

AALTO-YLIOPISTO

Teknillinen Korkeakoulu

Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta

Sähkötekniikan laitos

Mikael Forsblom

Distanssireleen heilahtelusalvan tarpeellisuuden selvittäminen dynamiikkasimuloinnin

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten

Espoossa 31.3.2010

Työn valvoja:

Professori Liisa Haarla

Työn ohjaaja:

Diplomi-insinööri Minna Laasonen

Alkusanat

Tämä työ on tehty opinnäytteenä Aalto-yliopiston Teknillisen korkeakoulun Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunnalle sähkötekniikan laitoksen siirtotekniikan tutkimusryhmässä. Työn tilaajana ja rahoittajana on toiminut valtakunnallinen kantaverkkoyhtiö Fingrid Oyj, joka vastaa Suomen päävoimansiirtoverkosta.

Haluan kiittää työni valvojaa, professori Liisa Haarlaa, mielenkiintoisesta ja haastavasta diplomityön aiheesta sekä hyvistä kommentteista ja neuvoista. Kiitokset kuuluvat myös työn ohjaaja Minna Laasoselle sekä kaikille muille ohjausryhmän jäsenille. Erityisesti kiitän Tuomas Rauhalaa ja Harri Kuistia mielenkiinnosta työtäni kohtaan ja hyvistä neuvoista liittyen dynamiikkasimulointien suorittamiseen, sekä Lauri Koivistoa releisiin liittyvistä tiedoista ja neuvoista.

Suurin kiitos kuuluu vanhemmilleni, joiden niin taloudellinen kuin henkinen tuki on ollut korvaamatonta pitkään jatkuneiden opiskeluvuosieni varrella. Kiitokset myös siskolleni Monikalle, jonka ymmärrys ja kärsivällisyys oli vertaansa vailla opiskeluni alkuaikoina ollessamme kämppeiksiä. Suuret kiitokset myös Marialle, jonka kannustuksella ja tuella on ollut ratkaiseva merkitys opintojeni loppuun saattamisessa. Lopuksi haluan kiittää vielä kaikkia ystäviäni ja sukulaisiani, joiden ansiosta opiskeluaikani on ollut mukavaa aikaa.

Espoossa 31.3.2010

Mikael Forsblom

Tekijä:	Mikael Forsblom
Työn nimi:	Distanssireleiden heilahtelusalvan tarpeellisuuden selvittäminen dynamiikkasimuloinnein
Päivämäärä:	31.3.2010 Sivumäärä: 77
Tiedekunta:	Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta
Professuuri:	S-18 Sähköverkot
Työn valvoja:	Professori Liisa Haarla
Työn ohjaaja:	Diplomi-insinööri Minna Laasonen
Sähkönsiirtojärjestelmän vikojen havaitseminen tapahtuu releillä, jotka tarkkailevat verkosta mitattavia tietoja, esimerkiksi suojattavan johdon impedanssia. Mikäli releen mittaama arvo alittaa tai ylittää (reletyypistä riippuen) sille asetellun toiminta-arvon, rele antaa laukaisukäskyn katkaisijalle, joka irrottaa vioittuneen osan verkosta. Työn tavoitteena oli kehittää verkon muutostilojen laskennassa käytettävään PSS/E -ohjelmistoon toiminnallisuus, jonka avulla voidaan dynamiikkasimuloinnein tarkastella verkossa olevien releiden toimintaa vikojen jälkeisten tehoheilahtelujen aikana. Toiminnallisuutta testataan työn lopuksi ja saatuja tuloksia on tarkoitus hyödyntää releasettelujen määrittämisessä ja arvioitaessa onko distanssireleisiin aseteltavissa olevien heilahtelusalpojen käyttäminen tarpeellista, jotta releiden virhetoiminnot tehoheilahtelujen aikana voidaan sulkea pois. Distanssirele voi nimittäin tulkita suuren tehoheilahtelun viaksi ja aiheuttaa näin virheellisen laukaisun. Heilahtelusalpa on toiminto, joka erottaa heilahtelutilanteen viasta ja estää releen virheellisen toiminnan tehoheilahtelujen aikana. Tavoitteen saavuttamiseksi kehitettiin reletyökalu, jonka avulla pystytään tutkimaan releiden toimintaa simulaation aikana. Työkalun toteutuksessa käytettiin apuna ohjelman tarjoamia relemalleja, jotka kuvaavat reaali maailman releitä. Tärkeä osa toteutusta oli erilaisten apuohjelmien kehittäminen. Reletyökalua testattiin simuloimalla erilaisia tilanteita pohjoismaisessa siirtoverkossa tavoitteena hankkia tietoa releiden mittaamista impedansseista sekä mahdollisista reletoinnoista. Testauksen perusteella voidaan sanoa, että reletyökalun toteutus onnistui ja työkalu toimi kuten oli tarkoitus. Simulointien perusteella voidaan todeta, että distanssireleiden virhetoiminnot eivät ole todennäköisiä tilanteissa, joissa stabiiliusehdot sekä siirtokapasiteettien asettamat rajoitukset täyttyvät. Näin ollen distanssireleen heilahtelusalpaa ei yleensä tarvita, mutta joillakin johdoilla sitä on kuitenkin perusteltua käyttää.	
Avainsanat:	distanssirele, heilahtelusalpa, dynamiikkalaskenta, tehoheilahtelu

Author:	Mikael Forsblom	
Name on the Thesis:	Evaluating the Need for Power Swing Blocking in Distance Relays with Dynamic Simulations	
Date:	31.3.2010	Number of Pages: 77
Faculty:	Faculty of Electronics, Communications and Automation	
Professorship:	S-18 Power Systems	
Supervisor:	Professor Liisa Haarla	
Instructor:	Minna Laasonen, M. Sc. (Tech.)	
Faults in power systems are detected by using relays which observe data, e.g. the impedance of the protected line, metered from the grid. If the metered value exceeds or goes under its reference value, the relay sends a trip signal to the switching device that disconnects the faulty component from the grid. The purpose of this thesis was to develop a method which can be used to observe relay events during power oscillations caused by faults. The method should operate in conjunction with the power system simulation software PSS/E and this is tested at the end of the work. The results are used to study whether it is necessary to use power swing blocking in distance relays to exclude the possibility of erroneous relay events. False tripping can occur because a distance relay might interpret large power oscillations as a fault and thereby trip an intact line. Power swing blocking is a function that separates power swinging from fault events and prevents relays from tripping because of power oscillations. A relay tool that can be used to monitor relay events during dynamic simulations was developed. Relay models from the dynamic library of the software were used to represent real-world relays. The planning and execution of special-purpose macros played an important role in the tool's implementation. Finally, the relay tool was tested by performing simulations with the Nordic grid model. The main target was to study the impedances metered by the relays and to examine if any relay events occurred. Based on the testing, the implementation of the relay tool was successful and the tool worked as it was meant to. According to the simulations, it can be stated that erroneous trippings of distance relays are not probable in power flow cases in which the terms of stability and transfer capacity are fulfilled. Hence, it is not necessary to use power swing blocking in distance relays on most of the transmission lines. However, it is justified to use it in some specific cases.		
Key words:	distance relay, power swing blocking, dynamic simulations, power oscillation	

Käytetyt merkinnät ja lyhenteet

Merkinnät:

A	Sähköasema A
B	<i>Suskeptanssi</i>
B	Sähköasema B
C	Sähköasema C
C_i	<i>Kapasitanssi kiskossa i</i>
E_i	Generaattorin i sähkömotorinen voima
E_c	Generaattorin napajännite
EFD	Magnetointipiiriin syötettävä jännite
F	Vikapaikka
G	<i>Konduktanssi</i>
G	Generaattori
H_{LIM}	Signaalin raja-arvo
I	<i>Virta</i>
$\underline{I}$	<i>Virtaosoitin / Virta johdolla</i>
$\underline{I}_1$	<i>Virta johdon alussa / Virta johdolle asemalta A (kuva 4.5)</i>
$\underline{I}_2$	<i>Virta johdon lopussa</i>
I_A	<i>Johdon virta asemalla A</i>
j	Imaginääriyksikkö
K	Vahvistus
K1-K5	Katkaisijoita
L_i	<i>Induktanssi kiskossa i</i>
PH1	Heilahtelusalvan aktivointisignaali
pu	Suhteellisarvon yksikkö (per unit)
R	Rele

R	<i>Resistanssi</i>
R1-R5	Releitä
R_v	<i>Vikaresistanssi</i>
$T_{i, i=1-5}$	<i>Aikavakioita</i>
U	<i>Jännite</i>
$\underline{U}$	<i>Jänniteosoitin</i>
$\underline{U}_1$	<i>Jännite johdon alussa</i>
$\underline{U}_2$	<i>Jännite johdon lopussa</i>
U_{AV}	<i>Vaihejännite asemalla A</i>
VOTHSG	Stabilointipiiristä lähtevä signaali
V_{REF}	Ohjausjännite
V_S	<i>Stabilointipiiristä tuleva signaali</i>
X	<i>Reaktanssi</i>
X_1	<i>Aseman A ja haarapisteen välisen johdon reaktanssi</i>
X_2	<i>Aseman B ja haarapisteen välisen johdon reaktanssi</i>
X_3	<i>Haarapisteen ja vikapaikan välisen johdon reaktanssi</i>
X_4	<i>Vikapaikan ja aseman C välisen johdon reaktanssi</i>
X_{AB}	<i>Pisteiden A ja B välisen johdon reaktanssi</i>
X_{AF}	<i>Aseman A ja vikapaikan välinen reaktanssi</i>
X_B	<i>Pisteessä B olevan kondensaattorin reaktanssi</i>
X_{BC}	<i>Pisteiden B ja C välisen johdon reaktanssi</i>
X_{BF}	<i>Aseman B ja vikapaikan välinen reaktanssi</i>
X_M	<i>Releen mittaama reaktanssi</i>
$\underline{Y}$	<i>Admittanssi</i>
$\underline{Z}$	<i>Impedanssi</i>
Z1	Releen 1. suojausvyöhyke
Z2	Releen 2. suojausvyöhyke

Z3	Releen 3. suojausvyöhyke
Z_{mit}	<i>Releen mittaama impedanssi</i>
α	kerroin, jonka arvo on välillä 0–1
δ	<i>Jännitteen kulma</i>
ΔF_w	Heilahtelusalvan mittausvyöhykkeen leveys eteenpäin
ΔR_w	Heilahtelusalvan mittausvyöhykkeen leveys taaksepäin
ϕ	Johdon ja X-akselin välinen kulma

Lyhenteet:

AJK	Aikajälleenkytkentä
DISTR1	PSS/E:n distanssirelemalli (liite 1)
IDEV	PSS/E:n toiminto (liite 1)
IPLAN	Ohjelmointikieli (liite 1)
P1	Pohjois- ja Etelä-Suomen välisten siirtojohtojen leikkaus (tehonsiirto yhteensä)
PJK	Pikajälleenkytkentä
PSAS	PSS/E:n toiminto (liite 1)
PSS/E	Power System Simulator for Engineering -ohjelmisto
PSSPLT	PSS/E:n tulosten analysointiohjelma (liite 1)
RAC	Ruotsin ja Suomen välisten vaihtosähköjohtojen leikkaus (tehonsiirto yhteensä)
RXR1	PSS/E:n distanssirelemalli (liite 1)

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
Käytetyt merkinnät ja lyhenteet	5
Sisällysluettelo.....	8
1. Johdanto	10
2. Suomen voimansiirtojärjestelmä	12
2.1. Rakenne ja verkon komponentit.....	12
2.1.1. Generaattorit.....	12
2.1.2. Tehomuuntajat.....	13
2.1.3. Siirtojohdot.....	13
2.2 Verkon stabiilius.....	14
2.2.1 Yleistä	14
2.2.2 Stabiilius	15
2.2.3 Kulmastabiilius ja tehoheilahtelut	15
2.2.4 Jännitestabiilius	16
2.2.5 Taajuusstabiilius	18
3. Relesuojaus.....	19
3.1 Yleisesti relesuojauksesta	19
3.1.1 Relesuojauksen käsitteitä	19
3.1.2 Relesuojauksen ominaisuudet	19
3.1.3 Relesuojauksen rakenne	20
3.1.4 Relelajit.....	21
3.1.5 Reletyypit.....	22
3.2 Kantaverkon suojausmenetelmät.....	23
3.2.1 Generaattoreiden ja tehomuuntajien suojausmenetelmät	24
3.2.2 Kiskosuojaus ja katkaisijavikasuojaus	24
3.2.3 Kompensointilaitteiden suojaus	25
3.3 Kantaverkon johtosuojaus	26
3.3.1 Johtoviat	26
3.3.2 Johtosuojauksen periaatteet	28
4 Distanssireleet	31
4.1 Toiminta ja asettelut.....	31
4.1.1 Toimintaperiaate	31
4.1.2 Vyöhykkeet	32
4.1.3 Toimintakuvio ja ulottuma	33
4.2 Ulottumaan vaikuttavat tekijät.....	34
4.2.1 Vikaresistanssin ja sivusyötön vaikutus	34
4.2.2 Sarjakompensoinnin vaikutus.....	36
4.3 Tehoheilahtelujen vaikutukset.....	38
4.3.1 Distanssireleen toiminta tehoheilahteluissa.....	38
4.3.2 Heilahtelusalpa.....	39
4.3.3 Heilahtelusalvan käyttö.....	41

5. Simulointi PSS/E –ohjelmistolla	42
5.1 Yleistä	42
5.1.1 Verkkomallin luominen	42
5.1.2 Tehonjakolaskenta	43
5.2 Dynamiikkalaskenta	43
5.2.1 Yleistä	43
5.2.2 Dynamiikkamalli	44
5.2.3 Mallien käyttämät vakiot ja muuttujat	46
5.2.4 Kanavien lisääminen	47
5.2.5 Simulointi	47
5.2.6 Tulosten käsittely	48
6. Releiden toiminnan mallinnus	49
6.1 Relemallit	49
6.1.1 Relemallien sisäinen logiikka	50
6.1.2 Relemallin lisääminen dynamiikkamalliin	51
6.1.3. Relemallin toiminta simuloinnin aikana	51
6.1.4 Relemallin sisäisten muuttujien käyttö	52
6.2 Reletyökalun toteutus	53
6.2.1 Relekanavien lisääminen makron avulla	53
6.2.2 Reletoimintojen tarkastelu	54
6.3 Reletyökalun sovittaminen ohjelmistoon	55
6.3.1 Relemallin toimintakuvio	55
6.3.2 Reletyökalun käyttö ja päivittäminen	56
6.3.3 Impedanssikäyrien piirtäminen	58
7. Tutkimus: Heilahtelusalpojen tarve	60
7.1 Tutkimuksen lähtökohdat ja menetelmät	60
7.1.1 Siirtokapasiteetti	60
7.1.2 Keskeytystilanteet	61
7.1.3 Menetelmät	62
7.1.4 Reletyökalun toiminta	64
7.2. Tulokset	65
7.2.1 Vaimeneminen eri keskeytystilanteissa	65
7.2.2 Releiden toiminnot tehoheilahteluissa	66
8. Johtopäätökset ja pohdinnat	68
Lähteet	70
Liitteet	72

1. Johdanto

Siirtoverkon tehtävä on siirtää voimalaitoksilla tuotettu sähkö sähköasemille, joista se siirretään edelleen pienemmällä jännitteellä alue- ja jakeluverkkoa pitkin kuluttajille. Koska sähköä ei voida varastoida suuria määriä, täytyy sitä tuottaa joka hetki yhtä paljon kuin sitä kulutetaan. Tästä johtuen on edullista, että yhä suurempia alueita liitetään toisiinsa siirtoverkkojen välityksellä, jolloin kuormitusten ja tuotannon vaihtelut on helpompi tasata. Voimansiirtojärjestelmä onkin tuhansista komponenteista – kuten generaattoreista, muuntajista ja johdoista – ja niiden välisistä liitoksista eli katkaisijoista ja erottimista muodostuva kokonaisuus. Järjestelmän käyttäytymistä eri tilanteissa ei voida tutkia kokeilemalla, joten siihen tarvitaan tietokonepohjaista mallintamista ja laskentaa.

Kuten kaikissa teknisissä järjestelmissä, myös siirtoverkossa tapahtuu vikoja. Ne voivat johtua joko verkon komponenttien kulumisesta, hajoamisesta, väärästä toiminnasta tai ulkopuolisesta tekijästä, kuten esimerkiksi salamaniskusta. Vikoja varten tarvitaan suojausjärjestelmä, joka tarkkailee verkon tilaa ja kytkee vikaantuneen verkon osan irti havaitessaan vian. Vikojen havaitsemisessa käytetään hyväksi releitä, jotka tarkkailevat verkosta mitattavia tietoja, esimerkiksi johdon impedanssia. Mikäli releen havaitsema arvo ylittää tai alittaa (riippuen reletyypistä) sille asetellun toiminta-arvon, rele antaa laukaisukäskyn katkaisijalle, joka irrottaa viallisen komponentin verkosta.

Äkilliset, esimerkiksi vian seurauksena tapahtuvat, verkon tuotanto- ja kuormitusvaihtelut aiheuttavat epätasapainon sähkön tuotannon ja kulutuksen välillä. Tällöin verkko joutuu niin sanottuun dynaamiseen muutostilaan, jossa verkon eri puolilla sijaitsevien generaattoreiden kulmanopeudet alkavat heilahdella eli ennen vikaa vakioina pysyneet kulmanopeudet vuoroin kiihtyvät ja hidastuvat. Verkon ollessa stabiili, heilahtelut tasoittuvat ja verkko hakeutuu samaan tai uuteen tasapainotilaan, riippuen siitä onko verkossa tapahtunut pysyvä muutos. Verkon tilaa tarkkailevat distanssireleet saattavat kuitenkin joissain tapauksissa tulkita havaitsemansa heilahtelun verkossa olevaksi viaksi ja näin ollen virheellisesti kytkeä johtoja irti verkosta. Tästä seuraa entistä suurempi tehotilanteen epätasapaino, ja pahimmillaan koko systeemin romahtaminen on mahdollista.

Tämän työn tarkoituksena on kehittää verkon muutostilojen laskentaan käytettävään PSS/E -ohjelmistoon toiminnallisuus tai työkalu, jonka avulla verkon muutosilmiöitä tutkivan dynamiikkalaskennan yhteydessä voidaan suoraan tarkastella verkossa olevien releiden

toimintaa dynaamisten heilahtelujen aikana. Työkalua on tarkoitus hyödyntää releasettelujen määrittämisessä ja sen tehtävä on auttaa arvioimaan, onko distanssireleisiin aseteltavissa olevien heilahtelusalpojen käyttäminen tarpeellista, jotta edellä mainitun kaltaiset virhetoiminnot voidaan sulkea pois.

Työn aluksi luvussa kaksi käsitellään siirtoverkon rakennetta ja verkon stabiiliutta. Releet ovat tärkeä osa työn aihepiiriä ja niitä esitellään luvuissa kolme ja neljä. Keskeinen merkitys työn tekemisessä on ollut *"Power System Simulator for Engineering"* -verkostolaskentaohjelmiston eli PSS/E:n käytössä. Luvut viisi ja kuusi käsittelevät ohjelmiston käyttöä, ominaisuuksia ja työn päämääränä olleen relemallinnuksen toteuttamista. Työkalun avulla tehdyn laajemman releiden toimintaa tehoheilahteluissa käsittelevän tutkimuksen tekemistä ja tuloksia esittelee luku seitsemän ja koko työn perusteella tehdyt keskeiset johtopäätökset sekä pohdintoja työstä on esitetty luvussa kahdeksan.

2. Suomen voimansiirtojärjestelmä

Siirtoverkkoa voidaan pitää voimajärjestelmän selkärankana; se yhdistää toisiinsa voimalaitokset ja sähköasemat, joiden kautta sähköä syötetään edelleen loppukäyttäjille. Tehotasapainon – sähkön tuotannon ja kulutuksen tasapainon – ylläpitämiseksi järjestelmä on edullista rakentaa siten, että mahdollisimman paljon tuotantoa on liitettyä samaan järjestelmään, jotta kuormien tai tuotantolaitoksen verkosta irtoamiset tai siihen liittymiset eivät aiheuta suuria taajuuden muutoksia. Tästä syystä Suomen voimansiirtojärjestelmä ei ole oma erillinen yksikkönsä, vaan se on liitetty pohjoismaiseen yhteiskäyttöjärjestelmään, joka yhdistää Suomen, Ruotsin, Norjan ja Itä-Tanskan voimajärjestelmät vaihtosähköyhteyksin. Tämän lisäksi Suomesta on suurjännitteiset tasasähköyhteydet Venäjälle, Viroon ja myös Ruotsiin, mutta näiden merkitys on erilainen kuin vaihtosähköyhteyksien, koska tasasähköyhteys vaatii omat suuntaaja-asemansa siirtoyhteyden molempiin päihin. Asemien avulla siirtojohdon läpi kulkevaa tehoa voidaan säädellä, kun taas vaihtosähköyhteyden teho määräytyy tuotetun ja kulutetun sähkön ja tarjolla olevien siirtoreittien mukaan itsestään. Tasasähköyhteyksien avulla voidaan myös vaimentaa järjestelmän tehoheilahteluja moduloimalla yhteyden läpi kulkevan tehon suuruutta.

2.1. Rakenne ja verkon komponentit

Sähköverkko koostuu monista erilaisista osista. Sähköä tuotetaan generaattoreilla, sen jännitetasoa muunnetaan tehomuuntajilla, sitä siirretään johdoilla ja sen kulkureitti avataan ja suljetaan katkaisijoilla. Lisäksi verkossa on erottimia, ylijännitesuojia, kompensointilaitteita ja mittalaitteita, joiden kaikkien toiminta on tärkeää luotettavan sähkönsiirron kannalta. Lisäksi on erilaisia valvonta-, ohjaus- ja tiedonsiirtolaitteita, joiden tehtävinä on verkon toiminnan valvominen ja ohjaus. Sähköverkon ilmiöiden ymmärtämisen kannalta on tärkeää tietää, minkälaisista osista verkko koostuu ja mitä ominaisuuksia milläkin komponentilla on. Seuraavassa käydään lävitse tämän työn kannalta tärkeimpien komponenttien toimintaa ja niiden merkitystä verkon osana.

2.1.1. Generaattorit

Generaattoreiden tehtävänä on muuntaa mekaaninen energia sähköenergiaksi. Voimalaitoksen käyttövoimasta riippumatta generaattorit toimivat siis samalla periaatteella, vaikkakin generaattoreiden rakenne vaihtelee ja sitä kautta myös niiden ominaisuudet poikkeavat toisistaan. On kuitenkin tärkeää huomata, että generaattoria pyörittää aina turbiini, joka saa voimansa mekaanisesti, esimerkiksi paineistetun höyryn tai veden välityksellä. Generaattorit ja

turbiinit ovat suurimassaisia laitteita ja näin ollen niihin liittyy aina hitautta. Kun tahtigeneraattoria kuormitetaan, se tarvitsee enemmän mekaanista tehoa pysyäkseen tahdissa eli pyöriäkseen vakionopeudella. Nopeat kuormituksen muutokset aiheuttavat generaattorin hidastumista tai kiihtymistä, mikä on epätoivottavaa. Mainittakoon, että taajuusmuuttajan välityksellä verkkoon liitetyt generaattorit ovat verkon kannalta erilaisia, koska verkkoon syötettyä tehoa voidaan säädellä muuttajan avulla. Suurin osa generaattoreista on kuitenkin suoraan verkkoon kytkettyjä. Tuulivoimaloiden lisääntymisen myötä taajuusmuuttajan välityksellä verkkoon liittyvien generaattoreiden määrä tulee kuitenkin kasvamaan. Generaattoreiden hitauteen liittyvää kulmastabiiliutta tarkastellaan lähemmin luvussa 2.2.

2.1.2 Tehomuuntajat

Muuntajilla muutetaan sähkön jännitetasoja. Tämä on tarpeellista, koska suurten tehojen siirtäminen on edullista korkeilla jännitteillä, mutta sähkön tuottamiseen ja kuluttamiseen käytetään pienempiä jännitteitä. Tehomuuntajien, kuten kaikkien muuntajien, toiminta perustuu sähkömagneettiseen induktioon. Ferromagneettisen (rautaisen) muuntajasydämen ympärille kierretyn johtimen (ensiökäämin) virta aiheuttaa rautaan vaihtelevan magneettivuon, joka puolestaan indusoi jännitteen saman sydämen ympärille kierrettyyn toiseen johtimeen (toisiokäämin). Mikäli toisiokäämi on osa suljettua virtapiiriä, aiheuttaa käämin jännite piiriin virran. Käämien kierroslukujen suhdetta kutsutaan muuntajan muuntosuhteeksi, joka on tyhjäkäynnissä suoraan verrannollinen ensiö- ja toisiopuolen jännitteisiin ja kääntäen verrannollinen virtoihin. Muuntajan jännitteisiin vaikuttaa myös jännitteensäätö, käämikytkin sekä kuormitettuna hajareaktanssien aiheuttama jännitehäviö. Muuntajat ovat normaalissa käyttötilanteessa melko lineaarisia komponentteja. Vikatilanteissa niiden yksi tärkeä tehtävä on vikavirran rajoittaminen, mikä perustuu muuntajan virtapiiriin tuomaan impedanssiin.

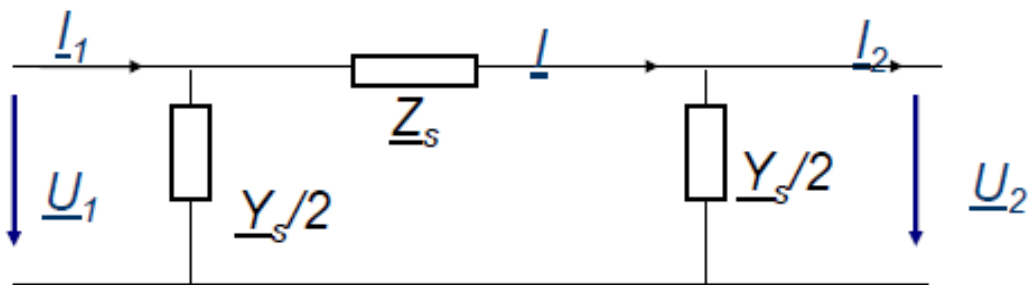
Muuntajien yksi tärkeä tehtävä on jännitteensäätö. Suurten jännitetasojen muuntajissa on automaattisesti säätyvä käämikytkin, jonka avulla käämien kierroslukujen suhteita voidaan muuttaa siten, että jännitteet pysyvät halutulla tasolla valitulla puolella, yleensä toisiopuolella. Pienemmän tason muuntajissa (20/0,4 kV) käämikytkintä ei ole, vaan sen tilalla on mahdollisesti välitokytkin, jolla muuntosuhdetta voidaan manuaalisesti säätää portaittain. Muuntajien merkitys tämän työn kannalta ei ole oleellinen, joten muuntajia ei käsitellä tässä tarkemmin.

2.1.3. Siirtojohdot

Siirtojohdot ovat voimansiirtojärjestelmän näkyvin osa. Suomessa käytetään jännitetasoiltaan 110 kV:n, 220 kV:n ja 400 kV:n voimajohtoja. Siirtoverkko pyritään rakentamaan rengasmaisesti siten,

että yhden johto-osuuden vikaantuminen ei aiheuta sähkönsiirron keskeytystä, vaan sähkö voidaan toimittaa toista johtoreittiä pitkin.

Siirtojohtoja voidaan fysikaalisesti mallintaa resistanssin, reaktanssin ja susceptanssin avulla kuvan 1 osoittamalla tavalla. Johdon impedanssi $\underline{Z} = R + jX$ sisältää johdon vaihtovirtaresistanssin sekä reaktanssin. Johdon admittanssi $\underline{Y} = G + jB$ kuvaa käytännössä sähkökentän aiheuttamaa vuotovirtaa konduktanssin G läpi, sekä johdon susceptanssin B tuottamaa loistehoa.



Kuva 2.1. Siirtojohdon pii-sijaiskytkentä. $\underline{U}_1$ on jännite johdon alussa ja $\underline{U}_2$ jännite johdon lopussa. $\underline{I}_1$ on johdon virta alkupäässä ja $\underline{I}_2$ on virta loppupäässä. $\underline{Z}_s$ on johdon impedanssi ja $\underline{Y}_s$ on admittanssi.

Kantaverkon voimajohdoilla reaktanssi on selvästi suurempi kuin resistanssi eli käytännössä johto voidaan useimmiten olettaa induktanssiksi. Tätä voimajohtojen ominaisuutta voidaan hyödyntää johtojen suojauksessa, sillä tästä syystä esimerkiksi oikosulussa vikavirta on lähes täysin induktiivista. Kuormitusvirta puolestaan on enimmäkseen resistiivistä, joten virtapiirin impedanssia mittaamalla voidaan havaita verkossa tapahtuva vikatilanne ja lisäksi saada tietoa vian sijainnista. Mittaus perustuu ohmin lakiin, jonka mukaan impedanssi saadaan jakamalla jännite virralla eli $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$. Asiaa käsitellään tarkemmin luvussa 3.4 distanssireleiden yhteydessä.

2.2 Verkon stabiilius

2.2.1 Yleistä

Järjestelmässä tapahtuvat viat muuttavat verkon tilaa yleensä pienentämällä tai kokonaan estämällä tehonsiirron jonkin verkon osan lävitse. Verkon kytkentätilanteen tai kuormituksen muuttuessa, tai vian seurauksena jo ennen katkaisijan toimimista, verkon tehotasapaino rikkoontuu ja verkko alkaa hakeutua uuteen tasapainotilaan. Tämä on vaihtosähköverkon hyvä ominaisuus, eli siirtojohtojen tehonjako määräytyy itsestään tuotannon ja kulutuksen ja niiden

välischen siirtojohtojen impedanssin mukaan. Uuteen tasapainotilaan pääsemisen edellytyksenä on verkon stabiilius. Mikäli verkko ei ole stabiili, tuloksena on verkon romahtaminen ja suurhäiriö.

Dynamiikkalaskennassa on kyse juuri muutosilmiöiden tutkimisesta ja simuloinnista. Kokonaiskuvan saamiseksi lukijan on hyvä tietää peruskäsitteet verkossa tapahtuvista ilmiöistä, sillä niihin viitataan myöhemmin käsiteltäessä verkon suojausasioita, joissa releillä on tärkeä rooli. Seuraavassa esitellään muutosilmiöihin liittyviä käsitteitä.

2.2.2 Stabiilius

Mikäli verkko palautuu häiriön jälkeen uuteen tasapainotilaan siten, että järjestelmä pysyy suurimmaksi osaksi kokonaisena, sanotaan verkon olevan stabiili. Stabiilius luokitellaan vielä useampaan erityyppiseen stabiiliuteen, jotka ovat kulmastabiilius, jännitestabiilius sekä taajuusstabiilius. Lisäksi uutena ehdotuksena yhdeksi stabiiliuden lajiksi on esitetty roottorin nopeusstabiiliutta (Samuelsson et al 2006). Viimeksi mainittu liittyy lähinnä sellaisiin tuulivoimaloihin, joissa generaattoreina käytetään epätahtikoneita. Uusi määritelmä on kehittäjiensä mukaan tarpeen, koska epätahtigeneraattorin tapauksissa ei voida käyttää muita stabiiliuden määritelmiä.

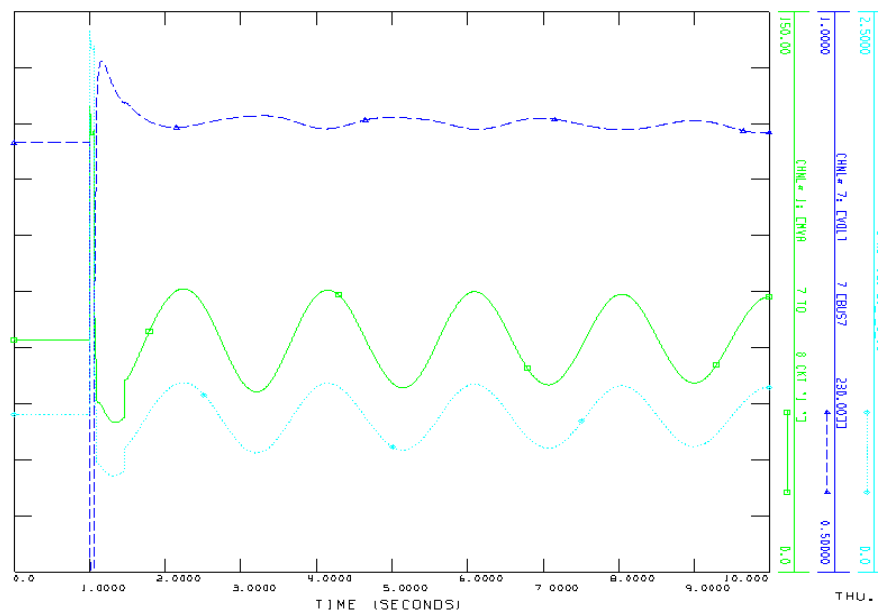
2.2.3 Kulmastabiilius ja tehoheilahtelut

Kulmastabiilius tarkoittaa tahtigeneraattoreiden kykyä pysyä tahdissa. Kun generaattorin kuormitusta muutetaan, sen nopeus pyrkii muuttumaan, koska sitä pyörittävä mekaaninen voima pysyy yleensä vakiona. Helpoin tapa havainnollistaa asiaa on olettaa oikosulku lähellä generaattoria. Oikosulun seurauksena jännite menee nolaksi eikä tehoa pysty siirtymään verkkoon, joten generaattori lähtee kiihtymään. Kun vika poistetaan, generaattorin kulmanopeus alkaa hidastua muiden verkossa olevien generaattoreiden tahdistavan momentin johdosta. Näin syntyy sähkömekaanisia heilahteluja, joiden aikana generaattorin kulmanopeus vuoroin kiihtyy ja hidastuu. Tilanne on kulmastabiili, mikäli generaattori pystyy häiriön jälkeen palaamaan tahtikäyntiin. On loogista, että mitä lyhyemmän ajan generaattori ehtii kiihtyä, sitä paremmat mahdollisuudet sillä on palautua tahtikäyntiin vikatilanteen poistuttua verkosta. Tämä on yksi syy, minkä takia suojauksen tulee toimia tarpeeksi nopeasti.

Siirtojohdoilla edellä mainittu tilanne näkyy ilmiönä, jonka aikana verkon solmupisteiden jännitteet ja johdoilla kulkevat virrat ja tehot heilahtelevat. Käytännössä tällöin puhutaan tehoheilahteluista. Tehoheilahtelujen vaimennus on tärkeä voimajärjestelmän ominaisuus, joka riippuu sekä itse järjestelmästä että siitä, missä toimintapisteessä järjestelmä on heilahtelujen

alkaessa. Toimintapiste määräytyy järjestelmään liittyneenä olevan tuotannon, kuormituksen ja johtojen siirtotilanteiden perusteella. Generaattoreiden suurten aikavakioiden takia heilahtelut ovat hitaita ja niiden vaimeneminen saattaa kestää kymmeniä sekunteja. Heilahtelujen taajuus riippuu generaattoreiden ominaisuuksien lisäksi verkon siirto- ja kytkentätilanteesta. Järjestelmässä esiintyvien heilahtelujen taajuus riippuu myös siitä minkä alueiden generaattorit heilahtelevat toisiaan vastaan. Etelä-Suomen ja Etelä-Ruotsin generaattoreiden heilahtelutaajuus toisiaan vastaan on noin 0,3 Hertziä kun taas Etelä-Ruotsin ja Norjan generaattoreiden välinen heilahtelutaajuus on noin 0,5 Hertziä (Kuisti 2010). Lisäksi yksittäisten koneiden heilahtelutaajuus on konekohtainen, yleensä noin 1-2 Hz.

Kuvan 2.2. tilanne on lähellä kriittistä tilannetta, jonka jälkeen järjestelmä ei pysty enää palaamaan tahtikäyntiin. Tämä nähdään siitä, että heilahtelujen vaimeneminen on erittäin hidasta. Toisin sanoen heilahtelujen amplitudi pienenee vian jälkeen hyvin hitaasti.



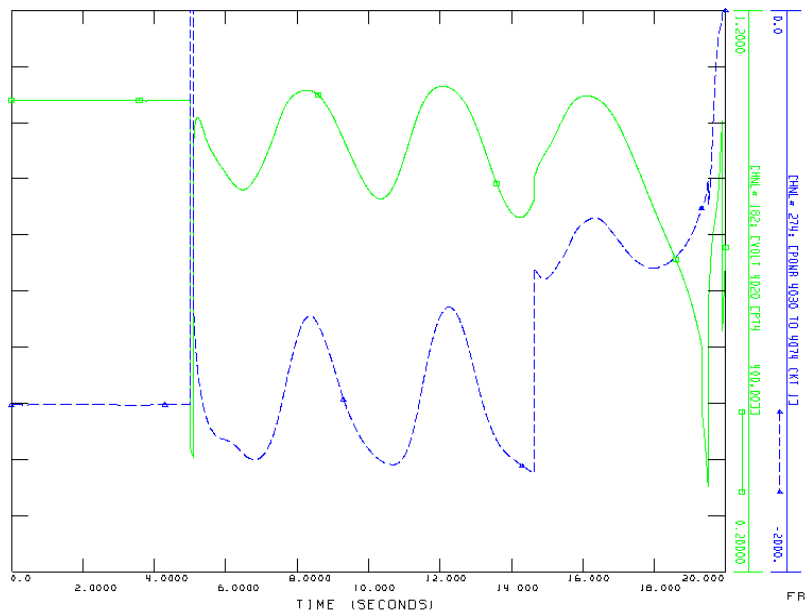
Kuva 2.2. Siirtojohtojen tehoheilahtelut vian jälkeen. Vika alkaa hetkellä $t = 1$ s ja sen kesto on 0,1 s. Kuvassa on esitetty kiskojännite (sininen käyrä), johdolla kulkeva virta (vihreä käyrä), sekä johdolla siirtyvä teho (turkoosi käyrä).

2.2.4 Jännitestabiilius

Jännitestabiilius liittyy voimajärjestelmän kykyyn ylläpitää vakaat jännitteet kaikissa solmuissa tietyssä käyttötilanteessa häiriön jälkeen. Jännitestabiilius riippuu järjestelmän kyvystä ylläpitää tai palauttaa tasapainotilanne tuotannon ja kuormituksen välille käytettävissä olevien siirtojohtojen avulla (IEEE/CIGRE 2004). Kuormituksen käyttäytyminen muutostilanteiden aikana

on siis tärkeä asia jännitestabiiliuden kannalta. Suurissa häiriöissä järjestelmän epälineaarisuus tulee ottaa huomioon jännitestabiiliutta tutkittaessa. Epälineaarisuutta aiheuttavat muun muassa moottorit, käämikytkimet, sarjakondensaattorit, sekä generaattoreiden loistehotuotannon säädöt ja maksimiarvot.

Tyypillisesti jännitestabiiliusongelma voi syntyä esimerkiksi vian seurauksena, kun johto vikaantuu ja sen seurauksena irtoaa verkosta. Tällöin muiden johtojen tehonsiirto kasvaa, jolloin niiden kuluttama loisteho kasvaa vastaavasti. Mikäli loistehoa ei ole saatavilla, lopputuloksena voi olla jänniteromahdus. Tilannetta voi heikentää entisestään esimerkiksi sarjakondensaattorin ylijännitesuojauksen toimiminen, jonka seurauksena kondensaattori irtoaa verkosta, mikäli sen virta kasvaa liian suureksi heilahtelujen aikana. Kuvassa 2.3 on simuloitu tällaista tilannetta, jossa lopputuloksena on jänniteromahdus. Sarjakondensaattorin ohikytkentä näkyy johdolla siirtyvän tehon äkillisenä pienentymisenä. Tehon suunta johdoilla vaihtelee kuormituksen ja tuotannon mukaan, joten tarkasteluunasta riippuen tehonsiirto voi olla myös negatiivinen, kuten kuvan tilanteessa on.



Kuva 2.3. 100 ms vika hetkellä $t = 5$ s, jonka seurauksena syntyy tehoheilahtelutilanne. Sininen käyrä on johdolla siirtyvä teho ja vihreä käyrä kiskojännite mittauspisteessä. Sarjakondensaattorin ohikytkentä ylivirran vuoksi heikentää siirtokapasiteettia entisestään ja tuloksena on jänniteromahdus, jonka seurauksena tehonsiirto menee nollaan.

2.2.5 Taajuusstabiilius

Taajuusstabiilius tarkoittaa järjestelmän kykyä ylläpitää taajuus vakaana sen jälkeen kun tuotannon ja kuormituksen välinen tasapaino on järkkynyt jonkin verkossa tapahtuneen tapahtuman johdosta. Taajuuden säätöä varten verkossa täytyy olla säätövoimaa, joka reagoi taajuuden muutoksiin joko lisäämällä tuotantoa (alitaajuustilanteissa) tai vähentämällä sitä (ylitaajuustilanteissa).

Taajuusstabiiliuden turvaamiseksi käytetään järjestelmäsuojia, ns. tehonvajaussuojia, joilla voidaan esimerkiksi kytkeä automaattisesti irti suuri kuorma, mikäli verkon taajuus laskee liikaa. Järjestelmäsuojat eivät siis suojaa erityisesti mitään verkon osaa, vaan koko verkon toimintakykyä, kuten nimestäkin voi päätellä.

Jos taajuus laskee paljon alle nimellistaajuuden, niin generaattorit pitää irrottaa verkosta, koska generaattoria pyörittävät turbiinit voivat vaurioitua alitaajuudella toimiessaan. Näin ollen taajuuden laskiessa alle turvallisen arvon, generaattorin suojaus toimii ja kytkee sen irti, jonka seurauksena jo valmiiksi liian alhainen taajuus laskee entisestään ja seurauksena voi olla taajuusromahdus. Käytännössä tilanne voi syntyä suuressa yhteiskäyttöjärjestelmässä silloin, jos vikojen seurauksena järjestelmä hajoaa osiin, joiden sisäinen epätasapaino tuotannon ja kulutuksen välillä on suuri.

3. Relesuojaus

Relesuojaus on turvallisen ja käyttövarman verkon perusedellytys. Kappaleessa 3.1 käsitellään relesuojauksen periaatteita, rakennetta ja esitellään yleisimmät relelajit ja -tyypit. Kohdassa 3.2 esitellään kantaverkon eri osien suojausmenetelmiä ja kappaleessa 3.3 perehdytään erityisesti kantaverkon johtosuojaukseen. Johtosuojauksessa yleisesti käytettyjä distanssireleitä käsitellään erikseen luvussa 4.

3.1 Yleisesti relesuojauksesta

3.1.1 Relesuojauksen käsitteitä

Relesuojaus käsitteenä on hieman epämääräinen ja vaatii hieman selvennystä. Mikäli käsite on lukijalle uusi, saattaa mieleen tulla ajatus, että verkossa on releitä, joita täytyy suojata. Relesuojaus tarkoittaa juuri päinvastaista, eli verkossa on releitä sen takia, että ne suojaavat verkkoa ja verkon komponentteja vioilta. Releet eivät kuitenkaan suojaa verkkoa siinä mielessä, että ne estäisivät vikojen tapahtumista, vaan ne toimivat yleensä vasta sen jälkeen kun vika on jo tapahtunut – muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Relesuojaus on kuitenkin suojausta siinä mielessä, että se irrottaa vikaantuneen verkon osan verkosta ja siten suojaaa terveitä verkon osia, materiaalia ja ihmisiä vikatapahtumien aiheuttamilta ilmiöiltä.

Releet ovat eräänlaisia mittalaitteita, joiden tehtävänä on tarkkailla verkon sähköisiä suureita ja niiden avulla havaita normaalista poikkeavat tilat verkossa. Releille annetaan tietyt toiminta-arvot, joita releiden yhteydessä kutsutaan yleisesti releen asetteluiksi. Niiden ylittäminen tai alittaminen (reletyypistä riippuen) tulkitaan epänormaaliksi tilaksi, jolloin rele antaa ohjauskäskyn katkaisijalle, joka irrottaa viallisen verkon osan terveestä verkosta. Releillä on siis erittäin tärkeä rooli turvallisen ja toimintavarman sähköverkon osana ja niitä onkin ollut käytössä sähköverkossa jo 1900-luvun alusta alkaen. Relesuojaus edustaakin generaattoreiden jännitteen ja taajuuden säädön ohella automaation vanhimpia sovelluksia. (Mörsky 1993)

3.1.2 Relesuojauksen ominaisuudet

Relesuojaukselta edellytetään monia asioita. Sen toiminnan tulee olla selektiivistä, jotta vian sattuessa mahdollisimman pieni osa verkosta kytketään irti. Suojauksen on toimittava riittävän nopeasti ja herkästi siten, että verkko ei aiheuta ihmisille tai omaisuudelle vaaraa ja että verkon stabiilius säilytetään kaikissa olosuhteissa. Lisäksi suojauksen tulee kattaa koko suojattava

järjestelmä ja sen käytettävyyden tulee olla hyvä ja sen toiminta täytyy olla koestettavissa käyttöpaikalla. (Mörsky 1993)

Suojareleiden ja niiden ohjaamien katkaisijoiden muodostamien suoja-alueiden tulee osittain peittää toisensa, jotta suojaus on kattava. Vian sattuessa alueella, joka on kahden suojausalueen sisällä, tulisi suojauksen kuitenkin toimia selektiivisesti. Selektiivisyys tarkoittaa sitä, että suojauksen tulee irrottaa vain viallinen osa verkosta siten, että terveitä verkon osia ei irroteta tarpeettomasti. Näin ollen suoja-alueen ensisijaisen suojalaitteen tulee ehtiä toimia ennen kuin niin sanottu varasuojaus toimii. Useimmiten selektiivisyys on toteutettu aikaan perustuvalla selektiivisyydellä. Tällöin varasuojan toimintaa on tarkoituksen mukaisesti hidastettu niin, että pääsuojaus ehtii toimia ensimmäisenä.

Releiden päätehtävä on siis vikojen havaitseminen ja niiden irrottaminen verkosta antamalla ohjauskäskyjä katkaisijoille. On myös muun tyyppisiä releitä, jotka pyrkivät toimimaan jo ennen vian syntyä. Tällaisia ovat esimerkiksi ylikuormitusreleet, lämpöreleet ja muuntajan kaasureleet eli Buchholz -releet.

3.1.3 Relesuojauksen rakenne

Releet ovat yksi suojausjärjestelmän osa ja niitä käytetään kaikilla jännitetasoilla lukuun ottamatta pienjänniteverkkoa, jossa suojaus on perinteisesti toteutettu sulakkeiden avulla. Johdonsuojareleet sijaitsevat lähes poikkeuksetta¹ sähköasemilla siten, että jokaista johtolähtöä valvoo vähintään yksi rele. Suurempien jännitetasojen eli alue- ja siirtoverkon tapauksessa releet ovat aina sijoitettuina sähköasemille. Kohdesuojaus, kuten esimerkiksi kisko- tai muuntajasuojaus, toteutetaan luonnollisesti aina suojauskohteessa eli sähköasemalla tai voimalaitoksella.

Tärkeimmät suojauskohteet on varustettu kahdennetulla suojauksella, joka tarkoittaa sitä, että käytetään kahta relettä yhtä suojauskohdetta varten. Tällöin toisen releen vikaantuessa toinen rele kuitenkin vielä toimii, jolloin lopputuloksena on edelleen selektiivinen laukaisu. Varasuojauksen toimiminen tarkoittaa yleensä aina sitä, että myös terveitä verkon osia irrotetaan ja laukaisukäskyn lähettäminen viivästyy. Tästä syystä suojauksen kahdentaminen kriittisissä kohteissa on järkevää, vaikka varasuojauskin on olemassa.

¹ Poikkeuksena mainittakoon keskijänniteverkossa käytetyt ns. pylväskatkaisijat, joissa rele ja koko suojausyksikkö katkaisijoineen ja tiedonsiirtolaitteineen toimivat integroituna yksikkönä, joka on asennettu keskijänniteverkon puupylvään yhteyteen. Tällä tavoin voidaan pitkä johtolähtö jakaa kahteen suojausvyöhykkeeseen.

Releet eivät yksin pysty huolehtimaan verkon suojauksesta, vaan ne tarvitsevat avukseen monia muita laitteita, jotka yhdessä muodostavat suojausjärjestelmän. Muita suojausjärjestelmän komponentteja ovat mittamuuntajat, apusähkölaitteet ja tiedonsiirtoyhteydet. Myös katkaisijat ovat tärkeä osa suojausta. Katkaisijoita ei kuitenkaan virallisesti lasketa suojausjärjestelmän osaksi (SFS-IEC 2002). Edellä mainittujen lisäksi on erilaisia hälytys- ja raportointikeskuksia, jotka yleensä liittyvät käytönvalvontajärjestelmään, jonka avulla valvotaan ja ohjataan koko sähköverkkoa.

Mittamuuntajat mittaavat primääripiirin eli varsinaisen suojattavan verkon virtoja ja jännitteitä ja muuntavat ne toisiopiiriin kytketyille releille sopivaan muotoon. Mittamuuntajia on saatavilla kaikille eri jännitteille ja virroille siten, että toisiopiiriin syntyvät jännitteet ja virrat vastaavat standardoituja arvoja. Releiden mittaussiirien jännitteet ja virrat on nimittäin myös standardoitu, joten valitsemalla sopivat mittamuuntajat voidaan samoja releitä käyttää useissa eri jännitetasoissa.

Katkaisijat ovat primääripiirin osia, joiden tehtävä on kytkeä verkon osia kiinni ja irti toisistaan sekä kuormitus- että vikatilanteissa. Niiltä vaaditaan siis suurta virran kytkentä- ja katkaisukykyä. Katkaisija saa ohjauskäskynsä releeltä. Käytännössä ohjaus tapahtuu siten, että rele kytkee ohjausjännitteen katkaisijan ohjauskelalle, jolloin katkaisija tekee kytkentätoimenpiteen.

Relesuojauksen toimintakyvyn säilyttäminen kaikissa tilanteissa on siis tärkeää ja näin ollen sähköasemat varustetaan aina akkuvarmennetuilla apusähköjärjestelmillä. Näin voidaan varmistaa, että sähköaseman ohjaus- ja tiedonsiirtolaitteet säilyttävät toimintakykynsä myös sähköaseman syöttöverkon ollessa jännitteetön vian seurauksena. Tästä syystä myös releet, katkaisijat ja tiedonsiirtolaitteet saavat käyttö- ja ohjausjännitteensä apusähköjärjestelmän kautta.

3.1.4 Relelajit

Useimmiten releet mittaavat joko virtaa tai jännitettä, mutta releen toimintaperiaate voi perustua myös muuhun verkosta mitattavissa olevaan suureeseen. Ylivirtareleet toimivat virran ylittäessä asetellun arvon, kun taas jänniterele voi toimia joko yli- tai alijännitteestä. Muita relelajeja ovat taajuusreleet, tehoreleet, suuntareleet, epäsymmetriareleet, differentiaalireleet sekä distanssireleet.

Releet voivat olla hetkellisreleitä, jotka mittaavat hetkellistä arvoa ja toimivat heti asetellun rajan ylityttyä. Rele voi olla myös niin sanottu aikarele, jolloin releen toimintaa viivästetään tarkoituksella tietyissä tilanteissa, esimerkiksi silloin, kun aseteltu virta-arvo ylitetään vain hieman. Usein hetkellis- ja aikareleet toimivat samassa yksikössä käänteisaikahidasteisena eli siten, että

esimerkiksi ylivirtareleen tapauksessa laukaisu tehdään sitä nopeammin mitä suurempi ylivirta on. Riittävän suurella virralla rele toimii siis kokonaan ilman viivästystä hetkellisreleenä.

Taajuusreleet mittaavat verkon taajuutta ja toimivat sen ylittäessä tai alittaessa asetellut rajat. Suuntareleet mittaavat sekä jännitettä että virtaa ja muodostavat niiden avulla suureet, jotka ovat verrannollisia niiden väliseen vaihekulmaan. Esimerkiksi suunnatun ylivirtareleen toiminta vaatii samanaikaisesti virran hetkellisarvon olevan aseteltua raja-arvoa suurempi sekä jännitteen ja virran välisen vaihekulman olemista määritetyllä alueella. Tehorele mittaa tehoa virran ja jännitteen avulla. Epäsymmetriareleet voivat suojauskohteesta riippuen mitata esimerkiksi kolmivaiheverkon virran tai jännitteen vastakomponenttia, joka saadaan mittamuuntajien erikoiskytkentöjen avulla (numeerisen releen tapauksessa laskennallisesti). Mitattu suure johdetaan sitten virta- tai jännitereleeseen, joka toimii, kun aseteltu laukaisuarvo ylitetään. (Mörsky 1993)

Differentiaalirele, eli erovirtarele, mittaa virtojen erotusta. Yleisimmin differentiaalirelettä käytetään komponenttien, kuten muuntajien tai kiskojärjestelmien, suojaukseen, jolloin esimerkiksi kiskoon menevä virta ja sieltä lähtevä virta on helppo mitata. Joissain tapauksissa relettä käytetään myös johtosuojauksessa, mutta tällöin vaaditaan viestiyhteys johdon eri päissä mitattavien tietojen siirtoon. Releen toiminta perustuu suojausalueelle menevän ja sieltä lähtevän virran erotuksen mittaamiseen. Normaalisti virrat ovat samansuuruisia, mutta vikatapauksessa näin ei ole ja rele antaa laukaisukäskyn, kun erovirta on aseteltua suurempi. Differentiaalireleen haittapuoli on epäselektiivisen laukaisun mahdollisuus virtamuuntajien kyllästyessä. Tämän välttämiseksi on olemassa erikoiskytkentöjä, joilla ilmiön tapahtumista voidaan ehkäistä ja asia voidaan ratkaista myös valitsemalla sopivat virtamuuntajat. Suomessa käytetään virtamuuntajia, jotka on varustettu remanenssin poistavalla ilmaraolla, jolloin ongelmaa kyllästymisestä ei ole (Haarla 2008).

Distanssirele mittaa johdolla kulkevaa virtaa ja johdon alkupäässä olevaa jännitettä, joiden avulla se pystyy havaitsemaan johdolla olevan vian. Distanssirelettä käytetään johtosuojauksessa ja sitä käsitellään laajasti luvussa 4.

3.1.5 Reletyypit

Nykyään kaikki valmistettavat releet ovat mikroprosessoriin perustuvia numeerisia releitä, joissa samaan yksikköön on integroitu kaikki suojaussovelluksessa tarvittavat suojaustoiminnot. Samaan kokonaisuuteen on yhdistetty myös käyttö-, automatiikka-, rekisteröinti- ja tiedonsiirtotoiminnot. Sähköverkon komponenttien elinkaari on usein hyvin pitkä ja tästä syystä myös vanhemman

tyyppisiä releitä on vielä käytössä joissakin sähköverkon osissa. Suomen kantaverkossa kaikkia reletyyppisiä on vielä käytössä, mutta mekaanisia releitä ei ole enää useita (Koivisto 2010).

Ensimmäisenä kehitetyt, toiminnaltaan täysin mekaaniset, releet koostuvat liikkuvista osista, jotka kääntyvät virtojen aiheuttamien magneettisten voimien johdosta ja näin tekevät kytkentätoimintoja esimerkiksi vapauttamalla suoraan katkaisijan laukaisujousen mekaanisesti. Sähkömekaaniset releet voivat olla kytkettyinä joko suoraan primääripiiriin tai mittamuuntajien kautta toisiopiiriin. Mekaaniset releet vievät melko paljon tilaa ja ovat asetteluiltaan epätarkkoja. Releet toimivat melko luotettavasti, kunhan niitä huolletaan ja koestetaan säännöllisesti, jotta niiden liikkuvat osat eivät jäykisty. (Mörsky 1993)

Seuraava kehityssaskel oli siirtyminen mekaanisista releistä tasasuuntaajareleisiin ja sen jälkeen staattisiin releisiin. Ensin mainituissa mittaavan osan muodostaa herkkä kiertokäämikela, joka toimii tasavirralla. Tästä syystä vaihtovirta täytyy ensin tasasuunnata. Tasasuuntaus tehdään sovitusmuuntajan jälkeen alemmalla jännitetasolla. Sovitusmuuntaja toimii samalla kiertokäämikelan suojana, koska se kyllästyy suurilla virroilla. (Mörsky 1993)

Staattiset releet liitetään sovitusmuuntajan välityksellä mittamuuntajien toisiopiiriin. Varsinainen mittausta tapahtuu elektroniikan avulla ja releen käyttöjännite tuodaan releelle erillisellä apusähköliitännällä. Staattisilla releillä päästään huomattavasti parempaan tarkkuuteen kuin mekaanisilla releillä ja ne vievät myös vähemmän tilaa. (Mörsky 1993)

Mikroprosessorireleiden liitäntä mittamuuntajiin toteutetaan vastaavasti kuten staattisissa releissä. Mitatut suureet muutetaan releessä digitaaliseen muotoon ja laskenta tehdään numeerisesti. Kideohjatun kellon ja digitaalitekniikan ansiosta releiden asettelut voidaan tehdä erittäin tarkasti. Mikroprosessorireleissä suojaustoiminnot voidaan tehdä hyvin monipuolisiksi ja erilaisten loogisten toimintojen toteuttaminen on helppoa. Logiikan avulla voidaan esimerkiksi parantaa suojaustasoa tai estää väärien toimintojen tapahtumista. (Mörsky 1993)

3.2 Kantaverkon suojausmenetelmät

Tässä kappaleessa esitellään lyhyesti mitä releitä verkon eri osien suojauksessa käytetään, jotta lukijalle muodostuu kokonaiskuva kantaverkon suojauksen monimuotoisuudesta. Generaattoreiden ja muuntajien suojauksen osalta mainitaan vain pääkohdat. Sähköasemien komponenttien suojaukseen perehdytään hieman tarkemmin, koska ne liittyvät osaltaan myös johtosuojaukseen, joka on työn kannalta keskeinen aihealue. Johtosuojausta käsitellään omana kokonaisuutenaan seuraavassa luvussa.

3.2.1 Generaattoreiden ja tehomuuntajien suojausmenetelmät

Suuret generaattorit ovat kalleimpia ja tärkeimpiä sähköverkon komponentteja ja siksi niiden suojaus on erittäin monipuolista ja käytössä on paljon erilaisia suojia, muun muassa ylivirta-, differentiaali-, taajuus-, jännite- ja epäsymmetriareleitä. Sähköisten releiden lisäksi generaattoreita valvotaan myös mekaanisilla laitteilla, kuten takometrillä, jolla mitataan generaattorin pyörimisnopeutta.

Myös tehomuuntajat ovat tärkeitä ja kalliita komponentteja, joten niidenkin suojaus on varsin monipuolinen ja sisältää yleensä vastaavia releitä kuin generaattorisuojaus lukuun ottamatta taajuusrelettä. Muuntajien erikoisuus on kaasusuoja eli Buchholz -rele, joka tarkkailee muuntajan kaasunmuodostusta. Kaasurele mahdollistaa muuntajaa uhkaavan vian havaitsemisen jo ennen vakavan vian tapahtumista. Mikäli öljyputkeen alkaa kerääntyä kaasua, esimerkiksi osittaispurkauksien takia, rele antaa hälytyksen, jolloin voidaan tehdä tarkastustoimenpiteitä ja mahdollisesti irrottaa muuntaja verkosta hallitusti. Kaasun muodostuksen ollessa voimakasta rele kuitenkin laukaisee muuntajan heti irti verkosta. Kaasurele toimii myös mekaanisena releenä muuntajan sisäisissä eristeivioissa, joissa käämien sähkömekaaniset voimat aikaansaavat muuntajaöljyn nopean painemuutoksen ja sitä kautta öljysyöksyn kaasureleen lävitse, jolloin rele laukaisee muuntajan verkosta välittömästi.

3.2.2 Kiskosuojaus ja katkaisijavikasuojaus

Sähköasemien kiskosuojat ja katkaisijavikasuojat ovat asemalla tapahtuvia vikoja varten. Kiskosuojaus voidaan periaatteessa jättää myös johtosuojina käytettävien distanssireleiden toisen vyöhykkeen tehtäväksi, mutta tehokkaan verkon käytön mahdollistamiseksi ja suurien vaurioiden estämiseksi on järkevää varustaa sähköasemien kiskot erityisillä kiskosuojilla, jolloin suojauksesta saadaan nopeampi ja selektiivinen. Toisaalta kiskovikoja sattuu melko harvoin ja erillisen kiskosuojan käyttö tuo mukanaan riskin virheellisestä suojauksen toiminnasta esimerkiksi asetteluvirheen tai virtamuuntajan kyllästymisen takia. Tästä syystä joidenkin mielestä kiskosuojausta ei ole tarpeellista toteuttaa lainkaan (Anderson 1999). Mikäli kiskovian hidas laukaisu aiheuttaa epästabiiliuden, niin kiskosuoja tarvitaan. Samoin kaksoiskiskojärjestelmän käyttö edellyttää kiskosuojien käyttöä, koska tässä järjestelmässä viallisen kiskon irrottaminen ei poista yhtäkään johtoa käytöstä (Mörsky 1993). Kiskosuojan puuttuminen tässä järjestelmässä sen sijaan aiheuttaa kaikkien johtojen irtoamisen, jolloin kaksoiskiskojärjestelmästä ei ole hyötyä kiskovian sattuessa. Suomessa kiskosuojaus on kaikilla 400 kV:n asemilla ja joillakin 110 kV:n asemilla (Haarla 2008).

Kiskosuojauksen toteutukseen on eri vaihtoehtoja, jotka yleensä perustuvat differentiaalireleisiin. Myös muita, joskin hieman erikoisempia, vaihtoehtoja on olemassa, kuten suuntavertoreleisiin perustuva kiskosuojauksen toteutusperiaate (Anderson 1999).

Katkaisijavikasuojaus tarkoittaa suojausta, joka toimii siltä varalta, että katkaisija ei laukaisukäskystä huolimatta aukene. Ellei katkaisija laukaisukäskystä huolimatta aukene, antaa katkaisijavikasuoja käskyn kaikille sen kiskon katkaisijoille, johon viallinen johto on kytketty. Silmukoidussa verkossa laukaisukäsky lähetetään myös vasta-aseman distanssireleelle, joka laukaisee välittömästi, mikäli se on havahtunut. Johtovika aiheuttaa koko aseman pimennyksen, mikäli katkaisija ei toimi eikä katkaisijavikasuojausta ole. Tämä johtuu siitä, että johtosuojauksen varasuojausvyöhykkeen katkaisijat sijaitsevat naapuriasemilla. Katkaisijavikasuojaus voidaan tarvita myös siitä syystä, että vikavirrat johdoilla saattavat olla pieniä. Kun asemalla on monta johtoa, vikavirta muilla johdoilla voi olla niin pieni, että vain viallisen johdon releet havahtuvat. Jos viallisen johdon katkaisija ei toimi eikä katkaisijavikasuojausta ole, mikään ei erota vikaa verkosta. Katkaisijavikasuoja toimii myös katkaisijan ja virtamuuntajan välissä olevassa viassa, jolloin laukaisukäsky tulee kiskosuojalta. (Haarla 2008)

3.2.3 Kompensointilaitteiden suojaus

Kompensointilaitteita varten vaaditaan myös omat suojausjärjestelmänsä, koska järjestelmässä kulkevat vikavirrat voivat aiheuttaa esimerkiksi sarjakondensaattoreihin liian suuria jänniterasituksia. Lisäksi myös rinnakkaiskompensointilaitteisiin voi tulla vikoja, joiden johdosta kyseinen laite täytyy kytkeä irti verkosta.

Rinnakkaiskondensaattorien rakenne asettaa tiettyjä vaatimuksia niiden suojaukselle. Kondensaattorit nimittäin koostuvat useammasta sarjaankytketystä kondensaattoriyksiköstä, jotka taas koostuvat useammasta rinnankytketystä yksittäisestä kondensaattorista. Sisäiset viat voidaan näin ollen poistaa kondensaattoriyksiköiden sulakkeiden avulla, jotka yksinkertaisesti kytkvät vikaantuneen komponentin irti rinnankytkennästä. Liitântäkiskojen suojaukseen riittää yleensä ylivirtasuojaus. Myös epäsymmetriasuojausta tarvitaan, koska usean (yksikkö)kondensaattorin ollessa vioittunut, muille saman ryhmän kondensaattoreille aiheutuu ylijännite. Epäsymmetriasuojaus voidaan toteuttaa joko ylivirta- tai ylijännitereleen avulla. (IEEE 1991)

Sarjakondensaattoreiden suojausta tarvitaan suojaamaan kondensaattoria ulkopuolisista vioista johtuvilta ylivirroilta. Kondensaattorin rinnalla käytetään yleensä metallioksidivaristoria, joka alkaa johtaa, mikäli kondensaattorin yli oleva jännite nousee liian suureksi. Jännitteen nousu

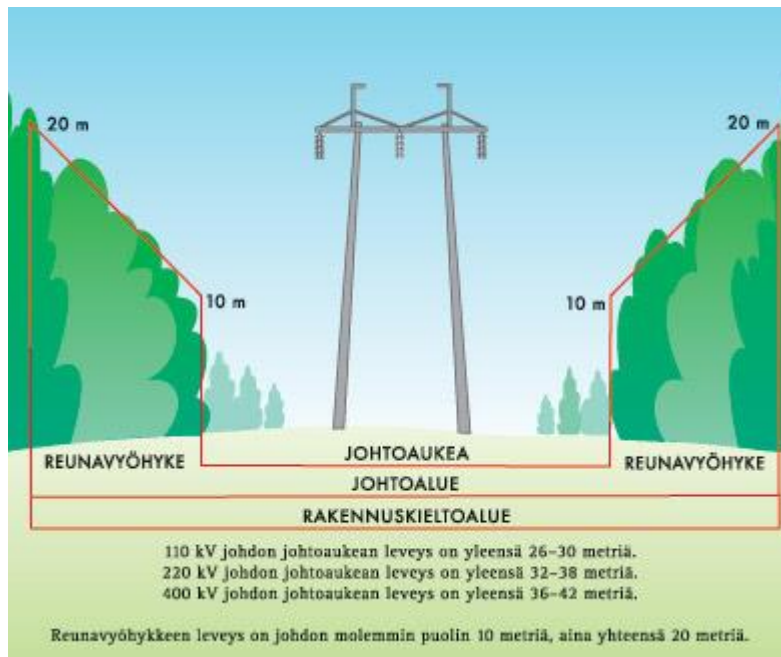
aiheutuu siis kondensaattorin läpi kulkevasta virrasta. Mikäli varistorin virta kasvaa liian suureksi, kytketään erityisesti tähän tarkoitukseen suunnitellun katkaisijan avulla kondensaattorin ohituspiiri kiinni, jolloin virta kulkee kondensaattorin ohi. Releenä tässä voidaan käyttää normaalia ylivirtarelettä. Fingridin sarjakondensaattorien suojauksessa käytetään ylivirtareleillä käänteisaikahidastusta, joka tarkoittaa, että laukaisu tapahtuu sitä nopeammin, mitä suurempi virta kondensaattorin lävitse kulkee. Haittapuolena kondensaattorin ohikytkenässä on siirtojohtoon merkittävä siirtokapasiteetin pieneneminen, minkä takia kondensaattorin nopea takaisinkytkentä on tärkeää, koska sillä voi olla vaikutusta verkon stabiiliuteen ääritilanteissa, kuten aiemmin todettiin kappaleessa 2.2.4 (kuva 2.3).

Reaktorien suojauksessa puolestaan ei ole tarvetta suojata komponentteja ulkopuolisten vikojen aiheuttamilta virroilta tai jännitteiltä, vaan reaktorisuojauksen tehtävänä on vikojen havaitseminen reaktorissa ja muuntajan siinä tertiääripiirissä, johon reaktori on kytketty. Kuivareaktorien suojauksessa voidaan käyttää ns. maadoitusmuuntajaa, jonka toisiopiiriin on maadoitusvastuksen yli olevaa jännitettä kytketty mittaamaan ylijänniterele. Reaktorisuojaus voidaan toteuttaa myös differentiaalirelettä tai vastakomponenttia mittaavaa relettä käyttäen (IEEE 2006). Suomen kantaverkossa ei käytetä maadoitusmuuntajia reaktorisuojauksessa, vaikka reaktorit ovat kuivareaktoreita. Suojaus on sen sijaan toteutettu ylivirta-, epäsymmetria- ja maasulkujänniterelettä apuna käyttäen (Koivisto 2010).

3.3 Kantaverkon johtosuojaus

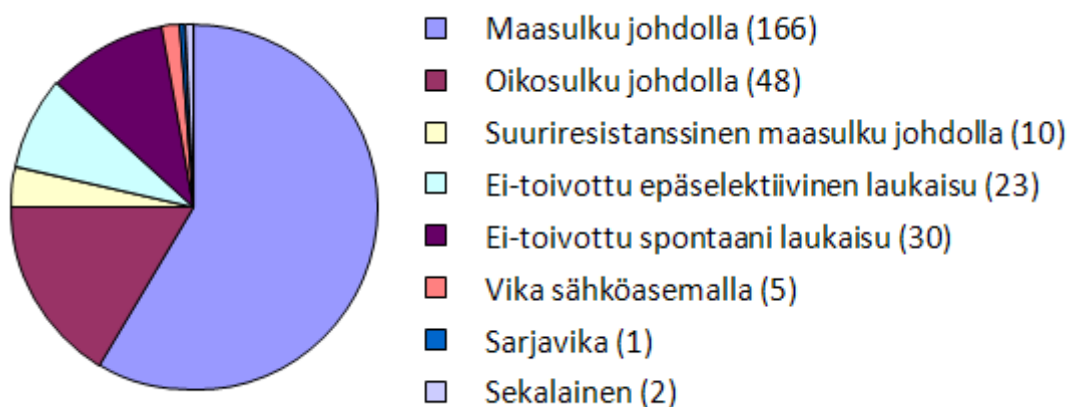
3.3.1 Johtoviat

Johtosuojauksen tehtävä on havaita johdolla sattuvat viat ja irrottaa vioittunut johto verkosta. Johdot kulkevat maastossa pitkiä matkoja ja ovat alttiina sääilmiöille ja muille ulkoisille häiriön aiheuttajille. Siirtojohtojen johtoaueat mitoitetaan siten, että esimerkiksi johdon vieressä kaatuvat puut eivät yletä johtoihin ja näin aiheuta maasulkua. Näin menettelemällä vältetään keskijänniteverkossa yleiset puuviat.



Kuva 3.1. Siirtoverkon johtoaukan ja reunavyöhykkeen mitoitus.(Fingrid 2010)

Puuvikojen ollessa harvinaisia yleisin vian syy kantaverkossa onkin salamanisku. Salamanisku aiheuttaa johdolla yleensä maasulun, kun salaman johdolle aiheuttaman syöksyjännitteen suuruus ylittää eristimien jännitelujuuden ja näin ollen maadoitetun pylvään ja jännitteisen johtimen välille syttyy valokaari. Mikäli salamavirta on suuri ja pylväsmaadoitus huono, salama voi aiheuttaa myös 2- tai 3-vaiheisen maaoskusulun. Kuvan 3.2 tilastoista nähdään, että (pieniresistanssiset) maasulut ja oikosulut kattavat lähes kolme neljäsosaa kaikista kantaverkon johtovioista. Vikojen painottumisesta kesään ja vikojen ohimenevästä luonteesta voidaan päätellä, että suurin osa näistä vioista on juuri salamoinnin aiheuttamia.

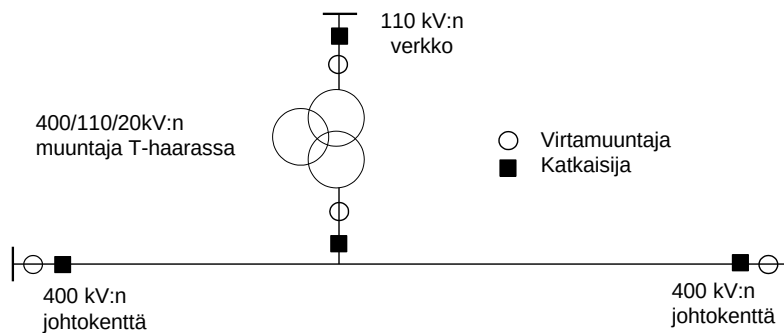


Kuva 3.2. Suomen kantaverkon 400 kV:n johtojen vikatyypit vuosina 1983-2002 (Haarla 2008).

3.3.2 Johtosuojauksen periaatteet

Silmukoidussa verkossa selektiivistä suojausta ei saa muodostettua johdon yhden pään virtaan perustuvilla releillä, kuten säteittäisessä verkossa. Tästä johtuen kantaverkon johtosuojauksessa käytetään pääasiassa distanssireleitä, joiden avulla saavutetaan hyvä selektiivisyys. Vvyöhykkeisiin perustuvan asettelun ansiosta saadaan samalla muodostettua varasuojaus vasta-aseman kiskovioille sekä sen takana tapahtuville johtovioille. Distanssireleiden yhteydessä käytetään monesti viestiyhteyksiä, mutta releet toimivat myös omana yksikkönään ilman viestiyhteyksiä eli releen toiminta ei ole kiinni niistä. Viestiyhteyksillä voidaan joissain tapauksissa (vika lähellä johdon vastapäätä) lisätä laukaisun nopeutta ja varmistaa selektiivisyys. Niitä voidaan käyttää hyväksi myös aiemmin käsitellyn katkaisijavikasuojauksen yhteydessä. Toisin kuin differentiaalireleen tapauksessa, distanssireleellä toteutetussa suojauksessa viestiyhteyden toimimattomuus ei aiheuta suojauksen toimimattomuutta, vaan mahdollisesti ainoastaan hidastaa sitä.

Suomessa 400 kV:n johdoilla on pääsuojana yleensä kaksi distanssirelettä viestiyhteyksin. Sarjakompensoituilla johdoilla sekä lyhyillä ja T-haarajohdoilla toisena pääsuojana on distanssireleen sijaan yleensä differentiaalirele, koska distanssireleen ulottuman asettelu edellä mainitun kaltaisille johdoille on hankalaa. T-haarajohdolla tarkoitetaan johtoa, jossa johtoon liittyy asemien välillä kolmas johto, jonka päässä ei ole varsinaista asemaa vaan muuntaja, jonka ylä- ja alajännitepuolella on katkaisijat (kuva 3.3).



Kuva 3.3. T-haarajohdon havainnekuva. Kahden sähköaseman väliseen johtoon liittyy haarajohto, jonka päässä ei ole sähköasemaa vaan muuntaja, jonka ylä- ja alajännitepuolilla on katkaisija.

Suurivikaresistanssiset viat havaitaan herkillä nollavirtareleellä, joka on kytketty vaihevirtoja mittaavien virtamuuntajien summakytkentään (Haarla 2008). Herkillä nollavirtareleellä tarkoitetaan sitä, että releen virta-asettelu on pieni. Laukaisu toimii hidastetusti, jotta distanssisuojaus ehtii toimia ensin. Virta-asettelu pohjautuu vanhoissa

sähköturvallisuusmääräyksissä olleeseen herkkyyksivaatimukseen, jonka mukaan suojauksen on havaittava maasulut, joiden resistanssi on 500 Ω tai vähemmän (Haarla 2008). Tämä tarkoittaa sitä, että 400 kV:n verkossa virta-asettelun on oltava pienempi kuin 231 ampeeria. Tätä suurempia nollavirtoja saattaa esiintyä, vaikka vikaa ei ole, esimerkiksi muuntajan jännitteiseksi kytkemisen aikana. Muuntajan kytkentävirroista johtuvat turhat laukaisut estetään 100 Herzin taajuuden kytkentävirrann tunnistavien salpareiden avulla (Koivisto 2010).

110 kilovoltin verkossa käytetään suuriresistanssisia vikoja varten suunnattua maasulkurelettä, joka mittaa nollavirrann lisäksi nollajännitettä. Tehollisesti maadoitetussa 400 kV:n verkossa nollajännite on kuitenkin pienivirtaisella vialla hyvin pieni, eikä suuntarele toimi. Tästä syystä Suomen kantaverkossa käytetään 220 kV:n ja 400 kV:n jännitetasoilla herkkiä nollavirtareleitä. Tehollisesti maadoitetussa rengasverkossa nollavirta on suurin viallisella johdolla. Näin ollen selektiivinen toiminta saadaan aikaan käyttämällä nollavirtareleessä käänteisaikahidastusta, jolloin suurimman nollavirrann mittaava rele antaa laukaisukäskyn ensimmäisenä.

Automaattinen jälleenkytkentä tarkoittaa johdon automaattista takaisin kiinnikytkemistä katkaisijan avaustoiminnon ja jännitteettömän väliajan jälkeen. Jälleenkytkennän tekee jälleenkytkentärele, joka antaa katkaisijalle kiinniohjauskäskyn asetellun ajan kuluttua siitä, kun jokin suojarele on antanut katkaisijalle avauskäskyn. Avauskäsky siis käynnistää jälleenkytkentäreleen, joka on kaksiportainen. Ensimmäinen porras on niin sanottu pikajälleenkytkentä (PJK), joka tehdään Suomen kantaverkon 400 kV:n johdoilla johdon toisessa päässä 2,4 sekunnin kuluttua ja toisessa päässä 2,6 sekunnin kuluttua katkaisijan avaamisesta. Huomattavasti lyhyempi jännitteetön väliaika riittäisi eristeenä olevan ilman jännitelujuuden palautumisen kannalta ja aiemmin kantaverkossa käytettiin 400 ja 600 millisekunnin jännitteetöntä väliaikaa. Simulointien perusteella on kuitenkin havaittu, että pysyvän vian tapauksissa pidempi väliaika voi joissakin tilanteissa nopeuttaa yhteiskäyttöverkon 0,3 Hz:n heilahtelujen vaimenemista. Stabiiliuden kannalta takaisinkytkentäajalla ei juuri ole merkitystä, koska verkon täytyy joka tapauksessa kestää johdon pysyvä irtoaminen, joten se kestää myös hieman pidemmän viiveen ennen johdon takaisinkytkentää. Lisäksi pidempi väliaika edesauttaa PJK:n onnistumista, joten on nähty hyvänä vaihtoehtona siirtyä käyttämään pidempää PJK:n jännitteetöntä väliaikaa. Mikäli PJK epäonnistuu, tehdään aikajälleenkytkentä (AJK), jonka viive eli virrattomien väliaika voi vaihdella 30 sekunnin ja kolmen minuutin välillä. AJK:n aikaa johdon toisessa päässä on yleensä pidennetty, jotta peräkkäiset kytkennät pysyvää vikaa vasten voitaisiin minimoida (Mörsky 1993). Suomen kantaverkon 400 kV:n johdoilla AJK:n aika on yleensä johdon toisessa päässä 30 sekuntia ja toisessa 35 sekuntia.

Jälleenkytkennät ovat käytössä vain johtovioille, eli niitä ei käytetä esimerkiksi kisko- tai muuntajavioissa. Suomessa PJK on kantaverkossa käytössä vain hidastamattomille laukaisuille ja AJK tehdään hidastettujen laukaisujen ja epäonnistuneen PJK:n jälkeen.

Jälleenkytkentöjen virrattomana väliaikana katkaisijan eripuolien jännitteet saattavat joutua epätahtiin, jolloin kiinnikytöntä ei voida tehdä. Tämän vuoksi käytetään tahdissaolon valvojaa, joka sallii katkaisijan kiinnikytöntän vain, mikäli jännitteet katkaisijan molemmilla puolilla ovat tahdissa, eli niiden amplitudi-, vaihekulma- ja taajuuserot ovat sallituissa rajoissa. Tämän lisäksi jännitteiden täytyy olla suuremmat kuin aseteltu minimijännite. Tahdissaolon valvojaan liittyy jännitevahti, joka sallii kiinnikytöntän, kun johdolta puuttuu jännite. Jännitevahtitoiminto voidaan haluttaessa kytkeä pois päältä. Suomessa tahdissaolon valvoja on käytössä kaikissa 400 kV:n jälleenkytkennöissä johdon toisessa päässä. 110 kV:n verkossa toiminto on käytössä vain joillakin voimalaitosjohdoilla. (Haarla 2008)

4 Distanssireleet

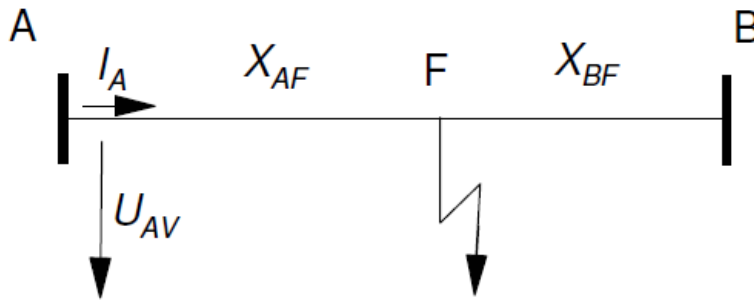
4.1 Toiminta ja asettelut

4.1.1 Toimintaperiaate

Distanssireleen toiminta perustuu releen sijoituspaikassa mitattavaan jännitteeseen ja virtaan, joista saadaan ohmin lain mukaan laskettua impedanssi. Sanotaan, että mitataan releen näkemää impedanssia. Toisaalta impedanssi on tietylle johdolle vakio, sen ominaisuutta kuvaava piirre, joka tiedetään jo entuudestaan. Mitattava impedanssi kuitenkin riippuu syötettävästä virtapiiristä², eli virtapiirin muuttuessa muuttuu myös releen näkemä impedanssi. Normaalissa käyttötilanteessa johdolle menevä virta on pääasiassa pätövirtaa, koska virtapiirissä on resistiivistä kuormitusta. Tällöin jännitteen ja virran välinen vaihekulma on pieni, ja impedanssin itseisarvo melko suuri. Oletetaan, että johdolla on vika, jonka vikaresistanssi on pieni. Tällöin virtapiiri on lähes täysin induktiivinen, koska se koostuu pelkästään johdosta, jonka reaktanssi on paljon suurempi kuin resistanssi. Vikavirran ja jännitteen vaihekulma on siten lähes 90 astetta ja niiden järjestys määräytyy vian suunnan perusteella. Mikäli vika on releen etupuolella, virta on jännitettä jäljessä. Releen takana olevassa viassa virta on jännitettä edellä.

Vian aikana releen mittaaman impedanssin itseisarvo pienenee, koska virran itseisarvo on vikavirran vaikutuksesta suuri ja jännite on pieni, koska oikosulussa jännite vikapaikassa on nolla. Toisaalta asiaa voidaan ajatella siten, että rele näkee pienen ja reaktiivisen impedanssin, koska virtapiirinä on vain releen ja vikapaikan välinen johto. Tällöin rele siis mittaa johdon impedanssia. Kun johdon ominaisimpedanssi pituutta kohti (Ω/km) tiedetään, voidaan mitatun impedanssin avulla laskea vikapaikan etäisyys mittauspisteestä. Tästä ominaisuudesta tulee releen nimikin, joka viittaa siihen, että rele mittaa vikapaikan etäisyyttä. Selvennetään asiaa kuvan 4.1 avulla. Johdon resistanssi on siirtoverkoissa huomattavasti pienempi kuin reaktanssi, joten resistanssin vaikutus voidaan jättää huomioimatta ja käsitellä impedansseja pelkkinä reaktansseina.

² Verkossa, johon liittyy tuotantoa ja kulutusta monessa eri pisteessä, tehon suunta vaihtelee. Tehoa siis syötetään monesta suunnasta, joten ei voida määritellä kuormaa, jota tietty asema syöttää eikä näin ollen voida sanoa, että rele mittaisi kuorman impedanssia vaan puhutaan yleisesti virtapiiristä.



Kuva 4.1. *Distanssireleen toimintaperiaate (Haarla 2008). Pisteessä F tapahtuu 3-vaiheinen oikosulku, jonka resistanssi on 0Ω , jolloin vikapaikan jännite on nolla. Asemalla A oleva rele mittaa johdolle menevän virran I_A ja vaihejännitteen U_{AV} avulla vikareaktanssin $X_M = X_{AF} = U_{AV} / I_A$.*

Impedanssin laskeminen muuttuu monimutkaisemmaksi, mikäli vika on yksivaiheinen maasulku, kaksivaiheinen oikosulku tai kaksoismaasulku. Tilanne hankaloituu entisestään, mikäli vikaresistanssi on suurempi kuin nolla. Jos vikaresistanssi on suuri, ei distanssirele pysty havaitsemaan vikaa lainkaan, koska vikavirrassa on silloin resistiivinen komponentti ja releen toimintapiste ei välttämättä siirry releen toimintakuvion sisäpuolelle (ks. 4.2.1). Tyypilliset distanssireleet pystyvät yleensä havaitsemaan vikoja, joiden resistanssi on korkeintaan 20 ohmia (Haarla 2008).

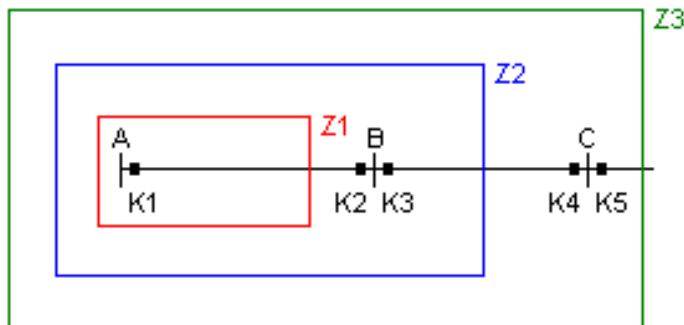
4.1.2 Vyöhykkeet

Distanssireleen asettelut perustuvat vyöhykkeisiin, joita on yleensä kolme (1-, 2- ja 3-vyöhyke). Näiden lisäksi on yleensä vielä erillinen havahtumisvyöhyke, jonka ulottuma on vielä 3-vyöhykettä pidempi ja joka ulottuu myös taaksepäin.

Kun releen näkemä impedanssi tulee uloimman vyöhykkeen eli havahtumisvyöhykkeen alueelle, rele havahtuu. Havahtuminen tarkoittaa sitä, että releen aikaa mittaava laskuri käynnistyy, mutta rele ei anna vielä mitään laukaisukäskyä. Muille paitsi ensimmäiselle vyöhykkeelle on aseteltu oma viive (hidastus), jonka kuluttua rele antaa laukaisukäskyn, mikäli impedanssi on kyseisen vyöhykkeen sisällä. Laukaisukäsky annetaan välittömästi, jos sisemmän vyöhykkeen hidastusaika on kulunut umpeen impedanssin ollessa ulommalla vyöhykkeellä ja tämän jälkeen impedanssi siirtyy kyseessä olevalle sisemmälle vyöhykkeelle. Kaikkien vyöhykkeiden laskuri siis käynnistyy heti, kun impedanssi ylittää havahtumisvyöhykkeen rajan ja vastaavasti nollautuu vasta, kun impedanssi siirtyy pois havahtumisvyöhykkeeltä, tai kun rele antaa laukaisukäskyn.

Releen ensimmäinen vyöhyke on ulottumaltaan pienin ja sen alueella rele laukaisee ilman tahallista hidastusta, eli sen toiminta-aika riippuu ainoastaan releen ominaisuuksista. Mekaanisilla

releillä päästään jopa 20 millisekunnin toiminta-aikaan, mutta mikroprosessorireleellä toiminta-aika on tyypillisesti hieman pidempi, yleensä kuitenkin korkeintaan 50 ms. 2-vyöhykkeen hidastus on yleensä noin 0,4 sekuntia ja 3-vyöhykkeen 1–2 sekuntia. Myös havahtumisvyöhyke antaa laukaisukäskyn, mikäli releen mittaama impedanssi pysyy havahtumisalueella yhtäjaksoisesti asetellun ajan, joka on yleensä kuitenkin melko pitkä, tyypillisesti kolmesta neljään sekuntia. Vyöhykkeiden tyypilliset ulottumat suhteessa johtopituuksiin on esitetty kuvassa 4.2.



Kuva 4.2. *Distanssireleen vyöhykkeiden ulottumat on merkitty tunnuksilla Z1, Z2 ja Z3. Sähkös asemia on merkitty kirjaimin A, B ja C. K1–K5 ovat sähkös asemilla olevia katkaisijoita, joita ohjaavat releet R1–R5 (sama sijainti katkaisijoiden kanssa).*

Ensimmäistä vyöhykettä ei voida selektiivisyyden takaamiseksi ulottaa suojaamaan koko johtosuutta A–B, koska vian sijaintia ei voida määrittää täysin tarkasti. Esimerkiksi, jos vyöhykkeen Z1 suojaus kattaisi koko johdon A–B, olisi olemassa vaara, että asemalla A oleva rele tulkitsisi lähellä asemaa B johdolla B–C tapahtuvan vian 1-vyöhykkeen viaksi ja laukaisisi katkaisijan viiveettä, joka tässä tilanteessa olisi väärä toiminto.

Hidastamattoman laukaisun saamiseksi kaikille johdon A–B vioille tarvitaan kyseisten releiden välille viestiyhteys. Vian sattuessa lähellä asemaa B johdolla A–B, katkaisijaa K2 ohjaava rele R2 antaa hidastamattoman laukaisukäskyn katkaisijalle K2, koska vika kuuluu sen 1-vyöhykkeeseen. Käytettäessä sallivaa aliulottuvaa toimintoa rele R2 lähettää samalla laukaisukäskyn myös aseman A releelle R1, joka on aseteltu laukaisemaan viiveettä, mikäli rele on havahtunut ja saa laukaisukäskyn releeltä R2. Tällöin johto saadaan kytkettyä irti nopeasti kummaltakin asemalta.

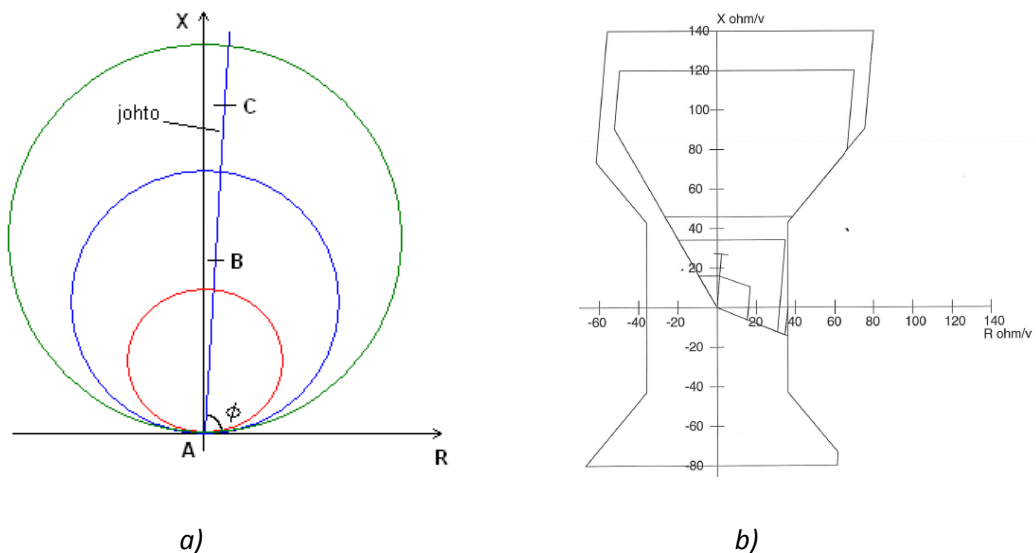
4.1.3 Toimintakuvio ja ulottuma

Distanssireleen vyöhykkeet määritellään R-X -tasossa, jossa releen sijaintipaikka kuvautuu origoon, ja josta myös suojattava johto lähtee eteenpäin positiivisen X-akselin suuntaan kulkien lähes akselin suuntaisesti. Kantaverkossa tyypillisillä johtolajeilla johdon kulma on noin 85 astetta

R-akseliin nähden. Kulma saadaan johdon ominaisresistanssin ja -reaktanssin suhteesta. Esimerkiksi Suomen 400 kV:n johdoilla verkossa yleisesti käytetylle 2-Finch-johdolle saadaan sijoittamalla johdon ominaisarvot $R = 0,027 \Omega/\text{km}$ ja $X = 0,324 \Omega/\text{km}$ kulman yhtälöön:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) = \arctan\left(\frac{0,324}{0,027}\right) \approx 85,2^\circ. \quad (1)$$

Kuva 4.3a havainnollistaa releen vyöhykkeiden ja johdon sijoittumista R-X -tasoon. Näin piirrettyjä vyöhykkeitä nimitetään yleensä releen toimintakuvioksi ja toimintakuvion sisäpuolista aluetta kutsutaan releen ulottumaksi. Vanhoissa sähkömekaanisissa releissä toimintakuvio koostuu aina sisäkkäisistä ympyröistä, kuten kuvassa 4.3a.



Kuva 4.3. a) Mekaanisen releen toimintakuvio. b) Tyypillinen numeerisen releen toimintakuvio. R-akselin suuntainen ulottuma on pienempi pienillä reaktanssin arvoilla, koska tällä alueella suuri kuormitusvirta saattaa aiheuttaa impedanssin liikkumisen lähemmäs X-akselia myös terveiden verkon tilanteessa.

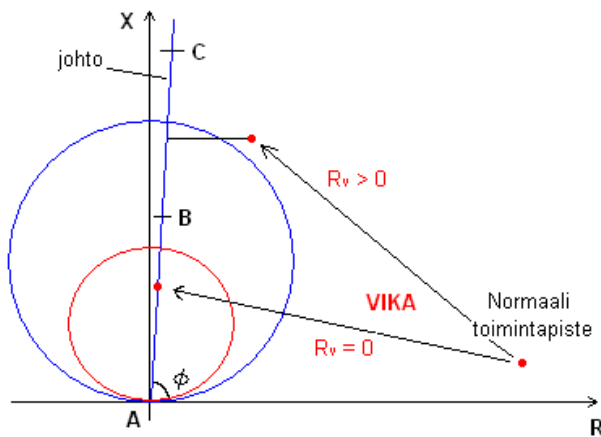
4.2 Ulottumaan vaikuttavat tekijät

4.2.1 Vikaresistanssin ja sivusyötön vaikutus

Distanssireleen ulottumaan vaikuttaa asettelujen lisäksi myös vikaresistanssi ja mahdolliset sivusyötöt. Kuvasta 4.4 voidaan havaita jo aiemmin mainittu asia, että suuri resistanssiset viat jäävät distanssireleeltä havaitsematta. Kun impedanssin resistiivinen komponentti on suuri, releen mittaama impedanssi voi jäädä toimintakuvion ulkopuolelle, vaikka todellisen vikapaikan

etäisyyden perusteella johdon impedanssi olisi kuvion sisällä. Tällöin releen ulottuma on lyhyempi kuin vikaresistanssiltaan pienissä vioissa. Numeerisissa releissä tätä ongelmaa voidaan vähentää, koska toimintakuvion muoto voidaan valita suorakulmioksi (Kuva 4.3 b), jolloin impedanssin siirtyminen sivuun johdolta ei vaikuta ulottumaan. R-suuntaista ulottumaa ei kuitenkaan voida kasvattaa kovin paljon, koska suurilla kuormitusvirroilla releen näkemän impedanssin itseisarvo pienenee ja toimintapiste siirtyy lähemmäs X-akselia.

Hankaluutta aiheuttaa myös se, että toisin kuin kuvassa 4.4 vikaresistanssi ei yleensä pysy vaakasuorassa. Johdon eri päiden jännitteet ovat tehonsiirrosta johtuen eri kulmissa, mikä aiheuttaa vikaresistanssiin X-suuntaisen komponentin. Tällöin ulottuma kasvaa siinä päässä johtoa, jossa tehon suunta on johdolle päin ja vastakkaisessa päässä ulottuma lyhenee. (Koivisto 2010)

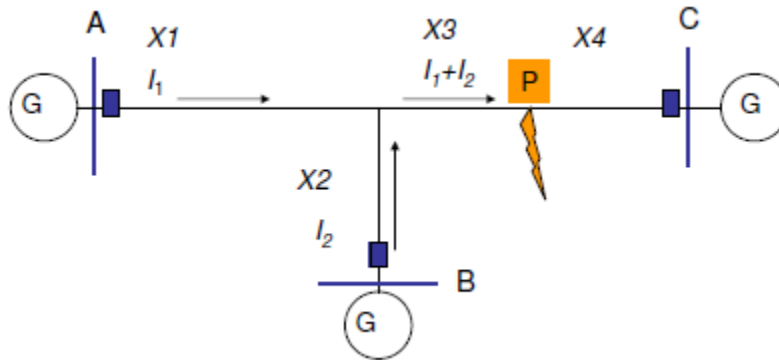


Kuva 4.4. Toimintapiste siirtyy vian aikana releen toimintakuvion sisään, jolloin rele antaa laukaisukäskyn joko heti (vyöhyke 1, punainen ympyrä) tai viivästettynä (muut vyöhykkeet). Kuvassa on esitetty kaksi vikatilannetta eri kohdissa johtoa erilaisin vikaresistanssein. Mikäli vikaresistanssi R_v on suurempi kuin nolla, niin releen mittaama impedanssi jää resistanssin verran johdolta sivuun, jolloin releen ulottuma pienenee.

Mikäli suojattavalla johdolla on sivusyöttöjä, ulottuma muuttuu haarajohdon syöttämän virran takia. Sivusyötöllä tarkoitetaan tilannetta, jossa vikavirtaa tulee vikapaikkaan myös muualta kuin johdon päissä olevilta asemilta. Tällöin releen mittaama vikapaikan etäisyys on pidempi kuin todellinen etäisyys, koska releen näkemä reaktanssi on

$$X_1 + \frac{I_1 + I_2}{I_1} X_3 = X_1 + KX_3. \quad (2)$$

X_1 on johdon alkupään reaktanssi ja X_3 on johdon loppupään reaktanssi. I_1 on johdon alkupään virta ja I_2 on haarajohdon virta (kuva 4.5). Todellisen virran ja releen mittaaman virran suhdetta merkitään kertoimella K ja sitä kutsutaan sivusyöttökertoimeksi, koska sen suuruudesta riippuu kuinka paljon releen näkemä reaktanssi poikkeaa todellisesta arvosta (Mörsky 1993). Toisin kuin vikaresistanssin tapauksessa tässä virhetekijä aiheutuu suoraan X -komponenttiin, joten ongelma on samanlainen toimintakuvion muodosta riippumatta.



Kuva 4.5. Sivusyötön vaikutus distanssireleen ulottumaan (Haarla 2008). Rele mittaa virtaa I_1 , vaikka todellisuudessa myös asema B syöttää vikavirtaa. Rele näkee tästä johtuen reaktanssin X_3 suurempana kuin mitä se todellisuudessa on.

4.2.2 Sarjakompensoinnin vaikutus

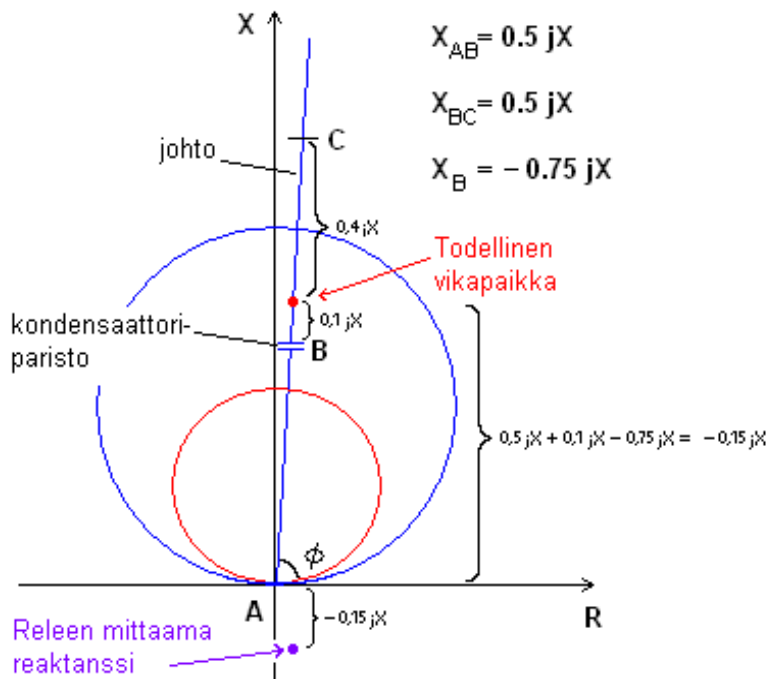
Pitkillä siirtojohdoilla käytetyt sarjakondensaattorit vaikuttavat myös oleellisesti releen ulottumaan, koska kondensaattori lyhentää johdon sähköistä pituutta. Tästä syystä sarjakompensoiduilla johdoilla distanssireleiden 1-vyöhyke joudutaan asettelemaan lyhemmäksi kuin mitä johdon todellisen pituuden (reaktanssin) perusteella aseteltaisiin. Kompensointiasteesta riippuu, kuinka suurta osaa kompensoidun johdon sähköinen pituus vastaa johdon todellisesta pituudesta, joka saadaan johdon ominaisarvojen perusteella. Kompensointiaste voi olla esimerkiksi 50 %, jolloin kondensaattorin reaktanssi on noin puolet kompensoitavan johdon reaktanssista. Suomen kantaverkossa pitkien johtojen kompensointiaste on noin 50–75%.

Sarjakondensaattoriparisto voi joskus olla pois verkosta esimerkiksi huollon takia tai kondensaattorin suojaus voi vikavirran seurauksesta oikosulkea kondensaattorin kipinävälin tai ohituskatkaisijan kautta, kuten aiemmin luvussa 3.2.3 todettiin. Tällöin johdon sähköinen pituus muuttuu vastaamaan johdon kompensoimatonta pituutta, jonka jälkeen releen 1-vyöhyke ulottuu esimerkiksi 50 prosenttisesti kompensoidulla johdolla alle puoleen johdon koko pituudesta. Nopea laukaisu voidaan kuitenkin saavuttaa viestiyhteyden avulla, joka onkin välttämätön sarjakompensoiduilla johdoilla nopean laukaisun aikaansaamiseksi, sillä distanssireleiden

itsenäinen hidastamaton laukaisu on Suomen kantaverkossa otettu sarjakompensoituilla johdoilla pois käytöstä (Koivisto 2010).

Kompensoinnin aiheuttaman negatiivisen reaktanssin takia rele voi joissain tapauksissa nähdä todellisuudessa etupuolellaan olevan vian negatiivisena reaktanssina. Tilanne on esitetty kuvassa 4.6, jossa releen ja vikapaikan välinen yhteenlaskettu reaktanssi on negatiivinen, jolloin releen mittauksen perusteella vikapaikka näyttäisi olevan releen takana. Sarjakompensoituun verkkoon tarkoitettu distanssirele toimii kuitenkin oikein tässäkin tilanteessa, koska se mittaa vian suunnan ennen vikaa vallinneen jännitteen avulla (Koivisto 2010).

Kompensoinnin aiheuttamien ongelmien vuoksi toisena pääsuojana kompensoituilla johdoilla käytetään differentiaalireleitä, koska sarjakompensointi ei vaikuta sen toimintaan millään tavalla.



Kuva 4.6. Kompensoinnin vaikutus releen mittaamaan reaktanssiin. Kompensointipariston kapasitanssi on suurempi kuin releen ja vikapaikan välisen johdon induktanssi, joten releen mittaama reaktanssi on negatiivinen ja vika näyttää laskennan perusteella olevan releen takana.

Sarjakompensoidun johdon suojauksessa tulee kaiken muun lisäksi huomioida kondensaattoriin jäävä varaus. Mikäli kompensoitu johto irrotetaan verkosta siten, että kondensaattori on varautuneena, saattaa siihen varastoitunut jännite aiheuttaa ongelmia, kun johto kytketään uudelleen jännitteiseksi. Tästä syystä johtosuojan laukaistessa pyritään sarjakondensaattorin kipinävälit pakkoliipaisemaan tai ohituskatkaisijat avaamaan ennen johtokatkaisijoiden

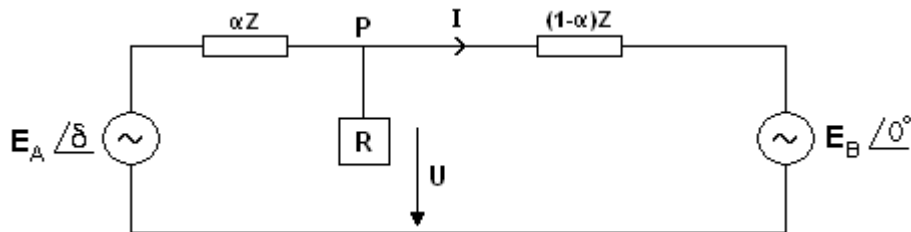
avautumista. Liipaisukäsäky käynnistetään johdon varrella olevilla asemilla, kun distanssireleiden johdon suuntaisen havahtumisen signaalit ovat saapuneet sarjakondensaattoriasemalle. Johtosuojat laukaisevat vasta kun signaali vasta-asemalta on saapunut. (Koivisto 2010)

4.3 Tehoheilahtelujen vaikutukset

4.3.1 Distanssireleen toiminta tehoheilahteluissa

Tehoheilahtelujen aikana verkon jännitteet, johdoilla kulkevat virrat ja tehot heilahtelevat. Tilanne saattaa aiheuttaa distanssireleen näkemän impedanssin siirtymisen toimintakuvion sisään ja koska heilahtelut ovat luonteeltaan hitaita (ks. 2.2.3), impedanssin siirtyminen pois alueelta voi kestää yli sekunnin. Tällöin vaarana on releen tekemä virheellinen laukaisu, joka voi tapahtua vaikka impedanssi siirtyisi vain releen uloimmalle vyöhykkeelle. Näin on, koska heilahtelujen hitaudesta johtuen impedanssi voi olla toimintakuvion sisällä niin kauan, että vyöhykkeen suuresta laukaisuviiveestä huolimatta virheellisen laukaisu tapahtuu.

Distanssireleen mittaamaa impedanssia voidaan tutkia laskuesimerkin avulla, jossa verkkona käytetään kuvan 4.7 yksinkertaista kaksikonemallia. (Mörsky 1993)



Kuva 4.7. Distanssireleen toiminta tehoheilahtelutilanteessa. E_A ja E_B ovat generaattoreiden sähkömotoriset voimat, αZ ja $(1-\alpha)Z$ ovat johtojen impedansseja, I on johdolla kulkeva virta ja U on pisteessä P vaikuttava, eli releen mittaama, jännite. (Mörsky 1993)

Yksinkertaisuuden vuoksi oletetaan, että kaikilla impedansseilla on sama vaihekulma ja releen sijoituskohta P jakaa generaattoreiden välisen impedanssin Z osiin αZ ja $(1-\alpha)Z$. Olkoon Z_{mit} pisteessä P sijaitsevan releen mittaama impedanssi. Kuvan perusteella saadaan

$$E_A \angle \delta - E_B = IZ, \quad (3)$$

$$E_A \angle \delta = U + \alpha IZ \quad \text{ja} \quad (4)$$

$$Z_{mit} = \frac{U}{I}. \quad (5)$$

Ratkaistaan U yhtälöstä (4) ja I yhtälöstä (3) ja sijoitetaan ne yhtälöön (5), saadaan

$$\frac{Z_{mit}}{Z} = \frac{(1-\alpha) \frac{E_A}{E_B} \angle \delta + \alpha}{\frac{E_A}{E_B} \angle \delta - 1} . \quad (6)$$

Yhtälöstä (6) nähdään, että releen mittaama impedanssi riippuu johdon impedanssin lisäksi tahtikoneiden sähkömotorisesta voimasta ja niiden välisestä kulmasta.

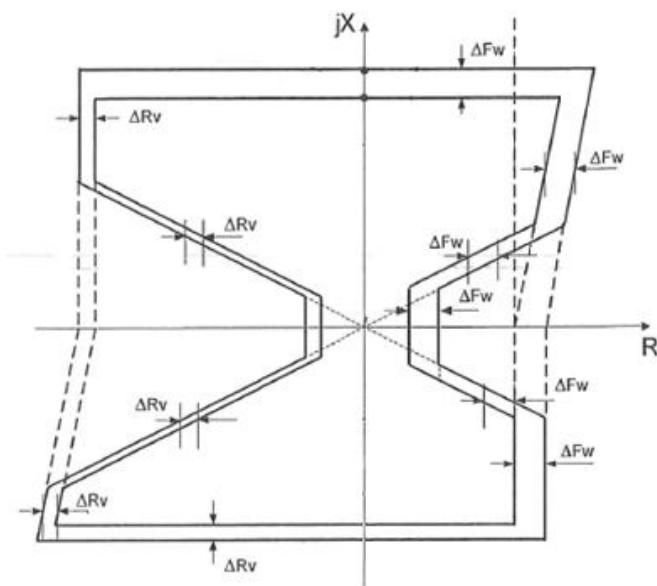
Todellisessa verkossa generaattoreita ja johtoja on paljon, joten releen näkemän impedanssin laskeminen analyttisesti on käytännössä mahdotonta. Tästä syystä asiaa kannattaa tutkia dynamiikkalaskennan avulla, koska muiden laskennassa kiinnostavien suureiden lisäksi voidaan samalla selvittää releen mittaaman impedanssin suuruus.

4.3.2 Heilahtelusalpa

Heilahtelusalpa on toiminto, jolla tehoheilahtelujen aiheuttamat virheelliset reletoinnot voidaan estää. Mikroprosessorireleissä toiminto on helppo toteuttaa ohjelmallisesti, mutta staattisissa ja mekaanisissa releissä tarvitaan erillinen heilahtelusalparele. Salvan toiminta voi perustua erilaisiin menetelmiin, esimerkiksi impedanssin muutosnopeuden mittaamiseen havahtumisalueen rajalla, tai virran hetkellisarvon tutkimiseen. On olemassa myös suuretta $U \times \cos(\phi)$ mittaavia salpareleitä, joiden mittaustapa perustuu jännitteen itseisarvon sekä virran ja jännitteen välisen vaihekulman muutoksen tarkkailuun.

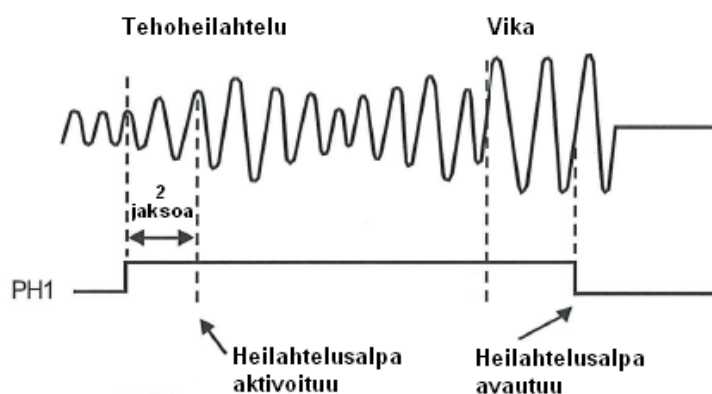
Tehoheilahtelujen erottaminen vikatilanteista impedanssin muutosnopeuden avulla perustuu siihen, että vioissa impedanssin siirtyminen uuteen toimintapisteeseen tapahtuu erittäin nopeasti, kun taas tehoheilahteluissa muutosnopeus on pieni. Nopea siirtyminen vikatapauksissa johtuu siitä, että vikavirran nousunopeus on suuri. Tehoheilahtelujen todettiin puolestaan jo aiemmin (2.2.3) olevan luonteeltaan hitaita.

Vyöhykkeisiin perustuvassa heilahtelun tunnistuksessa rele laskee impedanssin muutosnopeuden mittaamalla ajan, joka kuluu impedanssin siirtyessä sisemmän ja ulomman vyöhykkeen väliin jäävän alueen lävitse (kuva 4.8). Rele siis mittaa impedanssin muutosnopeuden juuri ennen impedanssin siirtymistä releen toimintakuvion sisään. Mikäli impedanssin kulkuaika välivyöhykkeen yli on suurempi kuin salpareleeseen aseteltu aika, niin salpa aktivoituu ja estää laukaisun. Salpa nollataan, kun impedanssi siirtyy pois havahtumisvyöhykkeeltä, jolloin laukaisu on jälleen mahdollinen, mikäli impedanssi tulee uudelleen alueelle suuremmalla muutosnopeudella.



Kuva 4.8. Erään distanssireleen heilahtelusalvan toimintakuvio (ABB 2007, s.226). Rele mittaa aikaa, joka kuluu impedanssin siirtyessä kapean vyöhykkeen läpi. Vyöhykkeen leveys voi olla erisuuri eteenpäin kuin taaksepäin. Vyöhykkeen leveyttä merkitään kuvassa symbolein ΔR_v (leveys taaksepäin) ja ΔF_w (leveys eteenpäin).

Toinen mahdollinen heilahtelusalvan toteuttamistapa on virran hetkellisarvon muutokseen perustuva mittaus. Eräessä releessä heilahtelu havaitaan vertaamalla virran amplitudia kahden edellisen jakson amplitudiin. Taajuuden ollessa 50 Hz jakson pituus on 20 millisekuntia. Mikäli virran kasvu jatkuu kolmen jakson ajan, rele tulkitsee tilanteen aiheutuvan heilahteluista ja aktivoi heilahtelusalvan. (Areva 2006, s.5–24)



Kuva 4.9. Virran hetkellisarvon mittaukseen perustuvan heilahtelusalvan toiminta. PH1 on signaali, joka aktivoi heilahtelusalvan (alhaalla = ei heilahtelua, ylhäällä = heilahtelua). Jakson pituus riippuu verkon taajuudesta, ollen 50 Hz:n verkossa 20 ms. Rele vertaa virran amplitudia aina kahden jakson ajan, joten salvan aktivoitumiseen ja avautumiseen kuluu siis 40 ms.

4.3.3 Heilahtelusalvan käyttö

Heilahtelusalvan toteutustavasta riippuen se voi joissakin tilanteissa estää laukaisun myös silloin, kun laukaisu pitäisi sallia. Tällainen tilanne saattaa syntyä impedanssin muutosnopeutta välivyöhykkeellä mittaavan releen (kuva 4.8) tapauksessa silloin, kun vika tapahtuu heilahtelujen aikana sen jälkeen kun salparele on aktivoitunut ja estää laukaisun. Virheellinen toiminta johtuu siitä, että rele ei mittaa impedanssin liikkeitä enää havahtumisalueen sisällä, vaan pelkästään impedanssin saapuessa alueelle. Virran hetkellisarvoa mittaavassa releessä salpa avautuu vian syntyessä, koska virran mittausta jatkuu salvan aktivoitumisen jälkeenkin (kuva 4.9). Maasulun tapauksessa salpa voidaan avata käyttämällä nollavirtareleeltä saatavaa signaalia, joka indikoi maasulusta. Prosessorireleissä nollavirran mittausta tapahtuu samalla releellä, joten erillistä nollavirtarelettä ei tarvita (Suontausta 2010).

Hyvien puolien lisäksi heilahtelusalvan käyttöön liittyy siis myös riskitekijöitä. Tästä syystä joissakin verkkoyhtiöissä on päädytty ratkaisuun, että heilahtelusalpaa ei käytetä releissä lainkaan. Toiset verkkoyhtiöt puolestaan käyttävät heilahtelusalpaa kaikissa releissä. Suomessa heilahtelusalpa on otettu käyttöön vain sellaisissa paikoissa, joissa tehoheilahtelut voivat laskennan perusteella olla tarpeeksi suuria distanssireleen virheellisen toiminnan aiheuttamiseksi. Suojaus on toteutettu siten, että samalla 400 kV:n johdolla on johdon kummassakin päässä distanssireleen lisäksi joko differentiaalirele tai toinen distanssirele, jonka heilahtelusalvan toimintaperiaate on erilainen kuin toisessa distanssireleessä (Suontausta 2010). Differentiaalireleeseen tehoheilahtelut eivät vaikuta ja kahden distanssireleen tapauksessa vähintään toinen rele toimii myös heilahtelujen aikana tapahtuvassa viassa, koska se tunnistaa tilanteen, jossa toimintakuvion sisällä oleva impedanssi on lakannut muuttumasta (vian takia). Näin ollen se pystyy antamaan laukaisukäskyn, vaikka toisen (vain toimintakuvion rajalla impedanssin muutosnopeutta mittaavan) releen heilahtelusalpa olisi aktiivinen vian sattuessa ja siten estäisi laukaisukäskyn antamisen.

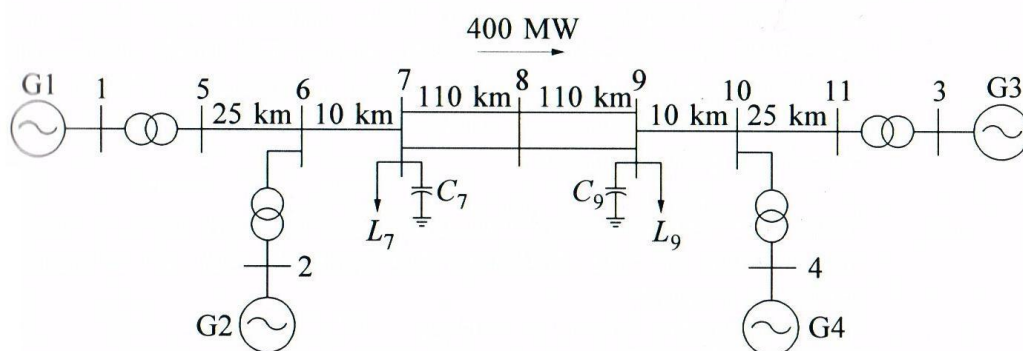
5. Simulointi PSS/E -ohjelmistolla

Työni päätavoite oli kehittää PSS/E -laskentaohjelmiston tueksi toiminto, jonka avulla saadaan tietoa releiden toiminnasta dynamiikkasimulaation yhteydessä. Halutun toiminnon tai työkalun toteuttamistapaa ei ollut etukäteen määritelty, vaan tarkoituksena oli kehittää helposti käytettävä ja päivitettävissä oleva toiminto jollakin toteutettavissa olevalla tavalla. Näin ollen työn suorittaminen vaati perehtymistä ohjelmistolla laskemiseen ja sen ominaisuuksiin. Tässä luvussa esitellään laskentaan liittyviä vaiheita ja laskennasta saatavia tuloksia, sillä niiden ymmärtäminen on lähtökohta uuden releyökalun kehittämiseksi.

5.1 Yleistä

5.1.1 Verkkomallin luominen

Ennen kun verkostolaskenta voidaan aloittaa, täytyy ohjelmistolle antaa tiedot laskettavasta verkosta eli luoda niin sanottu verkkomalli. Käytännössä isot verkot ja niiden verkkomallit ovat kehittyneet ja kasvaneet vuosien saatossa. Verkkomalleja pidetään tallennettuina tiedostoihin, joista ne voidaan ladata ohjelmistoon. Käytettävissä olleet pohjoismaisen verkon mallit olivat kuitenkin uuden toiminnon kehittämiseen liiankin monimutkaisia, joten tein työtäni varten aluksi oman yksinkertaisen verkkomallin käyttäen pohjana Kundurin kirjassaan esittämää yksinkertaista verkkoa (Kundur 1994, s.813). Tämä verkko on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1. Yksinkertainen siirtoverkko, jossa on neljä generaattoria. Generaattorit G1 ja G2, sekä kuormat L7 ja C7 ja näiden väliset lyhyet johdot muodostavat alueen 1. Vastaavanlainen alue muodostuu verkon toiseen päähän. Alueet on yhdistetty kahden rinnakkaisen siirtojohdon välityksellä. Tehonsiirto alueiden välillä eli siirtojohdoilla on 400 MW.

Verkkomalli luodaan ohjelmistoon joko suoraan tekstitiedostoon kirjoittamalla tai taulukkomuodossa käyttöliittymän avulla antamalla komponenteille niiden ominaisuuksia kuvaavien parametrien arvot.

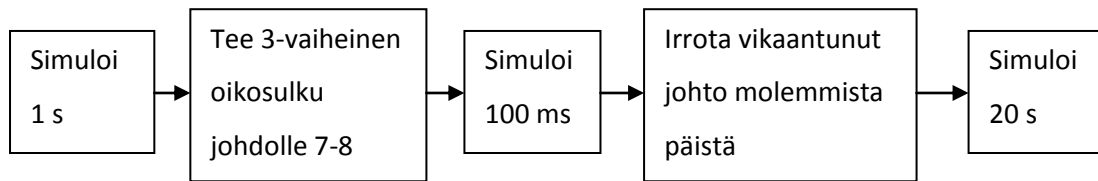
5.1.2 Tehonjakolaskenta

Kun verkkomalli on valmis, voidaan laskea verkon tehonjako. Tehonjakolaskennan tarkoitus on ratkaista verkon johdoilla siirtyvät tehot sekä solmupisteiden jännitteiden itseisarvot ja kulmat, kun tuotannot ja kuormat sekä verkon impedanssit ja admittanssit tiedetään. Tavallaan siis haetaan hetkellinen tasapainotila, jossa johdoilla kulkevat ja generaattorien tuottamat tehot sekä generaattoreiden ja jännitteiden kulmat vastaavat kyseistä tehonjakotilannetta. Mikäli jokin verkon osa muuttuu, esimerkiksi johto irtoaa tai kuormitus kasvaa, niin laskenta on tehtävä uudelleen, koska tehonjakotilanne muuttuu. Tehonjakolaskenta on aina tehtävä uudelle verkkotilanteelle ennen kuin voidaan aloittaa verkon dynamiikkalaskenta. PSS/E -ohjelmistossa on käytettävissä viisi iteratiivista menetelmää tehonjaon ratkaisemiseksi; kolme erilaista Newton-Raphsonin menetelmää sekä kaksi Gauss-Seidelin menetelmää. Eri menetelmien suppenemisominaisuudet riippuvat käsiteltävien verkkojen ominaisuuksista, minkä takia niiden käytettävyys vaihtelee tapauksesta riippuen. Kundurin verkkomallin tapauksessa tehonjako suppenee nopeasti kaikilla Newton-Raphsonin menetelmillä, kun taas Gauss-Seidelin menetelmä vaatii huomattavasti enemmän iteraatiokierroksia. Sen jälkeen kun on olemassa tehonjakotilanteeltaan ratkaistu verkkomalli, voidaan siirtyä eteenpäin dynamiikkalaskentaan.

5.2 Dynamiikkalaskenta

5.2.1 Yleistä

Dynamiikkalaskennalla tarkoitetaan verkon suureiden, kuten jännitteiden itseisarvojen sekä kulmien, virtojen ja tehojen laskemista verkon muutosilmiöiden aikana. Tyypillinen esimerkki dynamiikkalaskennasta on tehoheilahtelujen ja niiden vaimenemisen tutkiminen vian seurauksena tapahtuneen johdon irtikytkennän jälkeen. Laskennan suorittaminen koostuu sarjasta erilaisia toimenpiteitä, joiden avulla määritetään ensin verkon dynaaminen malli ja luodaan pohja laskennalle. Tämän jälkeen valitaan vielä tulostiedostoon tallennettavat suureet, ennen kuin varsinainen simulaatio voidaan aloittaa. Simulaatiota ohjataan joko manuaalisesti komentoriviltä tai valintaikkunoiden kautta tai ajamalla eräänlainen komentosarjatiedosto (PSAS -tiedosto, ks. Liite 1), johon on ohjelmoitu etukäteen haluttu simulaatioajo. Simulaation aikana ohjelma laskee kaikkien verkon suureiden arvon valitun aika-askeleen välein (esim. 5 ms). Simulaation eteneminen voi olla esimerkiksi kuvan 5.2 mukainen.



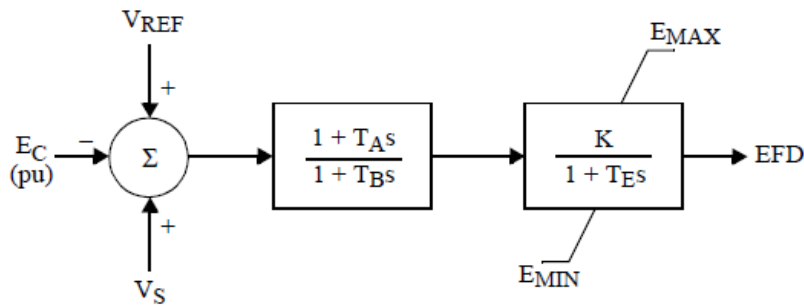
Kuva 5.2. Simuloinnin eteneminen käsky kerrallaan periaatetasolla.

Simulaation tulokset tallentuvat ohjelman luomaan tulostiedostoon, jota tarkastellaan simuloinnin jälkeen erillisellä ohjelmalla. Seuraavaksi esitellään laskennan eri vaiheita tarkemmin, koska työssä toteutetun reletyökalun ymmärtäminen ja esittely vaatii dynamiikkalaskennan vaiheiden ja komponenttien tuntemista.

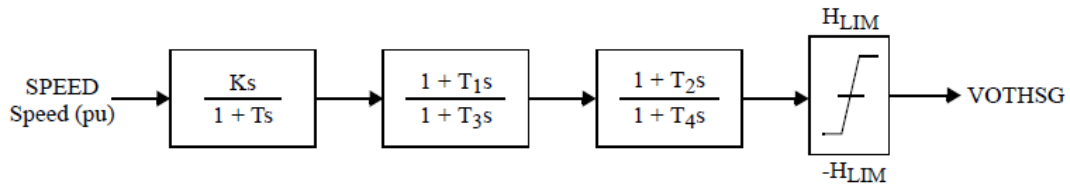
5.2.2 Dynamiikkamalli

Laskennan pohjana olevassa tehonjakoverkkomallissa on kuvattu komponenttien jatkuvan tilan ominaisuuksia, mutta muutosilmiöiden laskemiseksi tarvitaan näiden lisäksi tietoa komponenttien dynaamisesta käyttäytymisestä. Käyttäytymiseen vaikuttavat esimerkiksi generaattoreiden, niiden magnetoinnin ja lisästabiloinnin ominaisuudet. Nämä tiedot syötetään omaan dynamiikkatiedostoon (DYR -tiedosto, liite 1), jonka avulla ohjelma muodostaa laskenta-algoritmit muutostilanteita varten. Ohjelmistoon kuuluu varsin laaja dynamiikkakirjasto, jonka tarjoamia eri verkkokomponenttien dynamiikkamalleja voidaan suoraan käyttää simuloinneissa, kun niille annetaan kyseiseen malliin sopivat parametrit. Kirjastossa on malleja muun muassa erilaisille generaattoreille ja niiden tehon- ja jännitteensäätäjille. Lisäksi käyttäjä voi itse luoda omia malleja, mikäli sopivaa mallia ei löydy suoraan kirjastosta. Kirjastoon kuuluu myös erilaisia suojarelemalleja, kuten esimerkiksi sarjakondensaattoreiden ylivirtasuojauksessa käytettäviä suojareleitä sekä johtosuojina käytettäviä distanssireleitä.

Dynamiikkamallin luomisen ongelmakohdaksi muodostuu helposti oikeiden parametrien löytäminen. Erilaiset magnetointi- ja stabilointimallit on kuvattu ohjelmiston käsikirjoissa lohkokaavioina, joissa on erilaisia parametreja, joiden arvot riippuvat laitteiden fyysisistä ominaisuuksista. Aina näitä mallien parametrien arvoja ei ole saatavilla, jolloin joudutaan tekemään oletuksia. Voidaan esimerkiksi valita samat arvot, joita käytetään samantyyppisellä parametreiltään tunnetulla voimalaitoksella. Käyttämässäni verkkomallissa on neljä identtistä generaattoria, joiden magnetointijärjestelmien ja stabiloidijien dynaaminen käyttäytyminen on kuvattu kuvien 5.3 ja 5.4 lohkokaavioissa. Mallien valinnassa käytettiin pohjana Kundurin esimerkissään antamia lohkokaavioita ja parametreja (Kundur 1994, s. 814).

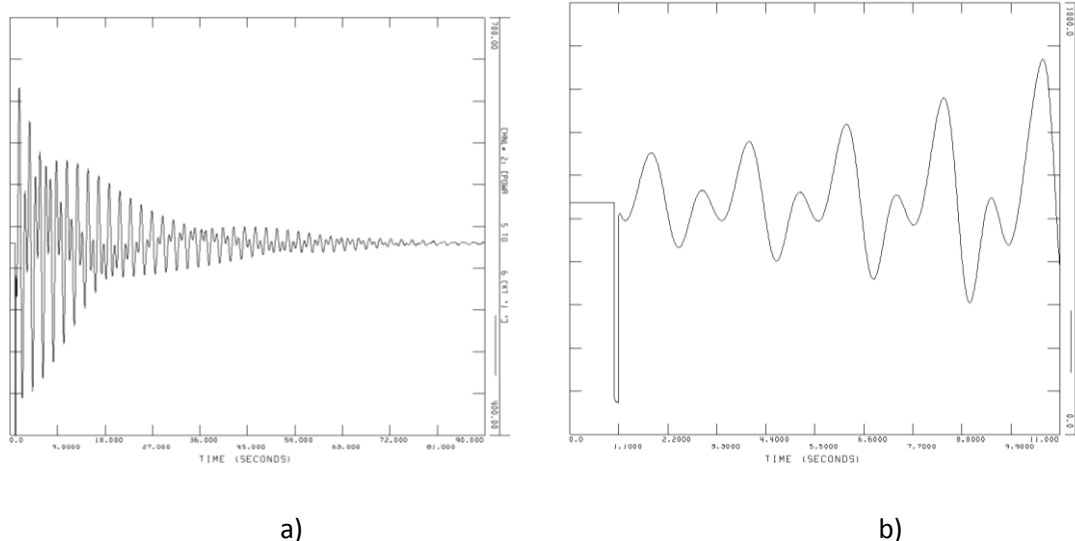


Kuva 5.3. Erään PSS/E:n dynamiikkakirjastosta löytyvän generaattorin magnetointimallin lohkokaavio (Siemens 2004, s. G-89). E_C on mitattu generaattorin napajännite, V_{REF} on halutun napajännitteen arvo ja V_S on stabilointipiirin syöttämä ”korjaustermi”. Parametrit T_i ovat malliin liittyviä aikavakioita ja K on vahvistus. Ulostulona saadaan generaattorin magnetointipiiriin syötettävä jännite EFD.



Kuva 5.4. Erään PSS/E:n dynamiikkakirjastosta löytyvän stabilointipiirin lohkokaavio (Siemens 2004, s. F-17). Sisäänmeno on generaattorin nopeus (Speed) ja ulostulo magnetoinnin ohjauspiiriin syötettävä jännitteen korjaustermi V_{OTHSG} (V_S kuvassa 5.2). K_s on vahvistus ja parametrit T_i ovat aikavakioita. H_{LIM} ja $-H_{LIM}$ ovat korjaustermien raja-arvot, joita suurempia arvoja ulostulo ei voi saada.

Ohjelman mallikirjastosta valmiina löytyvät mallit poikkeavat usein hieman siitä, mikä oikea malli on, tai ne on voitu esittää hieman eri muodossa. Näin oli myös tässä tapauksessa, sillä kirjan lohkokaaviossa signaaleiden summaus on toteutettu eri tavalla kuin ohjelman malleissa. Kirjan lohkokaaviossa (Kundur 1994, s.815) signaali E_t (vastaa kuvan 5.3 signaalia E_C) tulee summaimeen positiivisena ja V_{ref} negatiivisena, kun taas ohjelman tarjoamassa magnetointimallissa on päinvastoin (kuva 5.3). Tästä syystä magnetoinnin toimintaa täytyi tutkia parametrien merkkiä muuttamalla, jotta stabiloinnin oikea toiminta voitiin varmistaa. Stabiloinnin tarkoitus on siis pyrkiä vaimentamaan generaattorin nopeusheilahteluja moduloimalla magnetointia. Kuvassa 5.5 on esitetty tehoheilahtelujen kehittymistä johtovian jälkeen eri stabilointiparametrien arvoilla. Lähtötilanteen siirtotilan siirtoa on pienennetty noin sataan megawattiin, jotta verkko ylipäättään säilyy stabiilina johtovian jälkeen.



Kuva 5.5. Tehoheilahtelut johdolla, kun generaattorin stabilointijärjestelmän vahvistusparametrin K arvot ovat dynamiikkamallissa itseisarvoiltaan samat, mutta etumerkki on eri. Kuvassa a) heilahtelut vaimenevat, vaikkakin hitaasti. Kuvassa b) heilahtelut kasvavat ja tahtikäynti menetetään. Stabilointipiiri toimii väärään suuntaan, koska vahvistus on negatiivinen.

Kun dynamiikkamalliin on koottu kaikki tarvittavat komponentit, voidaan verkon dynaaminen laskentamalli muodostaa ajamalla dynamiikkatiedosto aiemmin tehdyn jatkuvan tilan verkkomallin päälle. Tällöin ohjelma alustaa lähtötilanteen, jonka pohjalta voidaan lähteä tekemään varsinaista simulointia.

5.2.3 Mallien käyttämät vakiot ja muuttujat

Kaikki dynamiikkamallin sisältämät yksittäisten komponenttien mallit koostuvat vakioista ja muuttujista. Vakiot määritellään, kun malli luodaan ja ne määräävät mallin ominaisuudet. Algebralliset muuttujat puolestaan sisältävät tietoja suureista, jotka muuttuvat simuloinnin aikana laskentamallin määräämän algoritmin mukaan, mutta ne eivät vaikuta tuleviin järjestelmän tiloihin. Tällainen suure on esimerkiksi releen näkemä impedanssi. Tilamuuttujat ovat järjestelmän ominaisuuksiin liittyviä muuttujia. Ne muuttuvat järjestelmän mukana vastaavasti, kuten algebralliset tilat, mutta ne myös määrittelevät järjestelmän tulevat tilat. Tilamuuttujia voivat olla esimerkiksi generaattorin napajännite ja kulma.

Tilamuuttujien avulla muodostetaan tilaesitys siten, että dynaamisen järjestelmän matemaattinen malli kirjoitetaan fysiikan lakien avulla yhdeksi tai useammaksi, mahdollisesti korkea-asteiseksi, differentiaaliyhtälöksi. Sääntötekniikan termin tilaesitys on matemaattinen malli fysikaalisesta systeemistä. Matemaattisesti on mahdollista palauttaa monta yhtäaikaista korkea-asteista

differentiaaliyhtälöä ensimmäisen kertaluvun differentiaaliyhtälösystemiksi, mikä onkin tilaesityksen idea. Mikäli systeemin matemaattinen malli sisältää korkeamman kertaluvun yhtälöitä, tarvitaan siis useampia tilamuuttujia, jotta malli saadaan kuvattua ensimmäistä astetta olevien yhtälöiden avulla. (TKK 2010)

Tilamuuttujien valinta ei ole yksikäsitteinen, sillä monet eri tilamuuttujat voivat kuvata samaa mallia. Jokaisessa vaihtoehdossa tilamuuttujien määrän täytyy kuitenkin olla sama kuin mallin differentiaaliyhtälön kertaluku, tai, jos malliin kuuluu useampi yhtälö, niin yhtälöiden kertalukujen summa (TKK 2010). PSS/E-ohjelman käyttäjän ei kuitenkaan tarvitse huolehtia tilamuuttujien valinnasta, vaan tietyt suureet on etukäteen valittu tilamuuttujiksi.

5.2.4 Kanavien lisääminen

Ennen simuloinnin aloittamista on vielä määritettävä ne suureet, joista laskennan jälkeen halutaan saada tietoa. Tällaisia suureita voivat olla esimerkiksi kiskojen jännitteiden itseisarvot ja kulmat, generaattoreiden kulmat ja johdoilla kulkevat tehot. Ohjelma tallentaa tulostiedostoon vain niiden suureiden tiedot, jotka on valittu tallennuskanaviksi, joten kanavien valinta on välttämätöntä, jotta simuloinnista saadaan tuloksia.

Kanavat voidaan lisätä joko käsin tai automaattisesti eräänlaisen komentosarjatieoston eli IDEV -tiedoston (liite 1) avulla. Tärkeänä osana toteuttamaani reletyökalua on IDEV -tiedoston luonti IPLAN -kielellä (liite 1) toteutetun komentosarjaohjelman eli makron (liite 1) avulla. Kyseisen makron toiminta esitellään tarkemmin seuraavassa luvussa.

5.2.5 Simulointi

Simulaatiota ohjataan eteenpäin joko manuaalisesti komentoriviltä, valintaikkunoiden kautta tai suorittamalla PSAS -tiedosto (liite 1), johon on ohjelmoitu etukäteen haluttu simulaatioajo. Ohjelma tallentaa tulostiedostoon kaikkien tulostuskanaviksi määriteltyjen muuttujien arvot automaattisesti jokaisella simuloinnin ajanhetkellä.

Usein halutaan simuloida tietylle verkkotilanteelle useita erilaisia vikatilanteita, koska etukäteen ei tiedetä mikä on verkon stabiiliuden kannalta vaarallisin tilanne. Tällöin on kätevää käyttää apuna ohjelman niin sanottua PSAS -tiedostoa, jolloin yhdellä komentosarjalla saadaan simuloitua peräkkäin monta erilaista vikatilannetta, joista jokaisesta saadaan oma erillinen tulostiedosto. Vastaavasti PSAS -tiedoston avulla voidaan toteuttaa simulaatio, jossa kokeillaan saman vian vaikutusta erilaisilla tehonjakotilanteilla.

5.2.6 Tulosten käsittely

Tallennettavaa dataa kertyy paljon, koska simuloinnissa käytettävä aika-askel on hyvin pieni (esim. 5 ms), verkon tilaa simuloidaan yleensä kymmeniä sekunteja ja tulostuskanavia voi olla muutamia satoja. Suuresta datamäärästä johtuen tulosten suora numeerinen tutkiminen olisi työlästä.

Simulaation tuloksia käsitellään erillisellä PSSPLT -tulostusohjelmalla, jonka avulla voidaan tuottaa erilaisia graafisia esityksiä tuloksista. Graafinen tulosten tutkiminen osoittautuu kuitenkin hitaaksi vaihtoehdoksi silloin, kun halutaan saada kerralla simuloinnin keskeisimmät tulokset. Usein tuloksista ei olla kiinnostuneita hetkellisarvojen osalta, vaan halutaan esimerkiksi tietää, mikä on simulaatiossa tapahtuvien tehoheilahtelujen vaimennussuhde, tai missä on verkon matalin jännite simulaation aikana ja kuinka suuri se on. Vaimennussuhteen saaminen suoraan grafiikan avulla ei edes ole mahdollista ja minimijännitteen löytämiseksi jouduttaisiin piirtämään kaikkien solmujen jännitteet koko simulaation ajalta ja etsimään niistä pienin arvo jännitekäyriä vertailemalla.

Edellä esitetyn perusteella tulosten numeerinen analysointi on paras vaihtoehto. Tutkittavaa dataa on paljon ja laskelmat toistavat aina tiettyä rutiinia, joten tulostiedostoja on helpointa käsitellä makrojen avulla. Binäärimuotoisesta tulostiedostosta täytyy ensin muuntaa haluttu data tekstimuotoon PSSPLT -ohjelman aputoimintojen avulla, jonka jälkeen tekstimuodossa olevaa dataa voidaan analysoida makrojen avulla. Makrojen käytön hyöty on siinä, että lopputuloksena saatavasta yhteenvetotiedostosta nähdään helposti tärkeimmät simulaatiosta saadut tulokset.

6. Releiden toiminnan mallinnus

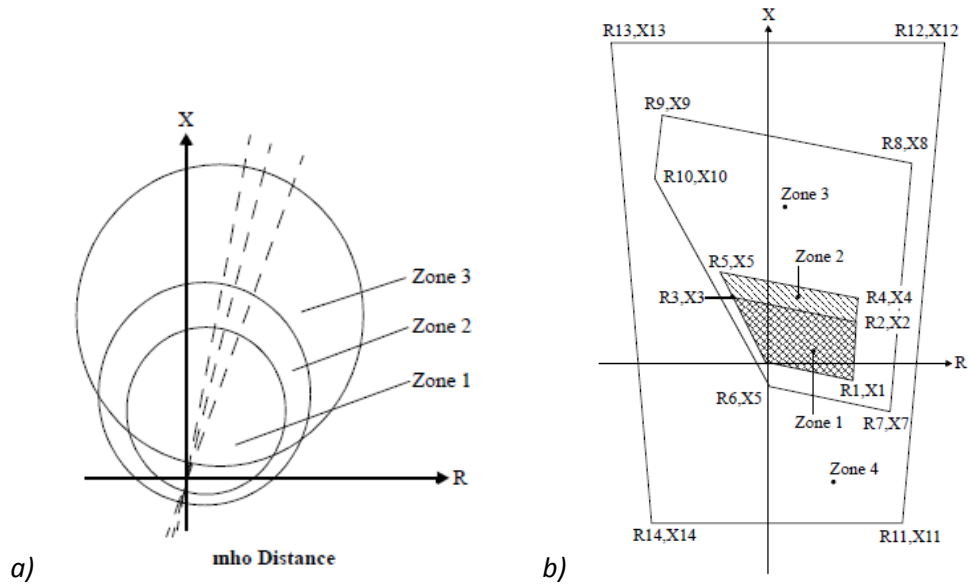
6.1 Relemallit

Reletoimintoja tarkkailevan työkalun toteuttamiseen annettiin Fingrid Oyj:n toimesta kaksi vaihtoehtoista toteuttamistapaa. Yksi vaihtoehto oli käyttää hyväksi ohjelmassa valmiiksi olevia relemalleja. Fingridin tapa tehdä simulointeja kuitenkin asetti toteutukselle sellaisen ehdon, että releiden ei haluta tekevän kytkentätoimenpiteitä simuloinnin aikana, vaan tavoitteena on ainoastaan saada tieto releen näkemästä impedanssista ja sen mahdollisesta käymisestä releen havahtumisalueella. Toinen mahdollinen ratkaisutapa oli rakentaa jonkinlainen oma ohjelma tai makro, jolla käsitellään simuloinnista saatavia tuloksia ilman relemallien käyttöä.

Fingridillä ei ollut käytetty PSS/E -ohjelman relemalleja, joten ensimmäiseksi piti kartoittaa minkälaisia malleja ohjelman mallikirjasto sisältää, mitä niiden käyttäminen edellyttää ja miten ne toimivat. Ohjelmiston käsikirjasta selvisi, että relemallit on toteutettu useista komponenteista, jotka ovat yhteydessä toisiinsa ja yhdessä muodostavat kokonaisuuden, joka simuloinnin kannalta näyttää ulospäin kokonaiselta suojausjärjestelmältä. Relemallit nimittäin sisältävät releyksikön lisäksi johtohaaran molemmissa päissä olevat katkaisijat, jotka releiltä ohjauskäskyn saatuaan kytkvät johdon irti verkosta. Yksinkertaisimmissa malleissa katkaisijat toimivat aina samaan aikaan, mutta on olemassa myös kehittyneempi malli, joka sisältää oman katkaisijan kummassakin päässä johtoa ja näiden välisen tiedonsiirtoyhteyden. Alkuvaiheessa ei ollut kuitenkaan järkevää lähteä tutkimaan relemalleja liian monimutkaisella mallilla, joten valitsin malliksi yksinkertaisen PSS/E:n distanssirelemallin (DISTR1), joka kuvaa ympyränmuotoisilla toiminta-alueilla varustettua distanssirelettä.

Edellä mainitun distanssirelemallin toimintaa tutkittiin lisäämällä relemalleja kuvassa 5.1 esitetyn Kundurin verkkomallin dynamiikkamalliin ja kokeilemalla mitä releet tekevät kun niiden valvomalle johdolle simuloidaan vikatilanne. Kyseistä relemallia voidaan käyttää kolmella erilaisella toimintamoodilla, joista kaikki toimivat periaatteessa samalla tavalla, mutta toimintakuviot voidaan saada hieman erilaisiksi eri moodien avulla. Yksi vaihtoehto on käyttää moodia, jossa jokaisen vyöhykkeen ulottuma ja keskipisteen sijainti voidaan määrittää toisistaan riippumatta. Toisessa vaihtoehdossa (reaktanssirele) vain 3-vyöhyke on ympyränmuotoinen. 1- ja 2-vyöhykkeet muodostetaan 3-vyöhykkeen kalotteina annettujen reaktanssin arvojen mukaan. Kolmannessa vaihtoehdossa vyöhykkeet ovat ympyröitä, joiden keksipiste on origossa

(impedanssirele). Alussa otettiin käyttöön ensiksi mainittu vaihtoehto, koska sen ominaisuudet vaikuttivat tarkoitukseen sopivimmilta (kuva 6.1 a).



Kuva 6.1. Esimerkit PSS/E-ohjelman relemallien "DISTR1" (a) ja "RXR1" (b) toimintakuvioista. DISTR1-mallille voidaan valita erityyppisiä toimintamoodeja, joista tässä on käytetty "mho Distance" -moodia. RXR1-mallin muodostamiseksi tarvitaan 14 koordinaattipistettä, joita on merkitty kuvassa koordinaateilla (R_i, X_i).

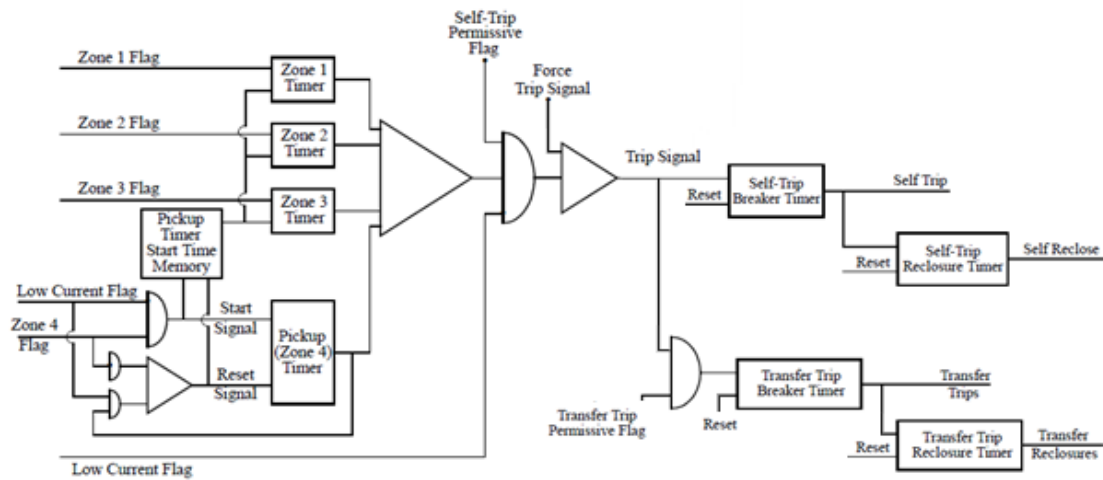
Työn edetessä siirryin kuitenkin käyttämään kokonaan toista, monikulmioista muodostuvaa, distanssirelemallia (RXR1), koska sillä pystytään parhaiten kuvaamaan todellisissa releissä käytettäviä toimintakuvioita. Kuvassa 6.1 b on esitetty kyseisen relemallin toimintakuvion ominaiskäyrä.

6.1.1 Relemallien sisäinen logiikka

Jokainen relemalli varaa käyttöönsä tietyn määrän vakioita ja muuttujia (ks. 5.2.3) ohjelmiston tietokannasta. Niiden avulla se toteuttaa loogisia operaatioita siten, että releen toiminta saadaan mallinnettua. Kuvan 6.2 logiikkakaaviosta selviää edellä mainitun RXR1-relemallin looginen toiminta. Muiden distanssirelemallien toiminta on pääpiirteittäin vastaavaa, mutta joitakin mallikohtaisia eroavaisuuksia on olemassa.

Relemallin logiikkakaaviossa esitettyjä laskureita ja signaaleita vastaa mallin käyttöönsä varaamat muuttujat, jotka esitellään luvussa 6.1.4. Mallin sisäinen laskenta-algoritmi määrittää muuttujiensa arvot perustuen kunkin hetken impedanssin arvoon. Ohjelma siis laskee muuttujien

arvot uudelleen jokaisella simulaation ajanhetkellä. Niiden ja käyttäjän määrittämien parametrien, kuten laukaisun viivästysajan, perusteella määräytyy relemallin toiminta.



Kuva 6.2. RXR1-relemallin logiikkakaavio (Siemens 2004, s. 18-28). Logiikka perustuu neljään vyöhykkeeseen, josta uloin (4-vyöhyke) on havahtumisvyöhyke, joka käynnistää havahtumislaskurin ja samalla kaikki vyöhykekohtaiset laskurit. Vyöhykkeen ollessa aktiivinen lähetetään katkaisijalle laukaisukäsky heti kun vyöhykekohtainen laskuri on käynyt loppuun (aika määritetään relemallin parametreissa). Katkaisijan toiminta-aikaa kuvaa oma laskuri, jonka käytyä loppuun johto irrotetaan. Laukaisusignaalin toinen haara menee kaukolaukaisuyksikölle, joka voidaan ohjelmoida laukaisemaan jokin muu johtohaara kuin se, minkä impedanssia rele mittaa.

6.1.2 Relemallin lisääminen dynamiikkamalliin

Relemallin sijoittaminen dynamiikkamalliin tapahtuu lisäämällä malliin liittyvät parametrit (liite 2) dynamiikkatiedostoon (ks. 5.2.2). Relemallin parametrit ovat siis ne käyttäjän määrittämät tiedot, jotka määräävät releen sijainnin ja sen toimintaan liittyviä seikkoja, kuten toimintakuvion koon sekä hidastusajat. Kun parametrit on lisätty, laskentamallin alustus täytyy tehdä uudelleen. Releen parametreja voidaan tämän jälkeen tosin muuttaa ohjelman avulla vaikka kesken simuloinnin, mutta releen sijaintia verkossa ei voida muuttaa ilman uuden alustuksen tekemistä.

6.1.3. Relemallin toiminta simuloinnin aikana

Relemalli reagoi simuloinnissa ainoastaan, mikäli impedanssi kulkee releen havahtumisvyöhykkeen eli toimintakuvion uloimman rajan sisäpuolelle. Simuloinnin etenemistä voidaan halutessa tarkkailla ohjelman seurantanäytöllä, johon ohjelma automaattisesti tulostaa tiettyjä asioita, kuten reletointeihin liittyviä tietoja. Seurantanäytölle voidaan myös tulostaa

tulostuskanaviin tallennettavien muuttujien arvot tietyn aika-askeleen välein, mutta tulostaminen hidastaa simuloinnin etenemistä eikä numeerinen esitys ole havainnollinen, joten tulostusta ei yleensä tehdä. Reletoiminnoista ohjelma ilmoittaa aina tulostamalla seurantanäytölle ilmoituksen impedanssin siirtymisestä alueen sisälle. Samalla käynnistyy relemallin sisäinen laskuri, joka mittaa impedanssin oleskeluaikaa alueen sisällä. Mikäli impedanssi siirtyy pois alueelta ennen kuin laskuriin määritelty raja-arvo, eli mallin parametreissa määritelty hidastusaika, saavutetaan, niin ohjelma ilmoittaa seurantanäytöllä impedanssin siirtymisestä pois alueelta. Samalla relemallin laskuri nollautuu. Mikäli laskuri saavuttaa raja-arvonsa, se lähettää laukaisukäskyn toiselle laskurille, joka kuvaa katkaisijan viivettä. Tämän laskurin toimintaa ei enää voi pysäyttää, vaikka impedanssi siirtyisi pois alueelta ennen laskurin käymistä loppuun, vaan johto irrotetaan verkosta laskurin saavutettua loppuarvonsa. Näin on tietysti myös reaali maailmassa, eli releen lähetettyä katkaisijalle laukaisukäskyn katkaisija aukeaa toiminta-ajan kuluttua. Simuloinnissa johdon irrottamisen verkosta tekee relemalliin sisään mallinnettu katkaisija, joka muuttaa verkkomallissa kyseisen johdon kytkentätilan.

Katkaisijan avautumisen jälkeen simulointi etenee jälleenkytkentälaskurin käynnistyessä automaattisesti laukaisuhetkellä. Jälleenkytkentälaskuri kuvaa reaali maailman jälleenkytkentärelettä, joten sen saavutettua loppuarvonsa johto kytketään takaisin kiinni. Mikäli jälleenkytkentää ei simuloitaessa haluta, on relemallin parametreihin syötettävä jälleenkytkentäviiveksi suuri lukuarvo.

Kaikista relemallin toimenpiteistä, kuten havahtumisesta ja impedanssin siirtymisestä ulos toiminta-alueelta, ohjelmisto ilmoittaa seurantaikkunassa automaattisesti. Tietoa releen toiminnasta ei voi kuitenkaan saada jälkikäteen esimerkiksi suoraan tulostiedostosta. Rele työkalun kannalta relemallien tärkeä ominaisuus on se, että releet voidaan simuloinnissa laittaa tarkkailutilaan, jolloin ne eivät tee mitään toimenpiteitä, vaikka impedanssi tulisi niiden havahtumisalueelle. Toimintatila voidaan siis muuttaa myös kesken simulaatioajan.

6.1.4 Relemallin sisäisten muuttujien käyttö

Mallin sisältämät muuttujat voidaan lisätä tulostuskanaviksi. Tämä tarkoittaa sitä, että muuttujan kullakin hetkellä sisältämä arvo tallennetaan tulostiedostoon. PSS/E-ohjelman käsikirjassa kerrotaan releen sisäisten muuttujien tallettamista suureista puutteellisesti: vain kolme muuttujaa – resistanssi, reaktanssi ja virta – annetaan, mutta muiden muuttujien tarkkaa toimintaa ei kerrota. Kokeilemalla sain kuitenkin selvitettyä, että näitä muuttujia voidaan tallentaa tulostiedostoon ja niistä pystytään tarkasti määrittämään releen toiminta simuloinnin

aikana. Reletoimintojen tallentaminen tulostiedostoon osoittautui siis mahdolliseksi käyttämällä hyväksi relemallin sisäiseen logiikkaan varattuja muuttujia.

Taulukko 6.1. *RXR1-relemallin käyttämät sisäiset muuttujat.*

Muuttuja	Kuvaus
L	Resistanssi R
$L+1$	Reaktanssi X
$L+2$	Virta I
$L+3$	Vyöhyketieto
$L+4$	Katkaisijatieto
$L+5$	Jälleenkytkentätieto
$L+6$	Kaukolaukaisu
$L+7$	Kaukolaukaisu

Muuttujien sijainti tietokannassa määräytyy sen mukaan missä järjestyksessä dynamiikkamallit ovat dynamiikkadata- eli DYR -tiedostossa (liite 1). Tämä aiheuttaa sellaisen ongelman, että komentosarjatiedoston (IDEV -tiedosto) käyttö oikeiden kanavien lisäämiseksi vaatii kyseisen IDEV -tiedoston päivityksen aina kun verkon dynaaminen malli ja sen myötä DYR -tiedosto muuttuu. Päivitys on tarpeellinen, koska kanavat lisätään ilmoittamalla halutun muuttujan sijaintipaikka tietokannassa. Tästä syystä muuttujakanavien lisäämistä ei voida tehdä käsin kirjoitetulla tiedostolla, sillä päivitystyö dynamiikkamallin muuttuessa olisi kohtuuttoman suuri.

6.2 Reletyökalun toteutus

6.2.1 Relekanavien lisääminen makron avulla

Ratkaisuna releiden muuttujasijaintien vaihtelun aiheuttamaan ongelmaan syntyi idea tehdä IPLAN -ohjelmointikielen avulla makro³, joka hakee dynamiikkamallissa esiintyvien relemallien havahtumistietoa kuvaavien muuttujien paikat PSS/E:n tietokannasta ja lisää kyseiset muuttujat tulostuskanaviksi. IPLAN -kieli on osa PSS/E-ohjelmistoa ja se tarjoaa valmiita funktioita, joiden avulla päästään käsiksi mm. ohjelmiston tietokantaan. Näin ollen edellä mainittu makro oli toteutettavissa valmiin IPLAN -kieleen sisältyvän funktion avulla, joka palauttaa relemallin muuttujien sijaintitiedon, kun releen parametrit annetaan.

³ IPLAN -makrojen kirjoittaminen tapahtuu tavallisella tekstinkäsittelyohjelmalla, jonka jälkeen erityisellä IPLAN -kääntäjällä (liite 1) koodi muunnetaan suoritettavissa olevaan muotoon. Kääntäjän muodostama ohjelmätiedosto voidaan sen jälkeen suorittaa PSS/E-ohjelmassa.

Käytettävissä olevien ohjelmointikielen funktioiden pohjalta parhaalta toteutustavalta vaikutti menetelmä, jossa makro lukee DYZ -tiedostoa lävitse rivi kerrallaan. Mikäli rivi kuvaa haluttua distanssirelemallia, niin ohjelma ottaa sen tiedot parametreiksi funktiolle, joka hakee relemallin muuttujien sijainnin tietokannasta. Tämän jälkeen ohjelma kirjoittaa IDEV -tiedostoon vastaavan rivin, joka lisää relemallin havahtumistiedon sisällään pitävän muuttujan tulostuskanavaksi. Kanavan tunnisteeksi annetaan releen johtohaaran pääteasemat, jonka avulla releet on helppo yksilöidä. Kanavan tunniste on siis muotoa "RELE_XXXX_YYYY", jossa XXXX ja YYYY ovat kyseisen johdon päätepisteiden solmujen numerotunnukset.

Releiden havahtumista kuvaavien kanavien lisäksi lisätään vielä relemallien resistanssin ja reaktanssin sisällään pitämät muuttujat. Niiden avulla voidaan tarvittaessa simuloinnin jälkeen piirtää releen näkemän impedanssin kulkureitti R-X -tasossa. Nyt kaikkia haluttuja kanavia vastaavat lisäyskomennot on kirjoitettu IDEV -tiedostoon, joten sen suorittaminen voidaan vielä sisällyttää samaan makroon. Näin käyttäjälle aiheutuva lisätyö relekanavien lisäämisestä on mahdollisimman pieni, sillä kaikki relekanavien lisäämiseen tarvittavat toimenpiteet voidaan tehdä saman makron avulla.

Ohjelmiston käyttäjän täytyy ennen simuloinnin aloittamista suorittaa makro ja sen suorituksen aikana, ohjelman kysyessä, antaa DYZ -tiedoston nimi, jota simulointimallin pohjana käytetään. Tämän toimenpiteen jälkeen kaikki tarvittavat relekanavat on lisätty tulostuskanaviksi ja niitä pystytään tutkimaan simuloinnin suorittamisen jälkeen.

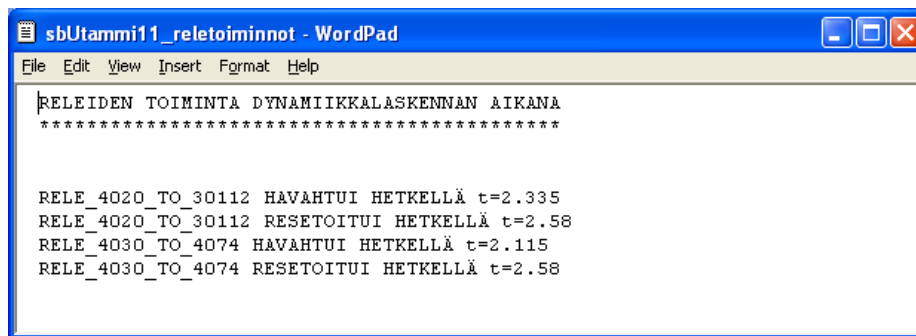
6.2.2 Reletoimintojen tarkastelu

Kuten kanavien lisääminen, myös tulosten tarkastelu tehdään IPLAN -kielisen makron avulla. Tulostiedostosta täytyy kuitenkin ensin tulostaa relekanavien tiedot tekstitiedostoon, koska binäärimuotoisten tulosten käsittely ei onnistu suoraan. Tekstitiedostoon tulostaminen tehdään PSSPLT -ohjelman avulla⁴ ja tässäkin voidaan käyttää hyväksi IDEV -tiedostoa, jolloin käyttäjälle aiheutuva lisätyö saadaan minimoitua.

Releen havahtumista kuvaavan muuttujan toiminta on yksinkertaista; muuttujan arvo pysyy vakiona, kunnes impedanssin siirtyessä havahtumisvyöhykkeelle muuttuja saa arvokseen sen hetkisen aikaleiman lisättynä vyöhykkeelle määritetyllä viiveellä. Näin ollen havahtumistietojen tarkastaminen tulostiedostosta onnistuu yksinkertaisesti käymällä lävitse relemuuttujien arvoja ja tutkimalla poikkeako niiden arvo jollakin hetkellä alkuperäisestä.

⁴ Tulostamisessa käytetään ohjelman PRNT -komentoa, jolla voidaan tulostaa binäärimuotoisen tulostiedoston halutut kanavat ascii-muotoiseen tekstitiedostoon tietyssä standardimuodossa.

Makron tehtävä on siis helpottaa käyttäjän työtä käymällä suuri tulostiedosto lävitse ja samalla tehdä yhteenvetotiedosto, josta selviää kaikki oleellinen. Lopuksi makro käy vielä yhteenvetotiedoston lävitse ja tarkastaa onko releiden havahtumisia tapahtunut. Mikäli näin on, käyttäjä saa ilmoituksen havahtumisista ja kehotuksen katsoa erillisestä yhteenvetotiedostosta (liite 1) tarkempia tietoja. Mikäli havahtumisia ei ole tapahtunut, käyttäjä voi suoraan siirtyä tutkimaan simulaation muita tuloksia ilman, että tulostiedostoa tarvitsee erikseen käydä tarkastamassa.



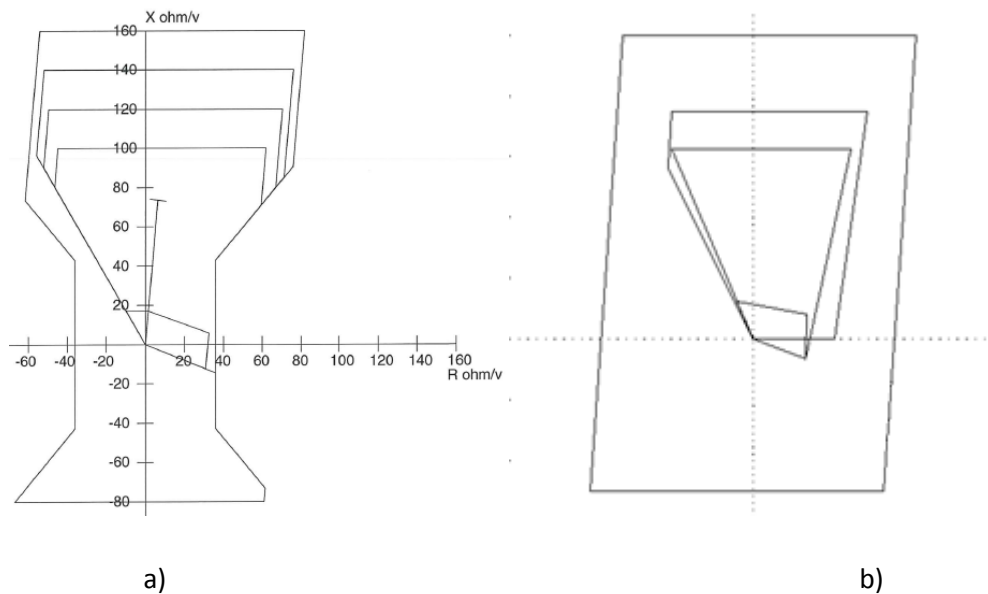
Kuva 6.3. Makron luoma yhteenveto reletoiminnoista simulaation aikana. Tuloksista nähdään, että releet johdoilla 4020 – 30112 ja 4030 – 4074 ovat ensin havahtuneet ja sitten resetoituneet hetkeä myöhemmin.

6.3 Rele työkalun sovittaminen ohjelmistoon

6.3.1 Relemallin toimintakuviot

Luvussa 6.2 kuvattiin pääpiirteittäin menetöt, joiden avulla releiden toimintaa dynamiikkalaskennan aikana arvioiva työkalu on toteutettu. Toiminnon käyttäminen olemassa olevien verkko- ja dynamiikkamallien kanssa vaatii relemallien lisäämisen dynamiikkamallin dynamiikkatiedostoon. Mikäli releet halutaan mallintaa vastaamaan mahdollisimman tarkasti oikeita releitä, niin jokainen rele pitää mallintaa erikseen, koska todellisessa verkossa releiden asettelut – toimintakuviot ja viivästykset - vaihtelevat verkon rakenteesta riippuen. Toisaalta PSS/E:n tarjoamat mallit eivät mahdollista oikeissa releissä käytössä olevien tiimalasin muotoisten toimintakuvioden käyttämistä (kuva 6.4). Näin ollen mallinnuksessa ei kuitenkaan päästä täysin tarkkaan lopputulokseen. Kun lisäksi otetaan huomioon reletyökalun käyttötarkoitus, joka ainakin tässä vaiheessa liittyy lähinnä heilahtelutilanteiden tutkimiseen, ei toimintakuvioden mallintaminen mahdollisimman tarkasti ole edes tarpeellista. Tätä tukee lisäksi se seikka, että heilahtelutilanteissa impedanssi liikkuu pääosin R-akselin suunnassa ja lähes kaikkien releiden havahtumisvyöhykkeen leikkauspiste R-akselin suhteen on noin 40 ohmin kohdalla. Reaktanssin

itseisarvon kasvaessa R-suuntainen ulottuma lähtee kasvamaan yltäen suurilla reaktanssin arvoilla yleensä noin 80 ohmiin.



Kuva 6.4. a) Todellisen numeerisen releen toimintakuvio. b) PSS/E -ohjelman relemallin RXR1 toimintakuvio

Mallinnuksen kannalta tärkeitä ovat vain uloimman eli havahtumisvyöhykkeen rajat, eikä niitä pystytä mallintamaan relemallin avulla tarkasti kuormitusalueen muodosta johtuen. Lisäksi simuloinnin yleisestä epävarmuudesta johtuen relemallien havahtumisvyöhyke halutaan joka tapauksessa tehdä hieman todellista suuremmaksi. Näiden lähtökohtien valossa riittävään tarkkuuteen päästään käyttämällä relemallina samanlaista mallia eli samoja parametreja kaikille verkon releille.

6.3.2 Reletyökalun käyttö ja päivittäminen

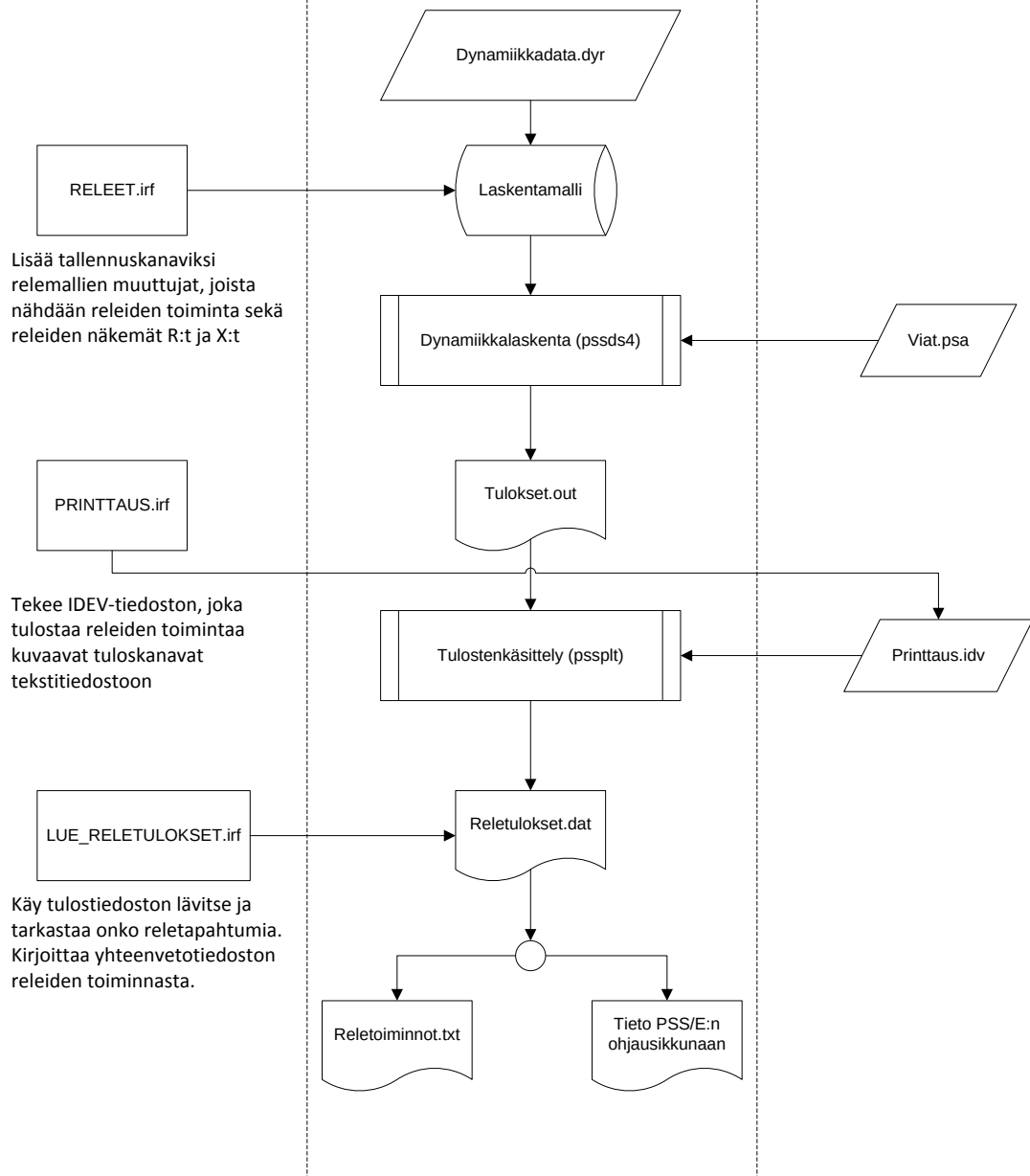
Reletyökalun toimintaa voi kuvata prosessikaavion avulla, josta selviää toiminnon käyttämiseen liittyvät vaiheet. Käyttäminen on periaatteessa kaksivaiheista; Ennen varsinaista simulointia tehtävät valmistelevat toimenpiteet sekä simulaation jälkeen tehtävä tulosten tarkastelu.

Kuvassa 6.5 käyttöä on ajateltu simuloijan kannalta katsottuna olettaen, että relemallit ovat valmiiksi lisättyinä simuloinnissa käytettävään dynamiikkadataan. Relemallien lisäämistä voidaan pitää omana työvaiheenaan, joka tarvitsee tehdä vain silloin kun verkko oleellisesti muuttuu. Reletyökalun käyttöohjeesta (liite 3) voi tutustua tarkemmin työkalun käytön eri vaiheisiin.

RELETYÖKALUN MAKROT

LASKENTAPROSESSI

MUUT OHJAUSTIEDOSTOT



Kuva 6.5. Dynamiikkalaskennan vaiheet reletyökalun käytön kannalta. *Irif* -tiedostot ovat makrotiedostoja, jotka käyttäjä suorittaa PSS/E:n dynamiikkaohjelmassa. Kaaviosta nähdään, että simulaation suorittamiseen liittyy paljon eri vaihteita ja erilaisia tiedostoja. Prosessi on pyritty tekemään samankaltaiseksi kuin vaimennuslaskennassa, joka on perinteinen dynamiikkalaskennan muoto.

Reletyökalu on pyritty tekemään siten, että työkalun käytöstä simuloijalle aiheutuva lisätyö on mahdollisimman vähäinen ja toisaalta siten, että verkkomallin tai dynamiikkamallin muutokset eivät vaadi makrojen päivittämistä. Tietysti esimerkiksi uuden johtohaaran tapauksessa, johtoa

suojaava rele täytyy lisätä dynamiikkamalliin, mutta käytettäviin makroihin ei vaadita muutoksia, vaan ne ottavat automaattisesti huomioon lisätyt tai poistetut komponentit.

Toiminnallisuuden käyttäminen pohjoismaisen verkkomallin yhteydessä halutulla tavalla vaati kaikkien todellisten verkossa olevien releiden lisäämistä dynamiikkatiedostoon relemallien avulla. Relemalleja lisättiin verkkomalliin kuitenkin vain Suomen alueelle, koska muiden yhteiskäyttöverkon maiden releasetteluista vastaavat kyseisten maiden omat kantaverkkoyhtiöt. Lisäksi aiemmin tehdyistä simuloinneista tiedetään, että RAC- ja P1-leikkausten⁵ 220 kV johtojen distanssireleiden mittaamat impedanssit tehoheilahtelujen aikana ovat niin suuria (satoja ohmeja), ettei aiheettomien reletointien riskiä ole olemassa (Kuisti 2008). Tässä työssä on siksi keskitytty vain 400 kV johtojen releiden heilahtelusalpojen tarpeellisuuden käsittelyyn, joten relemalleja oli tarpeellista lisätä vain 400 kV:n verkkoon.

Relemallien lisääminen tehtiin IPLAN -kielisen makron avulla, jonka suunnittelin ja tein tätä tarkoitusta varten. Verkossa olevien distanssireleiden sijainnit sain Fingridiltä ja niiden perusteella tein taulukon, johon on listattu kaikki verkkomallin solmupisteet, joihin relemalli pitää lisätä. Makro käyttää kyseistä taulukkoa hyväkseen lukemalla siitä relemallien sijainnit ja sen perusteella lisää halutut relemallit dynamiikkatiedostoon. Verkon muuttuessa taulukko pitää päivittää vastaamaan muuttunutta tilannetta, jotta mahdollisesti uudet asennetut releet tulee lisättyä ja että vanhat relemallit asentuvat oikein.

6.3.3 Impedanssikäyrien piirtäminen

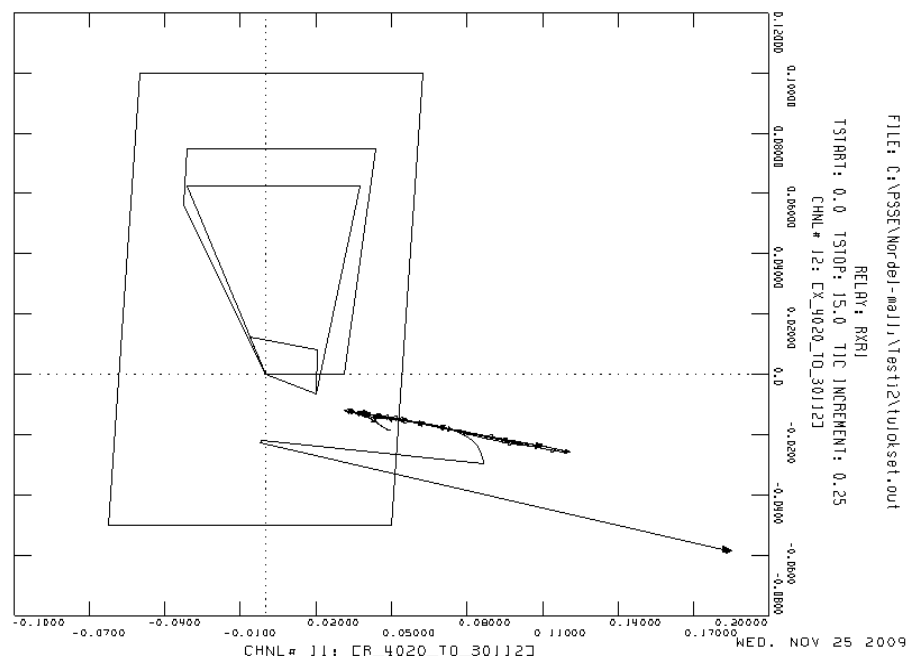
Mikäli impedanssin liikkeitä simuloinnin aikana halutaan tutkia tarkemmin, voidaan PSSPLT -ohjelman avulla piirtää R-X -tasoon impedanssikuvio samaan kuvaan releen toimintakuvion kanssa. Tällä tavoin voidaan esimerkiksi tutkia, kuinka lähelle releen toiminta-aluetta impedanssi joutuu tehoheilahtelun aikana tai kuinka kauan impedanssi pysyy alueen sisäpuolella yhden heilahdusjakson aikana. Myöhemmin sama tarkastelu voidaan tehdä erilaisten apuvälineiden avulla, mutta apuohjelmien kehitysvaiheessa impedanssikäyrät olivat hyvä keino ohjelmilla saatujen tulosten tarkastamiseen.

Releen toimintakuvion piirtämiseksi samaan kuvaan täytyy toimintakuvion nurkkapisteiden koordinaatit kertoa ohjelmalle. Koska dynamiikkamallissa käytetään kaikille releille samaa mallia, ei relekohtaista valintaa mallipohjasta tarvitse tehdä. PSSPLT -ohjelman avulla luetaan yleismallin tiedot pohjaksi piirtotoiminnoille tiedostosta, johon ne on valmiiksi määriteltä oikeassa muodossa.

⁵ Leikkauksilla tarkoitetaan tiettyjen verkon johtojen yhteenlaskettua tehonsiirtoa. RAC-leikkaus kertoo Suomen ja Ruotsin välisten vaihtosähköyhteyksien tehonsiirron ja P1-leikkaus Suomen sisäisen tehonsiirron pohjois-etelä-suunnassa.

Nurkkapisteen koordinaatit löytyvät dynamiikkatiedostosta, joten tarvittavat tiedot saadaan suoraan sen avulla. Lisäksi tarvitaan pieniä lisäyksiä ja muutoksia, jotta tiedosto saadaan ohjelman ymmärtämään muotoon.

Piirtotoiminnossa releen toimintakuvioksi voi valita dynamiikkamallissa käytettävän yleismallin ohella myös jonkin muun tapauskohtaisesti määritellyn kuvion. Heilahtelusalvan tarpeellisuuden tutkimisen kannalta yleismallin käyttäminen riittää kuitenkin varsin hyvin. Loppujen lopuksi piirtotoiminnon hyöty heilahtelutarkasteluissa rajoittuu lähinnä sellaisiin tapauksiin, joissa tehon suunta johdolla vaihtelee heilahtelujen aikana. Mikäli tehon suunta johdolla pysyy samana, releen mittaama toimintakuviota lähin impedanssi voidaan selvittää minimi-impedanssityökalun avulla (ks. 7.1.3).



Kuva 6.6. Impedanssi jää vian seurauksena heilahtelemaan releen havahtumisalueen reunan yli. Vaaka-akselilla on releen mittaama resistanssi ja pystyakselilla releen mittaama reaktanssi. Ohjelmassa käytetään suhteellisarvoja eli pu -yksiköitä, joten absoluuttinen arvo saadaan kertomalla pu -arvo impedanssin perusarvolla, joka tässä tapauksessa on 1600 ohmia.

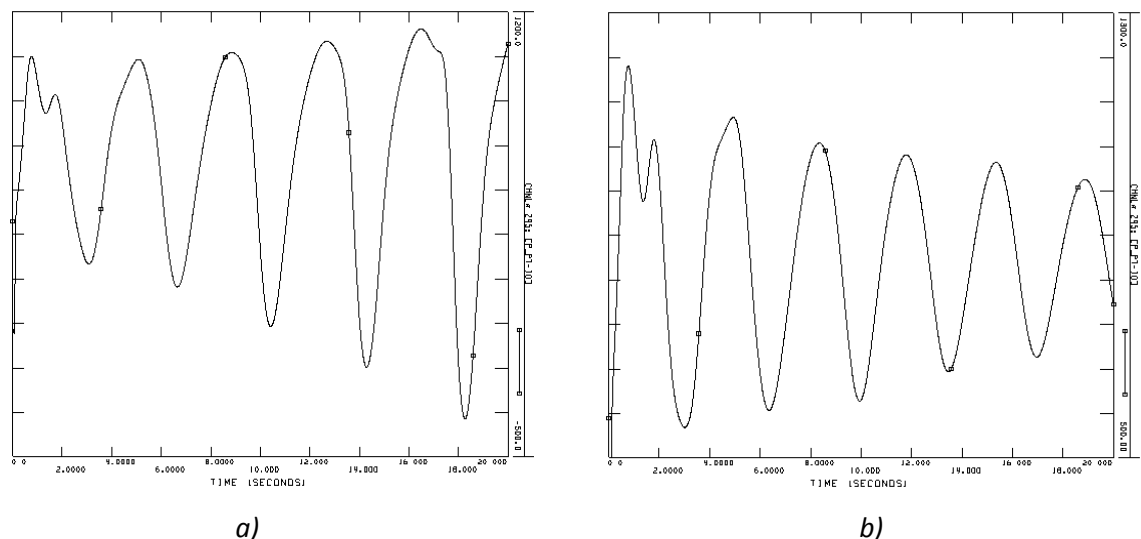
7. Tutkimus: Heilahtelusalpojen tarve

7.1 Tutkimuksen lähtökohdat ja menetelmät

Työn lopuksi tehtiin simulointeja, joiden tarkoituksena oli testata kehitettyä reletyökalua ja löytää sen avulla sellaisia tilanteita, joissa tehoheilahtelujen aiheuttamia distanssireleiden virhetoimintoja voisi syntyä. Simulointeja tehtiin erilaisilla keskeytys- ja kuormitustilanteilla ja relettoimintojen ohella tutkittiin heilahtelujen vaimenemista. Tarkoituksena oli etsiä jokaisella keskeytystilanteella sellainen siirtotilanne, että syntyy mahdollisimman suuria heilahteluja, koska tällöin virheellisten relettoimintojen todennäköisyys on suurin.

7.1.1 Siirtokapasiteetti

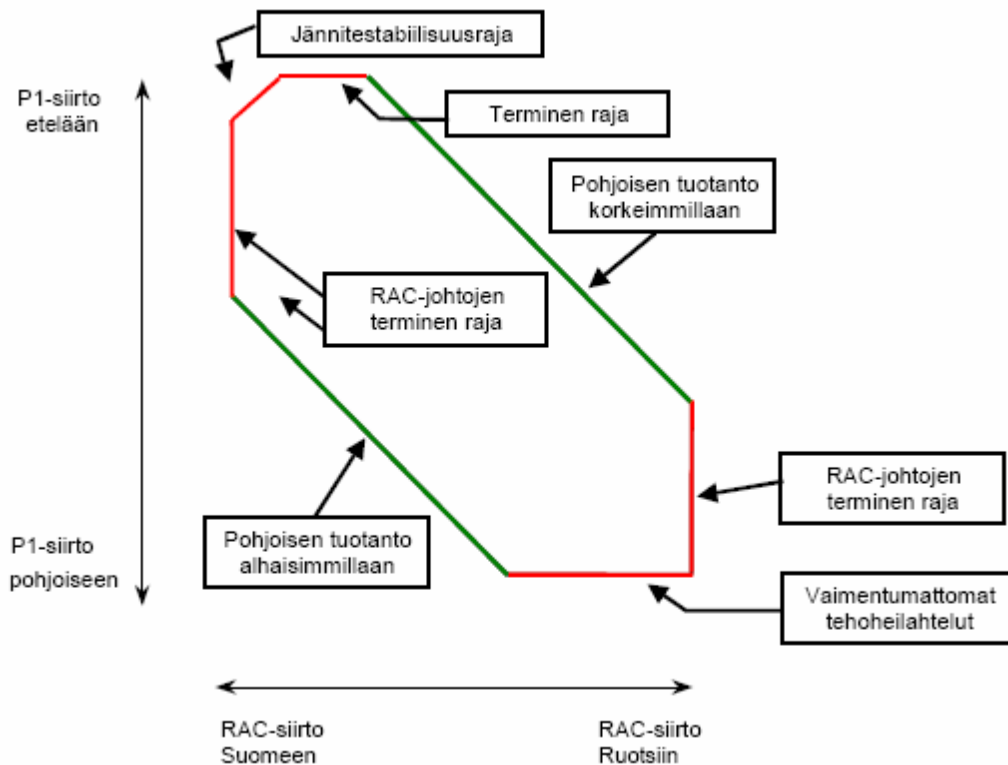
Johtojen tehonsiirtoa ja sen myötä vian jälkeisten tehoheilahtelujen suuruutta rajoittavat stabiiliusehdot, eli jos johtojen (joissain tapauksissa yksittäisen johdon) tehonsiirrot ennen vikaa ovat liian suuret, niin tehoheilahtelut eivät vaimene vaan kasvavat ajan funktiona. Tilanne on siis epästabiili ja reaali maailmassa se johtaisi verkon romahtamiseen. Tästä syystä kantaverkon johtojen tehonsiirtoa rajoitetaan N - 1 -kriteerin mukaisesti. N - 1 -kriteerillä tarkoitetaan ehtoa, jonka mukaan verkon siirtotilanne tulee olla mitoitettu siten, että verkko pysyy stabiilina kaikissa tilanteissa minkä tahansa yksittäisen vian sattuessa.



Kuva 7.1. a) Epästabiili tilanne: Siirtojohtojen tehonsiirron heilahteluamplitudi kasvaa vian jälkeen.
b) Tehoheilahtelujen amplitudi pienenee, eli tilanne on stabiili.

Ehto N - 1 -kriteerin täyttymiselle on, että tehoheilahtelun amplitudin täytyy pienentyä riittävän nopeasti kunkin yksittäisen vian jälkeen.

Verkon stabiilius voidaan menettää myös jännitestabiiliusrajan ylittämisen johdosta. Lisäksi omat rajoitusehtonsa antavat komponenttien suurimmat sallitut termiset rasitukset. Siirtokapasiteetti eri suuntiin voi olla erisuuruinen ja myös rajoittava tekijä voi vaihdella ja yleensä näin onkin, silloin kun stabiilius määrää siirtorajat. Kuvassa 7.2 on esitetty Suomen kantaverkon P1-siirron ja Suomen ja Ruotsin välisen RAC -siirron kapasiteettien rajoitusehdot eri siirtosuuntiin.



Kuva 7.2. Suomen verkon siirtorajat vuonna 2001 (Reilander 2001, s.28).

Simuloiduista tilanteista voidaan erottaa sellaiset tilanteet, jotka ovat realistisia siirtokapasiteettien kannalta. Tuloksissa huomioitiin kuitenkin myös sellaisia tilanteita, jotka eivät ole kovin todennäköisiä ja joiden siirrot olivat hieman normaalikapasiteetteja suuremmat. Tällä tavoin lisätään tuloksien varmuusmarginaalia ja saadaan tietoa tapauksista, joita saattaisi syntyä poikkeusolosuhteissa.

7.1.2 Keskeytystilanteet

Simuloitavia keskeytystilanteita valittiin yhteensä noin 40 kappaletta. Osassa tapauksissa keskeytyksen piirissä on yksi Suomen kantaverkon (liite 4) 400 kV:n johto tai sarjakondensaattori ja osassa kahden edellä mainitun komponentin yhdistelmä (yksi johto ja yksi kondensaattori tai kaksi johtoa). Keskeytystilanteet pyrittiin valitsemaan siten, että erilaisia tilanteita syntyi mahdollisimman monipuolisesti. Kahden komponentin keskeytyksissä valittiin tilanteita, joissa

verkosta irrotettavat komponentit ovat täysin eri puolilla verkkoa, sekä tilanteita, joissa keskeytykset ovat lähellä toisiaan, jolloin verkkoon muodostuu paikallinen pullonkaula. Pullonkaulalla tarkoitetaan tilannetta, jossa verkko jakautuu kahteen alueeseen, joiden sisäinen kapasiteetti mahdollistaisi suuremman tehonsiirron, mutta alueiden välisten johtojen siirtokapasiteetti on rajoittava tekijä.

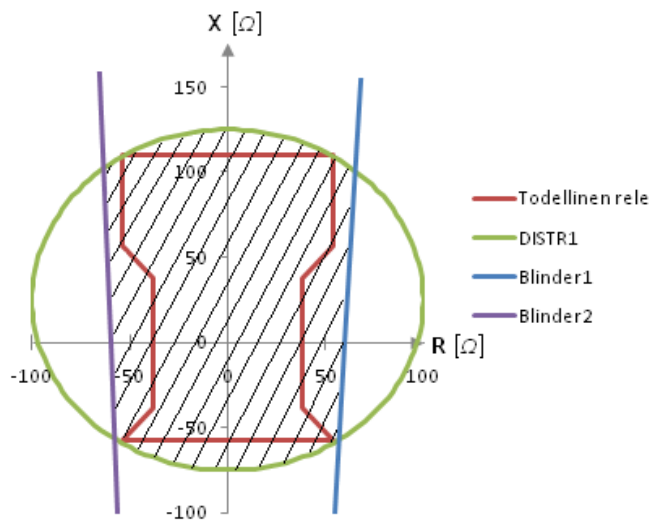
Keskeytystilanteita simuloitiin erilaisilla tehonjakotilanteilla ja erilaisilla vioilla tavoitteena etsiä ne tapaukset, joissa tehoheilahtelut ovat suurimpia, mutta tilanne pysyy kuitenkin stabiilina.

Lähtötilanteiksi otettiin kolme erilaista tuotantotilannetta, jotka kaikki olivat vientitilanteita eli Suomesta viedään sähköä Ruotsiin. Tehonjakoa muutettiin lähinnä pohjois-etelä -suuntaisen tehonsiirron (P1-leikkauksen) suhteen RAC -siirron pysyessä alkuperäisessä suuruusluokassa. P1-siirtoa pienennettiin lisäämällä tuotantoa pohjoisen vesivoimaloissa ja vähentämällä tuotantoa etelän vesi- ja lämpövoimaloissa.

Eri kytkentätilanteissa verkon mitoittava vika vaihtelee, joten tästä syystä simulointeja oli tarpeellista tehdä erilaisia vikatilanteita käyttäen. Simulointien määrän pitämiseksi kohtuullisena erilaisia vikoja valittiin kuitenkin hyvin rajallisesti käyttäen vikoina pääasiallisesti muutamaa eri vikatilannetta, joiden tiedettiin aiemman kokemuksen perusteella yleensä olevan mitoittava vika.

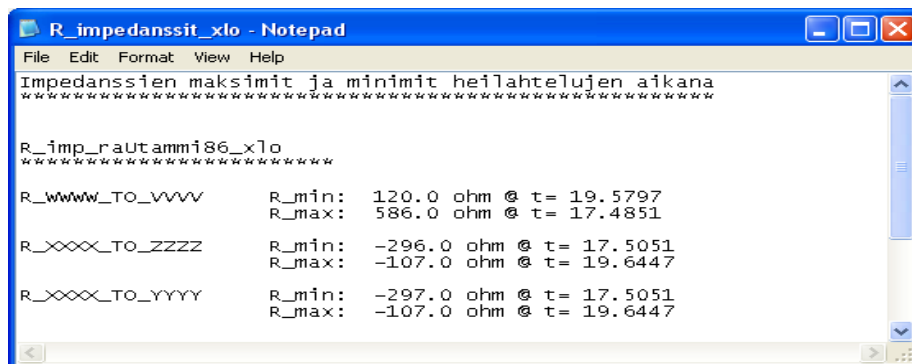
7.1.3 Menetelmät

Releiden havahtumisia simuloinneissa tutkittiin työn aikana kehitetyn reletyökalun avulla. Aiemmin käytettäväksi valitussa PSS/E:n RXR1-relemallin toiminnassa tuli esiin virhe, joka esti kyseisen mallin käytön pohjoismaisen verkkomallin yhteydessä. Virheen syytä ei saatu selvitettyä tarkasti, mutta ilmeisesti kyse oli relemallin sisäisestä ohjelmointivirheestä. Virhe tuli ilmi siten, että koko laskentaohjelmisto sulkeutui itsestään ("kaatui") tietyssä simuloinnin vaiheessa, mikäli RXR1-relemallit olivat toimintatilassa simuloinnin aikana. Tästä syystä tutkimus tehtiin lopulta käyttäen DISTR1 -mallia, jolla vastaavaa ongelmaa ei ilmennyt. DISTR1 -malliin sisältyvien rajoitussuorien (kuva 7.3) avulla tämänkin mallin avulla päästiin tehoheilahtelujen tutkimisen kannalta käytännössä yhtä hyvään tarkkuuteen kuin RXR1-mallilla. Toimintakuvion aktiivinen alue rajoittuu pystysuunnassa ympyrän kaareen ja vaakasuunnassa rajoitussuoriin (engl. blinder). R-suuntaiseksi toimintakuvion ulottumaksi valittiin X-akselin kohdalla 60 ohmia varmuusmarginaalin ollessa tällöin 50 % suhteessa todellisen releen tyyppilliseen toimintakuvioon.



Kuva 7.3. Simuloinneissa käytetyn relemallin sekä todellisen releen toimintakuviot. Relemallin aktiivinen alue on suorien väliin jäävä ympyrän viivoitettu osa.

Simuloinnissa käytettiin apuna PSAS -tiedostoja (liite 1), joiden avulla voitiin simuloida useita tehonjako- ja vikatilanteita peräkkäin. Tulokset kerättiin käyttämällä yhteensä kuutta erilaista makroa jokaisen yksittäisen simulaatioajon jälkeen. Tuloksista taulukoitiin jokaisen tapauksen vaimennusta kuvaava luku, havaitut reletoiminnot, sekä tiettyjen releiden havaitsemien impedanssien resistiivisten komponenttien minimiarvot.



Kuva 7.4. IPLAN -apuohjelma tulostaa releiden näkemiä minimi- ja maksimiarvoja impedanssin resistiiviselle komponentille. Impedanssin ollessa negatiivinen R_{max} edustaa pienintä mitattua arvoa. Ääriarvon mittaustajasta voidaan kuvan tapauksessa päätellä tilanteen epästabiilius, koska stabiilissa tilanteessa pienin impedanssi mitataan muutaman ensimmäisen heilahdusjakson aikana ($t < 6$ s).

R-komponentin minimiarvon tutkiminen osoittautui hyväksi menetelmäksi, koska simulointien impedanssikäyriä tutkimalla nähdään, että niissä tapauksissa, joissa releen toimintapiste tulee lähelle toimintakuvion rajaa, on X-suuntainen komponentti aina melko pieni. Voidaan siis olettaa,

että suurimmat heilahtelut tapahtuvat aina lähellä R -akselia ainakin sellaisissa tapauksissa, joissa tehon suunta johdolla ei käännä heilahtelujen aikana. Näin ollen pelkästään R -komponenttia tutkimalla pystytään näkemään kuinka lähellä relemalliin aseteltua 60 ohmin R -suuntaista rajaa impedanssi käy heilahtelujen aikana, vaikka reletointoja ei tapahtuisikaan. Tutkimista varten kehitin makron, joka tulostaa tiedostoon (kuva 7.4) kymmenen eri releen mittaaman resistiivisen komponentin minimi- ja maksimiarvon simuloinnin ajalta. Kyseiset releet valitsin tutkimalla aiempia simulointeja ja etsimällä niistä releet, joiden minimiarvot olivat pienimpiä muutamissa esimerkkitapauksissa.

7.1.4 Reletyökalun toiminta

Reletointojen tutkiminen työkalun avulla onnistui suunnitelmien mukaisesti. Työkalun käyttö saatiin sujuvaksi hyödyntämällä PSS/E-ohjelmistossa olevaa mahdollisuutta luoda graafiseen käyttöliittymään pikanäppäimiä, joita voidaan ohjelmoida suorittamaan haluttuja makroja.

Tuloksissa ei löytynyt poikkeuksia verrattaessa havaittuja reletointoja minimi-impedansseja mittaavalla työkalulla saatuihin tuloksiin. Toisin sanoen, aina minimi-impedanssin ollessa jollakin releellä pienempi kuin havahtumisraja, saatiin havahtumisesta tieto reletyökalun avulla. Muutamissa tapauksissa havahtumisia tapahtui sellaisilla releillä, jotka eivät olleet minimi-impedanssin mittauksen piirissä. Tällöin tarkastettaessa kyseisen releen impedanssikäyrä piirtotoiminnon avulla, voitiin kaikissa tapauksissa havaita impedanssin kulkeneen releen toimintakuvion sisälle.

Käytettävyyden kannalta merkittävä tekijä on työkalun käyttämiseen kuluva aika. Makrojen käynnistäminen saatiin nopeaksi pikanäppäinten avulla, mutta käsiteltävät tulostiedostot ovat suuria ja siitä syystä makrolta, joka tarkastaa reletoinnot, kului laskennassa käyttämältäni tietokoneelta aikaa noin minuutti yhden simulointitapauksen tulosten tarkastukseen. Varsinainen simulointikaan ei tosin tapahdu hetkessä, vaan yksittäisen tapauksen simulointiin kului noin kolme minuuttia. Vaimennuksen laskemiseen käytettävän makron suoritukseen ei sen sijaan kulu merkittävästi aikaa. Minimimpedanssien laskemiseen kuluu noin 10 sekuntia simulaatiota kohden eli selvästi vähemmän kuin releiden havahtumisien tarkastamiseen. Ero johtuu siitä, että vaimennuslaskennassa ja minimimpedanssin laskennassa tarkasteltavia suureita on selvästi vähemmän kuin reletointojen tutkimisessa. Lisäksi reletyökalussa tietojen käsittely on monimutkaisempaa kuin muissa työkaluissa. Näin ollen käsiteltävät datamäärät ovat näissä sovelluksissa eri suuruusluokkaa, joten suoria johtopäätöksiä reletyökalun tehokkuudesta on vaikea tehdä.

7.2. Tulokset

Tässä kappaleessa käsitellään tutkimuksen tuloksia yleisellä tasolla muutamien esimerkkitilanteiden avulla. Ensin käsitellään tehonsiirron suuruuden vaikutusta vaimenemiseen ja sen jälkeen esitetään tuloksia releiden havahtumisista simulaatioissa.

7.2.1 Vaimeneminen eri keskeytystilanteissa

Simulointien pohjana olleet tehonjakotilanteet oli valittu tarkoituksellisesti siten, että ne olivat stabiileja pahimmankin yksittäisen vian jälkeen, mutta tehoheilahtelut vaimenivat hitaasti. Useissa keskeytystilanteissa verkon siirtokyky heikkeni merkittävästi, koska jo lähtötilanteissa saattoi olla kaksi tehonsiirron kannalta merkittävää johtoa keskeytyksessä. Taulukossa 7.1 on esitetty erään johtokeskeytystilanteen simulointituloksia. Erityisesti tilanteen A tuloksista nähdään, että jo alle 250 megawatin muutos johtoleikkauksen siirrossa saa aikaan huomattavan parannuksen vaimenemisessa. Tehonjakotilanteessa A alkuperäinen siirtotilanne on selkeästi epästabiili tehoheilahtelun kasvaessa voimakkaasti – lähes viisinkertaiseksi – tarkastelujakson aikana. Siirron vähentämisen jälkeen tilanne on selkeästi stabiili heilahtelujen vaimetessa noin puoleen vastaavassa ajassa. Vertaamalla tilannetta B tilanteeseen A voidaan todeta, että tietyn leikkauksen tehonsiirron muuttaminen vaikuttaa vaimennukseen eri tehonjakotilanteissa (samassa verkkotilanteessa) eri tavoin. Tämä nähdään siitä, että tilanteen B vaimennus on alennetulla siirrolla huonompi kuin tilanteessa A, vaikka siirron muutos B:ssä on ollut jopa hieman suurempi kuin tilanteessa A. Stabiilien tapausten minimi-impedansseja vertaamalla nähdään, että pienin impedanssin arvo on saatu tapauksessa, jossa on ollut huonoin vaimennus.

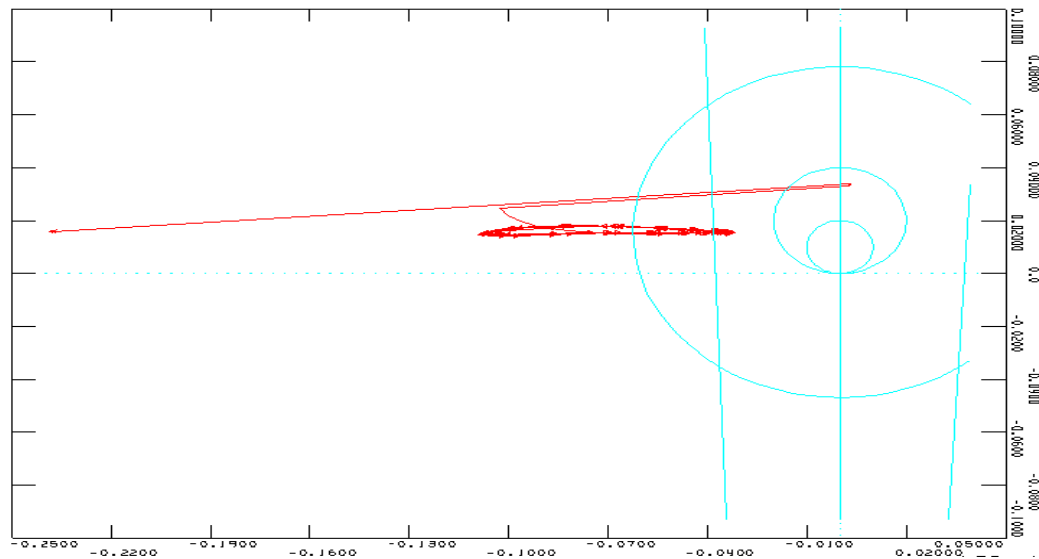
Taulukko 7.1 Simulointituloksia erilaisilla tehonjakotilanteilla. Vaimennusarvo kuvaa tehoheilahtelun amplitudin suuruutta tietyn ajan kuluttua heilahtelujen alkamisesta verrattuna ensimmäiseen heilahdusjakson amplitudiin. Epästabiili tarkoittaa, että vaimennusarvo on suurempi kuin yksi (1,0) eli heilahtelut eivät vaimene. Mitä pienempi vaimennuksen arvo on, sitä paremmin tilanteen tehoheilahtelut vaimenevat. Sarake ΔP kuvaa tietyn johtoleikkauksen läpi olevan tehonsiirron muutosta verrattuna alkuperäiseen siirtotilanteeseen. Epästabiileissa tilanteissa releiden havahtumisilla ei ole merkitystä tulosten kannalta, joten niitä ei ole merkitty taulukkoon. R_{min} -sarake kertoo pienimmän releen mittaaman impedanssin R -suuntaisen komponentin arvon. Merkintä "N/A" tarkoittaa, että arvoa ei voida määrittää tulosten perusteella, koska tehon suunta johdoilla on vaihtunut heilahdusten aikana. Tällöin impedanssi saa sekä positiivisia että negatiivisia arvoja, joten minimin määrittäminen ei ole mielekästä. Kaikissa tilanteissa on käytetty samaa kytkentätilannetta sekä samaa vikaa tehoheilahtelujen aikaansaamiseksi.

Tehonjakotilanne	Vaimennus	ΔP [MW]	Releet	R_{min} [Ohm]
A - alkuperäinen siirto	epästabiili	0	-	N/A
A - alennettu siirto	0,47	-230	ei havahtumisia	70
B - alkuperäinen siirto	epästabiili	0	-	N/A
B - alennettu siirto	0,85	-240	ei havahtumisia	62
C - alkuperäinen siirto	epästabiili	0	-	58
C - alennettu siirto	0,53	-234	ei havahtumisia	72

7.2.2 Releiden toiminnot tehoheilahteluissa

Reletoimintoja tapahtui pääasiassa vain selvästi epästabiileissa tapauksissa sekä muutamissa sellaisissa tilanteissa, joissa tehoheilahtelut vaimenivat, mutta vähintään yhden johdon siirtokapasiteetti oli ylitetty. Simuloinneissa tuli esille ainoastaan yksi tapaus, jossa rele havahtui siirtokapasiteettien mukaisessa ja stabiiliusehdot täyttävässä tilanteessa. Lähelle havahtumisrajaa (60-80 Ohmin välille) jouduttiin kuitenkin useimmissa tapauksissa, joissa heilahtelujen vaimeneminen oli hidasta ja yhtä johtoa kuormitettiin erityisen paljon (pullonkaula). Impedanssin suhteellisen pienet arvot ovat edellä mainituissa tapauksissa täysin odotettavissa heilahtelujen aikana suureksi nousevan kuormavirran johdosta.

Esimerkkitapaus, jossa reletoimintoja tapahtui N - 1 -kriteerin täyttävällä lähtötilanteella, oli tilanne, jossa verkkoa heikennettiin paikallisesti siten, että tehonsiirto oli kahdella johdolla melko suuri. Tämän jälkeen toiselle näistä johdoista tehtiin pysyvä vika, jonka takia viallinen johto irrotettiin verkosta 100 millisekunnin kuluttua vian alkamisesta. Tällöin kaikki tehonsiirto kahden alueen välillä jäi yhden johdon varaan ja tämän johdon distanssireleet havahtuivat mitatessaan R -suunnassa selvästi alle 60 Ohmin impedansseja, alimmillaan noin 0,032 p.u. $\approx$ 52 ohmia. (kuva 7.4)



Kuva 7.4. Releen mittaamat impedanssit R - X -tasossa tehoheilahtelujen aikana. Ennen vikaa impedanssi on kaukana negatiivisella puolitasolla. Vian aikana impedanssi siirtyy 2-vyöhykkeelle, minkä takia relemallien täytyy olla kytketty pois päältä vian aikana, jotta reletyökalu ei ilmoita vian aikaisista releiden havahtumisista. Vian poistumisen jälkeen impedanssi jää heilumaan ylittäen toistuvasti releen toimintakuvion rajan tehoheilahtelujen aikana. Relemallit kytketään päälle vian poistamisen jälkeen, jolloin reletyökalun avulla voidaan yhteenvetotiedostosta todeta releiden havahtuneen tehoheilahtelujen aikana. Kuviosta voidaan päätellä, että tehon suunta johdolla on relettä "vastaan" ja että vika tapahtuu releen etupuolessa.

8. Johtopäätökset ja pohdinnat

Simulointien valossa distanssireleiden heilahtelusalpojen käyttöönotolle ei näyttäisi olevan suurta tarvetta, koska releiden havahtumisia ei tapahtunut kuin edellä mainitussa yhdessä tapauksessa. Lisäksi täytyy huomioida, että tämäkin tilanne saatiin aikaiseksi käyttämällä suurta, jopa 50 %:n, varmuusmarginaalia releasetteluissa sekä simuloitaessa tilanteita aivan stabiiliusehtojen rajoilla ja käyttämällä keskeytystilanteita, jotka eivät liene todennäköisiä.

Loppututkimuksesta saadut tulokset ovat samankaltaisia kuin tulokset aiemmin tehdystä vastaavasta tutkimuksesta (Kuisti 2008), jossa releiden mittaamia minimi-impedansseja heilahtelujen aikana on tutkittu muulla tavoin kuin suoraan osana dynamiikkalaskentaa. Lisäsimulointeja erilaisilla tilanteilla olisi tarvittu, jotta varmuus tulosten yhtenevyydestä olisi varmistettu. Lisäksi mainittakoon, että aiempien tutkimusten jälkeen verkkoon on tullut uusia johtoja ja sarjakondensaattoreita ja itse simulointimallia on muiltakin osin päivitetty, joten tarkan vertailun tekeminen on hankalaa. Lisäksi myös tuontitilanteita olisi pitänyt tutkia, sillä tuontitilanteen tehoheilahtelujen nopeammasta vaimenemisesta huolimatta heilahtelun ensimmäisen jakson amplitudi saattaa olla suurempi kuin vientitilanteessa. Tämä johtuu siitä, että siirtokapasiteetti Ruotsista Suomeen päin on suurempi kuin Suomesta Ruotsiin ja näin ollen johtojen kuormitukset ennen heilahtelun laukaisevaa vikaa voivat olla suurempia tuontitilanteessa. Jännitteiden pysyessä samalla tasolla ratkaisevaa impedanssin kannalta on juuri johdoilla kulkeva virta, jonka ollessa suuri, mitattu impedanssi on pieni. Voidaan siis sanoa, että simuloitujen tilanteiden edustavat vain hyvin pientä osaa kaikista mahdollisista verkon tiloista ja lisäksi simulointeihin liittyy aina paljon epävarmuustekijöitä.

Edellä todetun perusteella heilahtelusalpojen käyttö sellaisilla johdoilla, joihin voi vikatilanteiden johdosta kohdistua suuria hetkellisiä tehonsiirtoja, on perusteltua. Käyttöä voidaan perustella sillä, että tilannetta, jossa salpa estää laukaisun silloin kun laukaisu pitäisi sallia todellisen vian sattuesssa kyseessä olevalla johdolla suuren tehoheilahtelun aikana, voidaan pitää hyvin epätodennäköisenä. Lisäksi 400 kV:n verkossa käytössä oleva kahdennettu suojaus tekee virhetoiminnon mahdollisuuden vielä pienemmäksi, koska todennäköisesti vähintään toinen rele toimii oikein, vaikka toinen olisi lukkiutunut heilahtelusalvan johdosta (ks. 4.3.3).

Työn tavoitteena ollut releyökalun kehittäminen onnistui PSS/E-ohjelmiston valmiita relemalleja hyväksi käyttäen. Ohjelman monimutkaisuuden ja erilaisten käyttötapojen johdosta työkalun kehitys jatkui koko työn ajan ja kehitystyötä käytön helppouden ja tulosten keräämisen kannalta olisi edelleen jatkettava, jotta käytettävyydessä päästäisiin hyvälle tasolle. Releyökalun

kehityksen kannalta ratkaisevaa tämän kaltaisessa työssä, jossa kehittäjä ei entuudestaan tiedä ohjelmiston käytön yrityskohtaisia yksityiskohtia, olisi, että kehitteillä olevaa työkalua voitaisiin testata loppukäyttäjien toimesta useaan otteeseen työn aikana alkaen jo hyvin varhaisesta vaiheesta. Tällöin käytön erityispiirteisiin ja haluttuihin ominaisuuksiin voitaisiin saada hyviä parannusideoita riittävän ajoissa ja mahdolliset ongelmat huomattaisiin mahdollisesti aikaisemmin, jolloin turhan työn osuutta voitaisiin minimoida. Lisäksi tällöin loppukäyttäjät tutustuisivat uuteen työkaluun aikaisessa vaiheessa, mikä voisi edesauttaa uuden ominaisuuden käyttöönottoa. Muutoin saattaa käydä niin, että aktiivisen kehitysvaiheen jälkeen työkalun kehitys ja käyttö vähenee tai kokonaan loppuu, jolloin työstä saatu hyöty jää hyvin pieneksi.

Työn aikana oman osansa vastoinikäymisistä aiheutti ohjelmiston valmiista relemallista löytynyt ohjelmointivirhe, joka esti kyseisen relemallin käytön loppututkimuksessa. Reletyökalussa käytettävät makrot olivat kuitenkin ohjelmoitu siten, että työkalun muuttaminen yhteensopivaksi toisen relemallin kanssa onnistui melko helposti. Hyvää ohjelmointitapaa kannattaa siis suosia ohjelmasta ja ohjelmointikielestä riippumatta.

Lähteet

ABB 2007. Technical Reference Manual, Document ID: 1MRK 506 275-UEN, Releen mukana toimitettava käyttöohje.

Anderson, P. M. 1999. Power System Protection, IEEE, McGraw-Hill, New York, ISBN 0-07-134323-7, 1307 sivua.

Areva 2006, Technical Manual, MiCOM^{ho} P443 and P445 Distance Relay, Software Version 33, Hardware Suffix J, P44y/EN M/B21, Releen mukana toimitettava käyttöohje.

Fingrid 2010. Verkkosivut, http://www.fingrid.fi/portal/suomeksi/voimajohdot_ja_maankaytto/johtojen_rakenne/johtoalue, viitattu 25.1.2010

Haarla, L. 2008. Kurssi S-18.3200 Sähkönsiirtojärjestelmät 1, luentomateriaali 2008: Luento 5: Viat ja häiriöt, Luento 6: Siirtoverkon suojausasioita, Luento 7: Jännitestabiilius, Luento 8: Kulma- ja taajuusstabiilius, Luento 12: Siirtokapasiteetti.

SFS-IEC 2002. Standardi SFS-IEC 60050-448, Sähköteknilinen sanasto, osa 448: Sähkövoimajärjestelmän relesuojaus. Suomen standardisoimisliitto SFS, 82 sivua.

IEEE/CIGRE 2004. IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions, Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.; Hatziargyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; Van Cutsem, T.; Vittal, V.; Definition and classification of power system stability. IEEE Transactions on Power Systems, Volume 19, Issue 3, Aug. 2004, p.1390.

IEEE 1991. IEEE Standards: Guide for the Protection of Shunt Capacitor Banks, IEEE Std C37.99-1990, ISBN 1-1555937-071-8. Digital Object Identifier: 10.1109/IEEESTD.1991.101053

IEEE 2006. IEEE Std. C37.109, Guide for the Protection of Shunt Reactors, IEEE Guide for the Protection of Shunt Reactors. IEEE Std C37.109-2006 (Revision of IEEE Std C37.109-1988) IEEE, ISBN 0-7381-5322-2. Digital Object Identifier: 10.1109/IEEESTD.2007.353409. Sivut c1-29.

Koivisto, L. 2010. Vanhempi asiantuntija, Fingrid Oyj, Arkadiankatu 23 B, PL 530, 00101 Helsinki, Yksityiset sähköpostikeskustelut, 14.1.2010, 10.3.2010.

Kuisti H. 2010. Vanhempi asiantuntija, Fingrid Oyj, Arkadiankatu 23 B, PL 530, 00101 Helsinki. Yksityinen sähköpostikeskustelu, 10.3.2010.

Kuisti H. 2008. Vanhempi asiantuntija, Fingrid Oyj, Arkadiankatu 23 B, PL 530, 00101 Helsinki. Fingridin sisäinen muistio, 4.3.2008.

Kundur, P. 1994. Power System Stability and Control, McGraw-Hill, New York 1993 ISBN 0-07-035958-X, 1176 sivua.

Mörsky, J. 1993. Relesuojaustekniikka, Otatieto Oy, Hämeenlinna, 2. korjattu painos, ISBN 951-672-175-3, 459 sivua.

Reilander, A. Tasa- ja vaihtosähköyhteyden vertailu kantaverkon siirtokyvyn lisäämiseksi, Diplomityö, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Sähkötekniikan osasto, 2001, 76 s.

Samuelsson et al 2006. Samuelsson, Olof; Lindahl, Sture, Discussion of "Definition and classification of power system stability". IEEE Transactions on Power Systems, Volume 21, Issue 1, Feb 2006, p.446.

Siemens PTI 2004. PSS/E Program Application Guide, Online Documentation, PSS/E 30, Shaw Power Technologies, Inc. Ohjelmiston mukana toimitettava dokumentointi.

Siemens PTI 2004. PSS/E Program Operation Manual, Online Documentation, PSS/E 30, Shaw Power Technologies, Inc. Ohjelmiston mukana toimitettava dokumentointi.

Suontausta, J. 2010. Asiantuntija, Fingrid Oyj, Arkadiankatu 23 B, PL 530, 00101 Helsinki. Yksityinen sähköpostikeskustelu, 22.1.2010.

TKK 2010, Analogisen säädön verkkokurssi As-74.2111. <http://control.hut.fi/Kurssit/Verkkokurssit/AS-74.2111/tilaesitys/oppitunti4/muodostaminen.html>, viitattu 23.2.2010

Liitteet

Liite 1. PSS/E-ohjelmaan liittyviä määritelmiä.

DAT -tiedosto	PSS/E:n käyttämä tiedostotyyppi ascii-muotoisen datan tulostamiseen. DAT -tiedostoja voidaan katsoa tekstinkäsittelyohjelmalla.
DYR -tiedosto	Verkkomallin komponenttien dynaamisia ominaisuuksia kuvaava tiedosto. DYR -tiedostoon on koottu kaikkien verkkomallin generaattoreiden, magnetointien, stabilointien, tasasähköasemien ohjausjärjestelmien ominaisuudet, joiden perusteella PSS/E muodostaa laskenta-algoritmin suureiden muutoksille. DYR -tiedostoon tulee myös verkon aktiivisten komponenttien, kuten releiden tiedot. DYR-tiedostoa voi katsella ja muokata tavallisella tekstinkäsittelyohjelmalla.
IDEV -tiedosto	Kuten PSAS -tiedosto, mutta sisältää suoraan PSS/E:n ymmärtämiä simulointikomentoja. IDEV -tiedostoja voi tehdä makrojen avulla tai "nauhoittaa" manuaalisesti antamalla simulaatiokäskyjä käsin ja ohjaamalla komennot IDEV -tiedostoon. Tämän jälkeen sama komentosarja on helppo toteuttaa uudelleen suorittamalla IDEV -tiedosto.
IPLAN -kääntäjä	Ohjelma, joka muuttaa tekstitiedostoon kirjoitetun ohjelmakoodin tietokoneen ymmärtämälle konekielelle.
IPLAN -ohjelmointikieli	PSS/E:n tukema ohjelmointikieli, jolla tehtyjä ohjelmia voidaan suorittaa PSS/E:n avulla. IPLAN -ohjelmissa voi käyttää syötteenä ja tulostustiedostona tekstitiedostoja. Ohjelman valmiiden funktioiden avulla päästään käsiksi PSS/E:n tietokantaan, josta voidaan hakea muuttujien tietoja ja muuttaa niitä.

Makro	Pieni, tiettyyn ohjelmistoon liittyvä apuohjelma, joita ohjelmiston käyttäjä voi tehdä ohjelmiston tarjoaman ohjelmointikielen avulla. Makrojen avulla voidaan esimerkiksi suorittaa erilaisia toimintoja ohjelmassa tai käsitellä ohjelman tuottamia tulostietoja. Makroa ei yleensä voida suorittaa ilman pääohjelmaa, eli tässä tapauksessa PSS/E - ohjelmaa. Tämä tarkoittaa sitä, että makron suorituksen täytyy aina tapahtua varsinaisen ohjelmiston sisällä.
PRNT -komento	Komento, jolla voidaan tulostaa simuloinnin binäärimuodossa olevasta ulostulotiedostosta kanavia ascii-muotoon. Ascii-muotoisia tiedostoja voidaan käsitellä IPLAN -makrojen avulla.
PSAS -tiedosto	Komentosarjatiedosto, jolla voidaan ajaa simulaatioajoja kirjoittamalla käskyt ylemmän tason kielellä tiedostoon, josta PSS/E osaa muodostaa simulaatioajon käskyjä.
RELY -toiminto	Komento, jolla tulosten tarkasteluohjelmalle PSSPLT:lle voidaan antaa käytetyn relemallin parametrit ja tämän jälkeen piirtää releen toimintakuvio samaan kuvaan simuloinnista saatavan impedanssikäyrän kanssa R-X -tasoon.
Yhteenvetotiedosto	Tiedosto, joka syntyy reletoinnit tarkastavan makron suorittamisen yhteydessä. Tiedostoon tulostuu simuloinnin aikana tapahtuneet reletoinnit sisältäen releen sijainnin havahtumis- ja resetoitumisaikoihin.

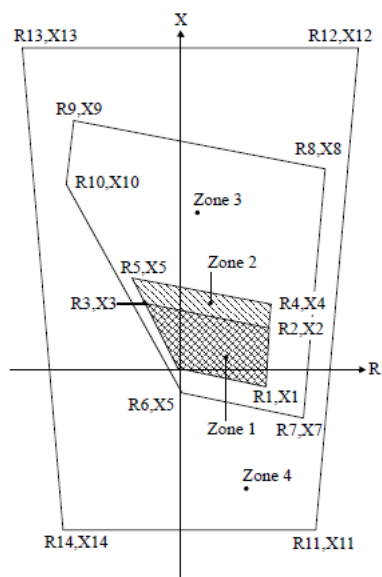
Liite 2. Relemallin RXR1 määrittämiseen vaadittavat parametrit:

Sijaintitiedot: IBUS = "solmusta", JBUS = "solmuun", ID = piirin nro, RS =liitännän numero (1 tai 2)

ICON- vakio	Arvo	Kuvaus		CON-vakio	Arvo	Kuvaus
I		0 - Monitorointitila 1 - Toimintatila		J		R1
				J+ 1		X1
I+ 1		"Kiskosta"	1. kauko- laukaisu	J+ 2		R2
I+ 2		"Kiskoon"		J+ 3		X2
I+ 3		Piirin nro		J+ 4		R3
I+ 4		"Kiskosta"	2. kauko- laukaisu	J+ 5		X3
I+ 5		"Kiskoon"		J+ 6		R4
I+ 6		Piirin nro		J+ 7		X4
I+ 7		"Kiskosta"	3. kauko- laukaisu	J+ 8		R5
I+ 8		"Kiskoon"		J+ 9		X5
I+ 9		Piirin nro		J+ 10		R6
I+ 10	X	Itselaukaisun kauko-ohjaus*		J+ 11		X6
I+ 11	X	Kaukolaukaisun lukitus**		J+ 12		R7
I+ 12	X	Vakiot, jotka vaaditaan releen sisäisen logiikan toteuttamiseen		J+ 13		X7
.				J+ 14		R8
.				J+ 15		X8
I+ 24				J+ 16		R9

* Arvoa ei määritä käyttäjä, vaan sen asettaa toinen rele, joka voi joko pikalaukaista releen tai estää sen itselaukaisun

** Arvoa ei määritä käyttäjä, vaan sen asettaa toinen rele, joka voi estää releen tekemän kaukolaukaisun



J+ 19		X10
J+ 20		R11
J+ 21		X11
J+ 22		R12
J+ 23		X12
J+ 24		R13
J+ 25		X13
J+ 26		R14
J+ 27		X14
J+ 28		Vyöhykkeen 1 hidastus***
J+ 29		Vyöhykkeen 2 hidastus***
J+ 30		Vyöhykkeen 3 hidastus***
J+ 31		Vyöhykkeen 4 hidastus***
J+ 32		Virran raja-arvo (pu)
J+ 33		Itselaukaisun hidastus***
J+ 34		Jälleenkytkennän hidastus***
J+ 35		Kaukolaukaisun hidastus***
J+ 36		Kaukolaukaisun JK-aika***

*** Aika annetaan suhteessa yhteen kellojaksoon:
f = 50Hz --> 1 = 20ms

Vakiot R1 - R14 ja X1 - X14 määrittävät releen toimintakuvion.

KÄYTTÖOHJE: Reletyökalun käyttö dynamiikkalaskennan yhteydessä

Versiopäivitys 2.1:

Tämän version avulla voidaan käsitellä vain PSAS-tiedostojen käytön yhteydessä syntyviä out-tiedostoja. Mikäli ajat simulaatioita käsin, voit käyttää työkalua, kunhan teet (esim. notepadilla) tiedoston viat.psa jonka sisältönä on käyttämäsi tulostiedoston nimi seuraavassa muodossa: "abc (välilyönti) OUTPUT=outfile.out", jossa "abc" voi olla mikä merkkijono tahansa ja "outfile.out" on tulostiedosto. Ylimääräisiä välilyöntejä ei saa olla.

1. Kopioi tiedostot **releiden solmupisteet.txt**, **Tulosta_reledyr.irf**, **Releet.irf**, **Lue_releet.irf**, **Printtaus.irf** työkansioon. Lisää myös käyttämäsi PSAS-tiedosto työkansioon. PSAS-tiedosto tulee olla nimetty **viat.psa**.
 2. Käynnistä PSS/E:n dynamiikkalaskennan käyttöliittymä (pssds4) työkansioista ja suorita makro **Tulosta_reledyr.irf**. Makro kysyy tiedoston nimeä, johon haluat liittää reledatan. Anna käyttämäsi dynamiikkatiedoston nimi (huolehdi siitä, että tiedosto on työkansiossa). Tarkista ohjelman seuranataikkunasta, että 98 kpl releitä lisättiin tiedostoon.
 3. Alusta dynamiikka normaalisti (DYRE) ja tee halutut muutokset simulointiasetuksiin.
 4. Tallenna snapshot ilman kanavia ja sulje ohjelma. Aja bat-tiedosto ja cload4 normaalisti.
 5. Käynnistä PSS/E ja palauta tehonjakotilanne sekä edellisessä kohdassa tallentamasi snapshot
 6. Aja makro **Releet.irf**. Anna käyttämäsi DYR-tiedoston nimi ohjelman kysyessä sitä (ks. ohjelman seurantaikkunaa). Makro tekee nyt kolme IDV-tiedostoa:
 1. **relekanavat.idv**, joka lisää releiden seuraamisessa käytetyt kanavat sekä releiden näkemät R- ja X-arvot tulostuskanaviksi
 2. **releet_monitor.idv**, joka kytkee releet monitorointitilaan.
 3. **releet_act.idv**, joka kytkee releet toimintatilaan.
- Makro samalla myös ajaa IDV-tiedostot **relekanavat.idv** ja **releet_monitor.idv**, joten tämän jälkeen relekanavat on lisätty ja relemallit ovat monitorointitilassa.
7. Dynamiikkasimuloinnin voi nyt aloittaa normaalisti (lisää haluamasi kanavat ja aja haluttu simulaatio).

TÄRKEÄÄ! PSAS-tiedostoon pitää lisätä vian poistamisen (CLEAR FAULT) jälkeisille riveille seuraavat käskyt:

PASSTHRU
IDEV releet.act.idv
FIN

(Käsin ajettaessa simuloinnin vikatapahtuman jälkeen täytyy ajaa IDEV-tiedosto **releet_act.idv**)

Tämä tehdään siksi, että releet täytyy kytkeä päälle vasta vikatapahtuman jälkeen. Muussa tapauksessa ne havaitsevat vian ja toimivat sen johdosta, jolloin reletoinnallisuuden tulokset näyttävät aina releiden toimivan. Lisäksi releet voivat tehdä ei-toivottuja kytkentöjä havaittuaan vian.

HUOM! Tästä eteenpäin toiminta edellyttää, että tiedosto "**viat.psa**" on työkansiossa.

8. Kun simulointi on valmis, suorita makro **Printtaus.irf**. Käynnistä PSSPLT ja aja IDEV-tiedosto **printtaus.idv**.

9. Palaa takaisin PSS/E:n puolelle ja aja makro **Lue_releet.irf**.

10. Ohjelma ilmoittaa onko reletointoja havaittu ja jos on, kehottaa katsomaan tarkemmat tulokset yhteenvetotiedostoista. **Niitä tulostiedostoja, joissa on ollut reletointoja, vastaavat yhteenvetotiedostot löytyvät työkansioista.** Kaikista tarkastettuja tiedostoja vastaavat "temp"-tiedostot löytyvät myös sieltä. Ne kannattaa poistaa simulaation suorittamisen jälkeen.

Relemallin asetteluiden muuttaminen

1. Kopioi tiedosto **Muuta_asettelut.irf** työkansioosi.

2. Avaa tiedosto **Reletyökalu_distr.xlsx**. Tiedoston sijainnilla ei ole merkitystä, eli sitä ei tarvitse kopioida työhakemistoon ennen avaamista.

3. Kytke makrojen käyttö päälle.

4. Muuta sinisellä pohjalla olevia ohmimääräisiä releen asettelutietoja. Voit tutkia mallin suhtautumista todelliseen releeseen grafiikan avulla. Relemallin toimintakuviokuva koostuu ympyrän osasta, joka jää blindereiden 1 ja 2 väliin. Myös todellista relettä voi muuttaa.

5. Paina Kirjoita tiedostoon –nappia, kun sopivat asettelut on valittu.

6. Palaa PSS/E:n dynamiikkakonsoliin ja avaa haluamasi snapshot.

7. Aja skripti **Muuta_asettelut.irf**

8. Asettelut on nyt muutettu!

Excel-taulukko luo hakemiston C:\\PSSE_Temp\\ johon se tallettaa tekstitiedoston, jossa on muutettavat parametrit. Kansion tiedostoihin voi käydä poistamassa makron ajamisen jälkeen.

Minimi-impedanssityökalun käyttäminen

1. Kopioi tiedostot **tee_impedanssi_file.irf** sekä **Lue_impedanssit.irf** työkansioosi.

2. Simuloinnin suorittamisen jälkeen suorita pssds4:ssä makro **tee_impedanssi_file.irf**

3. Siirry PSSPLT:n puolelle ja suorita IDEV-tiedosto **ascii_impedanssit.idv**

4. Siirry takaisin pssds4:n puolelle ja suorita makro **Lue_impedanssit.irf**

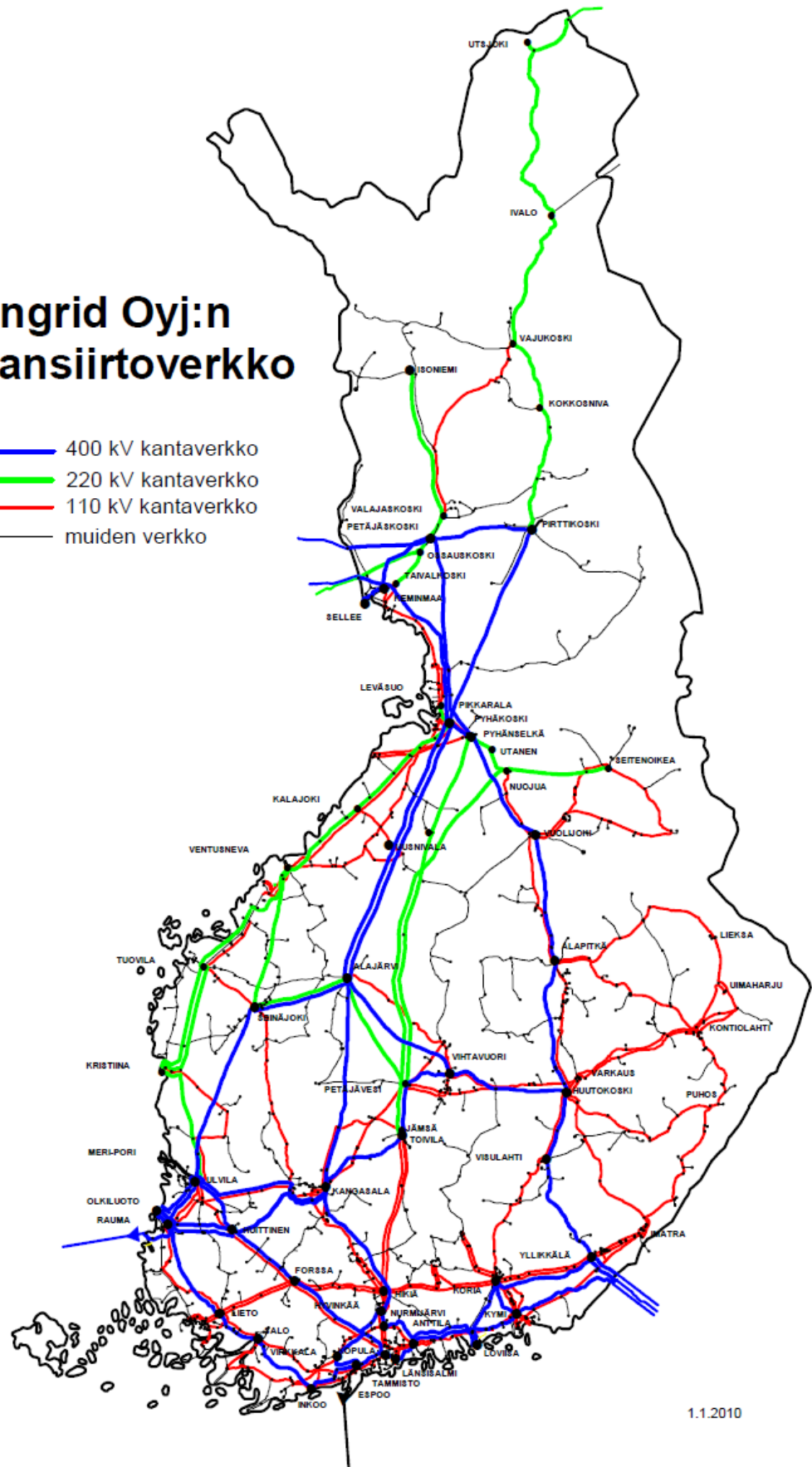
5. Ohjelma tulostaa tiettyjen releiden R-komponentin minimin ja maksimin sekä ohjelman tulostusruutuun, että tiedostoon **R_impedanssit.txt**.

Mikäli tehon suunta johdolla kääntyy simulaation aikana, niin minimi-impedanssityökalusta ei ole hyötyä ($R_{min}=0$). Muussa tapauksessa sen avulla nähdään pienin R-suuntaisen komponentin arvo tehoheilahtelujen aikana kyseisillä releillä. Ohjelmassa käsiteltävät releet on määritelty ohjelmätiedostossa **tee_impedanssi_file.ipl**. Ohjelmakoodin alussa on määritelty String-tyyppinen muuttuja **JONO1**, jonka parametreinä on annettu ne kanavat, joiden arvoja ohjelma käsittelee. Näitä kanavia muuttamalla ja kääntämällä ohjelma uudelleen IPLAN-kääntäjällä on mahdollista muuttaa tarkasteltavia releitä.

Liite 4. Suomen voimansiirtoverkko vuonna 2010.

Fingrid Oyj:n voimansiirtoverkko

- 400 kV kantaverkko
- 220 kV kantaverkko
- 110 kV kantaverkko
- muiden verkko



1.1.2010