöttämällä releen jännitekanaviin nimellisjännitettä ja samalla yli asetteluarvon olevaa jännitteen kolmatta yliaaltoa releen nollajännitemittaus kanavaan. Testaukseen tarvitaan neljä jännitekanavaa. U_0 kanavan jännitettä tiputetaan niin, että start kosketin havahtuu ja laukaisuaika saadaan seuraamalla trip koskettimen tilaa. Näin ollen suojan havahtuminen voidaan testata helposti Ramping -moduulilla ja suojan laukaisuaikojen testaamiseen voidaan hyödyntää State Sequencer -moduulia.

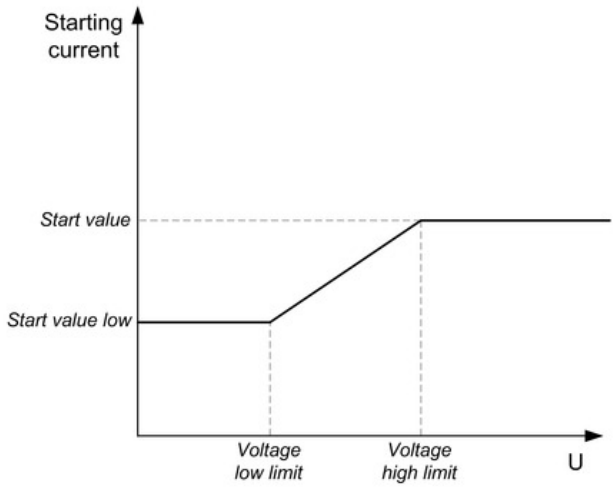
5.9 Roottorin maasulkusuoja (64R)

Roottorin maasulkusuojan testaamiseen käytetään tehdastesteissä vastusdekadia, jolla pyritään simuloiman roottorin DC-piirin ja maan välistä maasulkuvastusta. Asettelut suojalle asetellaan yleensä käyttöönottotestien yhteydessä sillä silloin voidaan tarkkaan mitata generaattorin synnyttämä maasulkuresistanssi, jonka mukaan suojan virta-asettelut asetellaan.

Tehdastesteissä suojaus voidaan todeta toimivaksi syöttämällä releen I_0 -virtamittauskanavaan virtaa asetteluarvon yli. Suojan testaamiseen voidaan käyttää State Sequencer -moduulia.

5.10 Jänniteriippuvainen ylivirtasuojaus (51V)

Jänniteriippuvaisen ylivirta suojan koestukseen tulee selvittää jännitteen ja virran suhteellinen laukaisu. Suojausfunktio mittaa kolmivaiheisen virran ja jännitteen myötä komponentteja ja on riippuvainen näiden alemman ja ylemmän tason asetteluista VI -käyrällä.



Kuva 20. Jännitteen slope karakteristika kertoo virran havahtumisarvon tietyllä jännitteellä.

Jos jännitteen Voltage low limit -asettelu on pienempi kuin Voltage high limit -asettelu niin suoja toimii jännitteen slope karakteristikalla kuvan 20 käyrän mukaisesti. Suojan virta havahtuminen lasketaan tällöin yhtälöllä

$$\mathrm{I}_{>\mathrm{effective}} = I_S - \left[\left(\frac{I_S - I_A}{U_Y - U_A}\right) * (U_Y - U)\right], \tag{23}$$

missä $\mathrm{I}_{>\mathrm{effective}}$ on virran havahtumis arvo, I_S virran asetteluarvo, $I_A$on virran alatason asetteluarvo, U_Y on jännitteen ylätason asetteluarvo, U_A on jännitteen alatason asetteluarvo ja U mitattu jännite (ABB, 2024).

Jänniteriippuvaisen ylivirtasuojauksen testaamiseen voidaan hyödyntää State Sequencer moduulia. Virran toimintaraja voidaan testata tarvittaessa Ramping moduulilla ramppaamalla virran arvoa ylös tietyllä jännitteellä.

5.11 Katkaisijavikasuoja (50BF)

Katkaisijavikasuoja asetteluissa tulee huomata myös mahdollinen uudelleenlaukaisu engl. retrip. Mikäli vikatilanteesta huolimatta, suojarele ei onnistu avaamaan katkaisijaa, katkaisija jää kiinnitilaan tai virta jatkaa kulkuaan niin katkaisijavikasuojaus aktivoituu. Suoja lähettää ensin auki komennon toiselle aukiohjauskelalle, jonka jälkeen käynnistää siirtolaukaisun ylemmän jännitetason katkaisijoille. Katkaisijavikasuojan testaamisessa tulee siis tarkastella molempia laukaisutietoja.

Mikäli katkaisijavikasuojan toimimiseen tarvitaan katkaisijan tilatieto, tulee käyttää omicronin binaari outputteja katkaisijan tilan simulointiin. Katkaisijavikasuojan koestamiseen sopii parhaiten State Sequencer. Vikatilan jälkeen tulee kuorman suuruus olla katkaisijavikasuojan virtarajan yli, jolloin suoja lähettää siirtolaukaisun eteenpäin. Tulee myös varmistaa, ettei suoja lähetä siirtolaukaisua, jos kuorma vikatilanteen jälkeen tippuu nollaan. Katkaisijavikasuojan toiminnallisuuden oikeellisuuden toteaminen on tärkeää, jotta tarpeettomia yläjännitepuolen laukaisuja ei tulisi ja tuotanto voi jatkaa

normaalina ilman vikaantunutta lähtöä. Suuret kuorman tai tuotannon pudotukset voivat aiheuttaa verkkoon suuria heilahteluja ja näin vaikuttaa verkon stabiilisuuteen merkittävästi.

5.12 Tahaton kytkentä verkkoon (27/51)

Suojauksen tulee olla aktiivinen vain silloin kun generaattori on pois käytössä. Suojalle asetellaan minimi jännitteen toiminta arvot, millä varmistetaan se ettei suoja toimi ylivirtasuojan tavoin normaalissa generaattorikäytössä.

ABB REX sarjan releissä asetellaan suojalle *Arm set voltage* ja *Disarm set Voltage* -arvot. Syöttämällä jännitettä yli *Arm set voltage* -arvon tulee suoja aktiiviseksi ja binaariulostulo ARMED aktivoituu, jolloin suoja havahtuu virran ylittäessä virta-asettelun rajan. Toiminnallisuus tulee tarkistaa releen näytöstä tai viemällä ARMED output signaali vapaalle testikoskettimelle. ARMED tilan ollessa ei aktiivinen ei suoja saa lähettää laukaisu tietoa. Näiden testaamiseen voidaan hyödyntää State Sequencer -moduulia.

5.13 Ali-impedanssisuojaus (21)

RIO tiedoston Distance pohjaan voi käyttäjä määritellä haluamansa impedanssitason, joka vastaa relevalmistajan suunnittelemaan toiminta-aluetta. Esimerkiksi ABB:n moottoreiden tai generaattoreiden impedanssiin perustuvassa vektorisuojauksessa impedanssin toiminta alueet ovat mho impedanssiympyrä karakteristikalla RX-koordinaatistossa. Koneen impedanssikestoisuus tulee suhteuttaa virta- ja jännitemuuntajien nimellisimpedanssiin sillä suojareleelle ei asetella generaattorin lähtötietoja, vaan rele laskee suhteellisen impedanssin mittamuuntajien nimellisistä ensiöarvoista. Esimerkiksi ali-impedanssi suojassa havahtumisarvo eli impedanssiympyrän säde asetellaan prosenttiyksikkönä virta- ja jännitemuuntajan muodostamasta nimellisimpedanssiin nähden. Tämä nimellisimpedanssi saadaan laskettua yhtälöllä

$$Z_n = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot I}, \tag{24}$$

missä Z_n on mittamuuntajien nimellisimpedanssi, U on jännitemuuntajan ensiö ja I virtamuuntajan ensiöarvo. Impedanssi mitataan laskennallisesti kahden vaiheen väliltä suojan prosessointilohkossa. Esimerkiksi vaiheen A ja B välinen impedanssin saadaan yhtälöllä

$$\overline{Z_{AB}} = \frac{U_{AB}}{I_A - I_B}. \tag{25}$$

Ennen impedanssiin perustuvien suojien koestusta tulee tarkistaa releeltä oikea impedanssin mittaus. Jos kaikki vaihevirrat ja vaihejännitteet tai pääjännitteet ovat saatavilla niin releen tulisi näyttää kaikkien vaiheiden välisten impedanssien amplitudit ja kulmat releen mittausvälilehdellä. (ABB, 2024) Mitatun impedanssin ja nimellisen impedanssin suhteen alittaessa asetellun impedanssiympyrän säteen (engl. *Polar reach*), rele havahtuu.

Impedanssisuojien tarkempaan tarkasteluun voidaan hyödyntää Distance tai Advance Distance moduulia. Impedanssisuojien havahtuminen ja toiminta-alueet eli havahtumisrajat saadaan todettua parhaiten Advanced Distance moduulilla, mutta toiminta-aikojen toteamiseen voidaan käyttää yksinkertaisempaa State Sequencer moduulia. State Sequencer tilamäärittelyissä voidaan lisätä impedanssilaukaisu (*Z shot*), missä vikatilan vikaimpedanssi lisätään automaattisesti käyttäjän määrittelemällä vikavirralla. Moduuli säätää jännitteen automaattisesti määritetyn yksi-, kaksi- tai kolmivaiheisen vikapaikan mukaan. Vikaimpedanssi lasketaan automaattisesti, mutta myös resistanssi ja reaktanssi arvoja voidaan tarkastella ja muokata testiin sopivaksi.

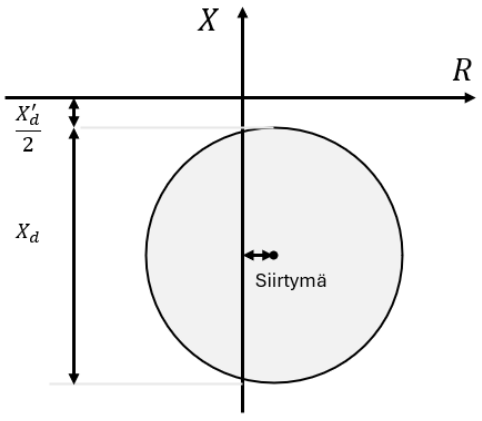
Lähioikosulussa jännite romahtaa virran pysyessä vakiona, joten koestus voidaan suorittaa vakio kuormitusvirran arvolla laskemalla jännitettä portaittain ramping moduulin avulla. Havahtumisjännitteen arvon perusteella voidaan laskea

myötäimpedanssi, jota taas verrataan releen asetteluarvoon (Kankaanpää, 2019, s. 38). Vaihtoehtoisesti ramping moduulilla voidaan syöttää impedanssia lähelle nollaa eri vikaimpedanssin kulman arvoilla ja tarkastella havahtumiskoskettimen tilanmuutosta. Impedanssi kannattaa syöttää kaikista neljästä suunnasta neljän rampin avulla. Suojausfunktion laukaisu ajat voidaan todentaa edellisten suojien tapaan State Sequencerilla.

5.14 Alimagnetointisuojaus (40)

Alimagnetointi suojaus laskee ali-impedanssin tavoin impedanssin konfirmoiduista jännitteen ja virran arvoista. Impedanssi voidaan tässä moduulissa mitata myös vaihekohtaisesti. Yleensä impedanssi mitataan kaikkien vaiheiden myötäkomponenteista, jolloin niin vaiheiden välisten kuin vaiheiden impedanssien alittaessa asetellun impedanssiympyrän, rele havahtuu.

Releen ympyräimpedanssin halkaisija asetellaan yleensä koneen tahtireaktanssin X_d ja muutosreaktanssilla X_d’ mukaan. Offset asettelu on yleensä puolet muutosreaktanssin arvosta. Kuva 21 esittää kapasitiivisen alimagnetointisuojan toimintakuviota.



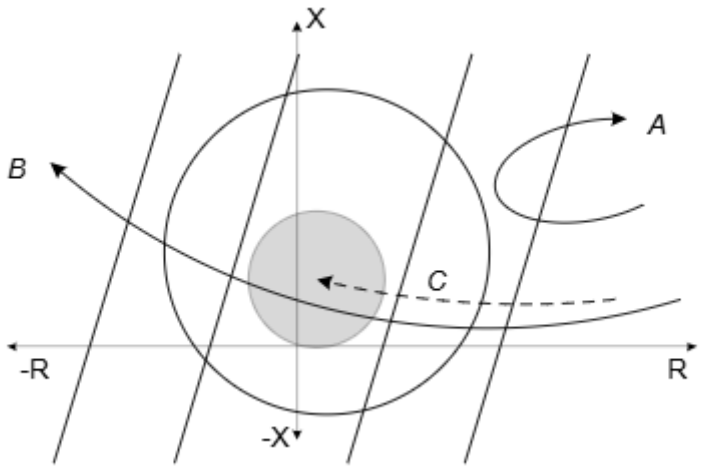
Kuva 21. Alimagnetointi käyrä muodostuu generaattorin tahtireaktanssin X_d ja generaattorin muutosreaktanssin X_d' mukaan. Siirtymä, (engl. *Displacement*) asettelulla voidaan tuoda suojaukseen lisää selektiivisyyttä. (ABB, 2024)

Alimagnetointisuojan koestus noudattaa pitkälti ali-impedanssin suojan koestusta. Suojan testaamiseen voidaan hyödyntää advanced distance tai state sequencer moduulia.

5.15 Epätahtisuojaus (78PS)

Epätahtisuojan tarkoituksena on tarkastella impedanssi nopeaa muutosta epätahtikäytön aikana. Koneen ollessa epätahtitilanteessa, impedanssi muutos voi olla niin nopea, ettei alimagnetointisuojaus tai ali-impedanssisuojan ehdi toimia. ABB:n suojareleissä käytetään OOSRPSB funktioita, joka on suunniteltu tällaisia tilanteita varten.

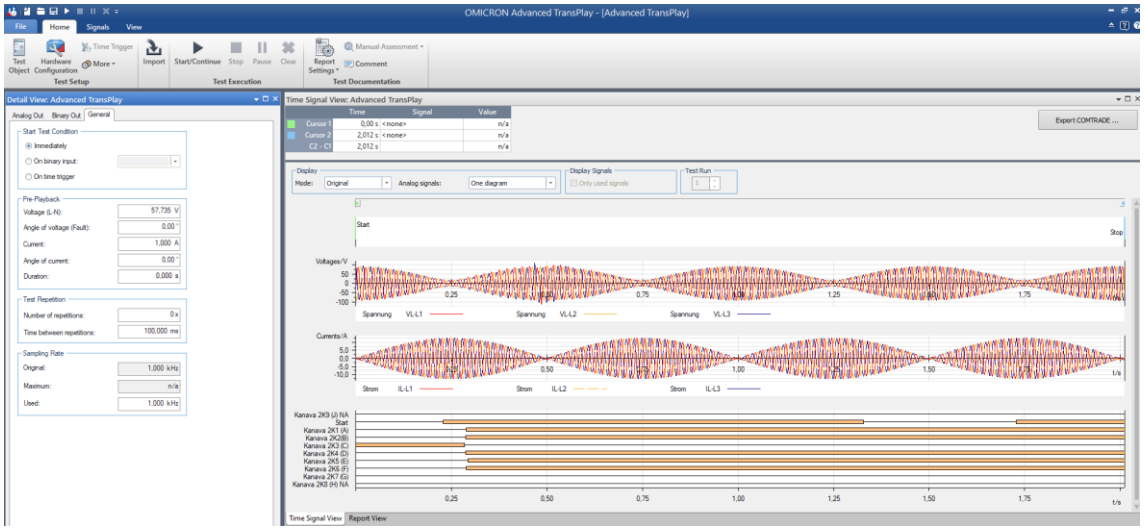
Suojan ulostulo OSB output aktivoituu, kun suoja havaitsee epätahtitilanteen, ja lähettää laukaisukäskyn jos määritellyt ehdot täyttyvät. Esimerkiksi suoja voidaan määrittää laukaisevaksi vasta, kun useampi epätahtitilanne on verkossa havaittu. ABB:n technical manuaalissa epätahtitilanteet määritetään esimerkin avulla seuraavasti. Kuvassa 22 kuvataan eri tilanteiden impedanssin muutosta kolmen eri tilanteen mukaan.



Kuva 22. Epätahtitilan havaitseminen ABB:n suojareleissä.

Tilanteessa A impedanssi käy määriteltyjen inner ja outer binders alueiden sisällä mutta poistuu saavuttamatta mho impedanssiympyrää. Suoja ilmoittaa, että heilahtelu (Swing) tilanne on havaittu, mutta ei aiheuta epätahtisuojan laukaisua. Tilanteessa B impedanssi kulkee koko määrittely alueen läpi eikä impedanssisuoja kerkeä toimimaan. Epätahtisuoja kuitenkin havaitsee verkon epästabiilisuuden ja mahdollisesti poistaa epätahtiin joutuvan generaattorin mikäli näin on haluttu. Tilanteessa C ei epätahtitilannetta pääse syntymään vaan esimerkiksi verkon jännite laskee lähelle nollaa, jolloin generaattori on ali-impedanssissa ja irrotetaan verkosta ali-impedanssin laukaisusta.

Epätahtisuojan testaamiseen Siemens suosittelee käytettäväksi transienttitiedostoja. Transienttitiedostot voidaan luoda käyttäen erilaisia simulointiohjelmistoja tai käyttää todellisen epätahtitilanteesta tallennettua häiriötallennetta (Siemens, 2024). Tiedostoa voidaan tarkastella omicronin Advanced transplay -testimoduulilla.

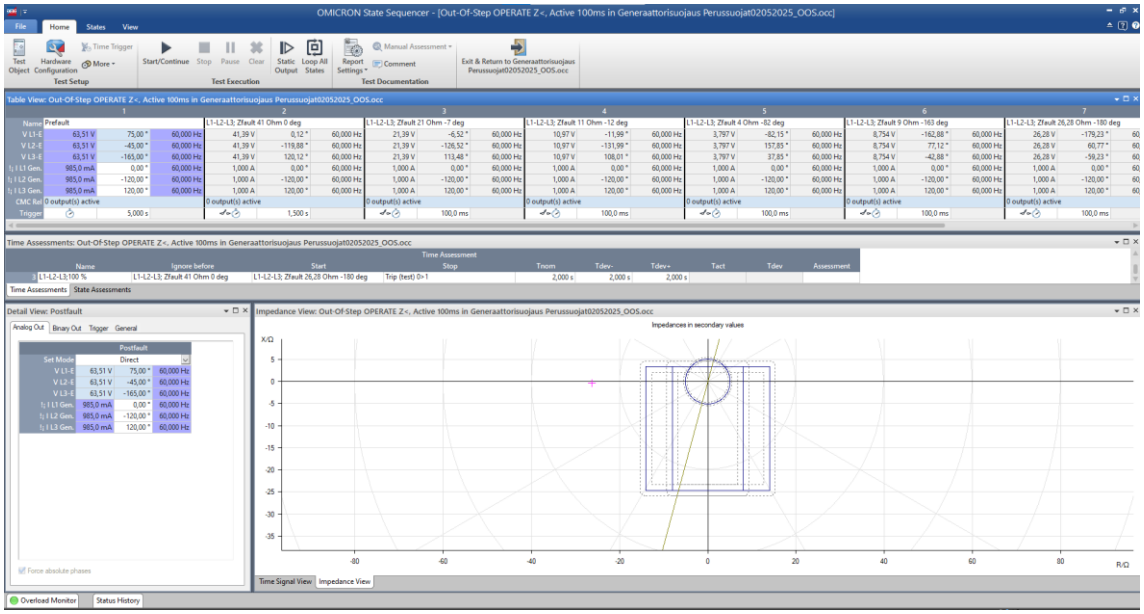


Kuva 23. Advanced TransPlay -moduuli.

Suojan oikean toiminnallisuus voidaan todeta tarkkaan häiriötallentimien avulla. PCM600 distrurbance handling työkalulla voidaan tarkastella suojareleen liipaisemaa häiriötilannetta PCM600 ohjelmistossa tai häiriötallenne voidaan ladata tarkempaan tarkasteluun esimerkiksi Wavewin ohjelmalla.

Ensiötesteissä epätahtisuojan toiminnallisuus on myös hankala todeta. Ensiötesteissä yleensä riittää syötetyn kuorman myötäkomponenttien tarkastelu. Jos jännitteen ja virtojen suuruudet ja vaihekulmat sekä myötä komponenttien impedanssin vektorisuure vastaa syötettävän kuormituksen suureita niin epätahtisuojan oletetaan toimivan oikein (Siemens, 2024, s. 2095).

ABB:n epätahtisuojalohko on nimeltään OOSRPSB (ANSI 78PS). Epätahtisuojan testaamisessa voidaan ABB suojissa tarkastella OSB ja OOS OPERATE ulostuloja releen tapahtumalistasta sekä mahdollisten laukaisu ja havahtumiskoskettimiin linkitettyjen ulostulojen avulla. Karkea epätahtitilanne voidaan saavuttaa Omicronin State Sequencerin avulla karkeasti. RIO tiedoston Distance moduuliin voidaan määrittää epätahtialueet impedanssitasossa edellisen ali-impedanssisuojan tavoin kuvan 24 mukaisesti.



Kuva 24. Epätahtisuoja epätahtihavahtuminen ja laukaisun toteaminen.

Pohjan tarkoituksena on nopeiden state lohkojen avulla simuloida epätahtitilannetta missä impedanssi siirtyy alijännitteen heilahtelun seurauksesta vasemmalle puolelle

impedanssitason läpi. Näin epätahtisuoja havahtuu ja laukaisee tietyn ajan kuluessa kun jännite on siirtynyt 180 astetta virtaa jälkeen.

5.16 Differentiaalisuojaus (87)

Differentiaalisuojan eli erovirtasuojan suojausalueet rajautuvat tarkasti suojattavan kohteen molemmilla puolilla oleviin virtamuuntajiin. Generaattoreilla tällä tarkoitetaan generaattorin tähtipisteen ja syöttöpuolen virtamuuntajia. Virtamuuntajien kytkentä tulee tarkistaa tapauskohtaisesti, ja suoja tulee asetella niin, että erovirta normaalitilanteessa on nolla. Erovirran I_d amplitudi saadaan yhtälöllä

$$I_d = |\bar{I}_1 + \bar{I}_2|, \tag{26}$$

missä $\bar{I}_1$ ja $\bar{I}_2$ ovat generaattorin tähtipisteen virta ja generaattorin syöttävän puolen virta. Käytännössä järjestelmässä voi esiintyä jonkin verran erovirtaa virtamuuntajien epätarkkuudesta vuoksi, mutta teoriassa normaalikäytössä $I_d = 0$.

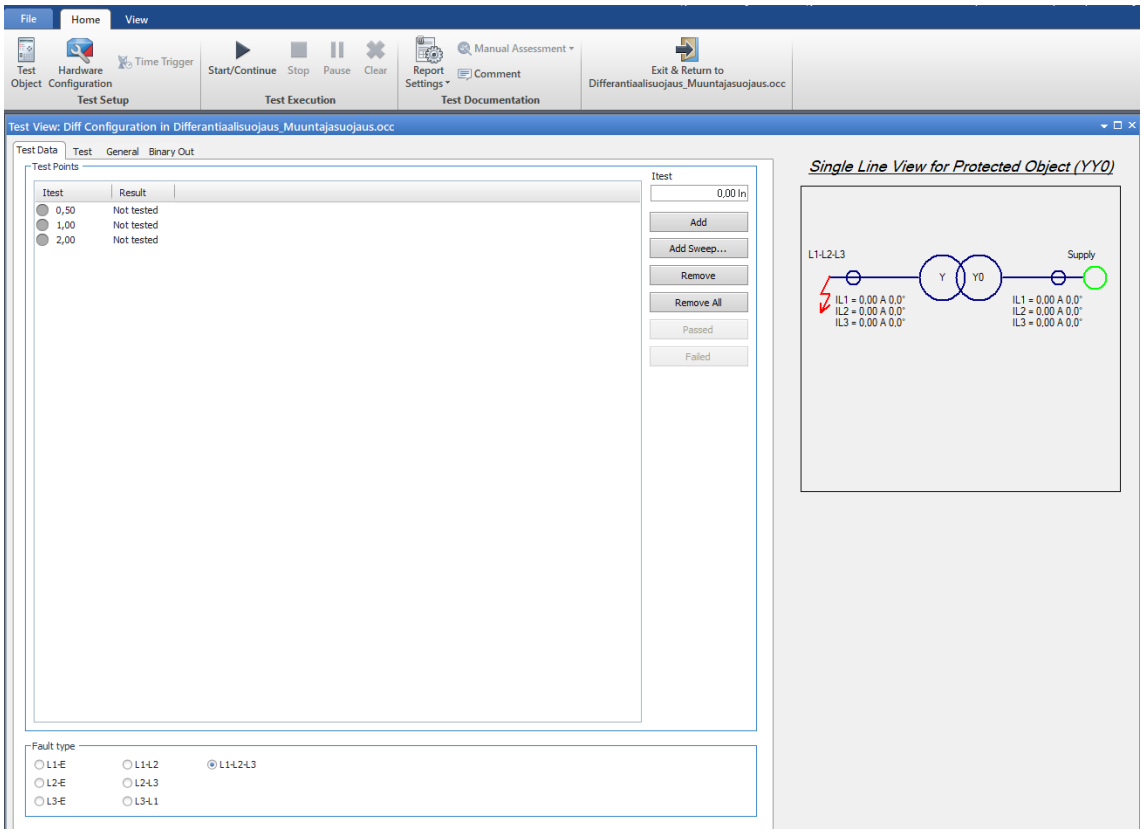
Alemman portaan differentiaalisuojaus vakavoivaan biasvirralla eli vakavointivirralla. Vakavointivirran laskenta vaihtelee relevalmistajan mukaan, mutta yleisesti vakavointivirta I_b voidaan laskea yhtälöllä

$$I_b = \left|\frac{\bar{I}_1 - \bar{I}_2}{2}\right|. \tag{27}$$

I_d ja I_b suhdetta voidaan tarkastella Omicron RIO differential toiminnolla. Differential funktiolla voidaan tarkastella kokonaisvaltaisesti differentiaalisuojauksen toimintaa asettelemalla suojattavan alueen ja komponenttien nimellisarvot. Suojattava komponentti voi olla muuntaja, generaattori, moottori tai kisko. RIO differentiaalifunktio laskee automaattisesti sille syötetyistä virtamuuntajien ja nimellisjännitteiden sekä nimellistehojen arvoista järjestelmän kuormitusvirrat. Differentiaalisuojaus toteutetaan tavallisesti kaksi portaisena $I_{diff} >$ ja $I_{diff} >>$. Alemman portaan vakavointikäyrää

voidaan tarkastella karakteristika välilehdellä, joka muodostuu suurimman sallitun erovirran ja kuormitusvirran suhteesta. Myös toisen ja viidennen yliaallon tarkastelu voidaan määrittää tässä moduulissa.

Jos kuormitusvirta kasvaa niin sallitaan yhä suurempi erovirta. Ideaalitilanteessa suojareleen mittaama erovirta on nolla. Thevenin järjestelmässä tulevien virtojen suuruus on sama kun siitä lähtevien. Diff configuration avulla voidaan tarkastaa, että differentiaalisuojan parametrit ovat aseteltu oikein ja virtakanavien johdotuksen kytketty suunnitelmien mukaan. Kuvassa 25 on esimerkki Yy0 kytketyn kaksi käämimuuntaja koestuksesta.

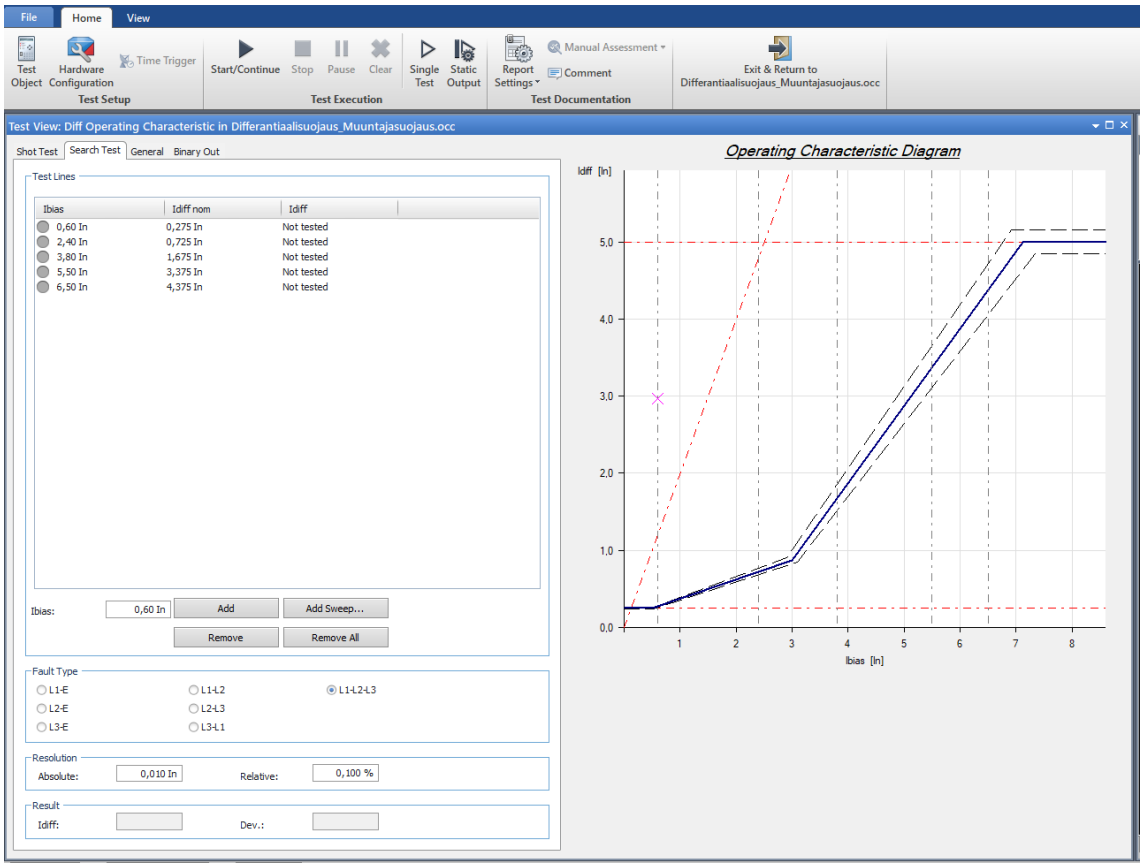


Kuva 25. Diff Configuration -moduulilla tarkistetaan differentiaalisuojan mittaukset.

Differentiaalisuojausta voidaan tarkastella moduulilla yksi-, kaksi- tai kolmivaiheisena. Testin käynnistyttyä, käyttäjän tulee tarkistaa kuormitusvirran suuruus releen differentiaalisuojan mittaamista arvoista, sekä varmistaa ettei rele näe erovirtaa. Mikäli

erovirta ei ole nolla tai suojarele laukaisee, niin tulee tarkistaa testin ja suojareleen parametriasettelut ja suorittaa testi uudelleen.

Differentiaalisuojauksessa kuormitusvirran suuruus vaikuttaa erovirtalaukaisun herkkyyteen. Mitä suurempi kuorma järjestelmässä sitä suurempi erovirta tarvitaan differentiaalisuojan havahtumiseen. Differentiaalisuojan laukaisukäyrän testaamiseen käytetään Diff Operating Charectics -moduulia. RIO funktiossa määritetty toimintakäyrä voidaan koestaa eri kuormitusvirran arvoilla ja etsiä kuormitusvirtaa vastaava erovirta. Moduuli ilmoittaa käyttäjälle jos indikointi releeltä on käyttäjän määrittelemien alueiden rajoissa.



Kuva 26. Differentiaalisuojan suojauskäyrän koestaminen Diff Operating Characteristic -testimoduulilla.

Differentiaalisuojan ylemmän portaan koestuksessa on hyvä huomioida koestusvirran suuruus. Kuvasta 26 voidaan nähdä, että ylemmän portaan differentiaalivirran asettelu on 5 kertaa nimellinen virta. Virtamuuntajan toision ollessa 5A, tämä tarkoittaa jo 25 A:n suuruista koestusvirtaa. Koska esimerkiksi ABB REX640 suojareleen virtakanavien jatkuva virtakestoisuus on 20 ampeeria, niin on suositeltavaa tarkistaa differentiaalisuojan laukaisevien koskettimien oikea toiminta esimerkiksi QuickCMC avulla ennen differentiaalisuojan testausta (ABB, 2024).

5.17 Takatehosuojaus (32)

Tehoja voidaan tarkastella tehokolmion avulla missä generaattorin tuottama pätö- ja loisteho symmetrisessä järjestelmässä saadaan tehon kaavoilla

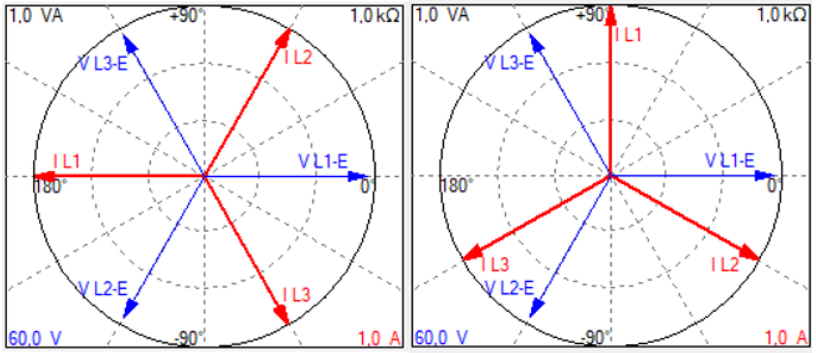
$$P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi, \tag{28}$$

$$Q = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \sin\varphi\,, \tag{29}$$

missä U mitattu pääjännite, I mitattu kokonaisvirta ja φ jännitteen ja virran välinen vaihe-ero. Kulma φ (fii) saadaan vähentämällä jännitteen vaihekulma virran vaihekulmasta kaavalla

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i, \tag{30}$$

missä φ_u jännitteen vaihekulma – ja φ_i vaihekulma tietyllä ajanhetkellä. Suoja yksinkertaisuudessa voidaan todeta toimivaksi syöttämällä virtaa vastakkaiseen suuntaan nimellisjännitteillä pätötehon tapauksessa. Virran ollessa jännitteen kanssa vastakkaisessa kulmassa, $\cos\varphi$ saa arvon -1, jolloin kaikki teho mitä rele näkee on ”negatiivista” pätötehoa. Virran amplitudia kasvattessa suoja havatuu sille asetetun tehoasettelun mukaan ja lähettää trip käskyn laukaisuajan kuluessa loppuun. Vastaavasti loistehon kaavasta $\sin\varphi$ saa arvon -1, jos virta on 90 astetta jännitettä edellä, jolloin kaikki teho on loistehoa. Kuvassa 27 on virran ja jännitteen osoitin vektorit eri tehoilla.



Kuva 27. Virran ja jännitteen osoitin vektorit osoitindiagrammissa. Vasemmalla neg. P ja oikealla neg. Q.

Takatehosuojan testauksessa voidaan hyödyntää myös Omicronin Power RIO:a. RIO:ssa määritettyjä parametreja käytetään advanced power moduulissa. Moduulissa voidaan piirtää laukaisu raja-arvot teho suojaukselle PQ -tasossa. Search välilehdellä voidaan etsiä havahtumisarvoa seuraamalla Start koskettimen tilan muutosta. Moduuli arvioi ja raportoi tämän arvon käyttäjälle. Myös laukaisuaikojen koestus onnistuu tällä moduulilla helposti.

5.18 Ylimagnetointisuojaus (24)

Generaattoriin indusoitunut jännite on suurempi kuin mitattu verkon jännite, sillä siihen vaikuttaa generaattorin vuoto reaktanssi ja päävirtojen synnyttämä jännite. Generaattorin indusoima jännite lasketaan yhtälöllä

$$\bar{E} = \bar{U}_{AB} + (\bar{I}_A - \bar{I}_B) \cdot (jX_{leak}), \tag{31}$$

missä $\bar{\mathrm{E}}$ on indusoitunut jännite, $\bar{\mathrm{U}}_{\mathrm{AB}}$ vaiheiden A ja B välinen pääjännite, $\bar{\mathrm{I}}_{\mathrm{A}}$ on vaiheen A virta, $\bar{\mathrm{I}}_{\mathrm{B}}$ vaiheen B virta, $\mathrm{X}_{\mathrm{leak}}$ on vuotoreaktanssi. Lähdejännite voidaan myös laskea vaihejännitteillä yhtälöllä

$$\bar{E} = \sqrt{3} \cdot \left(\bar{U}_1 + \bar{I}_1 \cdot (j \cdot X_{leak})\right), \tag{32}$$

missä $\overline{U}_1$ on vaihejännite ja $\bar{I}_1$ on vaihevirta. Lähdejännitteen ja mitatun taajuuden suhdetta verrataan ja lasketaan nimellisarvojen ja asetteluiden mukaan magnetointitaso yhtälöllä

$$M = \frac{\frac{E}{f_m}}{\frac{U_n}{f_n} \cdot \frac{Volt\ Max\ continous}{100}}, \tag{33}$$

missä M magnetointitaso pu arvona, E on indusoitunut jännite, f_m mitattu taajuus, U_n nimellisjännite ja f_n nimellistaajuus. Volt Max continous -asettelulla voidaan määrittää sallittu yhtäjaksoisen jännitteen suuruus. Vakioasettelulla Volt Max continous arvo on 100, jolloin yhtälö 33 saadaan yksinkertaisempaan muotoon

$$M = \frac{E}{f_m} \cdot \frac{f_n}{U_n}, \tag{34}$$

Ylimagnetointisuoja mittaa jännitteen ja taajuuden suhdetta. Ylimagnetointitila syntyy kun jännite nousee tai taajuus laskee systeemissä. Testissä syötetään releelle nimellisjännitettä nimellistaajuudella ja tarkistetaan suojan mittaama magnetointisuhde suojan mittausdatasta. Tason tulisi olla 100% nimellisarvoilla. Kun jännitettä nostetaan niin magnetointisuhde nousee ja kun se ylittää asettelurajan niin suoja havahtuu. Vaihtoehtoisesti voidaan laskea taajuutta ja tarkistaa sama toiminta. Ylimagnetointisuojan laukaisuaikojen testaamiseen voidaan käyttää State Sequencer -moduulia.

Vikatilanteet asetellaan ensin alle asetteluarvon ja sitten toisessa yli asetteluarvon. Vikatilanteen tulee olla suurempi kuin suojan laukaisuarvon. Jälkimmäisen tilan, missä havahtumisarvo ylitetään, mitataan laukaisukoskettimen tilan muutosaikaa vikatilanteen alusta koskettimen tilan vaihtoon. Samalla tulee tarkistaa ettei suojareleen havahtumiskosketin (start) aktivoidu ennen havahtumisarvojen ylittämistä.

5.19 Sulakevian valvonta (60)

Sulakevian valvonnan ulostuloilla lukitaan jänniteriippuvaisten suojien toiminta jännitemittausvian aikana. Suoja tulee olla pois päältä muiden suojausfunktioiden testauksen ajan. Sulakevian havahtumiskosketin voidaan viedä koestuskoskettimille, mutta tämä ei ole välttämätöntä. Funktion toiminta voidaan todeta myös tarkastelemalla tapahtumalistaa, sekä muiden suojien toimintaa. Funktion testauksessa suojareleelle tulee syöttää ensin nimellisjännitettä, jonka jälkeen pyritään mallintamaan esimerkiksi yhden mittausvaiheen vioittumista lisäämällä yhteen vaiheeseen negatiivista komponenttia asettelun yli. Tarkistetaan releen näytöstä, että sulakevian valvonta on aktivoitu, jonka jälkeen voidaan kokeilla muuttaa suureita niin, että jonkin jännitesuojan tulisi toimia. Tämän tilanteen saavuttamiseen voidaan käyttää State Sequencer moduulia tai todeta sulakevian valvonnan toiminnollisuus QuickCMC:llä.

6 Testausprosessin kehittäminen

Työn tavoitteena oli kehittää VEO Oy:n FAT suojareletestaus generaattorisuojien osalta. Eri testimoduuleita hyödyntäen kehitettiin generaattorisuojaukselle perussuojien pohja, jonka toiminnallisuutta pyrittiin testaamaan testihallissa. FAT -koestuskansioon tallennettaviin dokumentteihin ei ollut selkeää linjaa. Tässä luvussa käydään läpi generaattorisuojareleen koestukseen käytettyjä tiedostoja, sekä pyritään selventämään FAT -kansioon tallennettavia tiedostoja.

6.1 Suojareleen koestaminen

Projektin koestuksilla pyrittiin kartoittamaan testitiedostojen toimivuutta. Koestustiedostot luotiin suomenkielellä, sillä asiakkaan vaatimuksissa ei ollut toimittaa täydellisiä testiraportteja suojarelekoestusten osalta. Asiakkaan speksissä toimitukseen kuuluu suojareleen konfiguraatio, suojareleen toiminnan oikeellisuuden varmistaminen ja hälytysten testaaminen valvomoon. Tulevaisuuden kannalta, mikäli asiakas tulee vaatimaan tarkempien testituloksia, valmiin Omicron pohjan merkitys nousee huomattavasti suojareleiden koestuksen osalta.

6.2 Tarkastuslista

Luvussa 4 nostetut kohdat käydään läpi Excel taulukko muodossa. Tarkastuslistan avulla koestaja voi seurata koestuksen kulkua ja varmistua siitä, että kaikki kohdat täyttyvät. Näin varmistetaan, että koestus on yhden mukainen kaikkien toimitettavien projektien kanssa. Tämä helpottaa myös koestuksen aikataulutusta ja yleisesti projektin hallintaa.

Tarkastuslista voidaan tarvittaessa lisätä toimitukseen, mistä asiakas voi tarpeen mukaan tarkistaa koestuksen etenemisen. Listaan tulee merkitä koestuksen tekijä ja viimeinen muokkauspäivämäärä. Tarkastuslistalla on maininta toimitettavista koestustiedostoista, jotka tulee lisätä FAT koestuskansioon koestuksen jälkeen.

6.3 Testitiedostojen käyttö

Omicron tiedostoja testattiin eräässä generaattorilähdön projektissa, missä oli käytössä REX615 suojarele. Ennen koestusta luotiin suojareleen konfiguraatio käyttäen PCM600 ohjelmaa. Projektissa käytetyt suojaukset on esiteltynä taulukossa 2 sivulla 67. Samalla muodostettiin edellisessä alaluvussa mainittu Excel pohjainen tarkistuslista tulevia FAT koestuksia varten.

FAT koestuksen alussa huomattiin, ettei projektille ole määritetty työn aikaisen sähkötyöturvallisuuden valvojaa. Asiasta tulee ilmoittaa projektipäällikölle, jonka tulee toimittaa määräys sähkötyöturvallisuuden valvojasta työkohteessa dokumentti koestusalueelle. Vastuualueiden määrittämisen jälkeen voitiin koestukset aloittaa.

Varmistettiin silmämääräisesti kojeiston rakenne ja suojareleiden sarjanumerot ja tilauskoodi tarkistettiin releeltä. Oikeiden suojareleiden tyypin varmistuttua voitiin releen konfiguraatio kirjoittaa releelle. Generaattorisuojan testaukseen tarkoitettuja valmiita testipohjia pyrittiin hyödyntämään mahdollisimman pitkälle. Pohjan muodostuksessa huomattiin, että occ -tiedosto kannattaa pitää mahdollisimman yksinkertaisena, virheiden minimoimisen kannalta. Koska suojausfunktiot muuttuvat projektikohtaisesti, niin täydellisen testitiedoston muodostaminen muuttuu haastavaksi. Siksi on hyvä jakaa occ -tiedostot useampaan tiedostoon. Jokaisen tiedoston testipohjien tulostusalueet pyrittiin luomaan mahdollisimman yhdenmukaisiksi, jotta tarvittavien koestustiedostojen pdf -tiedostot voitiin helposti tulostaa koestuskansioon koestusten jälkeen.

Kyseisten suojien testaaminen jaettiin neljään tiedostokokonaisuuteen:
- REX615 General Generator Protections.occ,
- REX615 Differential protection_MPDIFF.occ,
- REX615 Out-of-Step_OOSRPSB.occ,
- REX615 Accidental energization_GAEPVOC.occ.

Jokaiselle tiedostolle tuotiin releen parametriasettelut XRIO -työkalulla sekä CMC:n hardware konfiguraatio. Näin asettelut ja testilaitteen kokoonpano voitiin lisätä helposti useaan tiedostoon. Määrittelyiden jälkeen voitiin testikokonaisuus muodostaa Omicronin OCC Batch työkalulla.

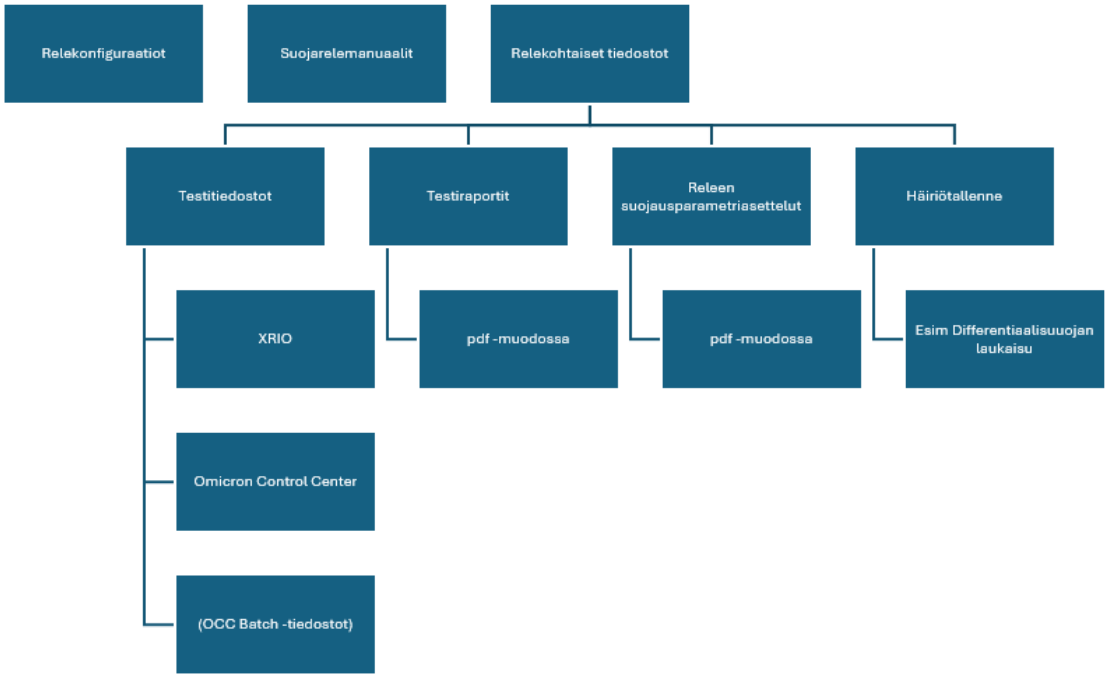
Generaattorisuojauksessa käytetyt perussuojat voitiin koestaa helposti XRIO -tiedoston avulla, minkä sisältämät suojareleen parametri linkitettiin testimoduuleille. Perussuojien testaamiseen käytetyt testimoduulit olivat: QuickCMC, State Sequencer ja Ramping. Pohjan parametrilinkitykset olivat joidenkin suojien osalta vääriä, mutta pohjaa pyrittiin muokkaan testien edetessä oikeaan suuntaan.

Erikoisemmat suojaukset olivat: Out-Of-Step OOS, tahaton kytkentä verkkoon GAEPVOC, sekä moottoreille suunnatun differentiaalisuojaus MPDIFF. Näiden suojausfunktioiden testaamiseen luotiin omat Omicron Control Center tiedostot, joissa XRIO -tiedostoja voitiin käyttää. Ylimääräiset testimoduulit poistettiin pohjasta. Näiden suojien testaamiseen voitiin hyödyntää Omicron Protection Testing Library:sta saatuja pohjia.

Omicron toimintakokeita ennen suoritettiin aikataulupuutteiden takia signaalitestit valvomoon ennen suojien koestusta. Koestusten aikana kuitenkin tarkistettiin, että oikea suoja näkyy myös valvomon näytöllä.

6.4 FAT koestustiedostot

Koestuksen jälkeen tallennetaan testitiedostot FAT -koestuskansion alle. Kansioissa olevia mahdollisia tiedostoja on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. FAT koestuskansion rakenne

Relekohtaiset tiedostot tulee nimetä releen position mukaan. Yleensä suojareleen nimi muodostuu piirikaavioissa nimetyn kojeiston ja laitenumeron avulla. Jokaisesta releestä tulee tehdä omat XRIO- ja OCC -testitiedostot ja näissä käytetyt suojareleasettelut tulee löytyä relekohtaisesti kansiosta. Koestusraporttina voidaan käyttää tulostettua OCC -tiedostoa pdf -muodossa. Nämä voidaan selkeyden vuoksi jakaa eri kansiohin.

Myös häiriötallentimen toiminta tulee todeta koestusten yhteydessä. Häiriötallentimen asettelut tulee yleensä asetteluiden laskijalta, mutta yleisohjeena voidaan käyttää Fingrid VJV2024 vaatimusta tyypin C voimalaitosten instrumentointista. Fingrid määrittelee julkaisussaan, voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset (2024, s.37), että häiriötallentimen tulee mitata ja tallentaa liittymispisteen tai muun sovitun mittauspisteen jännitteet ja virrat hetkellisarvoina vaiheittain. Häiriötallentimen tulee liipaista, kun suojarele laukaisee tai jännitteen suhteellisarvo alittaa 0,95 tai ylittää 1,05 per-unit arvon. Jälkimmäinen voidaan jättää huomioimatta generaattorisuojissa tai lähtöjen osalta. Häiriötallenteet ladataan releeltä ja lisätään kansioon osana tehdaskoestusta.

7 Johtopäätökset

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää VEO generaattorisuojauksen testaamista tehdasympäristössä. Generaattoritoteutuksissa on käytetty Schneider Electricin P3G30 suojaa, mutta loppuasiakkaan vaatimuksesta ollaan siirrytty käyttämään ABB:n monisovellusreleitä REX640 ja REX615 malleja. Aikaisemmin generaattorisuojan testaaminen suoritettiin VEO:n VECOS tarkastamossa käyttäen virtakärryä testilaitteena valmiiksi luodun P3G30 releen konfiguraation avulla. Koetuslaitteella ei kaikesta huolimatta saada automaattista koestuspöytäkirjaa, joten se tulee muodostaa manuaalisesti sitä vaadittaessa.

Tarkastettu ohjauspaneeli tulee valmiina pakettina automaatiosuunnittelijoille, jotka suorittavat automaation FAT koestukset. Tämä tarkoittaa sitä, että suojareleiden analogia- ja binaaritulot sekä niiden johdotukset ja toiminnallisuus on tarkistettu pääpiirteittäin ennen tätä prosessin vaihdetta. REX sarjan releen tulevat tehtaalle ilman pohjakonfiguraatioita, joten suojareleiden toiminnallisuus tulee todentaa myöhäisemmässä vaiheessa FAT automaatiotestien yhteydessä. Tästä vaiheesta ei ole tähän asti vaadittu pöytäkirjaa suojareleiden osalta, vaan kattavat suojarelekoestukset ovat suoritettu vasta SAT -vaiheessa.

Tämän työn yksi päämääristä oli muodostaa valmis FAT -koestuspohja suojareleiden osalta, mikäli näiden koestusraportteja vaaditaan tulevaisuudessa. Tuloksena saatiin luvun 6 pohjalta muodostettua selkeä kansiorakenne ja toimintamalli suojareleiden koestamiseen. Kansiorakenteen avulla varmistutaan siitä, että koestus tapahtuu yhdenmukaisesti projektista huolimatta. Samaa kansiorakennetta voidaan hyödyntää jatkossa muidenkin suojausten osalta eri tyyppisissä projekteissa.

Työn tavoitteena oli käydä Omicron Test Universen testi tiedostojen käyttöä ja suojien testausta läpi lukujen 4 ja 5 mukaan. Näiden pohjalta saatiin muodostettua generaattorisuojauksen koestukseen soveltuva OCC -testitiedosto REX640 ja REX615 mallin suojareleille. Pohjan linkitykset saatiin moduuleihin ja parametrien asettaminen

hoituu automaattisesti XRIO tiedostojen avulla. Tätä generaattorisuojauspohjaa tullaan jatkuvasti kehittämään uusien Genset projektien yhteydessä. Työ toimii myös pohjana muun henkilökunnan perehdyttämiseen generaattorisuojien koestukseen, josta tullaan järjestämään VEO:n sisäisiä koulutuksia.

Jatkokehityksenä tulee huomioida Omicron Test Universe 5.0 (TU 5.0) käyttöönotto tulevaisuudessa. Diplomityön aloituksen jälkeen Omicronin pilvipalvelupohjaiseen asiakasportaaliin ei enää päivitetä vanhempiin versioihin pohjautuvia Omicron Control Center-tiedostoja, joten tämä ohjaa käyttäjän päivittämään ohjelmiston uusimpaan versioon. Tämän työn pohjalta voidaan tehdä päivitetty versio testitiedostosta, joka on yhteensopiva TU 5.0 kanssa. Tämän lisäksi yritys aikoo tulevaisuudessa investoida uuteen CMC 500 sarjan testilaitteeseen, joka toimii vain uusimmilla Test Universe versioilla.

Lähteet

ABB. (2007). *REK510 User's manual. Current injection device for earth-fault protection of a synchronous machine rotor (1MRS752587-MUM)*. ABB Protection & Control Technical Documentation Portal. Noudettu 11.5.2025 osoitteesta https://library.e.abb.com/public/b7d58a6c12e052b8c125734e002dee9c/REK510_userman_752587_ENc.pdf

ABB. (2023). *REX640 Application manual (1MRS759123)*. ABB Protection & Control Technical Documentation Portal. Noudettu 11.5.2025 osoitteesta https://techdoc.relays.protection-control.abb/r/REX640-Application-Manual/PCL4/en-US/REX640-Application-Manual

ABB. (2024). *REX640 Technical Manual (1MRS759142)*. ABB Protection & Control Technical Documentation Portal. Noudettu 6.6.2025 osoitteesta https://techdoc.relays.protection-control.abb/r/REX640-Technical-Manual/PCL4/en-US/Technical-data?tocId=wFLhTuOt0lVcuTjLhFAvGQ

Anderson, P. M. (1998). *Power System Protection.* The institute of electrical and electronics engineering series. Wiley-IEEE Press. ISBN: 0-7803-3427-2

Aura, L., & Tonteri, A. J. (1998). *Teoreettinen sähkötekniikka ja sähkökoneiden perusteet* (2. uudistettu painos). WSOY. http://urn.fi/URN:ISBN:951-0-21385-3

Babu, P. (2019, 11. syyskuuta). *Stator Earth Fault Protection – Generator*. Electrical Engineering Materials. Noudettu 5.8.2025 osoitteesta https://electengmaterials.com/stator-earth-fault-protection-generator/

Csanyi, E. (2024, 11. joulukuuta). *What is negative sequence current and how does it affect generator work*. Electrical Engineering Portal. Noudettu 6.6.2025 osoitteesta https://electrical-engineering-portal.com/negative-sequence-current-generator-work

Elovaara, J., & Haarla, L. (2011). *Sähköverkot II*. Gaudeamus Helsinki University Press. http://urn.fi/URN:ISBN:978-951-672-363-4

Elovaara, J., & Laiho, Y. (1988). *Sähkölaitostekniikan perusteet* (4. korjattu painos). Valopaino Oy. http://urn.fi/URN:ISBN:951-672-285-7

Fingrid. (2025, 15. tammikuuta). *Voimalaitosten järjestelmätekniset vaatimukset VJV2024*. Fingrid. Noudettu 5.8.2025 osoitteesta https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/vjv2024.pdf

Haukilahti, N., Hietalahti, L., Kerkkänen, Y., Kohvakka, A., Niemenmaa, A., Nurmi, T., Pyrhönen, J., Vauhkonen, V., & Vekara, T. (2004). *Sähkötekniikan laskuharjoituksia ratkaisuineen: Muuntajat ja pyörivät sähkökoneet* (2. painos). Otatieto. http://urn.fi/URN:ISBN:951-672-338-1

Hirvonen, P. (2023). *Generaattorien suojausjärjestelmien toteutus metsäteollisuusintegraatissa* [Diplomityö, Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT]. LUTPub. http://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2023032433083

Häsä, S. (2009). *Generaattorisuojauksen uusinta* [Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu]. Aaltodoc. https://aaltodoc.aalto.fi/bitstreams/c1e04bfc-5cb5-4929-b270-6edb014b44c7/download

Kankaanpää, R. (2019). *Voimalaitosgeneraattorin relesuojauksen koestus* [Opinnäytetyö, Vaasan ammattikorkeakoulu]. Theseus. http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201904155040

Lehtelä, R., & Korpinen, L. (2007, 21. marraskuuta). *Sähkötekniikkaopus. Luku 10: Sähkökoneet*. Leena Korpisen verkkosivusto. Noudettu 20.6.2025 osoitteesta http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

Mörsky, J. (1992). *Relesuojaustekniikka*. Otatieto. http://urn.fi/URN:ISBN:951-672-175-3

Omicron. (2015). *Testing with the Ramping Test Module*. Test Universe 3.00 – Manual. Knowledge Library. Noudettu 21.8.2025. [rajattu pääsy]. https://www.omicronenergy.com/en/products/protection-testing-library/

Omicron. (2014). *CMC 356, Reference Manual*. OMICRON electronics GmbH. Noudettu 10.6.2025 osoitteesta https://www.omicronenergy.com/download/document/F4E6A7A9-A0AF-490C-A0E0-E956970E0FE6/

Omicron. (2014). *XRIO User Manual*. OMICRON electronics GmbH. Noudettu 10.6.2025. [rajattu pääsy] https://www.omicronenergy.com/en/products/protection-testing-library/

Omicron. (n.d.). *Testing Solutions for Protection Automation and Control Systems. CM-Line Catalog*. OMICRON electronics GmbH. Noudettu 10.6.2025 osoitteesta https://documents.mrosupply.com/brands/omicron/CM-Line-Catalog-ENU.pdf

Pahkala, I. (2015). *Generaattorin jännitesäädön periaatteet, vaatimukset ja mittaaminen* [Opinnäytetyö, Mikkelin ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2015101015315

Peltoniemi, S. (2016). *Generaattorisuojauksen testaus vesivoimalaitoksessa* [Opinnäytetyö, Vaasan ammattikorkeakoulu]. Theseus. https://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-2016060812460

Siemens. (2024). *SIPROTEC 5, Generator Protection, 7UM85 Manual (Versio C53000-G5040-C027-J.02)*. Siemens Industry Support. Noudettu 10.6.2025 osoitteesta https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742404/siprotec-5-7um85-generator-protection-manual?dti=0&lc=en-pe

VEO. (2025). *VEDA Koestusohje*. [Sisäinendokumentti, toimittaja: Stigell, A.] [Rajattu pääsy]

Suni, N. (2018). *Jännitteensäädön ja loistehonhallinnan kehittäminen Enocellin sellutehtaalla* [Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto]. LUTPub. https://urn.fi/URN:NBN:fi-fe2018042719244

Tziouvaras, D. A., & Hou, D. (2004, 1. tammikuuta). *Out-of-step protection fundamentals and advancements*. 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, College Station. https://doi.org/10.1109/CPRE.2004.238495

VEO. (2022). *Appointment of the supervisor of electrical work at site* [Sisäinen dokumentti, toimittajat: Söderholm, R., & Bexar, M.]. [Rajattu pääsy].

Liitteet

Liite 1. Suojausfunktioiden teknillisiä arvoja

Taulukko 3. Suojausfunktioiden teknillisiä arvoja (ABB, 2024).

Suojausfunktio	Havahtumistarkkuus asetteluarvosta	Maksimi havahtumisaika	Laukaisuaika		Nollaus aika	Nollaus suhde
			Vakioaika (DT)	Käänteisaika (IDMT)		
PHIPTOC	10-40 x In ±5%	15 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	<40 ms	0,96
PHHPTOC	±1,5% tai ±0,002 x In	29 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	<40 ms	0,96
PHLPTOC	±1,5% tai ±0,002 x In	29 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	<40 ms	0,96
PHPTOV	±1,5% tai ±0,002 x Un	31 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	40 ms	0,96
PHPTUV	±1,5% tai ±0,002 x Un	58 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	40 ms	
DOPPDPR	±3% tai ±0,002 x Sn	45 ms	1% tai 20 ms		30 ms	0,94
UEXPDIS	±3% tai ±0,2% x Zb	45 ms	1% tai 20 ms		30 ms	1,04
MNSPTOC	±1,5% tai ±0,002 x In	28 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	40 ms	0,96
T2PTTR	±1,5% tai ±0,002 x In		2% tai 500 ms			
FRPFRQ	±5mHz	<80 ms	1% tai 20 ms		<150 ms	
EFLPTOC	±1,5% tai ±0,002 x In	29 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	<40 ms	0,96
ROVPTOV	±1,5% tai ± 0,002 x Un	48 ms	1% tai 20 ms		40 ms	0,96
PHPVOC	±1,5% tai ±0,002 x In	26 ms	1% tai 20 ms	5% tai 20 ms	40 ms	0,96
OEPVPH	±3%	f dt/d 200ms; U dt/d 40ms	1% tai 20 ms	5% tai 50 ms	40 ms	0,96
MPDIF Low	±3% tai ± 0,002 x In	37 ms	37 ms		40 ms	0,95
MPDIF High		19 ms	19 ms		40 ms	0,95
TR2PDIF Low	±3% tai ±0,002 x In	40 ms	40 ms		40 ms	0,96
TR2PDIF High		20 ms	20 ms		40 ms	0,96
UZPDIS	±3% tai ±0,2% x Zb	50 ms	1% tai 20 ms		40 ms	1,04
CCBRBRF	±1,5% tai ±0,002 x In		1% tai 20 ms		20 ms	
OOSRPSB	±3% tai ±0,2% x Un/(√3 x In)		1% tai 20 ms		1% tai 40 ms	
GAEPVOC	±1,5% tai ±0,002 x In ±1,5% tai ±0,002 x Un	20 ms	1% tai 20 ms		35 ms	0,96

Liite 2. Ylivirtasuojauksen koestuksesta

Kääntäen verrannollinen laukaisuaika vikavirtaan nähden. Ensimmäinen ylivirta porras on aseteltu toimimaan normaalilla IEC käänteisaika funktiolla. IEC 60255 standardin mukainen laukaisu t(I) (engl. inverse defined minimum time) saadaan yhtälöllä

$$t(I) = k \cdot \left(\frac{A}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^c - 1} + B \right), \tag{35}$$

missä k on aseteltu aikakerroin, I on mitattu virta ja I_s on virta asettelu, A ja B sekä C ovat ANSI tai IEC -käyrävakioita. Laukaisu aikojen selektiivisyyttä voidaan tarkastella kun sijoitetaan seuraavan ylivirtaportaan asetteluarvo kohtaan I, jolloin saatu laukaisuaika tulisi olla suurempi kuin toisen portaan asettelu arvo. (ABB, 2024)

Taulukko 4. ANSI- ja IEC-käänteisaikakäyrien vakiot (ABB, 2024).

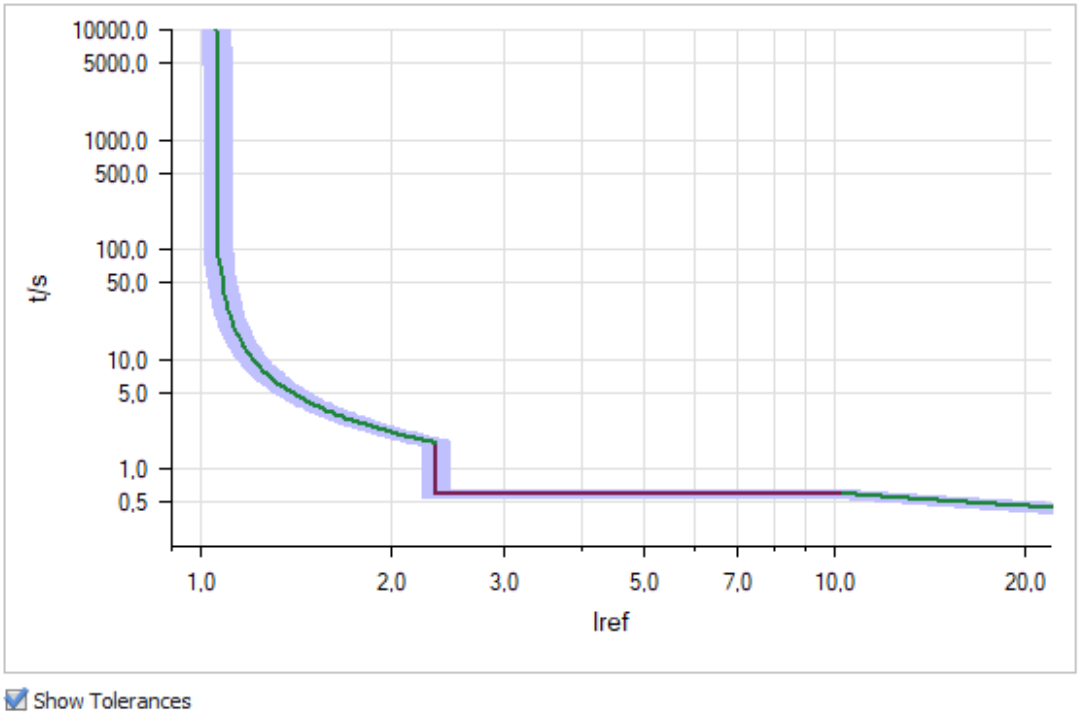
ANSI- ja IEC-käänteisaikakäyrä	**A**	**B**	**C**
ANSI Extremely Inverse	28,2	0,122	2,0
ANSI Very Inverse	19,61	0,491	2,0
ANSI Normal Inverse	0,0086	0,0185	0,02
ANSI Moderately Inverse	0,0515	0,1140	0,02
Long Time Extremely Inverse	64,07	0,25	2,0
Long Time Very Inverse	28,55	0,712	2,0
Long Time Inverse	0,086	0,185	0,02
IEC Normal Inverse	0,14	0,0	0,02
IEC Very Inverse	13,5	0,0	1,0
IEC Inverse	0,14	0,0	0,02
IEC Extremely Inverse	80,0	0,0	2,0
IEC Short Time Inverse	0,05	0,0	0,04
IEC Long Time Inverse	120	0,0	1,0

Tarkastellaan edellisen kappaleen kaavaa esimerkin avulla. Ensimmäinen ylivirtaporras toimii IEC normaalilla käänteisaika karakteristikalla, jonka asettelu arvot ovat: virta-

asettelu on 1,05 kertaa nimellisvirta I_N ja aikakerroin TMS on 0,02. Toisen ylivirtaportaan virta-asettelu on 2,35 x In ja laukaisu vakioaika asettelulla 600ms. Kun sijoitetaan toisen ylivirta portaan asetteluarvo yhtälöön 35 niin laukaisuajaksi t(I) saadaan:

$$t(I) = 0{,}02 * \left(\frac{0{,}140}{\left(\frac{2{,}35}{1{,}05}\right)^{0{,}02} - 1} \right) = 1{,}724\ s \qquad (36)$$

Näin voidaan todeta, että ylivirtasuojien asettelu on selektiivinen. Samaa voidaan tarkastella käyrämuodoilla. Omicron ylivirtamoduulilla saadaan tarkasteltua alla olevan kuvan 29 avulla ominaislaukaisukäyriä ajan t(s) ja referenssivirran Iref funktiona.



Kuva 29. Ylivirtasuojauksen ominaislaukaisukäyrä Omicronin Overcurrent moduulilla.

Käyrästä voidaan huomata vihreällä PHLPTOC käänteisaikakäyrä ja PHHPTOC vakioaikakäyrä. Taite kohta tapahtuu virran arvossa 2,35 kertaa nimellinen. Käyrän mukaan virran referenssiarvon ylittäessä noin 10,3 kertaisen arvon niin ylivirtaporras I> lähettää laukaisukäsky nopeammin kuin 600 millisekuntia, jolloin tämä toimii

ensisijaisena suojauksena. Sama voidaan todeta sijoittamalla kaavaan 35 tämä arvo. Kuvassa otettu mukaan toleranssi asettelu millä luodaan suurimmat sallitut poikkeamat käyrältä. Tässä esimerkissä aika toleranssiksi on sallittu $\pm$5% ja virtatoleranssiksi $\pm$5%.

Ylivirtamoduulin testipisteet valitaan lähellä edellisessä kappaleessa mainittua taitepistettä eli 2,35 kertaa virran nimellisarvoa. Tämän lisäksi voidaan tarkastella, että ensimmäisen ylivirtaportaan käänteisaika alittaa toisen portaan laukaisu ajan virran ollessa suurempi kuin 10,27 kertaa referenssivirran.