



Vaasan yliopisto  
UNIVERSITY OF VAASA

Eetu Pyykönen

# **Differentiaalisuojareleen asettelut ja kytkennät käytännössä**

Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö  
Kandidaatintutkielma  
Sähkö- ja energiatekniikka

Vaasa 2025

---

**VAASAN YLIOPISTO****Tekniikan ja innovaatiojohtamisen akateeminen yksikkö**

<b>Tekijä:</b>	Eetu Pyykönen		
<b>Tutkielman nimi:</b>	Differentiaalisuojareleen asettelut ja kytkennät käytännössä		
<b>Tutkinto:</b>	Tekniikan kandidaatti		
<b>Oppiaine:</b>	Sähkötekniikka		
<b>Työn ohjaaja:</b>	Kimmo Kauhaniemi, Henrik Tyvi (Wärtsilä)		
<b>Valmistumisvuosi:</b>	2025	<b>Sivumäärä:</b>	26

---

**TIIVISTELMÄ:**

Wärtsilän moottoritehtaalla suojauslaitteet ovat olennainen osa koeajon turvallisuuden ja tehokkuuden varmistamista. Erilaisten moottorien ja generaattoreiden testaaminen edellyttää sähköjärjestelmiltä joustavuutta. Tässä tutkielmassa keskitytään differentiaalisuojaukseen, joka on keskeinen suojaustekniikka generaattorien ja muuntajien vikojen havaitsemisessa.

Työssä tarkastellaan differentiaalisuojauksen toimintaperiaatteita ja sen merkitystä sähköjärjestelmissä sekä syvennytään erityisesti generaattorien ja muuntajien suojaukseen. Lisäksi tavoitteena on selvittää suojauksen toimintaa koeajon operaattoreille, jotta suojauslaitteiden käyttöön-otto ja asetusten määrittäminen olisi sujuvampaa.

Differentiaalisuojaus perustuu virran mittaukseen kolmivaihejärjestelmän suojattavan alueen sisään- ja ulostuloissa, jokaiselta vaiheelta erikseen. Erovirran perusteella toimiva suojaus mahdollistaa nopean, selektiivisen ja herkän toiminnan.

Tutkielman käytännön osuudessa tarkastellaan koeajossa käytettävien generaattorien ja muuntajien suojausasetelmia sekä tunnistetaan kehityskohteita, joiden avulla suojauksen käyttöön-ottoa voidaan tehostaa. Työn aikana nousi esiin erityisesti virtamuuntajien polariteetin ja muuntajien vaihesiirron vaikutus releasetuksiin. Yksi keskeisistä havainnoista liittyi generaattorin pyörimissuunnan vaikutukseen muuntajan kelloluvun asettelussa. Joissain tilanteissa kelloluku poikkesi nimikilven arvosta, kun generaattori pyöri vastapäivään, mutta toisissa tapauksissa sitä ei tarvinnut muuttaa. Ilmiön syy selvitettiin sekä laskennallisesti että simulointien avulla.

Osana tutkielmaa kehitetyn simulaatiomallin tarkoituksena oli auttaa differentiaalisuojauksen asetusten määrittelyssä ja ilmiöiden ymmärtämisessä. Vaikka sen käytännön hyöty voi olla rajallinen, se tarjosi tukea tutkielman kirjoittamiseen. Tutkielmassa ehdotettiin lisäksi parannuksia koeajon sähköjärjestelmien ohjeisiin, erityisesti muuntajan kelloluvun asettamiseen liittyen. Automaation käyttöliittymään esitettiin lisättäväksi huomautuksia, jotka voisivat vähentää inhimillisiä virheitä kytkennöissä.

---

**AVAINSANAT:** Generaattorit, Releet, Muuntajat, Sähköjärjestelmät, Simulointi

## Sisällys

1	Johdanto	4
1.1	Taustaa	4
1.2	Tutkielman tavoitteet	5
2	Differentiaalisuojauksen periaate	6
2.1	Differentiaalisuojaus yleisesti	6
2.2	Differentiaalisuojan merkitys sähköjärjestelmissä	8
2.3	Generaattorin suojaaminen differentiaalisuojalla	9
2.4	Muuntajan suojaaminen differentiaalisuojalla	10
2.4.1	Laukaisun esto perustuen 2 harmoniseen yliaaltoon	11
2.4.2	Virran nollakomponentin eliminointi	12
3	Käytännön asetelmat ja havainnot	14
3.1	Asetelma	14
3.2	Kytkenöissä huomioitavaa	14
3.3	Asetteluissa huomioitavaa	15
3.4	Kehityskohteita ja löydöksiä	17
3.4.1	Simulointimalli tarkastusta varten	20
3.4.2	Oikea toimintamalli	21
4	Johtopäätökset & yhteenveto	23
4.1	Havaittuja kehityskohteita	23
4.2	Omat pohdinnat	24
	Lähteet	25

# 1 Johdanto

## 1.1 Taustaa

Wärtsilän koeajossa käytettävät moottorit ja generaattorit muodostavat monipuolisen ja kehittyvän kokonaisuuden, jossa suojauksen rooli korostuu entisestään. On olennaista varmistaa, että suojaus reagoi tarkasti ja luotettavasti vikatilanteisiin, mutta samalla säilyttää järjestelmän toiminnan sujuvuuden ilman tarpeettomia keskeytyksiä. Suuri työntekijämäärä ja useat generaattorimallit edellyttävät myös tehokasta perehdytystä, jota pyritään jatkuvasti kehittämään. Tässä yhteydessä differentiaalisuojauksen ymmärtäminen on keskeisessä asemassa. Tämä tutkielma käsittelee erityisesti generaattorin ja muuntajan differentiaalisuojausta, selventäen sen toimintaperiaatteita ja merkitystä osaamisen tueksi.

Differentiaalisuoja on kriittinen komponentti erilaisten sähköjärjestelmien suojauksessa. Wärtsilällä differentiaalisuojaa käytetään generaattoreiden lisäksi muuntajien ja kojeistojen suojaamiseen. Erovirran mittaukseen perustuva suojaus on nopea, selektiivinen ja herkkä. Differentiaalisuojan toimintaa tarkastellaan tarkemmin tutkielman toisessa luvussa.

Suojareleen kytkennässä ja asettelussa tulee ottaa huomioon kulloinkin testattavan moottori-generaattori-yhdistelmän eri muuttujat. Lisäksi oikeaoppinen kytkentä vaatii myös hieman sähkökaavioiden lukutaitoa. Sähköasentajilla on paljon työtä koeajossa vaadittavien kytkentöjen purkamisessa ja kasaamisessa, joten perehdytyksen kehitys voisi auttaa tehostamaan koeajoa. Kun aikaa säästetään koeajossa, myös insinöörien aikaa vapautuu enemmän esimerkiksi uusiin projekteihin.

## 1.2 Tutkielman tavoitteet

Tutkielman päätavoitteena on tunnistaa kehityskohteita ja esittää ratkaisuja, jotka parantavat Wärtsilän moottoreiden liukuhihnallisen koeajon sähköjärjestelmien suojausten luotettavuutta ja tehokkuutta. Suojauksen toimivuus on keskeinen osa testauksen onnistumista ja tuotannon sujuvuutta.

Tavoitteena on, että tutkielma toimii pohjana ohjeistuksen kehittämiseksi. Selkeät ohjeet ja yhtenäiset toimintamallit helpottavat koeajon operaattoreiden työtä ja voivat samalla toimia apuna koulutuksessa ja perehdytyksessä. Lisäksi tutkielman tuottama tieto voi tukea tulevia automaatioprojekteja, joiden tavoitteena on differentiaalisuojareleiden asetusten automaattinen määrittäminen.

Henkilökohtaisella tasolla tutkielman tavoitteena on myös syventää omaa ymmärrystä sähköjärjestelmien suojausten periaatteista ja kehittää insinööriyöhön tarvittavia taitoja.

Seuraavassa luvussa tarkastellaan differentiaalisuojauksen toimintaperiaatteita yleisesti sekä syvennyttään erikseen muuntajan ja generaattorin suojaukseen, jolla luodaan pohja myöhemmälle analyysille. Kolmannessa luvussa kuvataan Wärtsilän nykyinen toimintamalli differentiaalisuojauksen käyttöönotossa aseteluiden ja kytkentöjen näkökulmasta. Lisäksi luvussa tuodaan esiin havaittuja kehityskohteita. Neljäs luku esittelee kehitetyt ratkaisut, arvioi niiden soveltuvuutta käytännössä ja tarkastelee tutkielman tavoitteiden toteutumista.

## 2 Differentiaalisuojauksen periaate

### 2.1 Differentiaalisuojaus yleisesti

Differentiaalisuojauksen (tunnetaan myös nimellä *erovirtasuoja* tai *diffis*) peruseriaate on hyvin yksinkertainen. Differentiaalisuoja mittaa suojattavan komponentin, kuten generaattorin käämin tai virtakiskon sisään menevän ja ulos tulevan virran. Rele vertailee virtoja, josta se pääättelee, onko laitteessa sisäisiä vikoja. Tämä rakenne mahdollistaa hyvin nopean ja absoluuttisesti selektiivisen suojauksen (*ABB:n TTT-käsikirja*, 2000, s. 13), eli suojaus pystyy eristämään vikaantuneen laitteen muusta verkosta, eikä se laukea muualla tapahtuvista vioista. Differentiaalisuojaukselle ominaista on myös sen mahdollistama herkkyys. Herkkyydellä tarkoitetaan, että sopivasti aseteltu suoja kykenee havaitsemaan vian, vaikka vikavirta olisi vain muutama prosentti nimellisvirrasta, eikä se tarvitse varasuojauksia. Tämä poikkeaa esim. distanssisuojauksesta, jonka suorituskyky on heikko suuriresistanssisissa vioissa (Mörsky, 1993, s. 46 & 58).

Differentiaalisuojaukseen tarvittava erovirta lasketaan kuvan 1 mukaisilla virran suunnilla käyttäen kaavaa

$$\underline{I_d} = \left| \underline{I_1} + \underline{I_2} \right|, \quad (1)$$

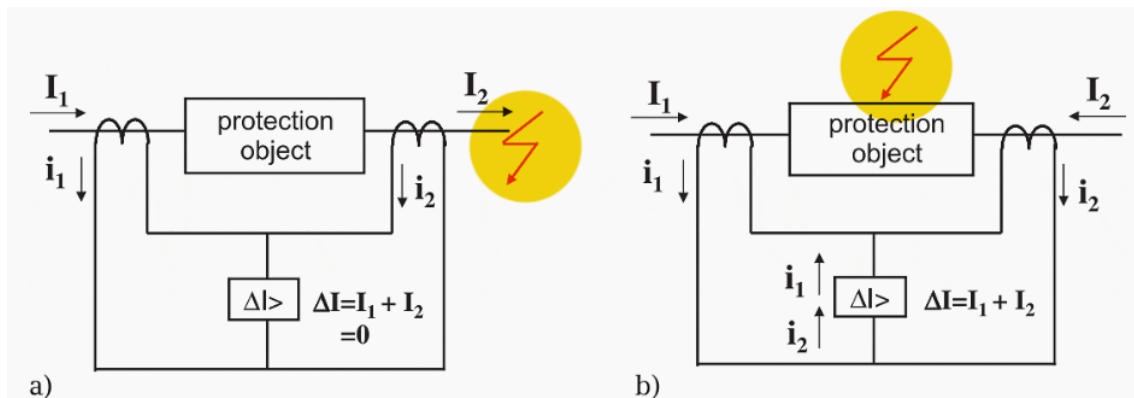
missä  $\underline{I_d}$  on erovirta,  $\underline{I_1}$  on suojattavan alueen alussa mitattu virta ja  $\underline{I_2}$  on suojattavan alueen lopussa mitattu virta (ABB, 2023, s. 648).

Teoriassa, suojattavan alueen ollessa ehjä  $\underline{I_d}$  on nolla. Toisin sanoen virtojen summan ollessa nolla ei olisi mahdollista, että virta kulkisi mitään muuta reittiä. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole. Mörskyn mukaan (s.49) rele tulee *vakavoida* mm. virtamuuntajien erilaisuuden ja magnetoinnin tyhjäkäyntivirtojen vuoksi. Etenkin virtamuuntajien erilaisuus ilmenee käytännössä Wärtsilän koeajossa, sillä generaattoreiden virtamuunta-

jat ovat aina hieman toisistaan erilaisia, kun taas kojeiston virtamuuntajat pysyvät samana. Vakavointi tarkoittaa releen laukaisun estämistä ennalta määritetyissä tilanteissa. Tätä varten määritellään vakavointivirta

$$\underline{I}_b = \frac{|I_1 - I_2|}{2} \quad (2)$$

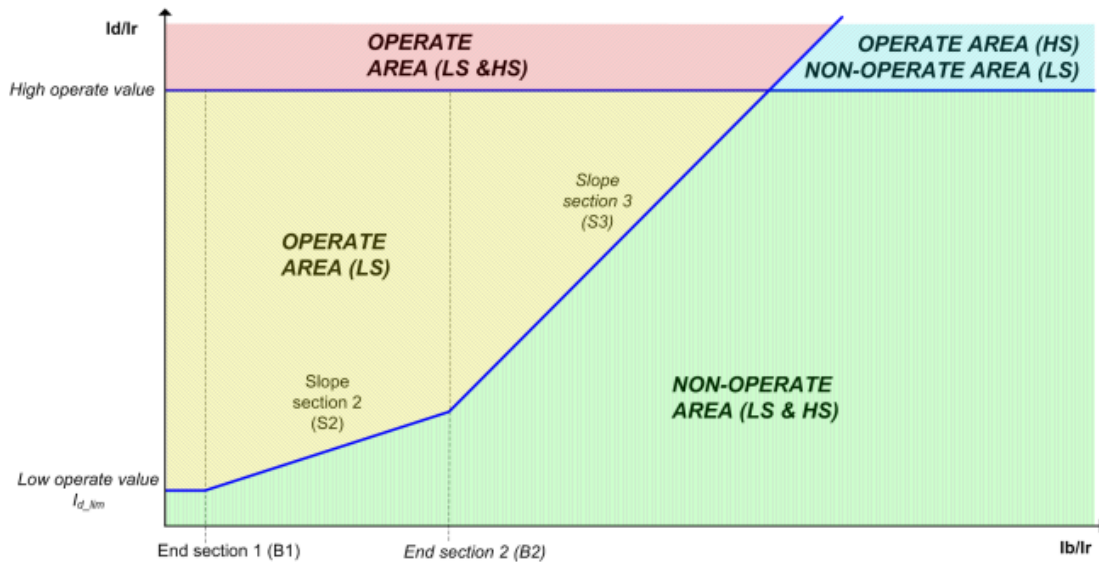
(ABB, 2023, s. 648). Huomioitavaa on, että edellä esitetyissä kaavoissa voi kirjallisuudessa usein plus- ja miinusmerkki olla eripäin. Tämä riippuu siitä, miten päin kukin virtamuuntaja oletuksena on (ks. kuva 1 virran suunnat). Erovirran ja vakavointivirran välinen suhde voidaan nykyaikaisissa releissä asettaa kullekin kohdalle siten, että turhilta toimintoilta vältytään mutta laitteet saadaan silti tehokkaasti suojattua.



**Kuva 1.** Virran kulku ulkoisen vian (a) ja sisäisen vian (b) tapauksissa (Csanyi, 2021).

Suojatun alueen vikaantuessa, alueen molemmat päät syöttävät vikavirtaa etenkin usealla rinnakkain syöttävällä lähteellä, jolloin kaavan 2 mukaan vakavointivirta  $\underline{I}_b$  pienenee ja täten rele herkistyy suojaten tehokkaasti sisäisiltä vioilta (kuva 1). Ulkoisten vikojen tapauksessa suojatun alueen läpi kulkeva virta kasvaa merkittävästi. Tällöin mm. virtamuuntajien erilaisesta kyllästymisestä johtuva näennäinen erovirta ei saa aiheuttaa laukaisua, jonka takia on aseteltu kuvan 2 mukainen jyrkempi käyrän osio suurilla virroilla

(ABB, 2023, s. 645). Asetteluihin määritellään myös erovirran arvo, suurien vikojen katkaisua varten, jolla rele toimii niin pian kuin mahdollista riippumatta vakavointivirrasta ks. kuva 2 *High operate value*.



**Kuva 2.** Esimerkki releen vakavointikäyrästä (ABB, 2023, s. 646)

## 2.2 Differentiaalisuojan merkitys sähköjärjestelmissä

Differentiaalisuojalle ominainen selektiivisyys ja herkkyys tulee tarpeeseen mm. verkon eri osien suojauksessa. Esimerkiksi Fingrid määrää lyhyille (alle 5  $\Omega$ , 110 kV & 220 kV) rengasjohdoille suojaus, jonka hidastamaton laukaisu käsittää koko johdon. Tähän ei jakeluverkossa usein pääsuojana oleva distanssisuoja kykene, sillä ne on yleensä aseteltu suojaamaan 80-90 % johdon pituudesta turhien laukaisujen välttämiseksi (Fingrid, 2024, s. 2).

Nykyään useissa sähköjärjestelmissä ei ole erillisiä differentiaalireleitä, vaan ne ovat integroitua muiden suojausten kanssa samaan releeseen. Tällainen on esimerkiksi Wärtsilän koeajossa käytetty ABB REX 640-rele. Sen nopein käämisulun havaitsija on juuri differentiaalisuoja. Voi kuitenkin olla tilanteita esimerkiksi tietyillä generaattoreilla, joissa ei ole virtamuuntajaa generaattorin tähtipistepuolella, joten erovirtaa käämeistä ei

saada mitattua. Tällöin käytetään ainakin ylikuormitus-, ylijännite- sekä takatehosuojaa. Nämä suojaukset ovat muutenkin käytössä ennaltaehkäisemässä vahinkoja, sillä generaattori on usein verkon kallein yksittäinen osa ja sen suojaaminen on taloudellisesti järkevää.

### **2.3 Generaattorin suojaaminen differentiaalisuojalla**

Suurten generaattoreiden ensisijaisena sisäisten vikojen suojana käytetään usein differentiaalisuojaa. Nopea vian kehityksen estäminen on tärkeää, sillä mahdollisessa vikatilanteessa henkilövahingot ja korjauskulut voidaan minimoida. Tässä työssä käsitellään erityisesti staattoriin liittyviä vikoja, joita ovat käämisulku, kierrossulku ja maasulku. Maasulku on maan ja vaiheen välinen vika, kierrossulku vaiheen sisäinen vika ja käämisulku on kahden tai useamman eri vaiheen välinen vika.

Erovirtasuojia on nopein ja varmin tapa käämisulun suojaamiseen, joka on usein generaattorin ongelmallisin vika. Erovirtasuojan toimintaperiaate mahdollistaa suhteellisen pienienkin käämisulkuvirtojen havaitsemisen, joita voi ilmaantua etenkin generaattorin saarekekäytössä, kun vikapaikka on lähellä staattorin tähtipistettä (Mörsky, s.146). Vian nopealla havaitsemisella voidaan välttää valokaarivahinkoa tai jopa tulipalo.

Differentiaalisuojan käyttö maasulun tunnistamiseen mahdollistaa nopean vian havaitsemisen. Esimerkiksi jännitteen nollakomponenttiin perustuva suojaus ei havahdu staattorin nollapisteen lähellä olevasta viasta, sillä toisin kuin differentiaalisuojauksessa, sen herkkyys ei riitä tunnistamaan sitä. Toisaalta suojattavan alueen ulkopuoliset maasulut voivat aiheuttaa virran nollakomponentista johtuvan turhan havahtumisen. Nollakomponentin vaikutuksia käsitellään myöhemmin tässä työssä. Suuren herkkyyden ansiosta erovirtasuojia pystyy tunnistamaan maasulun myös suuri-impedanssisissa vioissa maasta erotetuissa verkoissa (Xu ym., 2020, s. 1 & 5).

Kierrossulun havaitsemiseen differentiaalisuoja ei sovellu hyvin. Staattorin kaikkien kolmen vaiheen erovirtamittaukset suoritetaan erikseen, jolloin vika ei näy mittauksissa.

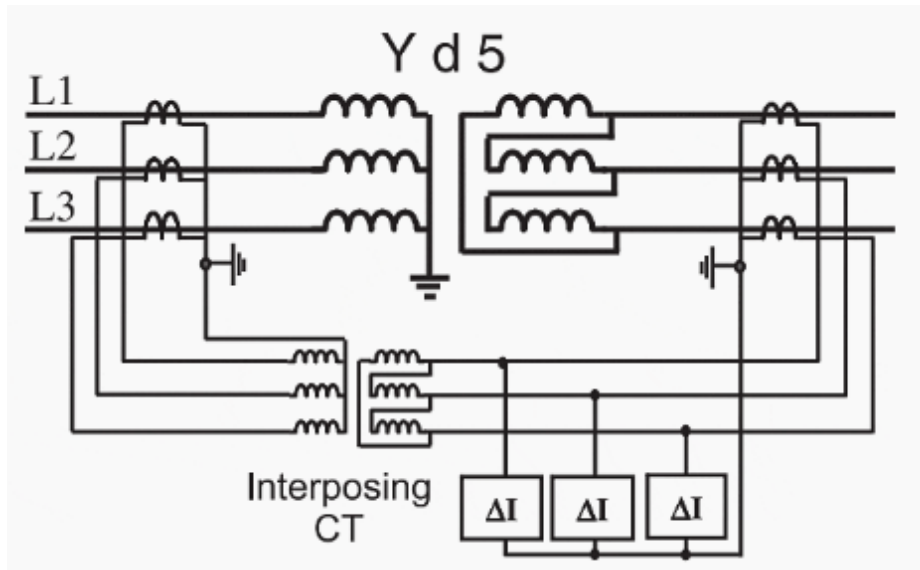
Kierrossulun voi helpoiten havaita mittaamalla jännite-epäsymmetriaa, jota differentiaalisuoja itsessään ei tee, mutta voi olla integroituna samaan releeseen. Mörskyn mukaan (s.149) kierrossulut ovat onneksi melko harvinaisia ja ilmaantuessaan usein kehittyvät maasuluiksi, jolloin ne havaitaan helposti.

Käämi- kierros- ja maasulun lisäksi liukuhihnamentaisissa Wärtsilän moottoreiden koeajossa erityisen tärkeää on suojata sähköjärjestelmiä myös virheellisiltä kytkennöiltä. Kappaleessa [2.1](#) mainittu *High Operate Value* asetus aiheuttaa releen havahtumisen välittömästi suurilla erovirran arvoilla, joita syntyy esimerkiksi, kun vaiheet on kytketty virheellisesti ristiin. Releen havaitessa erovirran, joka ylittää High operate valuen avaa se katkaisijan yleensä ennen kuin komponentit ehtivät vahingoittua.

## 2.4 Muuntajan suojaaminen differentiaalisuojalla

Muuntajasuojauksen oleellisin ero muihin suojattaviin kohteisiin on niiden muunto-suhde sekä kytkentäryhmän vaikutus ensiön ja toision väliseen vaihesiirtoon. Differentiaalisuoja havahtuu turhaan, jos vaihesiirtoa ei oteta huomioon. Kytkentäryhmä voidaan kompensoida kytkemällä virtamuuntajat siten, että niissä itsessään on muuntajaa vastaavat vaihesiirrot (kuva 3). Lisäksi muuntajan ensiön ja toision välinen virtaero otetaan huomioon valitsemalla sopivat muuntosuhteet virtamuuntajiin. Virranmittauksiin käytetään tähteen kytkettyjä virtamuuntajia, joiden lisäksi niiden välille on kytketty niin kutsutut välivirtamuuntajat ensiössä tähteen ja toiossa kolmioon, vastaamaan muuntajan kytkentäryhmää.

Nykyaikaisissa releissä, kuten ABB:n REX 640 mallissa, voidaan virtamuuntajat kytkeä molemmilla puolilla muuntajaa samoin. Tällöin releessä pitää muiden asetusten lisäksi ottaa huomioon muuntajan kytkentäryhmä ja muuntosuhde.



**Kuva 3.** Muuntajan differentiaalisuojaus ja kytkentäryhmän kompensointi välivirtamuuntajilla (Csanyi, 2021)

#### 2.4.1 Laukaisun esto perustuen 2 harmoniseen yliaaltoon

Muuntajien kytkeminen aiheuttaa releen tahattoman havahtumisen, mikäli kytkentäsäysvirtaa ei tunnisteta. Muuntajien kytkentäsäysvirralle ominaista on siinä esiintyvät virran yliaallot. Tätä voidaan hyödyntää releiden vakavoinnissa (Hamilton, 2013, s. 5). Useimmissa releissä on toisen yliaallon ja perustaajuisen virran vertailuun perustuva salpaustoiminto.

Hamilton (2013) mainitsee tutkimuksessaan, miten modernien muuntajien kehittyneet sydänmateriaalit mahdollistavat niiden aikaisempaa lineaarisemman hystereesikäyrän. Tämä, yhdessä pienemmän remanenssivuon kanssa, aiheuttaa suhteellisen pienen yliaaltosisällön kytkentävirralle. Jokainen vaihe ei aina koe esimerkiksi 20 % toisen yliaaltosisällön raja-arvoa. Muuntajan kytkentävaiheessa on kuitenkin todennäköistä, että ainakin yhden vaiheen jännite on nousevalla puolijaksolla ja remanenssi on riittävä yliaaltojen muodostumiseen. Näitä tilanteita varten on erilaisia vakavointialgoritmeja, jotka tunnistavat kytkentäsäyksen esimerkiksi vain yhdessä vaiheessa. Rele ei silti saa havahtua muiden vaiheiden suuresta perustaajuisesta virtapiikistä vaan laukaisu on salvattava (Hamilton, 2013, s. 5).

### 2.4.2 Virran nollakomponentin eliminointi

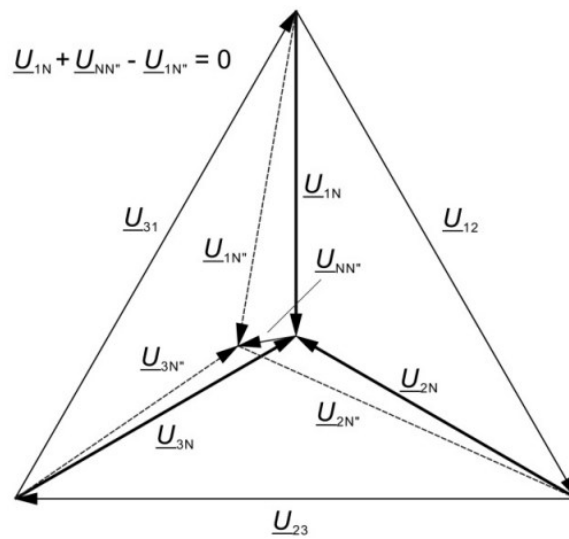
Kolmivaihejärjestelmien vikatilanteita tarkasteltaessa on hyödyllistä ymmärtää symmetristen komponenttien käyttö vikojen havaitsemisessa. Symmetriset komponentit kolmivaihejärjestelmälle järjestyksellä UVW määritellään seuraavasti:

$$\underline{I_{0,u,v,w}} = \frac{I_U + I_V + I_W}{3}, \quad (3)$$

$$\underline{I_{1,u,v,w}} = \frac{I_U + I_V \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + I_W \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}}{3}, \quad (4)$$

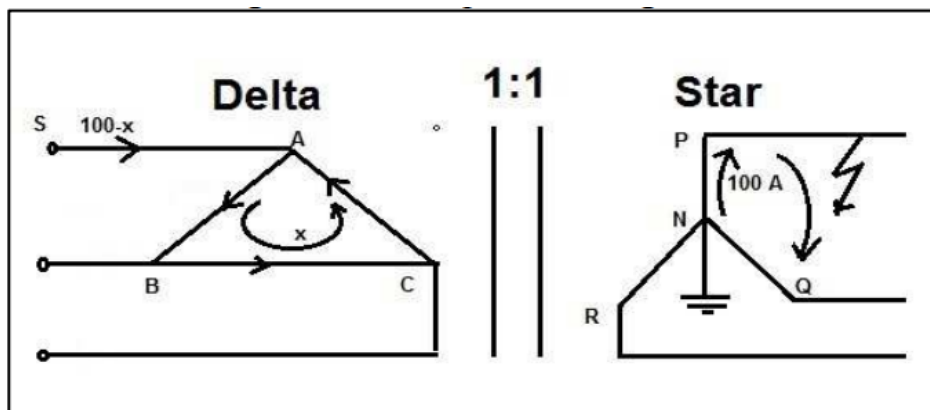
$$\underline{I_{2,u,v,w}} = \frac{I_U + I_W \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} + I_V \cdot e^{j\frac{4\pi}{3}}}{3}, \quad (5)$$

missä  $\underline{I_{0,u,v,w}}$  on virran nollakomponentti,  $\underline{I_{1,u,v,w}}$  on virran myötäkomponentti ja  $\underline{I_{2,u,v,w}}$  on virran vastakomponentti. (Doble Engineering Company, 2014). Edellä merkittyjen kaavojen 3, 4 ja 5 kätevyys ilmenee, kun analysoidaan epäsymmetristä kolmivaihejärjestelmää, joka syntyy käytännössä kaikissa vikatilanteissa. Kaavoilla saadaan kolme symmetristä osoitinpiirrosta, joilla laskeminen on paljon helpompaa. Nolla-, myötä-, ja vastakomponenttien lineaarikombinaatio on alkuperäinen epäsymmetrinen osoitinpiirros. Erityisesti jännitteen tai virran nollakomponentti on hyödyllinen, sillä se osoittaa, mihin nollakohta on siirtynyt alkuperäisestä tilanteesta (kuva 4). Esimerkiksi verkossa, jossa generaattorin tähtipiste on maadoitettu, voi pahin maasulku teoriassa siirtää osoittimien nollakohdan maahan. Tällöin nollakomponentti saa yhden vaihejännitteen arvon. Jännitteen nollakomponenttia hyödynnetään nk.  $U_0$  suojauksessa.



**Kuva 4.** Epäsymmetrinen 3-vaihejärjestelmä  $U_{NN''}$  =jännitteen nollakomponentti (IL05\_Three-phase-Networks\_EN, 2013, s. 1)

Suojausalueen ulkopuolinen maasulku voi näyttää differentiaalisuojalle erovirralla ja maasululle ominainen  $I_0$ -komponentti aiheuttaa havahtumisen. Esimerkkinä muuntaja, jonka ensiö on kytketty kolmioon ja toision tähtipiste on maadoitettu tai tehollisesti maadoitettu. Kolmiossa nollakomponenttia ei esiinny, kun taas tähteen kytketyllä puolella  $I_0$  kulkee ainoastaan vikaantuneen vaiheen kautta (kuva 5). Tällöin  $I_{\text{ensiö}} = \underline{I}$  ja  $I_{\text{toisio}} = \underline{I} + \underline{I}_0$  jolloin rele havaitsee erovirran. Tämän takia numeerisiin releisiin on lisätty ominaisuus virran nollakomponentin eliminoimiseksi toiselta tai molemmilta puolilta muuntajaa, ulkopuolisten vikojen aiheuttaman havahtumisen salpaamiseksi.



**Kuva 5.** Esimerkki nollakomponentin esiintymisestä Dy-muuntajassa (Jha ym., 2023, s. 2)

### 3 Käytännön asetelmat ja havainnot

#### 3.1 Asetelma

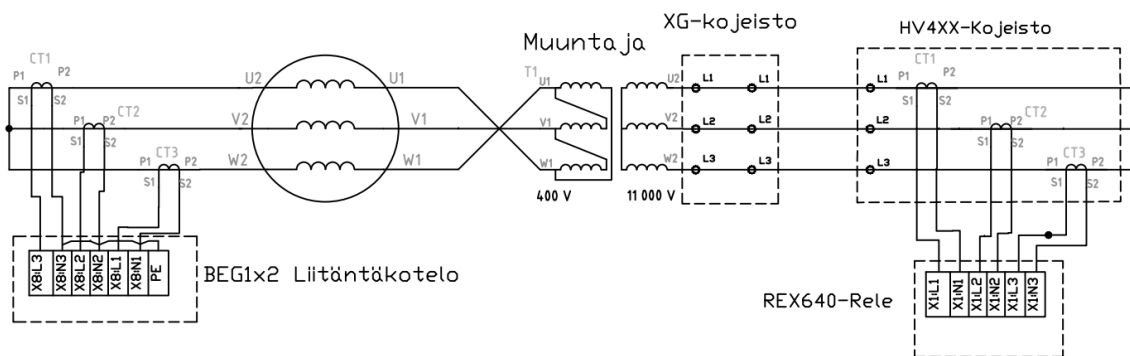
Wärtsilän koeajossa testataan monipuolisesti eri käyttötarkoituksiin ja tehovaatimuksiin suunniteltuja moottoreita, jotka pyörittävät sopivan tehoisia keski- tai matalajännitegeneraattoreita. Koeajon sähköjärjestelmät on siis kyettävä liittämään hyvin erilaisiin generaattoreihin mukautuen niiden jännitetasoon ja taajuuteen.

Generaattorit toimivat koeajossa sähköntuotannon lisäksi dynamometrinä. Toisin sanoen koeajon generaattorit (ja koeajon oheislaitteet) kuormittavat testattavaa moottoria eri nopeuksilla ja vääntömomenteilla, sekä tietenkin mittaavat nämä suureet tarkasti. Moottorin mennessä esimerkiksi potkurikäyttöön, erityisesti kiinteälapaisia potkureita pyörittämään, on generaattoria kuormitettava simuloimalla potkurille karakteristista nopeutta ja vastusta – *potkurikäyrää*. Tällöin on otettava huomioon esimerkiksi muuntajien kyllästymisriski alitaajuuskäytössä.

Sähköjärjestelmien käyttöönotossa suojaukset vaativat huolellisen ja usein aikaa vievän perehtymisen. Edellä kuvailtu asetelma, jossa sähköjärjestelmän komponentteja on pysyttävä vaihtamaan tehokkaasti ja turvallisesti alleviivaa suojareiden ymmärryksen tärkeyttä, sillä turvalliset asettelut on varmistettava joka kerta kytkennän muuttuessa.

#### 3.2 Kytkennöissä huomioitavaa

Wärtsilän koeajossa differentiaalisuojausta varten kytketään kolme virtamuuntajan toisiopiiriä BEG1x2 liitäntäkoteloon aina generaattorin vaihtuessa. Keskijännitekojeistojen HV4XX kytkentöjä ei muuteta vaan niiden kytkennät ovat kiinteitä (kuva 6).



**Kuva 6.** Yksinkertaistettu havainnekuva suojausvirtamuuntajien kytkennästä

Virtamuuntajien kytkennässä tärkeää on huomioida virran polariteetti. Oletusarvoisesti virtamuuntajat on käämitty siten että ensiövirran mennessä P1 merkityltä puolelta sisään, tulee se saman vaiheisena toision S1 liittimestä. Ensiön ja toision välistä saman vaiheisuutta voidaan kutsua positiiviseksi polariteetiksi. Wärtsilän koeajossa S1 kytketään aina kun mahdollista mittaukseen ja paluujohdin toision paluuliittimeen S2. Tällöin virran mittauksen polariteetti pysyy jokaisella generaattorilla samana.

Polariteetin lisäksi huomioon tulee ottaa generaattorin pyörimissuuntaa vastaava mittauksien kytkentäjärjestys. Useimmat Wärtsilän moottorit pyörivät vauhtipyörästä katsottuna myötäpäivään, tällöin generaattori pyörii moottorin puolelta katsottuna vastapäivään. Generaattoreiden vaihejärjestys on usein määritelty piirikaaviossa tai käyttönotodokumentaatioissa U, V, W, kun generaattorin pyörimissuunta on myötäpäivään. Pyörimissuunnan ollessa vastakkainen, saadaan verkkoa vastaava vaihejärjestys kytkemällä vaiheet U ja W ristiin. Luonnollisesti, myös mittaukset on tällöin kytkettävä ristiin vastaamaan vaiheiden kytkentöjä. Vastaavasti moottorin pyöriessä vastapäivään, vaiheiden ja niiden mittauksien kytkentä menee "vaihe vaiheeseen" (Tyvi, 2024, s. 23–25).

### 3.3 Asetteluissa huomioitavaa

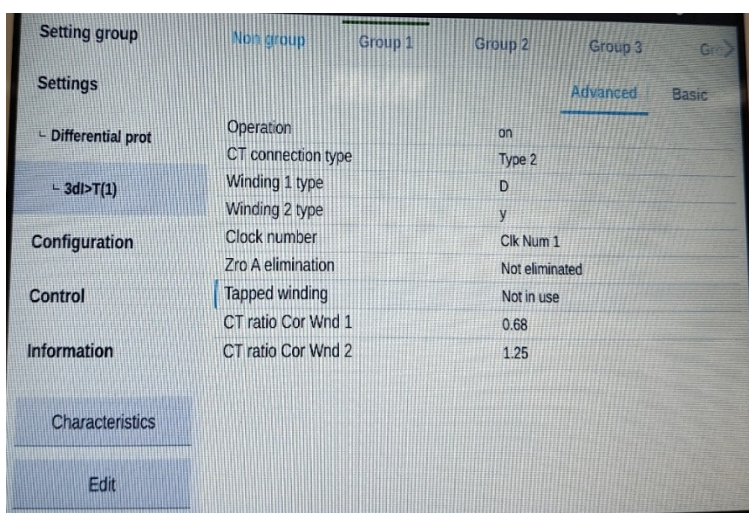
Moottoreiden koeajossa hyödynnettävien releiden asettelut ovat monipuolisia, mutta helppoja määrittää, sillä PLC asettaa suurimman osan arvoista automaattisesti releelle. Muuntajaan liittyvät asettelut eivät ole vielä sisällytettyjä laitosautomaatiikkaan, mutta

jatkossa nekin pyritään lisäämään, vähentäen virheiden riskiä. Valvomon käyttöliittymään voitaisiin myös lisätä huomautuksia operaattoreille esimerkiksi juuri kytkentöjen tarkastamisesta tarvittaessa.

PLC:n laskiessa asetteluarvot, operaattorin harteille jää virran mittauksiin ja muuntajaan liittyvät asetellut. Virtamuuntajien parametroinnissa otetaan samalla huomioon virtamuuntajien muuntosuhde sekä muuntajan eri virtatasot, jolla saadaan releelle syötettävä korjauskerroin

$$k = \frac{I_{n1}\sqrt{3}\cdot U}{S\cdot I_{n2}}, \quad (6)$$

missä  $I_{n1}$  ja  $I_{n2}$  ovat virtamuuntajan nimelliset ensiö- ja toisiovirrat,  $U$  on muuntajan pääjännite ja  $S$  on muuntajan nimellisnäennäisteho (ABB, 2023, s. 650). Kaavalla 6 laskeaan arvot kuvan 7 asetuslehdelle. Lisäksi generaattorin sisäisten virtamuuntajien muuntosuhde on ilmoitettava erilliselle sivulle. Merkillepantavaa asetuksissa on Ct connection type, sekä muuntajan kelloluku. Virran nollakomponentin eliminointia (Zro A elimination kuva 7) ei tarvita, sillä Wärtsilän koeajossa käytetään maasta erotettua verkkoa.



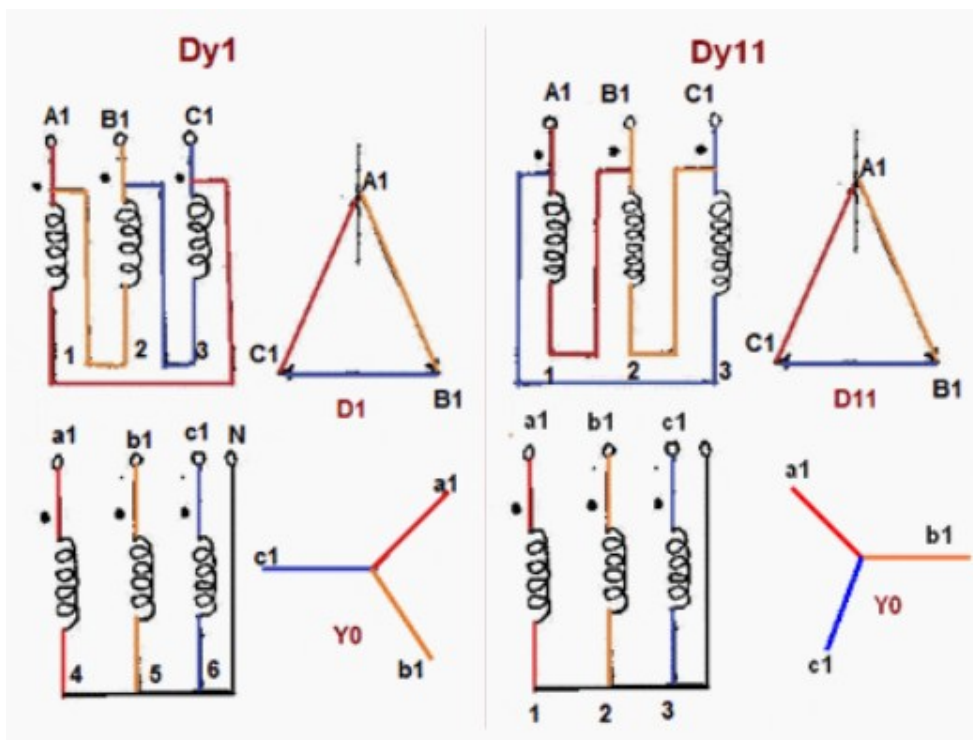
**Kuva 7.** Muuntajadifferentiaalisuojauksen asetuslehti

### 3.4 Kehityskohteita ja löydöksiä

Koeajon releistyksessä eniten muuttuvia tekijöitä ilmaantuu, kun moottoria kuormitetaan matalajännitegeneraattorin avulla. Tällöin keskijännitekojeiston ja generaattorin väliin täytyy kytkeä muuntaja (kuva 6, s. 15), jonka differentiaalisuojan asettelut vaativat oman opettelunsa. Koeajossa liukuhihnalla moottoreiden testaus vaatii onnistuneen käyttöönoton (muuntaja)differentiaalisuojalle. Väärän laukaisun diagnoosin ensimmäinen askel on tietenkin asetteluarvojen tarkistus. Toisaalta, mikäli rele havahtuu välittömästi katkaisija suljettaessa, on todennäköisesti kyseessä jonkinlainen kytkentävirhe. Olisi hyvä myös muistaa tehdä aistinvarainen tarkistus generaattorista ja kojeistosta ennen uudelleenkäynnistystä.

Oman havaintoni mukaan eniten hämmennystä operaattoreissa aiheutti muuntajan kytkentäryhmän ja kelloluvun asettelu releelle. Koeajossa yleisimmin käytettyjen Dy11 muuntajien kelloluvun näppäileminen sellaisenaan toimii oletuksella, että verkon pyörimissuunta on sama generaattorilta kojeistolle. Kappaleessa [3.2](#) todettiin että vaiheet kytketään ristiin myötäpäivään pyörivällä moottorilla aiheuttaen muuntajan nimikilvestä poikkeavan vaihesiirron ensiön ja toision välille.

Kuva 8 havainnollistaa hyvin kytkennästä johtuvan vaihesiirron. Kun muuntajan kolmioon kytketylle puolelle laitetaan vaihejohtimet ristiin, voi sen kuvitella olevan ”peilikuva” alkuperäisestä käämityksestä. Näin ollen Dy11 kytkentäryhmä täytyy asetella releelle Dy1:nä.

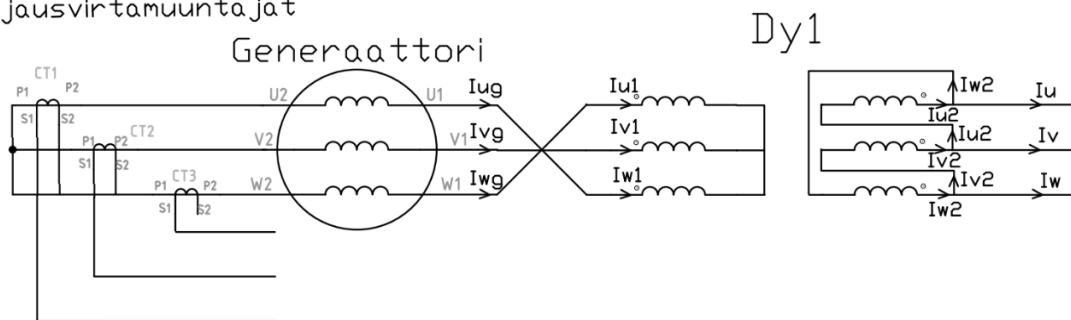


**Kuva 8.** Dy1 & Dy11 muuntajien käämien kytkentä (Parmar, 2012)

Käytännössä kuitenkin havaittiin, että kun muuntajaan kytketään kaapelit ristiin, ei joka tapauksessa releelle tarvitse ilmoittaa nimikilvestä poikkeavaa kytkentäryhmää. Kyseessä olevat muuntajat olivat erikokoisia, mutta niiden kytkentäryhmät olivat molemmissa Dy11. Ainut ero oli se, että toinen muuntaja kytkettiin vaiheet ristiin y-puolelta ja toinen D-puolelta, vastatakseen verkon pyörimissuuntaa.

Alun perin tiedettiin, että olemassa olevat asetukset toimivat, mutta niiden syyt eivät olleet ilmeiset. Mahdollisia tulevia projekteja varten on hyödyllistä selvittää käyttäytyvätkö esimerkiksi Dy ja Yd muuntajat tässä tapauksessa samalla tavalla. Yksinkertaistetusta piirikaaviosta (kuva 9) voidaan laskea virtojen vaihesiirtokulmat kussakin kohtaa generaattori-muuntaja-yhdistelmää.

Suojausvirtamuuntajat



**Kuva 9.** Vasemmalta oikealle kuvattuna: Generaattorin suojausvirtamuuntajat, generaattorin staattorin käämitykset sekä Dy1 muuntaja.

Generaattorin pyöriessä vastakkaiseen suuntaan kuin verkko, voidaan sen käämien vaiheviritrat merkata kuvaan 9 viitaten seuraavasti:  $I_{ug} = I_0 \angle -120^\circ$ ,  $I_{vg} = I_0 \angle 120^\circ$  ja  $I_{wg} = I_0 \angle 0^\circ$ .  $I_{ug}$  ja  $I_{wg}$  vaihtavat seuraavaksi paikkaa ja laskujen yksinkertaistamiseksi oletetaan häviötön muuntaja 1:1 muuntosuhteella, merkataan:  $I_{w2} = I_{ug}$ ,  $I_{v2} = I_{vg}$  ja  $I_{u2} = I_{wg}$ . Kirchhoffin virtalaista saadaan tällöin:

$$I_u = I_{u2} - I_{w2} = \sqrt{3} I_0 \angle 30^\circ. \quad (7)$$

Kaavan 7 tuloksesta huomataan, että vaiheiden ollessa ristissä generaattorin ja muuntajan välissä, vastaa mittausten vaihesiirto Dy1 muuntajalle oletettua vaihesiirtoa, sillä kuvan 9 CT3 ja CT1 ovat myös ristissä, mittaa rele kulman  $0^\circ$  generaattorilta ja kulman  $30^\circ$  muuntajan jälkeen. Eli matalajännitepuoli tulee yläjännitepuolta jäljessä 30 astetta jokaisella vaiheella.

Mikäli kuvassa 9 oleva ristiin kytkentä siirtyy muuntajan toiselle puolelle, muuttuvat virtojen määrittelyt seuraavasti:  $I_{w2} = I_{wg}$ ,  $I_{v2} = I_{vg}$  ja  $I_{u2} = I_{ug}$ . Lasketaan yksi muuntajan kolmioon kytketyn puolen virta uudessa tilanteessa:

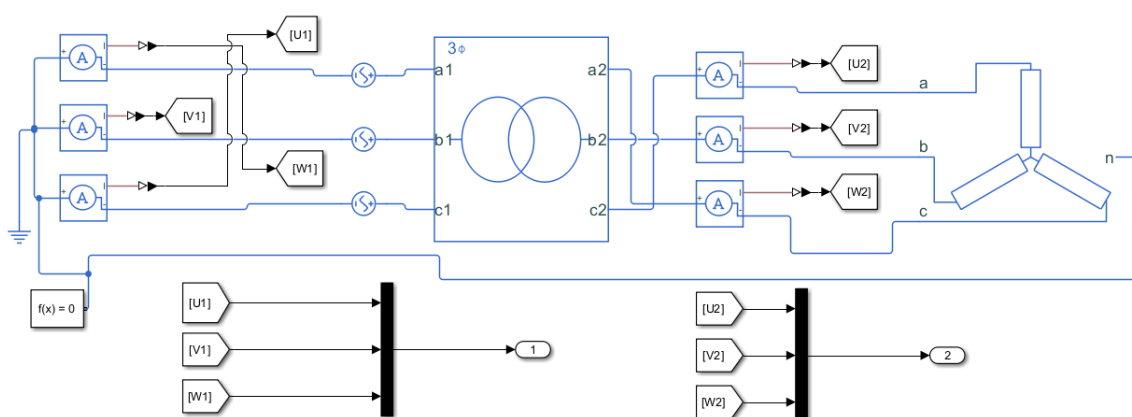
$$I_u = I_{u2} - I_{w2} = \sqrt{3} I_0 \angle -150^\circ. \quad (8)$$

Kaavan 8 kulman tulos  $-150^\circ$  menee kojeistolle W / L3 paikalle ja koska edelleen, generaattorin tähtipisteen virtamuuntajat on kytketty ristiin CT1  $\leftrightarrow$  CT3, vertaa rele sitä CT1:n tulokseen  $-120^\circ$ . Ts. rele havaitsee matalajännitepuolen tulevan  $30^\circ$  yläjännitepuolta edellä, mikä vastaa kytkentäryhmää ja kellolukua Dy11.

### 3.4.1 Simulointimalli tarkastusta varten

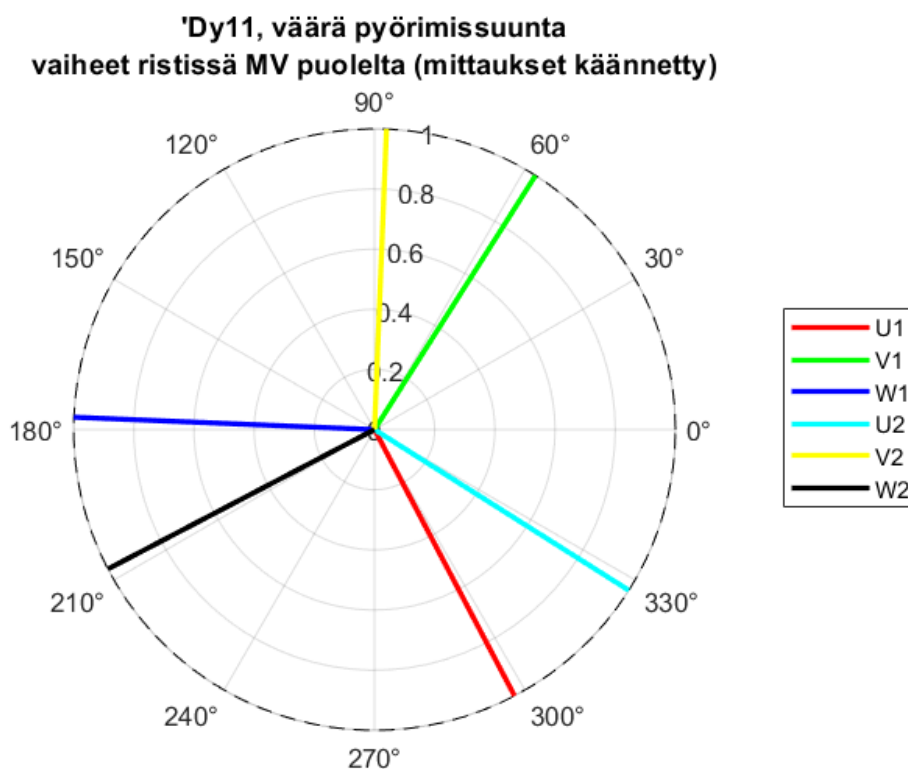
Suojareleen virtojen osoitinpiirroksot ovat käteviä pikaiseen tarkastukseen, että kaikki on kuten pitääkin. Esimerkiksi virheellinen kytkentä aiheuttaa kuitenkin niin nopean katkaisijan aukeamisen, että reaaliajassa piirtyvät osoittimet eivät ehdi näyttämään selvää vian syytä. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi puhelimella virtaosoittimien kuvaamista näytöltä, jotka eivät aina ehdi kehittyä stabiiliin tilaan näyttämään luotettavaa dataa. Tästä syystä tilanteen simulointi voisi tarjota helpon keinon tarkistaa asettelut oikeaksi ensimmäisellä kerralla.

Jatkossa ei ole tehokasta laskea vaihesiirtoja manuaalisesti kuten edellisessä kappalessa tehtiin. Osoitinpiirroksot voidaan onneksi luoda suhteellisen helposti simuloimalla yksinkertaistettua generaattoria, johon on kytketty muuntaja (kuva 10). Virrat mitataan generaattorin tähtipistepuolelta sekä muuntajan jälkeen, kuten käytännössäkin.



**Kuva 10.** Simulink malli, jossa kuvattuna generaattori, muuntaja, kuorma ja virranmittaukset ensiö- ja toisiopuolelta

Kuvassa 10 on esitettyä laatimani Simulink kuvaus muuntajan vaihesiirron määrittämistä varten. Mallista voidaan helposti vaihtaa mittausten ja muuntajan kytkentää sekä muuntajan kytkentäryhmää. Simulaatioajon jälkeen data on saatavilla Matlab-työtilassa, josta live editoriin tehty skripti tulostaa osoitinpiirroksen. Kuvassa 11 nähtävä osoitinpiirros vastaa yllä esitettyä Simulink mallin tulosta. Tässä tapauksessa Dy11 muuntaja kytkettynä vastapäivään pyörivään generaattoriin, tuottaa osoitinpiirroksen, joka vastaa releen mittauksia. Osoitinpiirrokselta vertailtuna esimerkiksi matalajännitepuolen vektoria U1 ja keskijännitepuolen vektoria U2 huomataan, että keskijännitepuoli eli ensiö on matalajännitettä edellä täten vastaten kytkentäryhmää Dy1.



**Kuva 11.** Simulointimallia vastaava osoitinpiirros

### 3.4.2 Oikea toimintamalli

Releen asettelut määritetään seuraavasti, kun kaikki muu on valmista koeajoa varten.

1. Tarkastetaan HMI:ltä (valvomon käyttöliittymä) että PLC on asettanut suojattavan generaattorin tiedot oikein (SET-näppäin).
2. Otetaan muuntajan differentiaalisuojaus ( $3dI>T$ ) käyttöön jos ajetaan matalajännitegeneraattoria, jolloin tarvitaan muuntaja.
3. Laske virtamuuntajien korjauskertoimet.
4. Kaikki tämänhetkiset koeajon muuntajat ovat Dy11 tyyppisiä. Asetetaan *Winding 1 type D* ja *Winding 2 type y* ja *Clock number 11*. Jos generaattorin pyörimissuunta on vastapäivään, jonka seurauksena vaihejohtimet on kytketty ristiin yläjännitepuolelta, täytyy releelle asetella muuntajan nimikilvestä poiketen *Clock number 1*.

## 4 Johtopäätökset & yhteenveto

Tutkielman aikana esiin nousi selviä käytännössä hämmennystä aiheuttavia tekijöitä. Virtamuuntajien polariteetin ja muuntajien vaihesiirron määrittäminen ovat molemmat itsessään yksinkertaisia asioita, mutta releistykseen kannalta koeajossa on paljon muuttujia, jotka voivat mennä helposti sekaisin ja täten vaikeuttaa ilmiöiden juurisyiden selvittämistä.

Alkuperäisen tavoitteen, eli ohjeistuksen ja toimintamallien kehittämisen näkökulmasta, tutkielmassa pyrittiin kirjallisuuden avulla selvittämään edellä mainittuja epäselvyyksiä sekä differentiaalisuojauksen yleisiä toimintaperiaatteita. Lisäksi laadin simulaatiomallin, jonka tarkoitus on helpottaa releen asetteluiden määrittelyä muuntajaa suojatessa. Tutkielman pohjalta ohjeistuksen tarkennuksen pitäisi onnistua. Myös mahdolliset tulevat projektit voivat hyötyä suojauksen täsmällisemmästä tarkastelusta, kun käsitellään uutta tilannetta.

### 4.1 Havaittuja kehityskohteita

Tutkielman pohjalta koeajon ohjeisiin saadaan lisättyä tarkennuksia. Ohjeisiin voidaan mm. kirjoittaa, että koeajon sähköjärjestelmissä releelle asetettava muuntajan kelloluku muuttuu 60 astetta esimerkiksi  $Dy11 \rightarrow Dy1$ , mikäli generaattori pyörii vastapäivään, ja sen keskijännitekaapelit on kytketty ristiin vastaamaan verkon pyörimissuuntaa.

Koeajon automaation käyttöliittymään voitaisiin lisätä huomautuksia kytkentöihin liittyen. Esimerkiksi huomautus tarpeen mukaan, että kaapelit kytketään ristiin, kun logikalle ilmoitetaan koeajettava moottori ja generaattori. Automaatioon on jo tulossa päivitys, jolla pyritään saamaan loputkin arvot laskettua ja asetettua koneellisesti vähentäen käyttäjältä aiheutuvaa riskiä. Tämä päivitys silmällä pitäen, toivottavasti tutkielmassa käsitellyt huomionarvoiset näkökulmat ja niihin selvitetty vastaukset voivat olla avuksi.

## 4.2 Omat pohdinnat

Tutkielman alkuperäisenä tarkoituksena oli kehittää opetusmenetelmiä releistyksen ymmärtämisen tueksi ja tätä kautta sujuvoittaa koeajoa. Varsinaisia opetusmenetelmiä itsessään ei ehkä löytynyt, mutta onnistuin selvittämään syy-seuraus-suhteita ja sitä kautta toivottavasti jatkossa kehittämään ohjeistusta ja toimintamalleja.

Henkilökohtaisesti kehitettävää jäi erityisesti tutkielman loppuunviennissä ja asioiden selvittelyssä. Myös käyttäjäkokemuksia olisi voinut kysellä enemmän. Lopulta sain omasta mielestäni melko kattavan lopputuloksen. Toisaalta tutkielman hyödyllisyys on osittain kyseenalainen. Esimerkiksi tekemääni simulaatiomallia tuskin käytännössä tarvitaan, kunhan eri skenaariot ja toimintatavat on listattu ohjeisiin.

Aineistoja opiskellessa sain paljon uutta tietoa mm. erilaisista suojaustekniikoista ja muuntajien toiminnasta. Opin lisäksi tiedonhakuja sekä ymmärtämään paremmin, mitä insinöörin työnkuva pitää sisällään. Tutkielman ja sen käytännön asetelman huomioon ottaen käsittelin joitakin aiheita ehkä liiankin laajasti. Pidän sitä kuitenkin arvokkaana, sillä Wärtsilän moottoreita voidaan käyttää monissa eri sovelluksissa. Laaja ymmärrys esimerkiksi releistä ja muuntajista on varmasti hyödyksi tulevaisuudessa. Tämän työn suurin arvo onkin juuri oman ymmärryksen kehittäminen.

## Lähteet

- ABB. (2023, helmikuuta 7). *Protection and control REX640, technical manual*.  
<https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentId=1MRS759142&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>
- ABB:n TTT-käsikirja. (2000, heinäkuuta). [https://heikkilaakso.com/opetus/abb/075\\_0007.pdf](https://heikkilaakso.com/opetus/abb/075_0007.pdf)
- Csanyi, E. (2021, maaliskuuta 29). Three basic principles of differential protection you SHOULD properly understand | EEP. *EEP - Electrical Engineering Portal*.  
<https://electrical-engineering-portal.com/three-basic-principles-differential-protection>
- Doble Engineering Company. (2014, huhtikuuta 20). *Symmetrical Components Made Easy – Part 1*. Doble Engineering Company. <https://www.doble.com/symmetrical-components-made-easy-part-1/>
- Fingrid. (2024, marraskuuta 6). *Kantaverkon-ja-asiakasliityntojen-relesuojaus-2024*.  
<https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/palvelut/kulutuksen-ja-tuotannon-liittaminen-kantaverkkoon/kantaverkon-ja-asiakasliityntojen-relesuojaus-2024.pdf>
- Hamilton, R. (2013). Analysis of Transformer Inrush Current and Comparison of Harmonic Restraint Methods in Transformer Protection. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(4), 1890–1899. IEEE Transactions on Industry Applications.  
<https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2257155>
- IL05\_Three-phase-Networks\_EN*. (2013, maaliskuuta). [https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/04/IL05\\_Three-phase-Networks\\_EN.pdf](https://www.a-eberle.de/wp-content/uploads/2021/04/IL05_Three-phase-Networks_EN.pdf)
- Jha, P. K., Gupta, N., & Kumar, A. (2023). Zero Sequence Filtering and its Impact on Low Impedance Differential Protection of Shunt Reactors. *2023 International Conference on Energy, Materials and Communication Engineering (ICEMCE)*, 1–5.  
<https://doi.org/10.1109/ICEMCE57940.2023.10434063>
- Mörsky, J. (1993). *Relesuojaustekniikka* (2. korj. p). Otatieto.

- Parmar, J. (2012, kesäkuuta 3). Understanding Vector Group of Transformer (part 1). *EEP - Electrical Engineering Portal*. <https://electrical-engineering-portal.com/understanding-vector-group-transformer-1>
- Xu, W., Yin, X., Wang, Y., & Qiao, J. (2020). Adaptive Form of Generator Stator Ground Fault Protection for the Floating Nuclear Power Plant Grid-Source Direct Connection System. *2020 IEEE 1st China International Youth Conference on Electrical Engineering (CIYCEE)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/CIYCEE49808.2020.9332535>