



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

ERINEVATE DISTANTSKAITSETE KÄITUMISE
UURIMINE MUUTUVA ELEKTRISÜSTEEMI INERTSI
TINGIMUSTES

ANALYSIS OF DIFFERENT DISTANCE RELAY BEHAVIOURS IN VARIABLE
POWER SYSTEM INERTIA CONDITIONS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mart Aru

Üliõpilaskood: 163242AAVM

Juhendaja: doktorant Marko Tealane
dotsent Jako Kilter

Tallinn 2018

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud. Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“25” mai 2018

Autor:
/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

“25” mai 2018

Juhendaja:
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....”201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees
/ nimi ja allkiri /

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Mart Aru	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Erinevate distantkaitsete käitumise uurimine muutuva elektrisüsteemi inertsi tingimustes	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2018	69 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja(d):</i> doktorant Marko Tealane ja dotsent Jako Kilter	
<i>Töö konsultant (konsultandid):</i>	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida nelja erineva distantkaitse toimimist muutuva inertsi elektrisüsteemis. Uurimuses kasutati kahte reaalselt ja kahte matemaatilist distantkaitset.</p> <p>Töös tutvustatakse elektrisüsteemi normaalseisundit ja teisi võimalikke olekuid. Kirjeldatakse erinevaid lühise tüüpe ja uuritakse lühise mõju sünkroongeneraatorile. Lisaks eelnevale antakse ülevaade distantkaitse töö põhimõtetest. Tutvustatakse elektromehaanilist ja mikroprotsessor releed.</p> <p>Töös keskendutakse kolme erineva lühise tüübi simuleerimisele erineva elektrisüsteemi inertsi juures. Katsete käigus tekitatakse reaajasimulaatori mudelis ühe-, kahe-, ja kolmefaasilist lühist. Seejärel mõõdetakse releede reaktsiooni aega. Täpsemalt pannakse kirja kohad, kus releed ei reageerinud vastavalt modelleeritud tulemustele.</p> <p>Töö tulemusena võib öelda, et kui elektrisüsteemis puudub sünkroongeneraator ja jõuelektronika tootmise osakaal on 5 MVA juures, siis releedel tekib raskuseid lühisele reageerimisega. Kõige raskem on releedel ära tunda kolmefaasilist lühist. Lisaks leiti, et RSCADi mudeli teine matemaatiline relee ei ole kahe- ja kolmefaasilise lühise korral töökindel.</p>	
<i>Märksõnad:</i> sünkroongeneraator, inverter, süsteemi inertsi, lühisvool, distantkaitse, näivtakistus	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Mart Aru	<i>Type of the work:</i> Master's Thesis
<i>Title:</i> Analysis of different distance relay behaviours in variable power system inertia conditions	
<i>Date:</i> 25.05.2018	69 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School of Engineering</i>	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Marko Tealane and Associate Professor Jako Kilter	
<i>Consultant(s):</i>	
<i>Abstract:</i> The purpose of this thesis is to study four different distance relay behaviours in variable power system inertia conditions. Two hardware and two mathematical distance relays were used in the study. The research introduces power system's normal state and other possible conditions. Different types of short circuit are described and short circuit impact to synchronous generator is analyzed. In addition to prior the study will provide an overview of distance relay's working principles. Electromechanical and microprocessor relays are introduced. The paper focuses on simulating three different types of short circuits at different power system inertias. In the course of the experiments a single, two and three-phase short circuit is generated in the real-time simulator model. The relay response time is then measured. The places where the relays did not react according to the modeled results will be specifically pointed out. As a result of the work, it can be said that if there is no synchronous generator in the electrical system and the production balance of the power electronics is at 5 MVA, then the relays will experience difficulties responding to short circuits. The most difficult part for the relays is to detect three-phase short circuit. In addition to above it was found that the second mathematical relay of the RSCAD model is not reliable in two- and three-phase short circuits.	
<i>Keywords:</i> synchronous generator, inverter, system inertia, short circuit, distance relay, impedance	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	6
Eessõna	8
Sissejuhatus.....	9
1 Elektrisüsteem	11
1.1 Elektrisüsteemi stabiilsus.....	14
1.2 Lühised elektrisüsteemis.....	15
1.2.1 <i>Asümmeetrilised lühised.....</i>	<i>16</i>
1.2.2 <i>Generaatori reaktsioon lühisele.....</i>	<i>16</i>
1.3 Tuuleenergia elektrisüsteemis.....	17
1.3.1 <i>Tuuleenergia tootmisseadmed.....</i>	<i>18</i>
2 Releekaitse.....	22
2.1 Elektromehaanilised releed.....	23
2.2 Mikroprotsessor releed.....	24
2.3 Distantkaitse.....	24
2.3.1 <i>Tootja 1 reaalne relee.....</i>	<i>26</i>
2.3.2 <i>Tootja 2 reaalne relee.....</i>	<i>29</i>
2.3.3 <i>RTDS matemaatilised releed.....</i>	<i>31</i>
3 Lühise modelleerimine tootmisüksuste erineva osakaalu puhul.....	33
3.1 Mudeli juhtimine.....	33
3.2 Sätete arvutamine distantkaitsetele.....	36
3.3 Kolmefaasiline lühis.....	40
3.4 Kahefaasiline lühis.....	48
3.5 Ühefaasiline lühis.....	59
Kokkuvõte	64
Kirjandus	68

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Erinevate distantkaitsete käitumise uurimine muutuva elektrisüsteemi inertsitingimustes
Üliõpilane:	Mart Aru, 163242AAVM
Eriala:	elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	dotsent Jako Kilter, doktorant Marko Tealane
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	detsember 2018
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2018

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Teema põhjendus:

Tulenevalt jõuelektronikal põhinevate tootmiseseadmete laialdasest rakendamisest ning klassikaliste pöörlevate tootmiseseadmete vähenemisest elektrisüsteemides suureneb elektrisüsteemi tundlikus väikestele häiringutele (väheneb süsteemi inerts). Süsteemi komponentide muutumine avaldab mõju ka kaitseseadmetele. Distantkaitse on elektrisüsteemis üks levinumaid kaitseliike. Oluline on, et kaitse töötaks õigeaegselt, vältides üle- ja alareageerimist. Tänapäevase teaduskirjanduse alusel puudub ühtne arusaam distantkaitse käitumisest süsteemi vähenenud inertsitingimustes.

Töö eesmärk:

Katsetada nelja erinevat distantkaitset, kaht matemaatilist (RTDS mudelid) ja kaht reaalselt seadet, kasutades selleks reaajasimulaatorit RTDS. Uurida erinevate distantkaitsete rakendumist sõltuvalt tootmise osakaalust, st inertsitasemest süsteemis. Samuti uuritakse kaitsete toimimiskindluse jaoks vastujärgnevusvoolu tekkimise tähtsust asümmeetriliste lühiste korral.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Kirjanduse põhjal erinevate distantkaitsete lahenduste/põhimõtete ja nende eripärade väljaselgitamine

- Kirjanduse põhjal esitatakse ülevaade distantskaitse lahenduse tehnilistest omadustest, modelemise iseärasustest ja hinnatakse lahenduse eeliseid/puuduseid.
- Kirjanduse põhjal töötakse välja metoodika, mille alusel hinnata distantskaitse lahenduste talitluse stabiilsust häiringute korral
- Uuritava elektrisüsteemi konfiguratsiooni määratlemine, mudeli koostmine ja katsetamine RTDS-ga
- Katsetulemuste analüüs
- Analüüsida tootmisüksuste osakaalu mõju distantskaitsele

Lähteandmed:

Teoreetiline info leitakse sobilikest kirjandusallikatest (raamatud ja teadusartiklid, andmebaasid ennekõike IEEE Xplore ja ScienceDirect). Elektrivõrgu koostamiseks vajalikud andmed saadakse juhendajalt.

Eessõna

Lõputöö teema anti välja elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi doktorandi Marko Tealase initsiatiivil. Autorit ajendas antud teemaga tegelemiseks huvi uurida taastuvenergia mõju elektrisüsteemi kaitseseadmetele. Magistritöös kasutatud RSCAD mudel on koostatud juhendaja Marko Tealase poolt. Katsed viidi läbi Tallinna Tehnikaülikooli Eleringi laboris. Olemasolev mudel oli suureks abiks antud töö valmimisele. Lõputöö autor tänab lõputöö kirjutamisel suureks abiks olnud juhendajat Marko Tealast ja Jako Kilterit.

Lõputöö autori alaline elukoht on Tallinn.

Sissejuhatus

Tulenevalt jõuelektronikal põhinevate tootmiseseadmete laialdasest rakendamisest ning klassikaliste pöörlevate tootmiseseadmete vähenemisest elektrisüsteemides suureneb elektrisüsteemi tundlikus väikestele häiringutele (väheneb süsteemi inerts). Järjest enam installeeritakse võrku taastuvenergiaga põhinevaid tootmiseseadmeid. Aastaks 2020 soovib Euroopa Liit vähendada kasvuhoonegaaside osakaalu 20% ja suurendada energia tootmist taastuvatest allikatest 20%.

Taastuvenergia kasutamine elektri tootmiseks avaldab mõju ka elektrisüsteemile. Käesolev magistritöö teema on oluline, sest inertsipuudumine lühise ajal avaldab mõju elektrivõrgu kaitseseadmetele. Konvertertehnoloogial põhineval tootmiseseadmel ei ole tavapäraselt pöörlevat massi. Traditsioonilises võrgu konfiguratsioonis suudab releekaitse lühiseid tuvastada kiirelt ja täpselt tänu küllaltki suurele lühisvoolule. Sünkroongeneraatori lühisvool võib lühise ajal olla kolm kuni kuus korda suurem nimivoolust. Seevastu konvertertehnoloogial põhineval tootmiseseadmetel on piiratud võime anda lühise ajal võrku lühisvoolu.

Magistritöös uuritav distantskaitse on elektrisüsteemis üks levinumaid, aga samas ka üks keerukamaid kaitseliike. Eestis on kõik põhivõrgu liinid kaetud distantskaitsega. On oluline, et seade töötaks õigeaegselt, vältides üle- ja alareageerimist. Viimase aja teaduskirjanduses puudub ühtne arusaam distantskaitse käitumisest süsteemi vähenenud inertsitingimustes.

Käesoleva töö esimeses osas antakse lühidalt ülevaade elektrisüsteemist ja selle seisunditest. Kirjeldatakse erinevaid elektrisüsteemis aset leidvaid lühiseid ja uuritakse nende mõju võrgu erinevatele elementidele. Seejärel antakse teoreetiline ülevaade tuuleenergia tootmisest. Tutvustatakse erinevaid võimalusi kuidas tuulegeneraatoreid ühendatakse võrku. Tuuakse välja erinevate ühendusviiside mõjud elektrienergia tootmisele ja selgitatakse tuulegeneraatori konverteri töö põhimõtet.

Lisaks eelnevale käsitletakse teoreetilises osas releekaitset. Antakse ülevaade distantskaitsest, vaadeldakse elektromehaanilisi ja mikroprotsessor releesid. Kirjeldatakse erinevaid kaitsesoonide määramise viise. Releekaitse viimases osas kirjeldatakse praktilises osas kasutusel olevate releede töö põhimõtet.

Töö teises, praktilises osas, antakse ülevaade katsetes kasutatud seadmetest ning kirjeldatakse mudeli ülesehitust.

Praktilise osa eesmärgiks on vaadelda kaitserelee reageerimist erinevates võrgu konfiguratsioonides. Mõju uurimiseks viidi läbi katseid sõltuvalt tootmise osakaalust, st inertsi tasemest süsteemis ja vaadeldi erinevate distantskaitsete rakendumist.

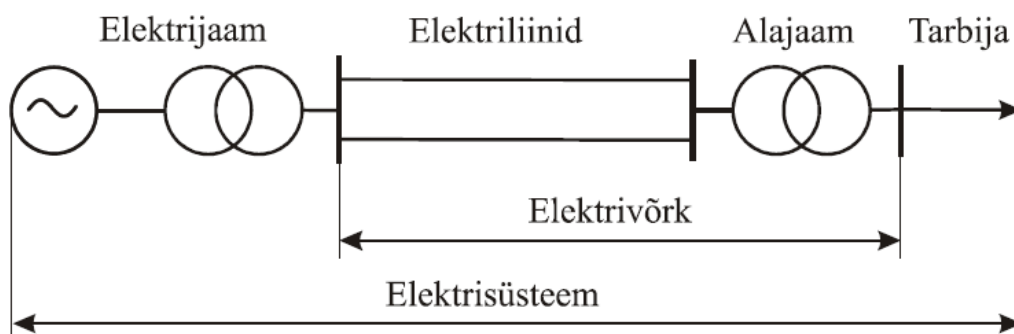
Distantskaitsete uurimiseks arvatati esmalt kaitsele sätteid. Seejärel viidi sätteid releedesse kasutades seadmete tootjapoolset tarkvara. Katsete läbiviimiseks kasutati nelja erinevat distantskaitset – kaht matemaatilist (RTDS mudelid) ja kaht reaalselt seadet.

Peale sätete sisestamist releedesse alustati lühiste simuleerimisega. Selleks kasutati arvuti tarkvara RSCAD. Tarkvara ülesandeks on juhtida mudelit, mis paikneb reaalajasimulaatoris (RTDS). Lühiseid modelleeriti liini algusest 10%, 50%, 85% ja 100% kaugusel. Katsete käigus hoiti summaarset tootmisvõimsust 50 MVA. Lisaks summaarsele (50 MVA) tootmisvõimsusele katsetati kaitsereleesid olukorras, kus sünkroongeneraator oli väljalülitatud ja tuulepargi võimsused olid 50, 25 ja 5 MVA. Iga võimsuse astme juures tekitati kolm erinevat tüüpi lühist.

1 Elektrisüsteem

Elektrisüsteem koosneb elektri tootmisest, ülekandmisest ja tarbimisest. Süsteemis olevad ühendused on omavahel tugevalt seotud. Mida suurem on süsteem, seda ökonoomsem on seda töös hoida. Suures süsteemis saab tootmisressurss paikneda kohas, kus on piisavalt toorainet ja ressursse. Maavarade lähedus tootmisüksusele aitab säästa energiat, mis muidu kuluks kütuse transpordile. Sellest tulenevalt töötavad süsteemid ühendüsteemina. Tervikuna koos toimides on eeliseks suurem töökindlus läbi reserveerimisvõimaluste ja lokaalse reservi väiksem vajadus. Energiat saab toota kaugemal olevast süsteemi osast. Lisaks eelnevale on ühendüsteemis võimalik kasutada kõrgema kasuteguriga seadmeid. Energiasüsteemide liitmisest saadav majanduslik tulu ületab reeglina selle rajamiseks vajaliku kapitalikulu. [1]

Kuna elektrit ei saa suurtes mahtudes salvestada, siis on tegemist dünaamilise süsteemiga. Sellises konfiguratsioonis on elementide elektrilised väärtused ajas muutuvad. Elektrisüsteemi loetakse stabiilseks siis, kui kõikide elementide väärtused jäävad kokkulepitud piiridesse. Joonisel 1.1 on toodud elektrisüsteemi lihtsustatud skeem. [1]



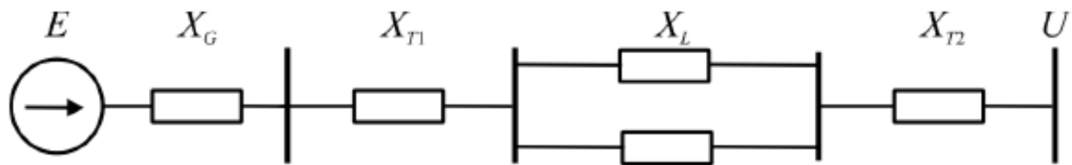
Joonis 1.1. Elektrisüsteemi lihtsustatud skeem [1]

Elektrisüsteem peab olema üles ehitatud nii, et erinevate talitlushäiringute korral säilitaks süsteem sünkroonse töö. Elektrisüsteemi struktuur ja käit peavad tagama, et ebasoodsate talitushäiringute korral ei tekiks süsteemis juhitamatut ja edasivalguvat elektrikatkestust. Väärtalituse korral võib rike levida ühendüsteemis laviinina. [1]

Keerukamates süsteemides on rohkem tootjaid ja tarbijaid ning süsteem koosneb erinevatest magistraal- ja haruliinidest. Keskpingevõrgud talitlevad peaaegu eranditult radiaalskeemi kohaselt. Eestis on levinud radiaalvõrk, sest suuremate keskuste vahemaad ei ole väga pikad ja tarbimine on enamasti koondunud suurematesse keskustesse. Selline võrgu ülesehitus on tüüpiline hajaasustuse piirkonnas. [1]

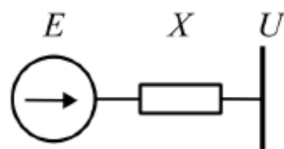
Suurte energiasüsteemide keerukus seisneb selles, et kõigi süsteemis olevate generaatorite töö peab olema sünkroonis ehk generaatorite rootorid peavad pöörlema sünkroonselt. Kui generaatorite vaheline nurk ületab kindlat väärtust võib ühendsüsteemis tekkida avariid. [2]

Asendades lihtsustatud süsteemi elemendid reaktiivtakistusega, saame elektrisüsteemi lihtsustatud askeemi (joonis 1.2).



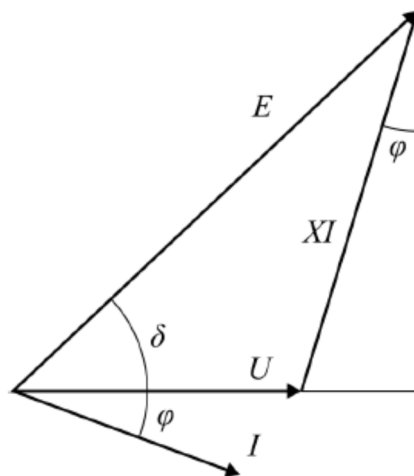
Joonis 1.2. Lihtsustatud elektrisüsteemi askeem [2]

Teisendades askeemi saame summaarsest takistusest koosneva ekvivalentse skeemi (joonisel 1.3).



Joonis 1.3. Ekvivalentne askeem [2]

Ekvivalentse askeemi põhjal on võimalik koostada vektordiagramm (joonis 1.4), mis vastab lihtsustatud elektrisüsteemile.



Joonis 1.4. Lihtsustatud elektrisüsteemi vektordiagramm [2]

Lihtsustatud elektrisüsteemi vektordiagrammi järgi saab tuletada järgmised seosed [2]:

$$\begin{aligned}E \sin \delta &= X I \cos \varphi \\ \frac{EU}{X} \sin \delta &= I U \cos \varphi \\ P &= \frac{EU}{X} \sin \delta\end{aligned}\tag{1.1}$$

Ekvivalentse generaatori võimsuse muutmisel jääb süsteemi takistus X ilmselt muutumatuks. Eelduste kohaselt on muutumatu ka pinge vastuvõtva süsteemi lattidel ning kui puudub automaatne ergutusregulaator, siis ka elektromotoorjõud. Generaatori võimsuse kasvamisega suureneb elektromotoorjõud ja pinge vaheline nurk δ ning vastupidi, kui võimsus kahaneb, siis nurk δ väheneb.

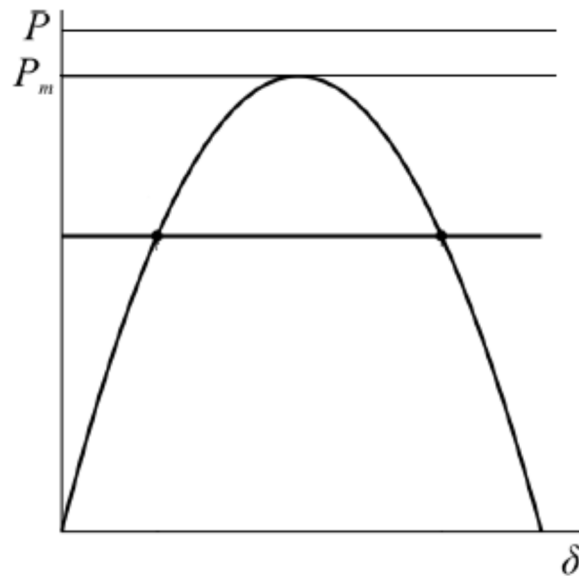
Elektromotoorjõu vektor jääb 90° võrra maha teda põhjustava magnetvoo vektorist. Seega langeb elektromotoorjõu vektor alati generaatori põiktelge. Kui ette kujutada, et elektromotoorjõu vektor on jäigalt seotud generaatori rootoriga, siis rootori pöörlemisel muutub vastavalt ka vektori E asend ja nurk δ . Nurk δ on seega mõjutatud nii elektrilistest kui ka mehaanilistest teguritest. Sellest tulenevalt on nurgal δ suur tähtsus elektromehaaniliste siirdeprotsesside kirjeldamisel. [2]

Võimsuse sõltuvust nurgast δ nimetatakse nurkkarakteristikuks. Kui elektromotoorjõud, süsteemi pinge ja takistus on muutumatud, siis valemi 1.1 kohaselt on nurkkarakteristik sinusoid. Nurkkarakteristiku amplituud on kirjeldatud valmiga 1.2. [2]

$$P = \frac{EU}{X}\tag{1.2}$$

Kasutades valemit 1.1 ja 1.2 saadud sinusoidi peale kandes turbiini mehaanilise võimsuse saadakse generaatori püsitalitluse tööpunktid, sest püsitalitluses peavad generaatori ja turbiini võimsused olema võrdsed. Generaatori maksimaalne võimsus saavutatakse juhul kui nurk $\delta = 90^\circ$. Turbiini mehaaniline võimsus sõltub turbiini läbivast aurust. Püsitalitlused loetakse turbiini võimsus konstantseks ning joonisel kujutatakse horisontaalse joonega. Sellisel juhul on kolm võimalikku olukorda, mis on näha joonisel 1.5 [2]:

1. Turbiini mehaaniline võimsus on võrdne generaatori elektrilise võimsusega.
2. Turbiini mehaaniline võimsus on suurem kui generaatori elektriline võimsus
3. Turbiini mehaaniline võimsus on väiksem kui generaatori elektriline võimsus.



Joonis 1.5. Generaatori ja turbiini võimsuste olekud [2]

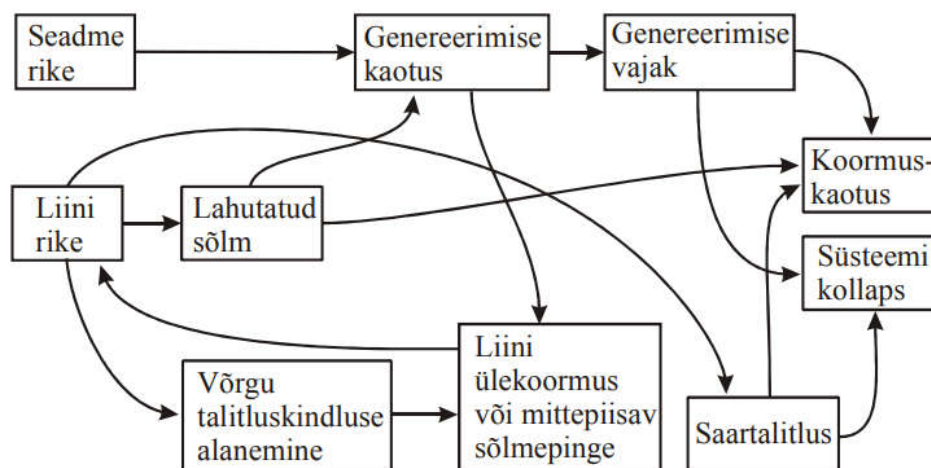
Jooniselt on näha, et lihtsa elektrisüsteemi ekvivalentsest generaatorist süsteemi ülekantav võimsus ei saa ületada mehaanilist väärtust, mis on määratud ülekandeseadmete ja generaatori parameetritega. [2]

1.1 Elektrisüsteemi stabiilsus

Elektrisüsteemi kõige olulisemaks kriteeriumiks võib pidada stabiilsust. Kui protsess on stabiilne siis see tähendab, et süsteem töötab ilma häiringuteta. Elektrisüsteemis võib eristada nelja seisundit:

- Normaalseisund
- Raskendatud seisund
- Avariiseisund
- Avariijärgne seisund

Normaalseisundis on tarbijatele tagatud süsteemi töökindlus, elektrienergia kvaliteet ja ökonoomsus. Raskendatud seisundis on üks või enam parameetrit väljunud ettenähtud normidest. Avariiseisund on raskendatud seisundi edasiarenenud juhtum, kus parameetrid on muutunud selliselt, et raskendatud seisund on üle läinud rikkeks ning osa seadmeid on saanud kahjustada või lülitunud välja. Avariijärgses seisundis on rike lokaliseeritud ja on asunud seda kõrvaldama. Kui avariijärgses seisundis saab rike kõrvaldatud, siis süsteem läheb üle normaalseisundisse. Joonisel 1.6 on kujundlik skeem elektrisüsteemi elementide rikete tagajärgedest. [1]



Joonis 1.6. Lihtsustatud skeem elektrisüsteemi elementide rikete tagajärgedest [1]

Selleks, et olla kindel elektrisüsteemi talitluse toimimises tuleb uurida süsteemi olekuid generaatorite, kompensaatorite, liinide ja teiste põhielementide väljalangemise korral. Analüüsi eesmärgiks on ennustada püsiseisundeid, mis võivad välja kujuneda peale rikkeid ja plaanilisi lülimisi. [1]

1.2 Lühised elektrisüsteemis

Siirdeprotsessid leiavad aset elektrisüsteemis järskude muutuste tagajärjel. Elektromagnetilisi siirdeprotsesse võivad esile kutsuda nii normaaltalitluse juhtimistoimingud (liinide, generaatorite, trafode ja teiste elektrisüsteemi elementide plaanilised sisse- ja väljalülitamised, reguleerimistoimingud) kui ka avariid. Enamlevinud avariide põhjused on järgmised:

- välgulöögid
- inimlikud eksimused
- liigkoormused
- seadmete rikked või väärtoimingud

Avariid süsteemis avalduvad lühistena või faasi katkemistena. Rikete poolt põhjustatud väärtalitused võivad elektrisüsteemi töös tekitada tõrkeid ja tarbijatele ebanormaalseid pingeid ja voolukatkestusi. [3]

Kõige sagedasemad ja ohtlikumad normaaltalitluse rikked on lühised. Lühis süsteemis on olematu või väga väikese takistusega plaanimata lühiühendus vooluahelas kahe või enam erineva potentsiaaliga komponendi vahel. Eranditeks võivad olla planeeritud lühised. Selliseid lühiseid kasutatakse jäätunud liinijuhtmete sulatamiseks, mõõtmiseks või muudeks katsetusteks. [3]

Lühiseid elektrisüsteemis võib nende tekke omaduselt jagada kaheks – sümmeetrilised ja asümmeetrilised lühised. Sümmeetrilised lühised esinevad, kui kõik kolm faasi on omavahel lühistatud. Sümmeetria eelduseks on, et kõikides faasides on võrdsed induktiivsused, aktiivtakistused ja vastastikused induktiivsused. Asümmeetrilised lühised esinevad süsteemis juhul, kui toimub ühe- ja kahefaasilised lühised ning kahefaasilised maalühised. Antud lühiseid nimetatakse asümmeetrilisteks, sest need hõlmavad ainult osa faase. [3]

1.2.1 Asümmeetrilised lühised

Asümmeetriliste lühiste korral hakkab generaator võrku genereerima kõrgemaid harmoonikuid. Kõrgemate harmoonikute arvestamine lühisvoolude arvutamisel on keerukas. Kuna kõrgemate harmoonikute amplituud, võrreldes põhikomponentidega, on oluliselt madalam, siis on kõrgemate harmoonikutega mittearvestamine põhjendatud. Lühisvoole ja –pingeid arvutatakse sümmeetriliste komponentide meetodiga. Arvutusviis põhineb sellel, et juhuslikult valitud faaside parameetrite avaldumine toimub läbi kolme sümmeetrilise elemendi, milleks on päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponent. [3]

Asümmeetriliste lühiste korral omavad suurt mõju päri-, vastu- ja nulljärgnevustakistused. Õhu- ja kaabelliinide päri- ja vastujärgnevustakistused on võrdsed, kuid nulljärgnevustakistused erinevad neist oluliselt [3]. Nulljärgnevusvoolud liiguvad õhuliini lühise korral kas läbi maa või liiniga paralleelselt paiknevas juhis (nt piksekaitsetross, raudteerööpad, metalltorud). Nulljärgnevustakistuste arvutamisel on probleemiks voolu määramine. Vool võib jaguneda maapinna ja teiste voolujuhtivate kontuuride vahel. Sellepärast on takistuse arvutamisel tehtud lihtsustus. Eelduseks on võetud, et liiniga ei paikne rööpselt voolujuhtivaid kontuure ning maa takistus on pindala kohta ühesugune ning kindla väärtusega. Sellest tulenevalt liigub kogu nulljärgnevusvool läbi pinnase. [3]

1.2.2 Generaatori reaktsioon lühisele

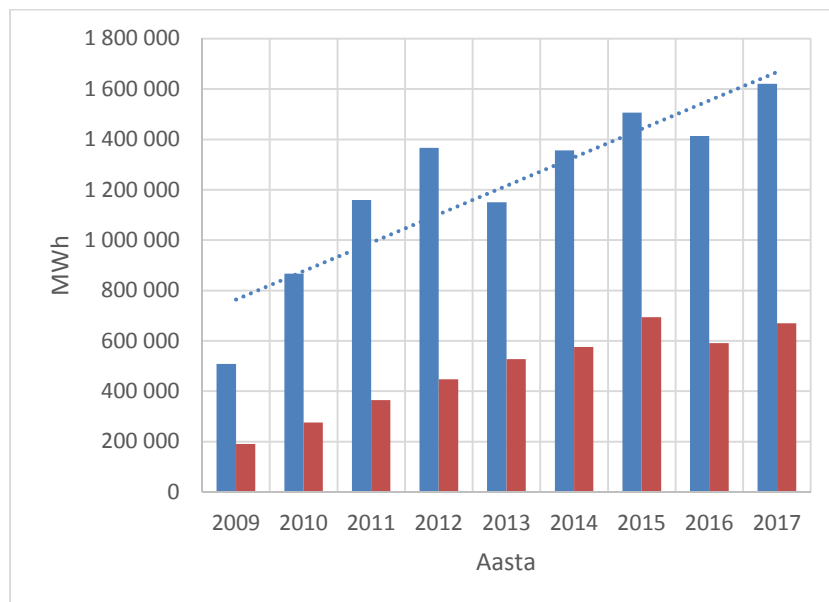
Generaatorite elektromotoorjõud ja takistused on elektrivõrgus toimuvate lühiste suhtes tundlikud. Elektriliste suuruste muutumist siirdeprotsesside käigus võib nimetada generaatori reaktsiooniks lühisele. Parameetrite muutumise suurus sõltub oluliselt lühisekoha ja masina klemmide vahele jäävast takistusest. Mida lähemal toiteallikast lühis aset leiab, seda suuremaks kujuneb allika reaktsioon, mis toob kaasa voolu perioodiliste komponentide muutumise. Mida kaugemal on lühis generaatorist, seda vähem tundlik on generaator lühisele. [3]

Lühise eelsel normaaltalitusel töötab generaator püsitalitusel, kus ergutusmähist läbiv ergutusvool tekitab ergutusvoo, mis staatorimähist aheldades indutseerib staatorisse elektromotoorjõu, mille tulemusel tekib läbi elektrivõrgu ja tarbijate suletud staatorimähises vool. Staatorivool omakorda tekitab rootori suhtes paigalseisva magnetvoo ehk ankrureaktsiooni. Staatorivoolu pikikomponent kutsus esile ergutusvoolule vastupidise suunaga magnetvoo. Põikikomponent kutsus esile aga voo, mis edastab magnetvoogu 90° võrra nihkes. Lühise olukorras suurenevad staatorivoolu piki- ja põikikomponent järsult. Parameetrite järsk muutumine suurendab staatorivoolu, mis suurendab ka ankrureaktsiooni. [3]

1.3 Tuuleenergia elektrisüsteemis

Viimasel kümnendil on järjest enam panustatud tuuleenergia arendamisse. Maailma Tuuleenergia Ühingu andmetel oli 2017. aasta lõpuks maailmas kokku installeeritud tuuleenergia võimsus 539 GW. Kogu installeeritud võimsusest piisaks, et katta ära kogu elektrienergia tarbimisest 5%. Tuulest toodetud energial nähakse suurt potentsiaali asendamaks fossiilsetest kütustest toodetud energiat [4]. Eesti Tuuleenergia Assotsiatsiooni [5] andmete alusel on 2016. aasta lõpu seisuga Eesti elektrituulikute installeeritud võimsus 309,96 MW.

Seoses karmistuvate keskkonnanõuete ja tehnoloogia arenguga on järjest enam hakatud elektrit tootma taastuvatest energiaallikatest. Joonisel 1.7 on näha Eestis toodetud taastuenergia kogus perioodil 2009-2017 [6].

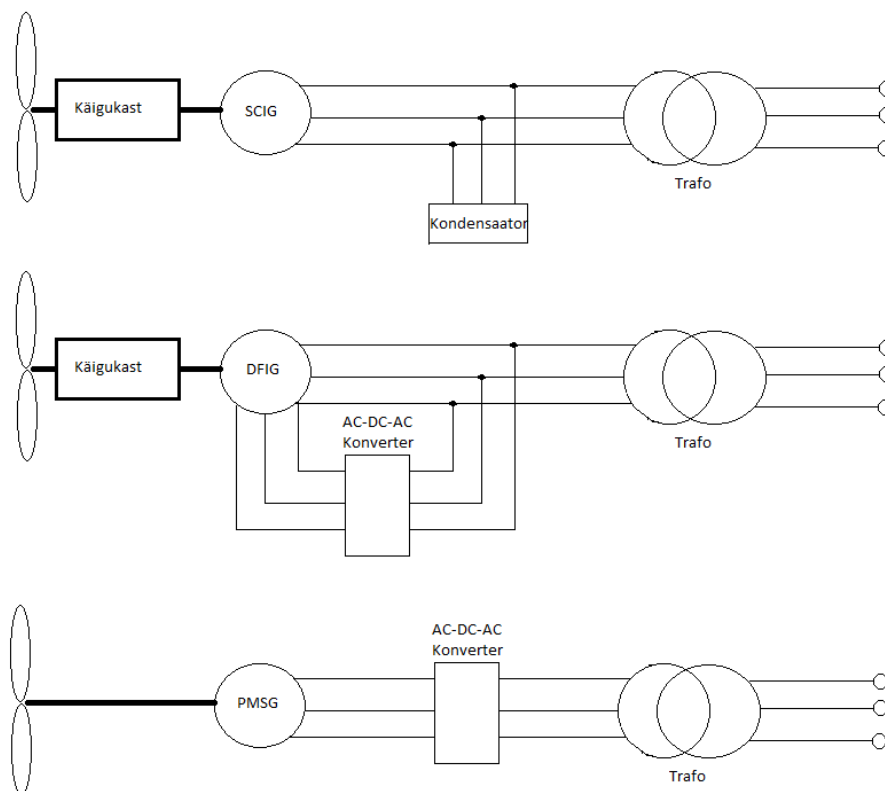


Joonis 1.7. Eesti taastuenergiast toodetud elektrienergia aastatel 2009-2017 (sinine kogu taastuenergia; punane tuuleenergia) [6]

Jooniselt on näha, et ligikaudu pool taastuenergia toodangust tuleb tuuleelektrijaamadest. Eleringi poolt koostatud 2017. aasta Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruande põhjal oli Eestis installeeritud tuuleelektrijaama võimus 313,3 MW ja päikeseelektrijaama võimsus 7,8 MW. 2018. aastaks prognoosib Elering Eestis toodetud taastuenergia koguseks 1650 GWh, millest tuuleenergia osakaal on 669GWh. Prognoositud taastuenergia kogus on 2% suurem kui oli aastal 2017 kogu toodang. [6]

1.3.1 Tuuleenergia tootmisseadmed

Tuulegeneraatorid muundavad tuule kineetilise energia mehaaniliseks energiaks, mis omakorda muundatakse läbi generaatori elektrienergiaks. Peamised tuulegeneraatorid on *squirrel cage induction generators* (SCIG), *doubly fed induction generators* (DFIG) ja *permanent magnet synchronous generators* (PMSG). Joonisel 1.8 on toodud generaatorite võrguühenduste lihtsustatud skeemid.



Joonis 1.8. SCIG, DFIG ja PMSG generaatorite ühendamise võrguga [7]

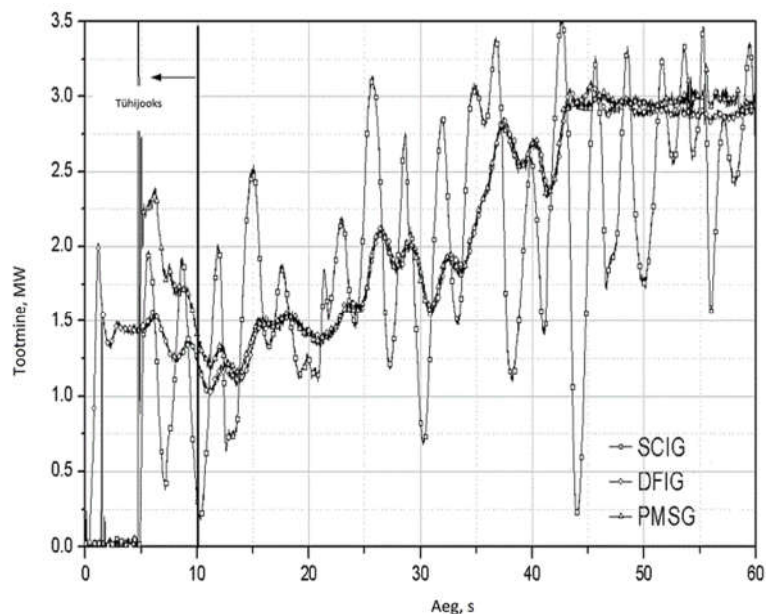
SCIG tüüpi seadmed on tavaliselt asünkroonmootorid. Juhul kui pöörleva keha moment on suurem kui sünkroongeneraatoril, siis seadeldis käitub kui generaator. Sellist tüüpi masinaid kasutatakse tuuleenergiast generaatoritena, sest nad on odavamad, vähem hooldust vajavad ja lihtsama ehitusega võrreldes püsimaagnet sünkroongeneraatoritega. Magnetvälja hoidmiseks

vajab generaator reaktiivenergiat, mis toodetakse võrku ühendatud kondensaatorpatareiga. Reaktiivenergia suure osakaalu tõttu on generaatori võimustegur väike. Sellist tüüpi generaatorid ei sobi suurde energiasüsteemi, kuna nad tarbivad liiga palju reaktiivenergiat. Lisaks reaktiivenergia tootmisele on asünkroonmasinale iseloomulik suur käivitusvool. Tihti vajavad sellised mootorid juhtimisseadmeid, mis siluvad käivitusvoole. [7]

DFIG eelis SCIG ees on see, et asünkroonmasina rootori ergutust on võimalik muuta. Ergutuse muutmise saab generaatorit kasutada erinevatel tuule kiirustel. DFIG masina puhul saadakse lisaergutus võrgust läbi AC-DC-AC inverteri. Inverteri tulemusena saab tuulegeneraatori rootori kiirust reguleerida $\pm 30\%$. [7]

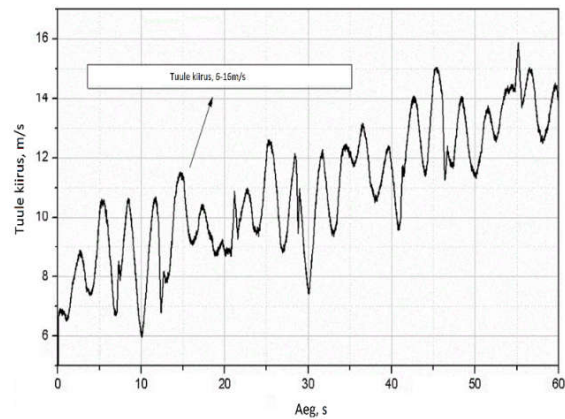
PMSG masin kasutab püsिमagnetiteid, et tekitada magnetvoog. Püsिमagnetite olemasolul ei vaja masin lisaergutust, et genereerida elektrienergiat. Sellest tulenevalt on masina hoolduskulud väiksemad. Käesolevas töös läbiviidud katsetel on kasutatud RSCAD-i PMSG tüüpi tuulikut, mis on võrguga ühendatud läbi AC-DC-DC-AC inverteri. PMSG tüüpi masinad on osutunud efektiivsemateks kui asünkroonmasinad. Viimasel ajal on PMSG masinad muutunud kuluefektiivsemaks peamiselt püsिमagnetite hinna alanemise tõttu. [7]

Joonisel 1.9. on toodud kolme tuulegeneraatori ühendusviisi väljundvõimsused. Väljundvõimsused on mudelleeritud joonise 1.10 järgi. [8]



Joonis 1.9. Erinevalt ühendatud tuulegeneraatorite väljundvõimsused samadel tuuletingimustel [8]

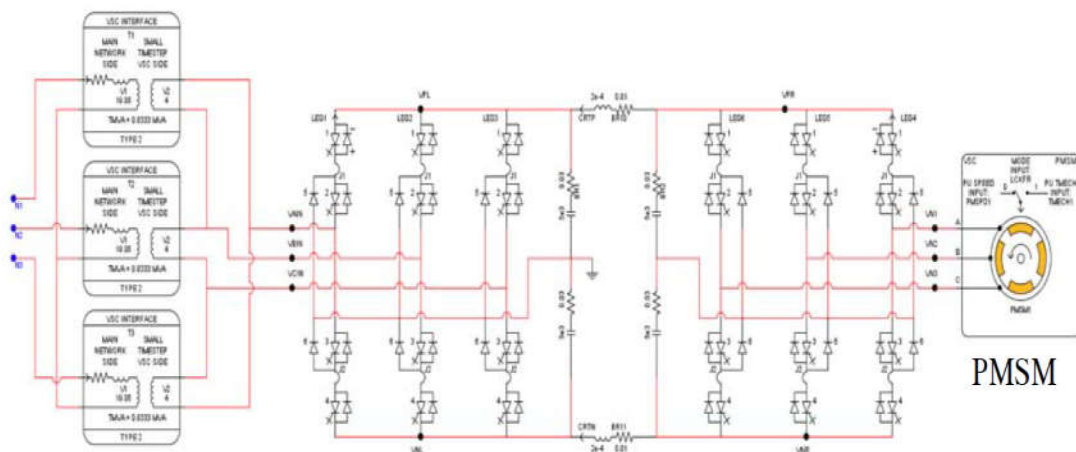
Jooniselt on näha, et DFIG ja PMSG ühendusviisid on tunduvalt efektiivsemad kui SCIG. Muutuva tuulekiiruse juures ei suuda SCIG ühendus võrku anda stabiilselt energiat. Peamine põhjus on ergutusmähise induktsiooni suur kõikumine. [8]



Joonis 1.10. Tuulegeneraatori võimsuste modelleerimisel kasutatud tuule graafik [8]

Taastuenergia tootmisüksuste võrku ühendamiseks kasutatakse konvertereid, sest toodetav energia ei ole stabiilne. Päikese- ja tuuleenergia tootmine sõltub tuule kiirusest või päikese intensiivsusest. Ebastabiilsus on üheks põhjuseks miks kasutatakse taastuvatest allikatest toodetud energia võrku ühendamisel jõuelektroonika seadmeid.

Kolmefaasiline vaheldi koosneb lülitite komplektist. Iga lüliti juhhib faaside pingeid nii, et nad oleksid üksteise suhtes 120° võrra nihutatud. Joonisel 1.11 on toodud tuulepargi RSCAD mudel



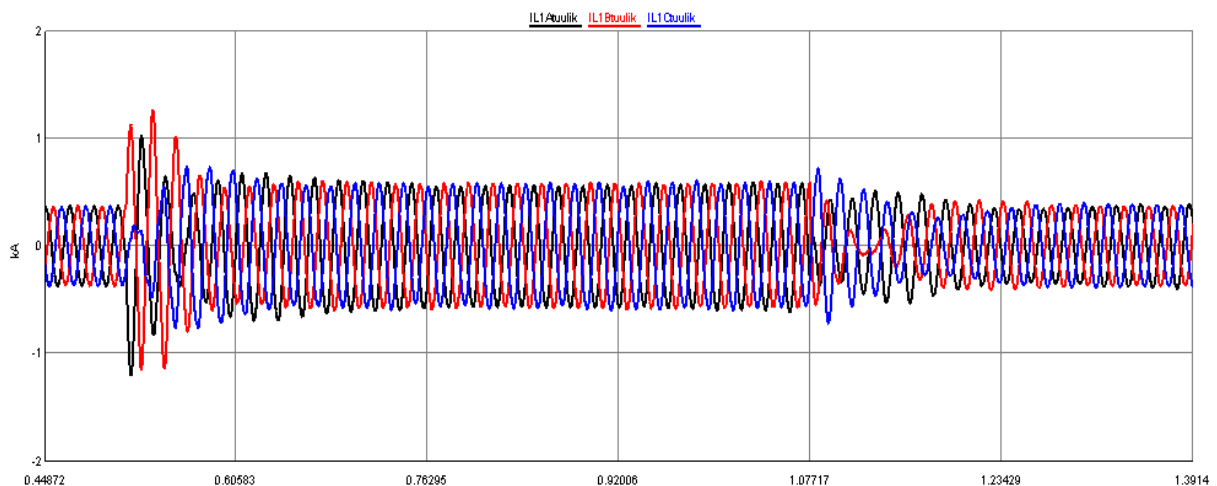
Joonis 1.11. Tuulepargi RSCAD mudel [9]

Joonisel 1.11 vasakult esimene elementide plokk moodustab trafo, mis on võrguga ühenduses. Sellele järgnev lülitite grupp on AC-DC-DC-AC konverter. Skeemil kõige viimasena on kujutatud püsिमagnetitega sünkroongeneraatorit.

Võrguga ühenduses oleva trafo mähised on ühendatud täht-kolmnurka. Selline ühendusviis on valitud selleks, et summutada nulljärgnevusvoole. Trafo madalpinge pool on 4 kV, mis on võrdne tuulegeneraatori väljundpingega. Kõrgepingepoole nimipinge on 33 kV. Viimase lülina tuulepargi ja elektrisüsteemi vahel on trafo nimipingega 110/33 kV. [9]

Trafo ja generaatori vahele jääva pingeaallika konverter on mõlemast otsast ühendatud läbi pingereaktorite ning maandatud läbi inverteri kondensaatori. Selline ühendusviis vähendab kolmandat järku harmoonikuid ja nulljärgnevuspingeid, mis on genereeritud püsिमagnetitega sünkroongeneraatori poolt. [9]

Järjest enam on hakatud võrgueeskirjas nõudma, et taastuvatel allikatel põhinevatel tootmisüksustel peab olema võimekus lühise ajal anda võrku piisavalt ebasümmeetrilist lühisvoolu. Siiaamaani on enamused konvertereid projekteeritud nii, et lühise ajal antakse võrku sümmeetrilist lühisvoolu või kui see ei ole võimalik, siis konverter lülitatakse võrgust lahti. Joonisel 1.12 on toodud praktilises osas kasutatav tuulepargi konverter.



Joonis 1.12. RSCAD jõuelektroonika inverteri lühisvool kahefaasilise lühise korral

Jooniselt on näha, et peale kolmandat perioodi on lühise ajal konverterist väljatulev vool küllaltki sümmeetriline. Käesolevas magistritöös on konverteri maksimaalne lühisvool piiratud 1,3 kordse nimivooluni.

Konverteritehnoloogial põhinevatel tootmiseadmetel on piiratud võime anda lühise ajal võrku lühisvoolu. Üldjuhul jääb konverteri lühisvool lühise ajal vahemikku 1-1,3 korda nimivoolu. Tunduvalt madalam lühisvoolu kordsus on tingitud konverteri sees olevast jõuelektroonika vastupidavusest. Lühis avaldab konverteri komponentidele tugevat termilist mõju. Piirates lühisvoolu on võimalik konverteri tootmiseks kasutada odavamaid komponente. [10]

2 Releekaitse

Releekaitse on üks peamistest kaitseviisidest elektrisüsteemis. Releede levik hakkas kiirenema koos automaatika arenemisega. Rikked, mis toimuvad elektrisüsteemis, on tavapäraselt väga kiire iseloomuga. Inimene ei jõua füüsiliselt õigeaegselt reageerida sündmustele, mis toimuvad elektrisüsteemis. Võrgueeskirja [11] kohaselt peab 330 kV liinil oleva lühise välja lülitama maksimaalselt 0,37 sekundi jooksul. 220 kV ja 110 kV võrgus on maksimaalne lühise aeg üks sekund. Rikke korral täiendavate kahjude vältimiseks kasutatakse automaatseid lahendusi.

Releede iseloomulikuks tunnuseks on automaatselt toimiv seade, mis reageerib etteantud füüsikaliste suuruste ehk sätete muutusele. Relee headeks omadusteks on kerge kasutajaliides, täpne reageerimine ning funktsioonide mitmekesisus. Enimlevinud relee kaitseliigid on:

- Voolukaitse;
- Pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse;
- Põikidiferentsiaalkaitse;
- Maalühiskaitse;
- Pingekaitse;
- Distantkaitse. [12]

Releekaitse ei hoia ära rikke tekkimist, vaid takistab rikke levimist süsteemis. Kuna süsteemi elemendid on omavahel tihedalt seotud, siis rikke tagajärjel võib tekkida kaskaadne protsess. Rikke ulatuse piiramiseks annab releekaitse signaali kahjustatud osa eraldamiseks süsteemist. Releekaitse ise ei ole võimeline riket lokaliseerima. Rikke kõrvaldamiseks läheb signaal releest võimsuslülitile, mis omakorda lülitab rikkalise osa süsteemist välja. Kuna elektrisüsteemis ei ole staatilisi suursi, siis releekaitse peab töötama kindlaksmääratud vahemikus. Vältida tuleb üle- ja alareageerimist. Ülereageerimine toob endaga kaasa lühiajalised katkestused, mis häirivad tarbijaid. Alareageerimise korral võib rike kanduda edasi teistele süsteemi elementidele ning põhjustada laiaulatuslikuma katkestuse. [12]

Releekaitse toimimispõhimõtet võib iseloomustada viie põhiomaduse järgi:

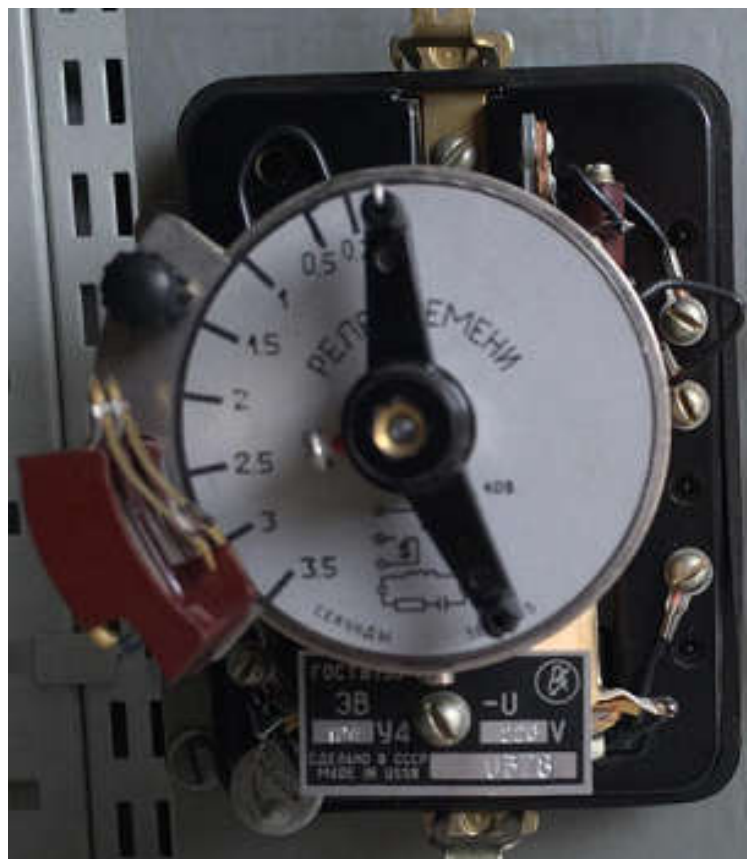
- Tunnussuurus;
- Rakendumise viide;
- Tunnussuuruse muutumise suund peale kaitse rakendumist;
- Selektiivsuse tagamine.

Vastavalt iseloomulikule põhiomadusele liigitatakse releed erinevatesse klassidesse. Eestis enim levinud releed jaotatakse kaheks [12]:

- Elektromehaanilised;
- Mikroprotsessorreleed.

2.1 Elektromehaanilised releed

Elektromehaanilised releed on levinumad releed elektrisüsteemis, sest nad on töökindlad ja neid on kõige kauem kasutatud. Nende tööpõhimõte on küllaltki lihtne. Igal releel on magnetahel, mis koosneb ankrust ja ikkest. Voolu suurenemisel magneetimisvoog suureneb ja rele kontaktid liiguvad, mille tagajärjel rakendub rele. Takistusmoment on üldjuhul loodud vedru abil. Joonisel 2.1 on kujutatud elektromehaaniline aegrelee. [12]



Joonis 2.1. Elektromehaaniline aegrelee

Relee miinuseks võib pidada seda, et mehaanilise kulumise tagajärjel rele täpsus halveneb. Kui rele vedru välja venib, siis tema takistusmoment ei ole enam sama. Relee rakendumine toimub siis, kui on täidetud järgmine tingimus:

$$M_{töö} > M_{tak} + M_{hööre}$$

kus $M_{\text{töö}}$ – töömoment

M_{tak} – takistusmoment ehk säte

$M_{\text{hõõre}}$ – füüsilisest kontaktist tulenev hõõrdejõud

Kui töömoment on suurem kui säte ja hõõrdejõud, siis toimub relee rakendumine. [12]

2.2 Mikroprotsessor releed

Maailmas hakati mikroprotsessoreid arendama 1960-ndate lõpus ja 1970-ndate alguses. Arendustööd käisid käsikäes koos arvutite arenguga. Releede levik ei olnud väga kiire, kuna tol ajal oli arvutustehnika väga kallis ning võttis palju ruumi. Mida kiiremaks ja väiksemaks muutusid arvutid, seda enam hakati mõistma protsessoritel töötavate releede eeliseid. [13]

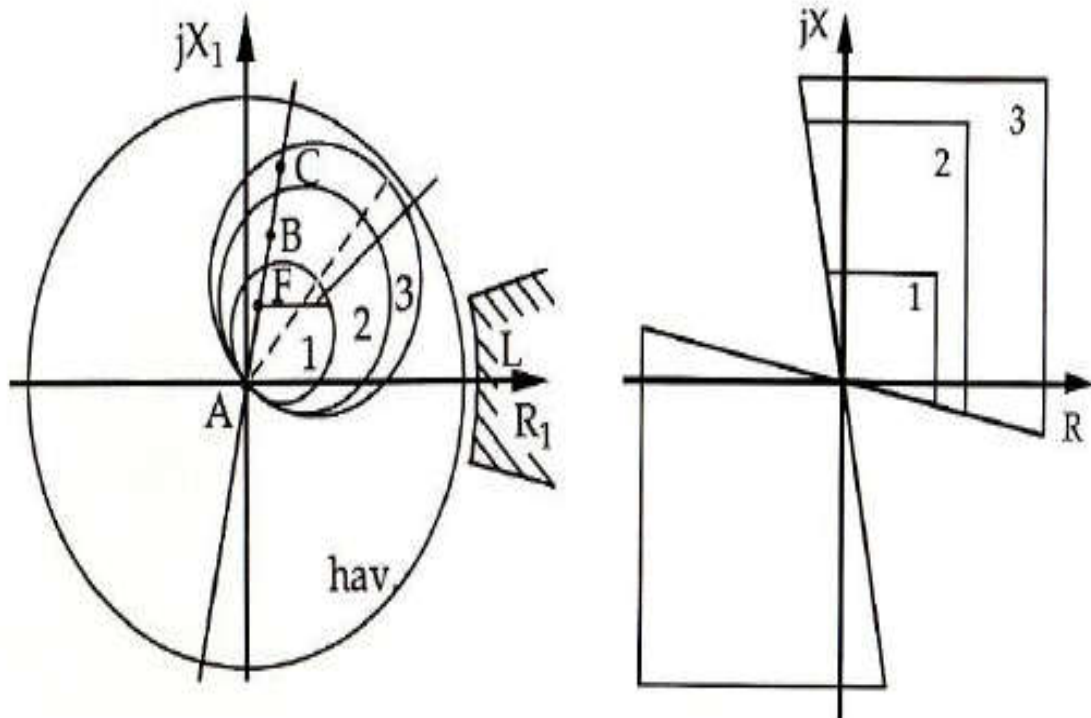
Mikroprotsessor releede eelised võrreldes mehaaniliste releedega on see, et nad suudavad teostada enesekontrolli ja nad on laialdaselt seadistatavad. Koos sidekanaliga on mikroprotsessoritel põhinevad releed täielikult selektiivsed. Arvutustehnika kiire arengu tulemusena on releed muutunud odavamaks, makstes mõnel juhul vähem kui mehaanilised releed. Ühel releel võib olla mitu erinevat kaitsefunktsiooni. Lisaks funktsioonidele on releede kaudu võimalik SCADAse saata mõõteandmeid. Seadmete mõõtekiirused jäävad tavaliselt suurusjärku 20 mõõtmist sekundis. [13]

2.3 Distantkaitse

Üldjuhul on distantkaitsel kokku neli erinevat kaitsetsooni ja neil kõigil on kindel suund. Distantkaitse on mõeldud töötama elektriliini peal. Distantkaitse mõõteelemendiks on takistusrelee, mis reageerib liini Z, X või R takistusele [12]. Liini faasitakistused kaitse paigalduskohast kuni lühise kohani on vastavuses liini osa pikkusega. Sellest tulenevalt sõltub relee rakendumine lühise koha kaugusest liinil. Oma olemuselt on distantkaitse alakaitse ehk rakendumine toimub tunnussuuruse vähenemisel. Enamlevinud kaitseliigid on faasidevahelised lühised ja maalühised. Distantkaitse leiab kasutust nii põhi- kui reservkaitsena.

Distantkaitse sätteid määratakse vastavalt liini pikkusele ehk võetakse protsent liini aktiivtakistusest. Tüüpiline esimese tsooni säte on 85% liini aktiivtakistusest Z_L . Teiseks tsooniks valitakse tavaliselt 120% liini pikkust. Esimese tsooni sätteks ei võeta 100% liini pikkusest, kuna välditakse mõõtevigu ja tsooni sattumist väljaspool liini. Teise tsooni eesmärk on katta ära liini lõik, mis ei ole kaitstud esimese tsooniga. [14]

Distantskaitse sätte tsoonid võivad olla kujutatud X ja R tasapinnal kas ringikujuliselt, hulknurkselt või nihutatud ringikujuliselt. Joonisel 2.2 on paremal pool kujutatud nelinurksel ja vasakul ringikujulist kaitsetsooni.



Joonis 2.2. Releekaitse tsoonid X ja R tasapinnal [12]

Nelinurkse kaitsetsooni kasutamine on tüüpiline mikroprotsessoril põhinevatel releedel. Ringikujulised kaitsetsoonid on iseloomulikud elektromehaanilistele releedele.

Kaitsetsooni kujutamisel tasapinnale tuleb arvestada võrgu konfiguratsiooniga. Kui süsteemis esineb võimsaid mootoreid, siis tuleb kaitsetsoonide kujutamisel arvestada ülimööduvate protsessidega, mis võivad esineda mootorite käivitamisel. Distantskaitse ei tohi reageerida protsessidele, mis on ülimööduvad. [14]

Eestis kasutatavate distantskaitsete esimese tsooni pikkus on üldjuhul 85%. Tulenevalt mõõtevigadest ei kasutata tsooni pikkust 100%. Selliselt lähtudes kaetakse liin tervenisti kaitsetsooniga. Kolmanda tsooni eesmärgiks on kaitsta järgnevat liini ja neljanda tsooniga kaitstakse liini, mis jääb relee taha. Kui kasutada sidekanalit kahe seadme vahel, siis on võimalik luua täielikult selektiivne süsteem. Lisaks sidekanalile kasutatakse selektiivsuse tagamiseks viiteaega erinevate tsoonid vahel.

2.3.1 Tootja 1 reaalne rele

Tootja 1 poolt toodetud distantskaitse on mõeldud kasutamaks nii kaitseks, seireks kui ka juhtimiseks. Relee on oma kasutajaliidese poolt laialdaselt seadistatav ning on kasutatav kõikidel pingestmetel. Kaitsereele on suuteline tuvastama kõiki rikkeid nii isoleeritud, maandatud ja resonantsmaandatud neutraaliga süsteemis. Relee vähim reageerimisaeg on 17ms. [15]

Seadme sisenditeks on vool ja pinge. Impulss saadakse voolutrafo sekundaar poolelt. Kokku on kaheksa analoog sisendit, esimesed neli on voolule ja ülejäänud neli on pingele. Neljast voolu sisendist kolm on mõeldud faaside voolule ning viimane sisend on mõeldud maavoolude mõõtmiseks. Kolm pinge sisendit on kasutusel faasi ja maa vaheliseks pinge mõõtmiseks. Neljas sisend on pinge nihke mõõtmiseks. Seadme kõik analoog sisendid suunatakse läbi filtri, kus signaalid filtreeritakse mürast. [15]

Lisaks signaalidele mõõtetrafodelt on releel digitaalsisend. Antud sisendit kasutatakse seadistamiseks. Releest informatsiooni saamiseks on digitaal väljundid ja LCD ekraan. Ekraanil on võimalik lugeda viimati toimunud sündmusi ja muuta sätete väärtusi.

Selleks, et rele saaks aru mõõtetrafode signaalidest, tuleb trafode nimiandmed sisestada kaitseseadme mällu. Kui määrata valed ülekandesuhted mõõtetrafodel, siis rele poolt arvutatud tulemused on valed ja sellest tulenevalt ei pruugi releed rakenduda. Seadmele saab ette anda primaar- ja sekundaarpoole andmed. Oluline on jälgida, et sekundaarpoole andmed oleksid trafol ja releel ühesugused. Vastasel juhul rele arvutab valed primaarpoole mõõtetulemused. Lisaks trafode andmetele on vaja ka elektrisüsteemi andmeid. Kõige mugavam viis sätteid sisestada on kasutada tootjapoolset programmi. [15]

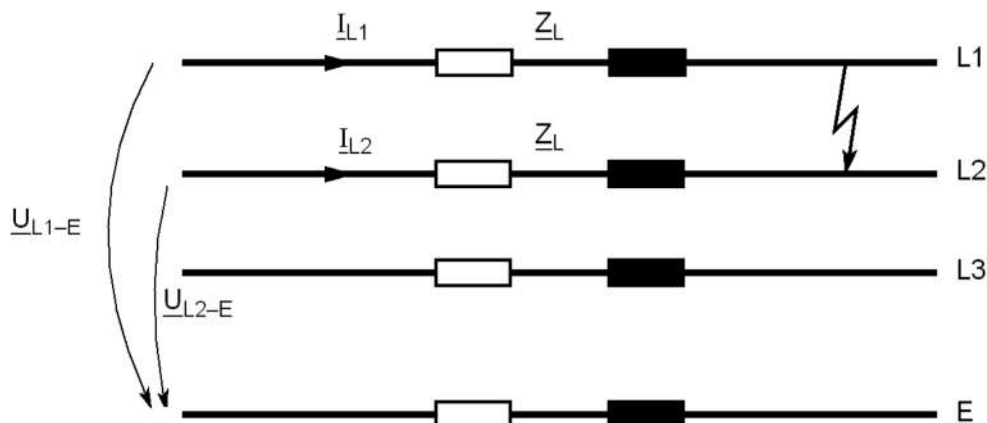
Relee sisse on ehitatud eraldiseisev mõõtesüsteem. Kokku on võimalik mõõta kuut erinevat lühise impedantsi (L1-E, L2-E, L3-E, L1-L2, L2-L3, L3-L1). Kahefaasilise lühise korral arvutatakse näivtakistus valemi 2.1 järgi:

$$Z_L = \frac{\overline{I_{L1}} \overline{Z_L} \overline{I_{L2}} \overline{Z_L}}{\overline{I_{L1}} \overline{I_{L2}}}, \quad (2.1)$$

kus \overline{I} – mõõdetud vool

\overline{Z} – näivtakistus

Joonisel 2.3 on toodud kahefaasilise lühise aseskeem.



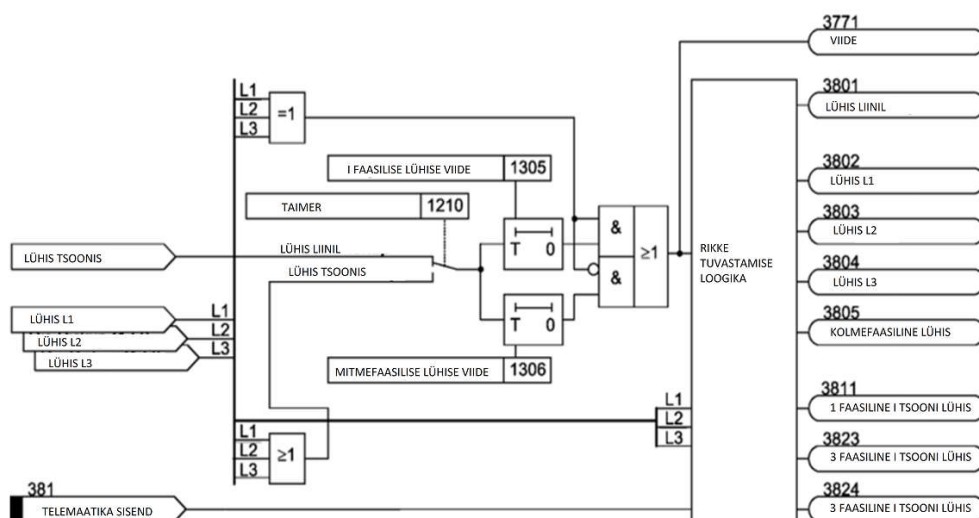
Joonis 2.3. L1 ja L2 vahelise lühise aseskeem [15]

Sellisel viisil mõõtmise toimub ainult siis, kui kõik faasid on ühendatud. Relee reageerib kahefaasilisele lühisele juhul, kui arvutatud tulemus on väiksem määratud sätetest.

Maalühise korral on liini impedants leitav valemi 2.2 järgi.

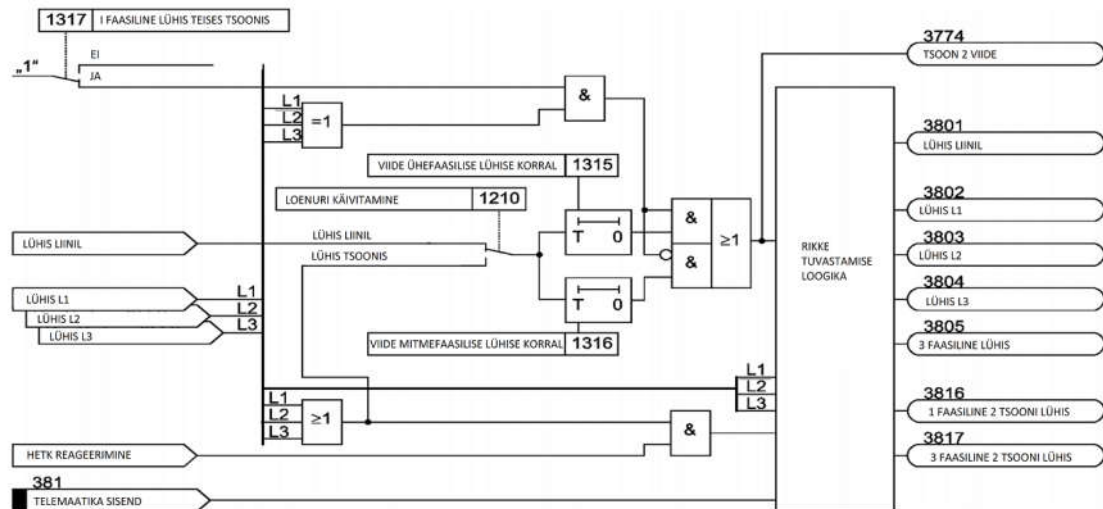
$$\overline{Z}_L = \frac{\overline{I}_{L3} \overline{Z}_L \overline{I}_E \overline{Z}_L \overline{Z}_E}{\overline{I}_{L3} \overline{Z}_E \overline{Z}_L \overline{I}_E} \quad (2.2)$$

Relee esimese kahe tsooni rakendamise loogika on toodud joonistel 2.4 ja 2.5. Iga releekaitse tsooni jaoks määratakse eraldi signaal, mis vastab antud tsoonile ja mõjutatud faasile. Iga tsoonile määratakse ajaline konstant. Üldjuhul mida kaugem on tsoon, seda pikem on viiteaeg.



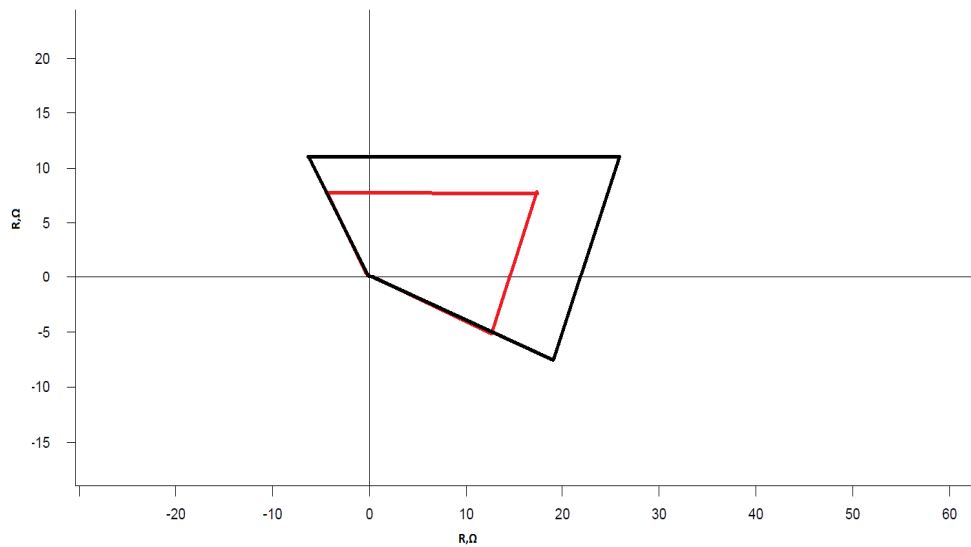
Joonis 2.4. Esimese tsooni rakendusloogika [15]

Jooniselt on näha, et relee mõõdab liini L1, L2 ja L3 impedantsi. Kui mõõdetav suurus on väiksem kui säte, siis relee reageerib sellele ning saadab välja veateate. Kui ühendada väljuv signaal liini võimsuslülitiga, siis on võimalik anda käsklus lüliti kontaktide avamiseks.



Joonis 2.5. Teise tsooni rakendusloogika [15]

Jooniselt on näha, et kui relee tuvastab esimeses tsoonis lühise, siis teise tsooni veateadet välja ei anta. Lisaks impedantsi mõõtmisele on teise tsooni rakendamisele lisatud viiteaeg. Tavaliselt jääb viiteaeg 0,2-0,4 sekundi sisse. Joonisel 2.6 on toodud tootja 1 esimesed kaks kaitsetsooni.



Joonis 2.6. Tootja 1 distantkaitse esimesed kaks tsooni [15]

Esimese tsooni ulatus on 85% liini pikkusest. Kui lühis jääb teise tsooni, siis relee rakendub peale viitaja möödumist.

Lisaks liini sätete määramisele on relee jaoks oluline defineerida ka liini ja maa vahelise impedantsi suhe (K_0). Suhet saab määrata kahel erineval viisil. Valemis 2.3 ja 2.4 on osakaalu määramine läbi aktiiv- ja reaktiivtakistuse ning valemis 2.5 on osakaal määratud läbi null- ja pärijärgnevuse.

$$\frac{R_E}{R_L} = \frac{1}{3} \left(\frac{R_0}{R_1} \quad 1 \right) \quad (2.3)$$

$$\frac{X_E}{X_L} = \frac{1}{3} \left(\frac{X_0}{X_1} \quad 1 \right) \quad (2.4)$$

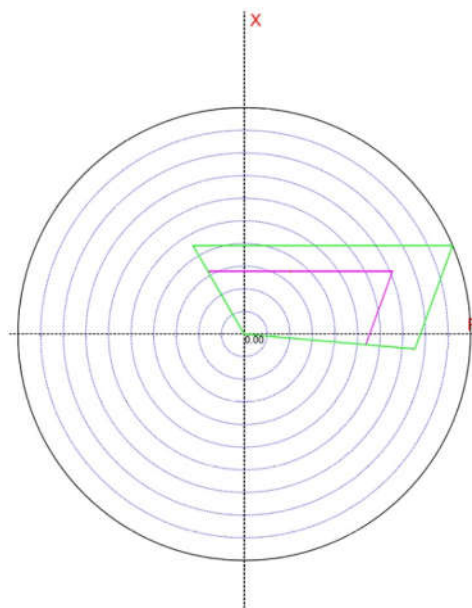
$$K_0 = \frac{\bar{Z}_E}{\bar{Z}_L} = \frac{1}{3} \left(\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_1} \quad 1 \right) \quad (2.5)$$

Käesolevas magistritöös on K_0 arvutamiseks kasutatud valemit 2.5

2.3.2 Tootja 2 reaalne relee

Tootja 2 relee puhul on tegemist mitmekülgse kaitseadmega. Peamine kaitsefunktsioon on liini diferentsiaalkaitse.

Releel on kokku kuus erinevat kaitsetsooni. Iga tsooni kohta on oma mõõteelement. Joonisel 2.7 on toodud tootja 2 relee esimesed kaks kaitsetsooni x-r graafikul.



Joonis 2.7. Tootja 2 distantkaitse esimesed kaks tsooni [16]

Distsantskaitse esimese tsooni ulatus jääb kuni 85% liini pikkusest. Kui lühis jääb väljapoole esimest tsooni (vahemikku 85-100% liini pikkusest), siis rakendub teine tsoon. Distsantskaitse teise tsooni rakendumisele on võimalik lisada viide, et vältida väärakendumist. Üldjuhul valitav viiteaeg on 0,4-0,6 sekundit.

Kahefaasilise lühise korral relee mõõdab liini impedantsi ja voolude ning pingete vahesid. B ja C faasidevahelise lühise korral avaldub faasipinge valemiga 2.6 ja 2.7.

$$\overline{V}_b = \overline{Z}_s \overline{I}_b + \overline{Z}_m \overline{I}_c + \overline{V}_f \quad (2.6)$$

$$\overline{V}_c = \overline{Z}_s \overline{I}_c + \overline{Z}_m \overline{I}_b + \overline{V}_f \quad (2.7)$$

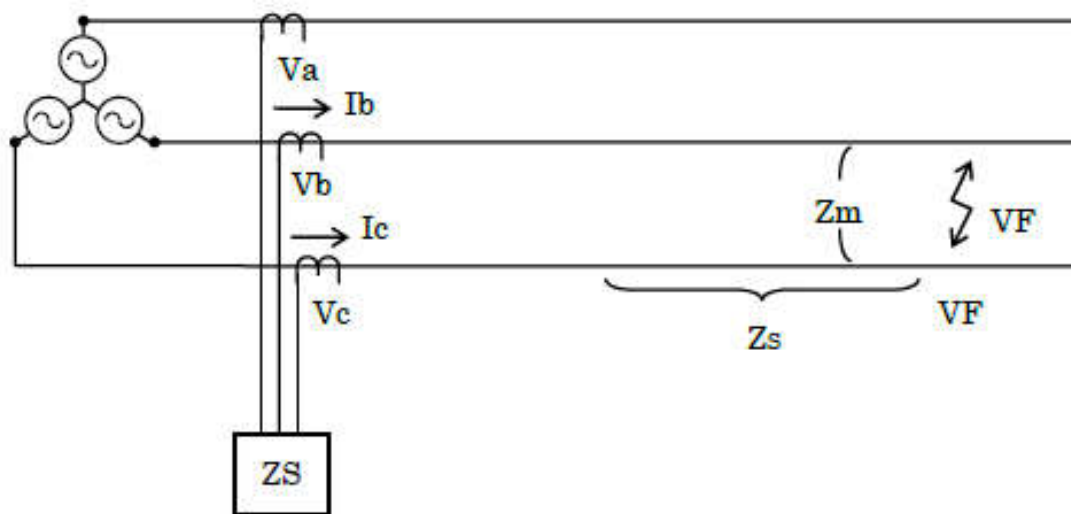
kus \overline{Z}_s – lühisekoha impedants

\overline{I}_b – b faasivool

\overline{I}_c – c faasivol

\overline{V}_f – lühispinge

Kahefaasilise lühise skeem on toodud joonisel 2.8.



Joonis 2.8. Kahefaasilise lühise skeem

Ühefaasilise maalühise korral on väga keeruline hinnata lühise kaugust. Nulljärgnevus impedants on erinev võrreldes pärijärgnevus impedantsiga. Sellest tulenevalt ei ole lühispinge proportsioonis lühisvooluga. Maalühise korral on oluline jälgida sümmeetrilisi komponente.

Relee sätete määramiseks on vaja teada liini aktiiv- ja reaktiivtakistust, takistuste vahelist nurka ning nulljärgnevuskomponendi suurust ja nurka. Lisaks elektrilistele parameetritele on vaja arvutada kompenseerimistegurid K_{xs} (valem 2.8) ja K_{rs} (valem 2.9). [16]

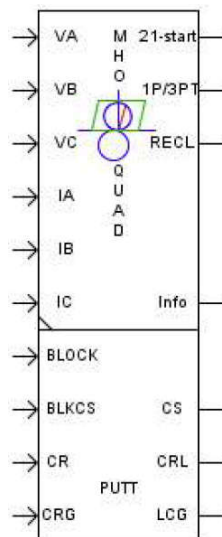
$$K_{xs} = \frac{X_0}{X_1} 100 \quad (2.8)$$

$$K_{rs} = \frac{R_0}{R_1} 100 \quad (2.9)$$

2.3.3 RTDS matemaatilised releed

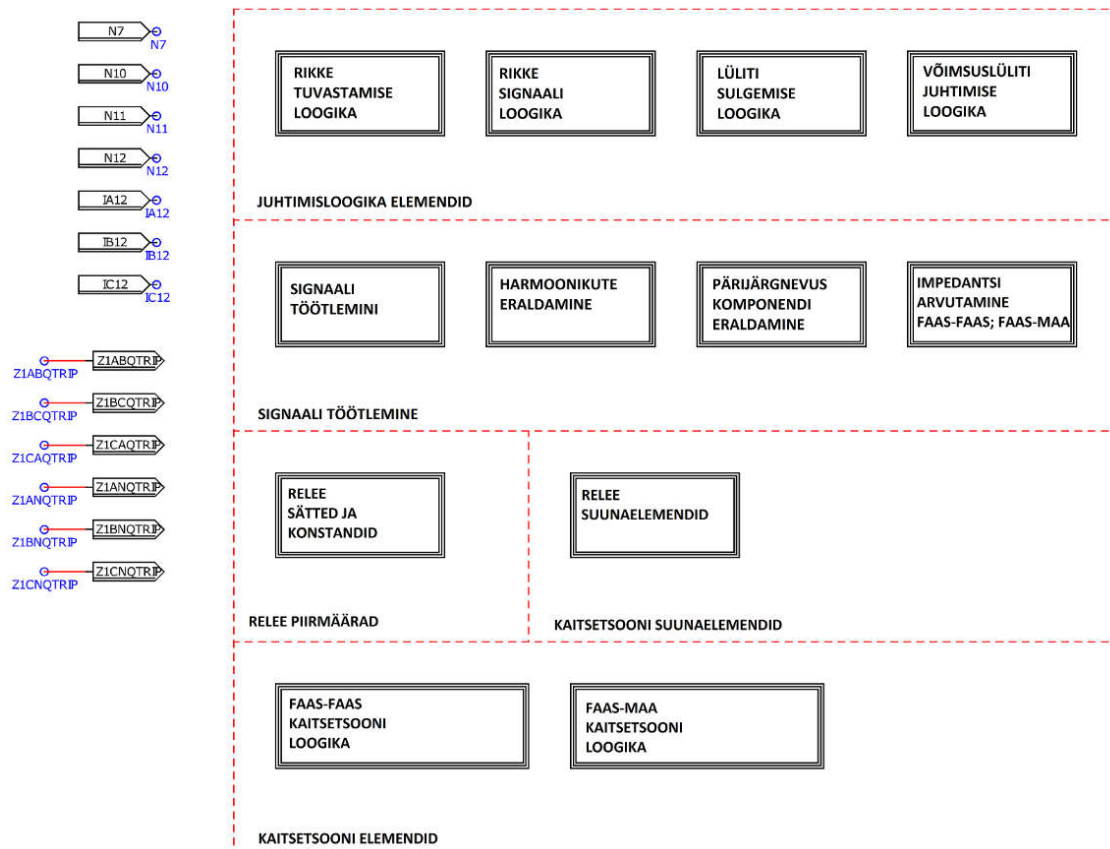
Mudelisse on sisse ehitatud kaks erinevat matemaatilist releed. Joonisel 2.9 on toodud esimene matemaatiline rele, mis koosneb ühest plokist ja joonisel 2.10 on toodud teine matemaatiline rele, mis on ülesse ehitatud 12st erinevast loogika plokist. Esimesel matemaatilisel releel on kuus impedantsi mõõtesõlme ning kolm maa- ja faasidevahelise lühise mõõteahelat. Funktsiooni kaitsepiirkonnaks on üks liin. Relee väljundsignaalidega on võimalik juhtida võimsuslüliti ühe või kolme faasi väljalülitamist. Lisaks lüliti juhtimisele on loogikaplokki sisseehitatud võimsuste võnkumise tuvastamine ja lüliti töökorra oleku kontroll. [17]

Kaitsetsoonid võivad olla ringi või trapetsi kujulised. Relee sisendite ja väljundite skeem koos kaitsetsoonide kujuga on toodud joonisel 2.9.



Joonis 2.9. Esimene matemaatiline rele, RSCAD [17]

Joonisel on rohelisega märgitud trapetsikujuline ja lillaga ringikujuline tsoon. Kaitsetsooni täpsemaks kujutamiseks on võimalik lisaks pingetele ja vooludele mõõta päri-, vastu-, ja nulljärgnevus impedantsi. Esimesel matemaatilisel releel on ainult üks kaitsetsoon. [17]



Joonis 2.10. Teine matemaatiline rele, RSCAD [17]

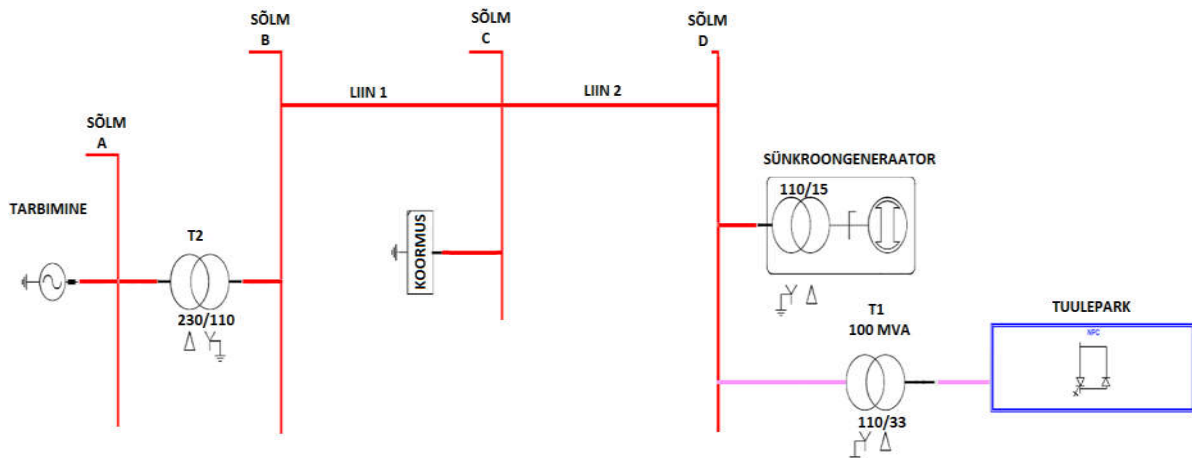
Teine matemaatiline rele on oma ülesehituselt tunduvalt keerulisem kui esimene matemaatiline rele. Joonisel 2.10 on paremal pool kujutatud rele sisend- ja väljundsignaalid. Esimesed seitse signaali on mõõteahela sisendsignaalid ja viimased kuus signaali on rele väljundsignaalid. Väljundsignaalide põhjal toimub rele rakendumine.

Rikke tuvastamiseks teine matemaatiline rele konverteerib mõõdetud voolu ja pinget signaalid diskreetsignaaliks. Peale signaali muutmist kasutatakse diskreetset Fourier' teisendust, et eraldada mõõtetulemustest reaali- ja imaginaarosad. Saadud tulemustest moodustatakse vektorid ja arvutatakse faas-faas vaheline impedants. [17]

Lisaks liini impedantsile on teisele matemaatilisele relele vaja konstanti juhul, kui lühise ajal ei ole võimalik mõõta pinget. Konstant saadakse varasematest mõõtetulemustest. Ilma liini pingeta ei suudaks rele arvutada liini takistust ja tekiks probleem arusaamisega, kus lühis paikneb. [17]

3 Lühise modelleerimine tootmisüksuste erineva osakaalu puhul

Releede testimiseks koostati mudel (joonis 3.1), mis koosneb kahest 110 kV liinist, koormusest ja tootmisest. Mudeli koormuseks on tinglik terviksüsteem. Koormus tarbib igal ajahetkel niipalju kui tootmisüksused suudavad toota.



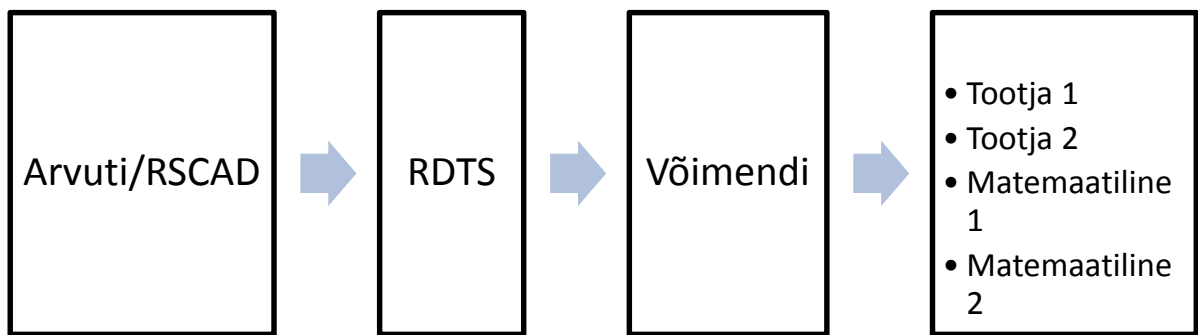
Joonis 3.1. RSCAD-i mudeli skeem

Mõlema liini pikkus on 30 km ja nimipinge 110 kv. Programmi kataloogist valiti liini juhiks Hawk, mille aktiivtakistus on $0,1223478 \Omega/\text{km}$. Kõik juhid on mudelis ilma lõhisfaasideta. Mastideks on kasutatud 110 kV gabariitidega masti, mis on 21,5 m kõrged.

Tootmisüksusteks on tuulepark ja sünkroongeneraator. Tuulepargi kõik tuulikud on tinglikult võetud üheks tootmisüksuseks kokku, mille maksimaalne võimus on 100 MVA. Primaarpoole pinge on 33 kV ja sekundaarpoole pinge 110 kv. Mähised on ühendatud kolmnurk/tähte. Tuulepargi trafo on jäigalt maandatud. Sünkroongeneraatori maksimaalne võimus on 100 MVA ja võimsustegur 0,9. Trafo primaarpinge on 15 kV ja sekundaarpinge on 110 kV. Mähised on ühendatud kolmnurk/tähte ning trafo on jäigalt maandatud.

3.1 Mudeli juhtimine

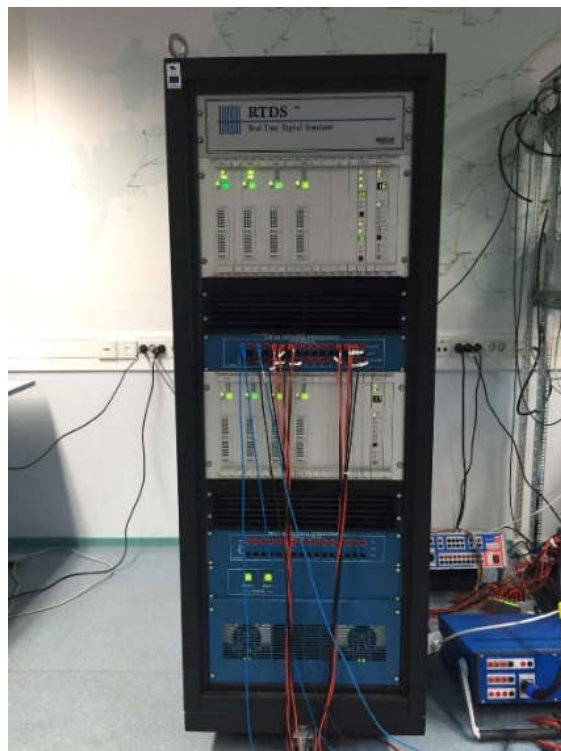
Mudeli juhtimine toimub arvutipõhiselt programmis RSCAD. Testide tegemisel tekitati katsesignaalid ehk lühised. Tekitatud signaalid saadeti releedesse ning seejärel uuriti seadmete käitumist impulsside mõjul. Mudeli rakendamise skeem on toodud joonisel 3.2.



Joonis 3.2. Mudeli skeem

Rakenduses on võimalik muuta tootmisüksuste võimsusi, lühise tüüpi, kaugust, aega ja masinate ning muude seadmete signaale.

RTDS (joonis 3.3) seadme puhul on tegemist reaajasimulaatoriga, mida kasutatakse elektrisüsteemi uurimiseks.



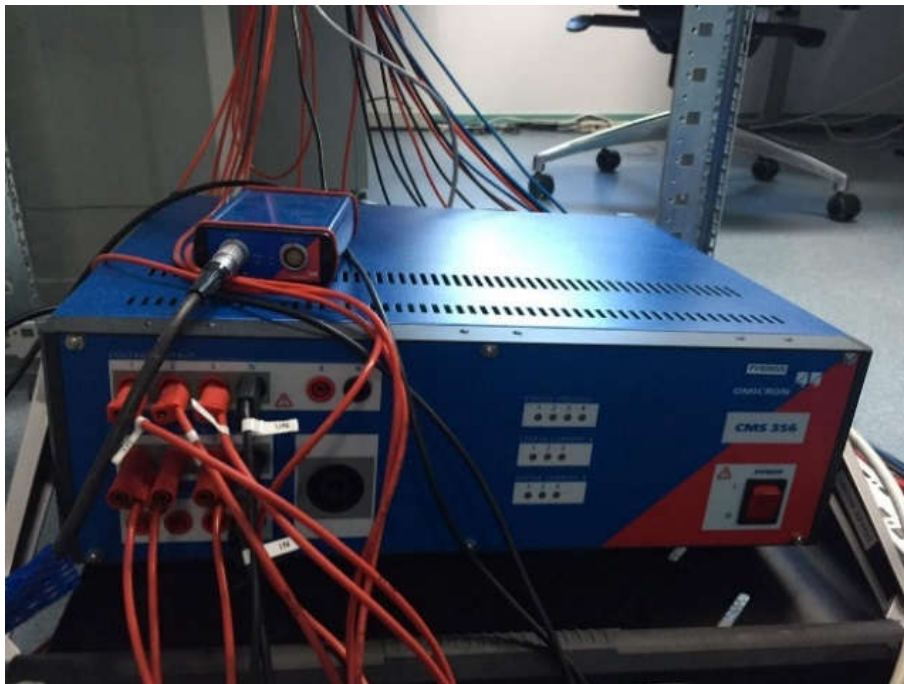
Joonis 3.3. Reaalaja simulaator

Simulaator võimaldab reaalajas vaadelda erinevate süsteemiosade käitumist ja mõju teistele seadmetele. Muutes süsteemi elemendi parameetreid on võimalik reaalajas näha sündmusi, milliseid toob kaasa parameetrite muutmine. Lisaks parameetrite muutmisele on

reaalajasimulaatoreid võimalik kasutada automaatikaseadmete, releede ja muude elementide katsetamiseks ilma, et kasutataks reaalset elektrisüsteemi. Peale süsteemi katsetamise on võimalik koostada erinevaid juhtimisalgoritme ja hinnata nende mõju elektrisüsteemi talitlusele. Läbi reaalajasimulaatori on võimalik algoritme täpsemalt seadistada.

Süsteemis saab luua erineva keerukusastmega mudeleid. Suurim erinevus teiste arvutustarkvaral põhinevate simulaatoritega on see, et RTDS-ga on ühendatud GPS kell. Lisaks täpsele ajamarkeerimisele on RTDS arvutussamm 2,5 mikrosekundit. Tänu täpsele markeerimisele on võimalik elektrisüsteemis toimunud sündmusi vaadelda kindlal ajahetkel. Lisamoodulina on seade toetatud IEC 61850 protokolliga ja selle alamprotokolliga GOOSE.

RTDSst edasi liiguvad simulatsiooni signaalid võimendisse. Signaali võimendina on kasutusel Omicron CMS356. Joonisel 3.4 on toodud võimendi esipaneel.



Joonis 3.4. Signaali võimendi CMS356

RTDS väljundsignaalid on $\pm 5V$. Selleks, et releesse jõuaks õige suurusega signaalid on vaja võimendit. Võimendis on määratud pingetrafo ülekanne 110000/1000 V ja voolutrafo 1000/1 A.

Releedesse sätete sisestamiseks kasutati releede tootjapoolseid programme. Mõlema tootja tarkvaraga on võimalik vaadata ja muuta relees olevaid sätteid. Lisaks sätetele on võimalik näha toimunud rikkeid ning reaaliaja mõõteandmeid.

Katsed viiakse läbi erineva tootmise osakaalu juures. Sünkroongeneraatori ja tuulepargi summaarne võimsus on 50 MVA. Lühist tekitatakse neljal erineval liinilõigul:

- 10%
- 50%
- 85%
- 100%.

Kaugused on valitud liini algusesse, esimese tsooni lõppu ja teise tsooni algusesse.

3.2 Sätete arvutamine distantkaitsetele

Selleks, et distantkaitse saaks aru, mis liinil toimub, on vaja arvutada liini aktiiv- ja reaktiivtakistus. Liini reaktiiv- ja aktiivtakistus avaldub valemite 3.1 ja 3.2.

$$R = \frac{r_0 l}{n} \quad (3.1)$$

$$X = \frac{x l}{n} \quad (3.2)$$

kus r_0 – liini aktiivtakistus Ω/km

n – juhtide arv liinis

x – liini reaktiivtakistus Ω/km , mis avaldub valemiga 3.3.

$$x = 0,144 \log \frac{D_k}{r_{jekv}} + \frac{0,0157}{n} \quad (3.3)$$

kus D_k – faasidevaheline keskmine kaugus meetrites

R_{jekv} – faasijuhtme ekvivalentne raadius meetrites, mis avaldub valemiga 3.4.

$$r_{jekv} = \sqrt[n]{a_k^{n-1} r_j} \quad (3.4)$$

kus r_j – osajuhtme raadius meetrites

n – osajuhtide arv lõhisfaasijuhis

a_k – osajuhtmete vaheline keskmine geomeetriline kaugus lõhisgaasijuhis

Valemite 3.3 ja 3.4 kasutamiseks on vaja valida mastid, sest need määravad ära juhtmete paiknemise üksteise suhtes. Saadud tulemused ja liinide parameetrid on toodud tabelis 3.1.

Tabel 3.1. Liini parameetrid

Juhtide arv	1
Liini pikkus; [km]	30
Aktiivtakistus r_0 ; [Ω /km]	0,1223
Liini aktiivtakistus R ; [Ω]	3,67
Faaside vaheline kaugus D_k ; [m]	5,49
Faasijuhtme ekvivalentraadius; [m]	0,0572
Reaktiivtakistus x ; [Ω /km]	0,301
Liini reaktiivtakistus X ; [Ω]	9,03
Impedantsi nurk	68,2

RSCAD programm annab samade parameetritega liini reaktiivtakistuseks 9,9 Ω ja aktiivtakistuseks 3,67 Ω . Kuna arvutatud tulemused on ligilähedased, siis võib järeldada, et mudeli takistused on õiged. Edaspidistes tehetes kasutatakse takistusi, mis on saadud RSCADst.

Tabelis 3.2 on toodud sümmeetriliste komponentide takistused.

Tabel 3.2. Päri- ja nulljärgnevus komponentide takistused

	Pärijärgnevus	Nulljärgnevus
Aktiivtakistus, [Ω]	3,67	10,5
Reaktiivtakistus, [Ω]	9,9	37,6

Teades komponentide takistusi saab välja arvutada moodulid. Komponentide moodulid on leitavad valemi 3.5 järgi.

$$z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (3.5)$$

kus z – näivtakistus ehk impedants, Ω ;

R – aktiivtakistus, Ω ;

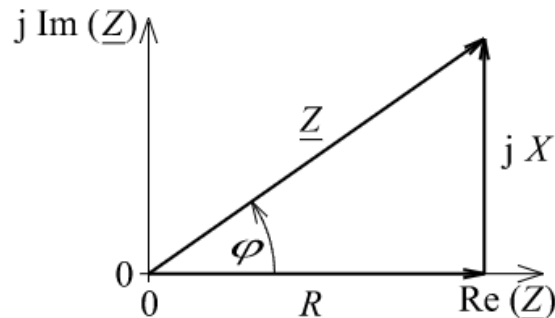
X – reaktiivtakistus, Ω .

Saadud moodulid on toodud tabelis 3.3.

Tabel 3.3. Arvutatud moodulid

Pärijärgnevustakistus, [Ω]	10,55
Nulljärgnevustakistus, [Ω]	39

Lisaks takistustele on sätete määramisel oluline takistuste vaheline nurk. Nurga suurust on võimalik leida, kui kujutada näivtakistuse vektordiagramm komplekskujul. Joonisel 3.5 on kujutatud näivtakistuse vektordiagramm.



Joonis 3.5. Näivtakistuse vektordiagramm

Kasutades tangensfunktsiooni on valemi 3.6 järgi võimalik leida vajaminev nurk.

$$\varphi = \arctan \frac{X}{R} \quad (3.6)$$

Sümmeetriliste komponentide nurgad on toodud tabelis 3.4.

Tabel 3.4. Arvutatud nurgad

Pärijärgnevustakistuse nurk, [$^{\circ}$]	70
Nulljärgnevustakistuse nurk, [$^{\circ}$]	74,4

Lisaks liini takistustele tuleb reaalsete releede jaoks arvutada kompenseerimistegurid. Tootja 1 kompenseerimistegur on leitav valemiga 3.7 ja tootja 2 tegurid on leitavad valemiga 3.8 ja 3.9.

$$K_0 = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \frac{Z_0}{Z_1} & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} \frac{39,04 + j^{74,4}}{10,55 + j^{70}} & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{3} (3,7 + j^{4,4} \quad 1) = 0,89 + j^{4,4} \quad (3.7)$$

$$K_{xs} = \frac{X_0}{X_1} \quad 100 = \frac{37,6}{9,9} \quad 100 = 380 \quad (3.8)$$

$$K_{rs} = \frac{R_0}{R_1} \quad 100 = \frac{10,5}{3,67} \quad 100 = 286 \quad (3.9)$$

Saadud kompenseerimistegurid on toodud tabelis 3.5.

Tabel 3.5. Reaalsete releede kompenseerimistegurid

$K_0; [\Omega]$	0,89
K_0°	4,4
$K_{XS}; [\%]$	380
$K_{RS}; [\%]$	286

Relee selektiivsuse tagamiseks tuleb takistused läbi korrutada tundlikkuse teguriga. Teguriga on võimalik ära määratleda releekaitse erinevad tsoonid. Käesolevas töös on valitud esimese astme teguriks 0,85 ja teise astme teguriks 1,2. Valitud suurused on laialdaselt kasutusel Eesti elektrisüsteemis olevatel distantskaitsetel. Arvutatud sätte väärtused on toodud tabelis 3.6.

Tabel 3.6. Arvutatud sätted

	Esimese astme säte	Teise astme säte
Aktiivtakistus, $[\Omega]$	16,8	64
Reaktiivtakistus, $[\Omega]$	8,40	32

Sätete määramisel on valitud aktiivtakistuse suuruseks kaks korda reaktiivtakistus. Enne releesse viimist tuleb arvutatud säte viia sekundaarpoolele. Katsete läbiviimisel on kasutatud pingetrafot suhtega 110000/100 V ja voolutrafot 1000/1 A. Kasutades selliseid mõõtetrafosid on sätete arvutamisel sekundaarpoole koefitsient 1,1. Sätete väärtused sekundaarpoolel on toodud tabelis 3.7.

Tabel 3.7. Sätete väärtused sekundaarpoolel

	Esimese astme säte sekundaarpoolel	Teise astme säte sekundaarpoolel
Aktiivtakistus, $[\Omega]$	18,48	70,4
Reaktiivtakistus, $[\Omega]$	9,24	35,2

Teise tsooni sätetele lisatakse viide 400 ms. Viidet on vaja selleks, et tagada distantskaitse selektiivsus.

Lühist on simuleeritud tootjapoolsel liinil. Lühise kaugused tootmisüksustest on 10%, 50%, 85% ja 100%. Simuleeritud võimsused on toodud tabelis 3.8. Igal stsenaariumil tehti kolm erinevat tüüpi lühis.

Tabel 3.8. Sünkroongeneraatori ja tuulepargi võimsused katsete käigus

Stsenaarium	Sünkroongeneraatori võimsus [MVA]	Tuulepargi võimsus [MVA]
1	40	10
2	30	20
3	25	25
4	20	30
5	15	35
6	10	40
7	0	50
8	0	25
9	0	5

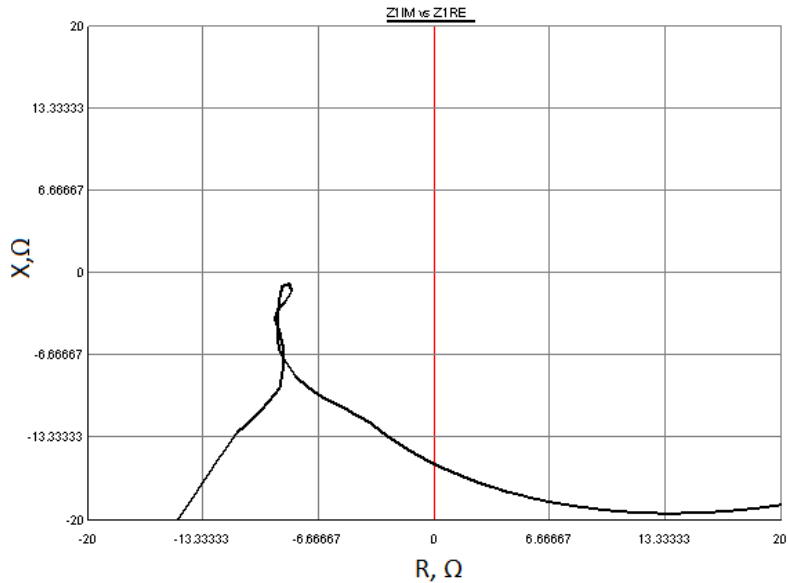
3.3 Kolmefaasiline lühis

Kolmefaasilist lühist tekitati faaside A-B-C vahel. Esimese tsooni lühise pikkuseks oli 200 ms ja teise tsooni pikkuseks 550 ms. Valitud aeg on piisav, et relee suudaks reageerida teises tsoonis. Erinevate tootmise osakaalude juures tehti 20 katset, millest igal lühise kaugusel tehti viis katset, et veenduda saadud tulemustes. Tabelis 3.9 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused esimese stsenaariumi korral. Lühise eelsel hetkel oli süsteemi tarbimine 42 MW ja vool liinis 0,23 kA.

Tabel 3.9. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 40 MVA ja tuulepargi võimsusel 10 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	35	Ei reageerinud	22	28
50	63	45	22	27
85	Ei reageerinud	Ei reageerinud	436	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	436	430

Saadud tulemustest on näha, et matemaatilised releed ei ole teise tsooni lühisele reageerinud. Esimesel matemaatilisel releel puudub teine tsoon, kuid sellegipoolest relee rakendus kahel korral viiest (reageerimise tõenäosus 40%). Joonisel 3.6 on toodud liini takistus lühiskatsel, kui matemaatilised releed ei reageerinud.



Joonis 3.6. Mõõdetud pärijärgnevustakistus (85% kaugusel)

Jooniselt on näha, et lühiskatsel ei liikunud liini takistus releekaitsetsooni. Sellest tulenevalt ei tuvastanud matemaatilised releed lühist liinil.

Reaalsed releed rakendusid kiiremini kui matemaatilised. Tootja 1 ja tootja 2 olid peaaegu kaks korda kiiremad esimeses tsoonis. Reaalsete releede omavahelises võrdluses oli esimeses tsoonis kiirem tootja 1 ja teises tsoonis tootja 2.

Järgmiste katsete käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 10 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 10 MVA võrra. Tabelis 3.10 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused teise stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 42 MW ja vool liinis 0,23 kA.

Tabel 3.10. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 30 MVA ja tuulepargi võimsusel 20 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	73	Ei reageerinud	22	27
50	57	Ei reageerinud	22	28
85	Ei reageerinud	Ei reageerinud	435	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	435	430

Tulemustest on näha, et teisel matemaatilisel releel on raskusi lühise tundmisega. Kui lühis oli 50%, 85% ja 100% kaugusel, siis teine matemaatiline rele reageeris igal kaugusel kahel korral

viiest (reageerimise tõenäosus 40%). 10% kaugusel olevale lühisele ei suutnud relee üldse reageerida. Selline ebajärjepidev reageerimine ei ole releekaitse seisukohalt rahuldav tulemus.

Esimene matemaatiline relee sai esimese tsooni lühisega hakkama ilma probleemideta. Reageerimise ajad on küll pikemad kui reaalsedel releedel, kuid koondtulemused ei ole halvad.

Reaalsed releed töötasid ilma tõrgeteta. Esimese tsooni lühisele suutsid releed reageerida alla 28 ms ja teise tsooni lühisele reageerisid alla 36 ms. Sellist reaktsiooni aega võib pidada väga heaks. Esimeses tsoonis oli kiirem tootja 1 ja teises tsoonis tootja 2.

Järgmiste katsete käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.11 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused kolmanda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 43 MW ja vool liinis 0,24 kA.

Tabel 3.11. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 25 MVA ja tuulepargi võimsusel 25 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	39	Ei reageerinud	22	28
50	35	22	22	27
85	43	27	435	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	436	431

Saadud tulemusest on näha, et matemaatilised releed suudavad 50% ja 85% kaugusel olevale lühisele reageerida kiiresti ja korrektselt. Mõlemad matemaatilised releed on reageerinud esimeses tsoonis. Lisaks suudab esimene matemaatiline relee reageerida 10% kaugusel olevale lühisele. Teisele matemaatilisele releele valmistab 10% kaugusel oleva lühise äratundmine raskusi. Viiest katsest kahel (reageerimise tõenäosus 40%) suutis relee 30 ms jooksul aru saada, et liinil on lühis. Ülejäänud kolmel korral relee ei reageerinud. Sarnaselt eelmisele katsetulemusele ei saa pidada sellist relee toimimist töökindlaks. Liini lõpus ei suutnud kumbki matemaatiline relee lühist ära tunda.

Reaalsed releed said lühise tuvastamisega hästi hakkama. Esimese tsooni reageerimisaeg jääb alla 30 ms ja teise tsooni aeg alla 36 ms (arvestatud ei ole viiteaega). Omavahelises võrdluses

oli tootja 1 kiirem esimeses tsoonis ja tootja 2 kiirem teises tsoonis. Mõlema tsooni reageerimiskiiruste vaheks on ligikaudu 5 ms.

Järgmiste katsete käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.12 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused neljanda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 44 MW ja vool liinis 0,24 kA.

Tabel 3.12. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 20 MVA ja tuulepargi võimsusel 30 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	39	Ei reageerinud	22	28
50	36	Ei reageerinud	22	27
85	Ei reageerinud	21	434	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	436	431

Tulemustest on näha, et esimeses tsoonis ainukesena ei suutnud reageerida teine matemaatiline relee. Ülejäänud releedele ei valmistanud lühise äratundmine raskusi. Esimene matemaatiline relee reageeris esimeses tsoonis 39 ms jooksul ja reaalse relee reageerimisaeg samas tsoonis jäi alla 29 ms.

Teine matemaatiline relee reageeris 85% kaugusel olevale lühisele esimeses tsoonis. Sellist tulemust võib pidada väga heaks. Samas liini lõpus olevat lühist ei suutnud teine matemaatiline relee ära tunda. Kokkuvõtvalt ei ole mõistlik kasutada releed, mis suudab reageerida ainult ühes kitsas vahemikus, samal ajal kui võrdväärised releed tulevad toime tunduvalt laiema ulatusega.

Reaalse relee töös ei esinenud tõrkeid. Releed töötasid sarnaselt eelmistele tulemustele.

Järgmiste katsete käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.13 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused viienda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 44 MW ja vool liinis 0,24 kA.

Tabel 3.13. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 15 MVA ja tuulepargi võimsusel 35 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	49	Ei reageerinud	22	28
50	36	Ei reageerinud	22	27
85	Ei reageerinud	26	436	431
100	Ei reageerinud	27	436	430

Tulemustest on näha, et ainukesena teine matemaatiline rele ei saanud lühise tuvastamisega hakkama täies ulatuses. Esimesele tsoonile ei toimunud üldse reageerimist. Kahe tsooni piiri peal reageeris matemaatiline rele esimeses tsoonis. Samuti liini lõpus toimus reageerimine esimeses tsoonis. Liini lõpus olevale lühisele reageerimine keskmiselt 27 ms on arvatavasti tingitud sellest, et tuulepargist tuleva lühisvoolu esimene amplituud on väga kõrge. Selline rakendumine ei ole soovitud tulemus. Ülereageeriv rele võib põhjustada väärlülitumisi elektrisüsteemis, mis omakorda põhjustab pahameelt tarbijatele ja kujutab ohtu teistele süsteemis olevatele seadmetele.

Reaalsed releed toimisid sarnaselt eelnevatele olukordadele. Releede töö oli kiire ja järjepidev. Esimeses tsoonis oli kiirem tootja 1 ja teises tsoonis tootja 2. Väärtalitlusi ja mittereageerimisi ei esinenud.

Järgmise katsete käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.14 on toodud 1 kolmefaasilise lühiskatse tulemused kuuenda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 45 MW ja vool liinis 0,24 kA.

Tabel 3.14. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 10 MVA ja tuulepargi võimsusel 40 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	28	22	22	28
50	28	Ei reageerinud	22	28
85	64	27	435	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	436	430

Tulemustest on näha, et sarnaselt eelnevatele olukordadele on teisel matemaatilisel releel raskusi lühise ära tundmisega. 50% kaugusel olevale lühisele reageeris relee kahel korral viiest (reageerimise tõenäosus 40%). Lisaks ei suutnud relee reageerida liini lõpus olevale lühisele. Sellist tulemust ei saa pidada kaitseseadme normaalseks tööks.

Esimene matemaatiline relee reageeris sarnaselt tootja 2 releega. Mõlema seadme keskmiseks esimese tsooni reageerimiskiiruseks on 28 ms. Lisaks sellele on esimene matemaatiline relee suutnud tuvastada kahe tsooni piiri peal olevat lühist.

Reaalsed releed töötasid vastavalt sellel, kuidas nad olid seadistatud. Reaktsiooniajad olid väga kiired. Tootja 1 oli esimeses tsoonis mõne millisekundi võrra kiirem kui tootja 2 ja teises tsoonis oli vastupidi.

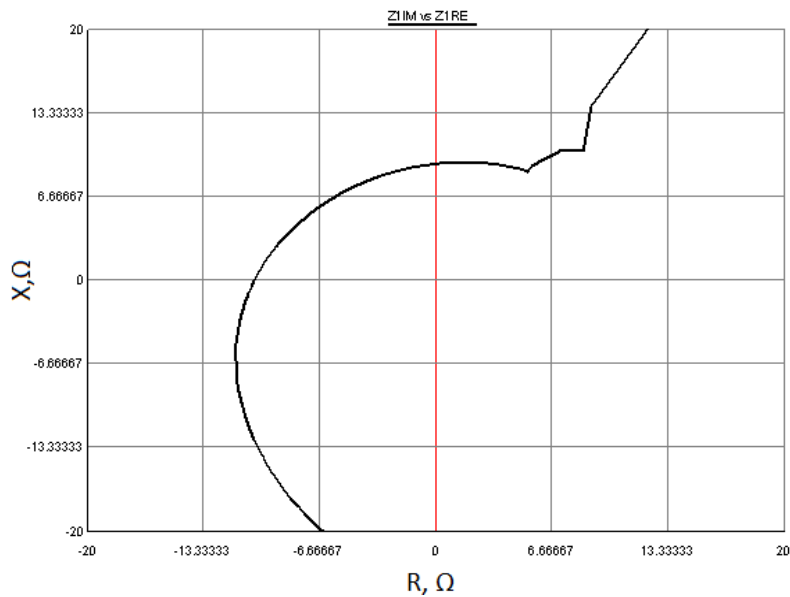
Järgmise katse käigus jäeti alles ainult üks tootmisüksus. Sünkroongeneraator lülitati välja ja alles jäi tuulepark võimsusega 50 MVA. Tabelis 3.15 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused seitsmenda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 46 MW ja vool liinis 0,26 kA.

Tabel 3.15. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 50 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	28	Ei reageerinud	22	26
50	30	22	22	27
85	221	28	435	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	436	429

Tulemustest on näha, et kõik releed peale teise matemaatilise töötasid õigesti. Lühisele reageerimise ajad on kõikidel releedel head. Esimene matemaatiline relee on suutnud kahe tsooni piiripealse lühise tuvastada, kuid esimese tsooni kohta on reageerimisaeg küllaltki pikk. Teine matemaatiline relee töötas sarnaselt olukorrale, kus sünkroongeneraatori ja tuulepargi võimsused olid 25 MVA. Joonisel 3.7 on toodud liini takistus lühiskatsel

Reaalsetest releedest oli esimeses tsoonis kiirem tootja 1 ja teises tsoonis tootja 2. Kahe relee reageerimiskiiruste vahe on ligikaudu 5 ms.



Joonis 3.7. Mõõdetud pärijärgnevustakistus (100% kaugusel)

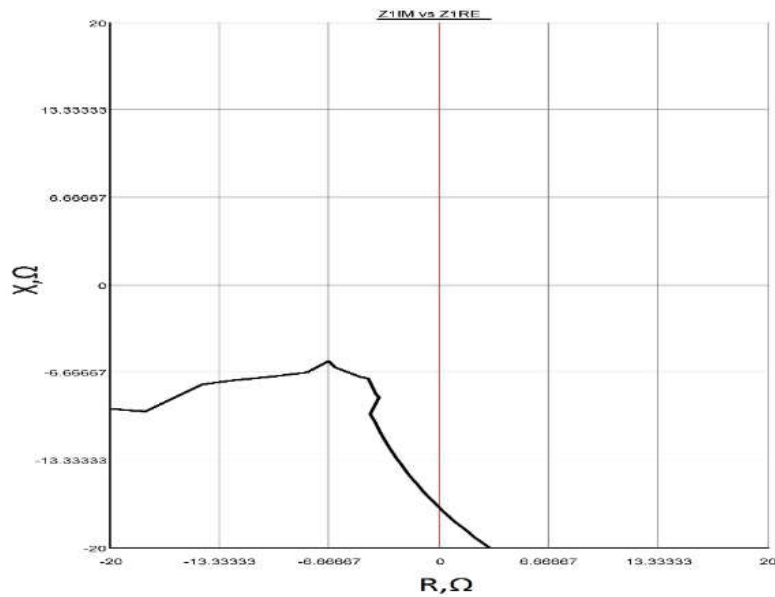
Jooniselt on näha, et takistus läbib releekaitse teist tsooni. Kuna teise tsooni viide on 400 ms ja takistus liikus tsoonist läbi, mitte ei jäänud sinna pidama, siis sellepärast relee ei reageerinud.

Järgmise katse käigus vähendati tuulepargi võimsust veelgi 25 MVA võrra. Tabelis 3.16 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused kaheksanda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 22 MW ja vool liinis 0,13 kA.

Tabel 3.16. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 25 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	29	Ei reageerinud	22	28
50	30	22	24	27
85	76	27	436	430
100	Ei reageerinud	27	434	431

Tulemustest võib järeldada, et reaalsed releed ja esimene matemaatiline relee reageerisid vastavalt etteseadud tingimustele. Teisel matemaatilisel releel tekkis esimeses tsoonis raskusi lühise ära tundmisega. Relee ei suutnud tuvastada lühist, mis oli liini algusest 10% kaugusel, kuid 50% kaugusel oleva lühisega ei tekkinud probleeme. Lisaks on relee reageerinud teise tsooni lühisele esimeses tsoonis. Joonisel 3.8 on toodud liini takistus, kui lühis on liini lõpus.



Joonis 3.8. Mõõdetud pärijärgnevustakistus (100% kaugusel)

Jooniselt on näha, et lühise ajal liigub liini takistus kaitsetsoonist mööda. Antud olukorras ei oleks pidanud teine matemaatiline relee reageerima lühisele, kuna liini takistus ei läbinud relee kaitsetsooni.

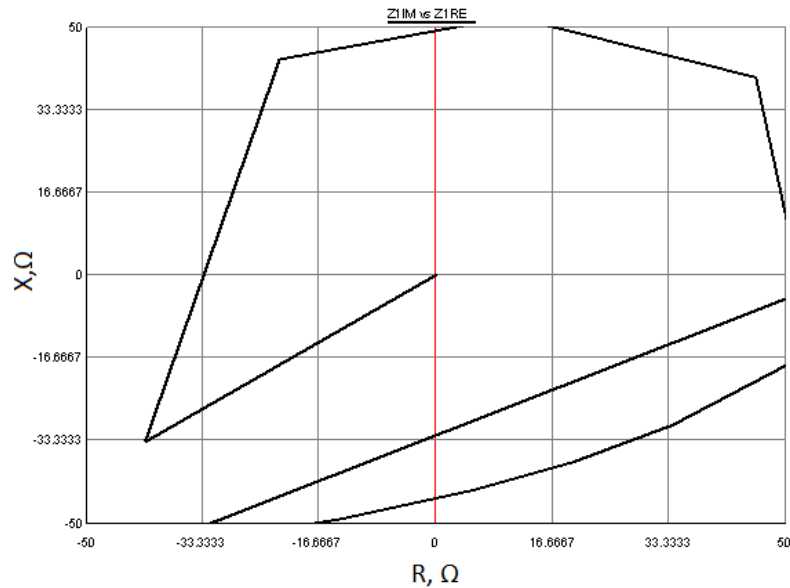
Viimase kolmefaasilise lühise katse käigus vähendati tuulepargi võimsust 5 MVA-le. Tabelis 3.17 on toodud kolmefaasilise lühiskatse tulemused üheksanda stsenaariumi korral. Sellise võimsuse osakaalu juures on tarbimine 3 MW ja vool liinis 0,026 kA.

Tabel 3.17. Kolmefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 5 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	33	Ei reageerinud	Ei reageerinud	31
50	34	Ei reageerinud	Ei reageerinud	29
85	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud

Tulemustest on näha, et kui sünkroongeneraatori tootmisvõimsus on 0 MVA ja tuulepargi võimsus 5 MVA, siis lühise äratundmine on releede jaoks raskendatud. Esimene matemaatiline relee suutis fikseerida 10% kaugusel olevat lühist neli korda viiest (reageerimise tõenäosus 80%) ja 50% kaugusel olevat lühist kolm korda viiest (reageerimise tõenäosus 60%). Tootja 2 suutis 10% ja 50% kaugust lühist ära tunda kolm korda viiest (reageerimise tõenäosus 60%). Nende tulemuste põhjal võib öelda, et releedele valmistab suuri raskuseid lühise tuvastamine.

Joonisel 3.9 on toodud releede poolt mõõdetud liini takistus, kui lühis on 100% kaugusel liini algusest.



Joonis 3.9. Mõõdetud pärijärgnevustakistus (kaugusel 100%)

Jooniselt on näha, et lühise ajal liini takistus moodub suure kaarega sätteväärtusest. Sellest tulenevalt ei rakendu releed. Kui lühis saab läbi, siis langeb välja tuulepark ning liini takistus jääb sätteväärtuse juurde pidama, kuid kuna tuulepark on väljas, siis releed ei rakendu.

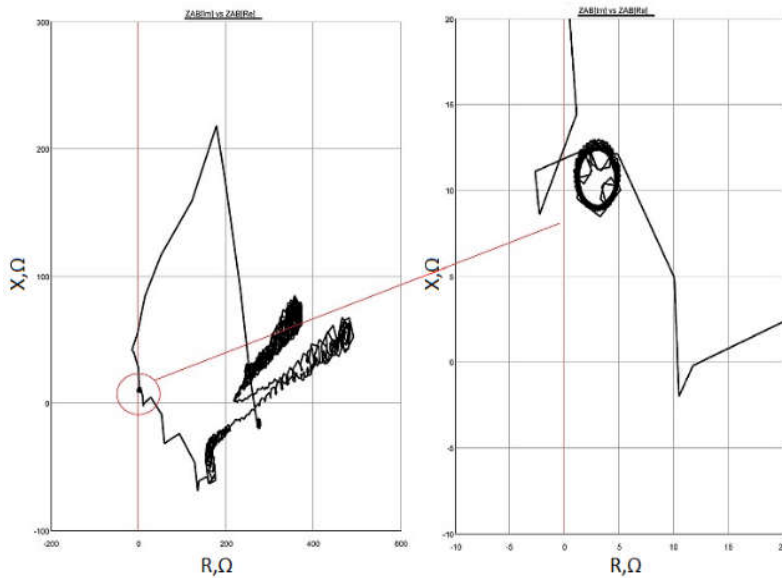
3.4 Kahefaasiline lühis

Kahefaasilist lühist modelleeriti faaside A-B vahel. Lühise pikkus valiti sarnaselt kolmefaasilisele lühisele – esimene tsoon 200 ms ja teine tsoon 550 ms. Kokku tehti igal tootmisvõimsuse osakaalul 20 kahefaasilist lühiskatset, millest igal lühise kaugusel tehti viis katset. Tabelis 3.18 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused esimese stsenaariumi korral.

Tabel 3.18. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 40 MVA ja tuulepargi võimsusel 10 MVA

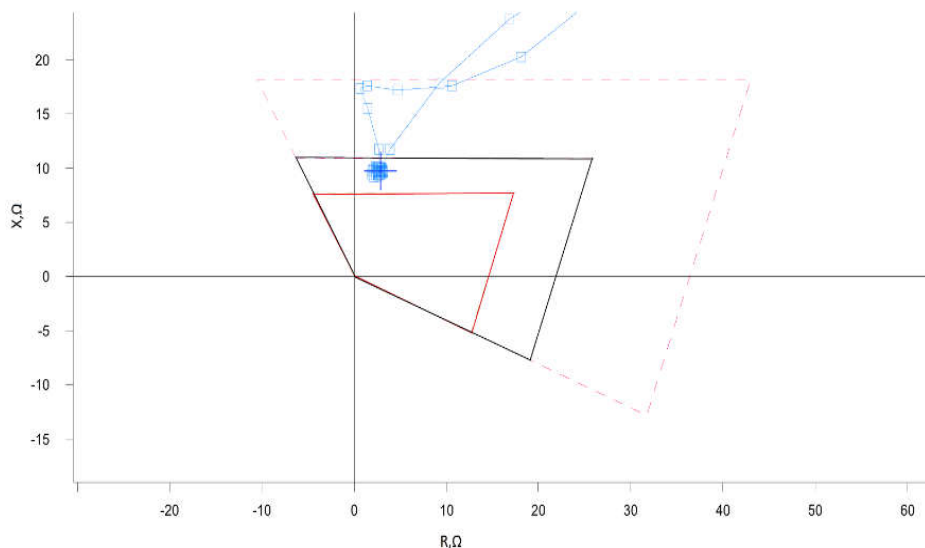
Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	28	22	17	27
50	28	22	22	28
85	30	Ei reageerinud	435	449
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	434	430

Katse tulemustest on näha, et teine matemaatiline rele ei suuda reageerida teise tsooni lühisele. Samas esimene matemaatiline rele reageerib 85% kaugusel olevale lühisele esimeses tsoonis. Liini takistus lühise ajal RSCADi poolt mõõdetuna on toodud joonisel 3.10 ja tootja 1 rele poolt mõõdetuna on toodud joonisel 3.11.



Joonis 3.10. Mõõdetud A-B faasi pärijärgnevustakistus (kaugusel 85%)

Jooniselt 3.10 on näha, et liini A-B vaheline takistus läbib lühise ajal esimest tsooni ja seejärel liigub releekaitse tsoonidest välja.



Joonis 3.11. Liini takistus mõõdetud tootja 1 rele poolt

Jooniselt 3.11 on näha, et tootja 1 rele ei fikseeri esimese tsooni läbimist ja takistus jääb kindlalt püsima teise tsooni.

Kokkuvõtvalt reaalsed releed reageerivad õigesti lühistele. Esimese tsooni reaktsiooni aeg on alla 28 ms ja teise tsooni oma alla 49 ms.

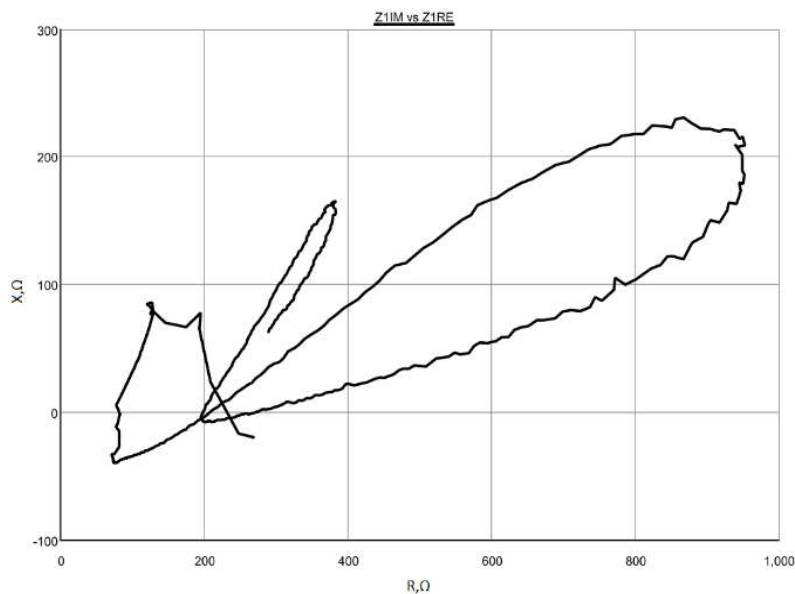
Järgmise katse käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 10 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 10 MVA võrra. Tabelis 3.19 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused teise stsenaariumi korral.

Tabel 3.19. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 30 MVA ja tuulepargi võimsusel 20 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	28	22	18	26
50	29	23	23	27
85	24	Ei reageerinud	442	431
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	439	430

Tulemustest on näha, et teine matemaatiline rele ei suutnud reageerida teise tsooni lühisele. Samas esimene matemaatiline rele reageerib 85% kaugusel olevale lühisele esimeses tsoonis.

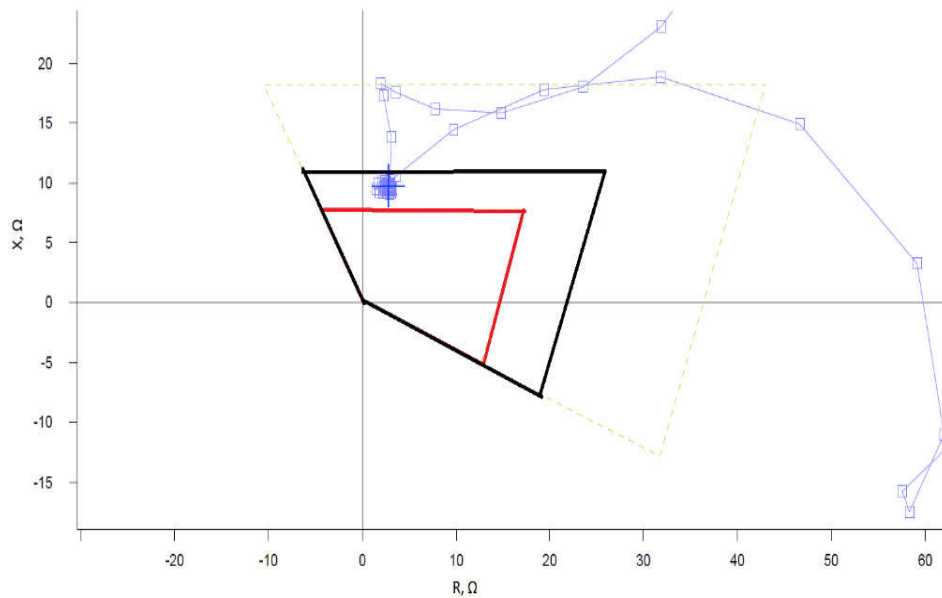
Joonisel 3.12 on toodud liini takistus 85% kaugusel oleva lühise ajal.



Joonis 3.12. Mõõdetud pärijärnevustakistus (85% kaugusel)

Jooniselt on näha, et lühise jooksul ei läbi takistus releekaitse kaitsetsooni. Esimene matemaatiline rele ei oleks pidanud sellises olukorras reageerima.

Joonisel 3.13 on toodud sama lühiskatse tulemused mõõdetuna tootja 1 rele poolt.



Joonis 3.13. Liini takistus lühiskatsel, tootja 1

Jooniselt on näha, et liini takistus jääb releekaitse teise tsooni. Reaalsed releed reageerisid lühisele kiiresti. Reaalsete releede reageerimisaeg on sarnane eelmisele katsetulemusele.

Järgmise katse käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.20 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused kolmanda stsenaariumi korral.

Tabel 3.20. Kahefaasilise lühiskatse koordtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 25 MVA ja tuulepargi võimsusel 25 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	28	136	18	27
50	28	24	25	26
85	38	Ei reageerinud	446	430
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	444	430

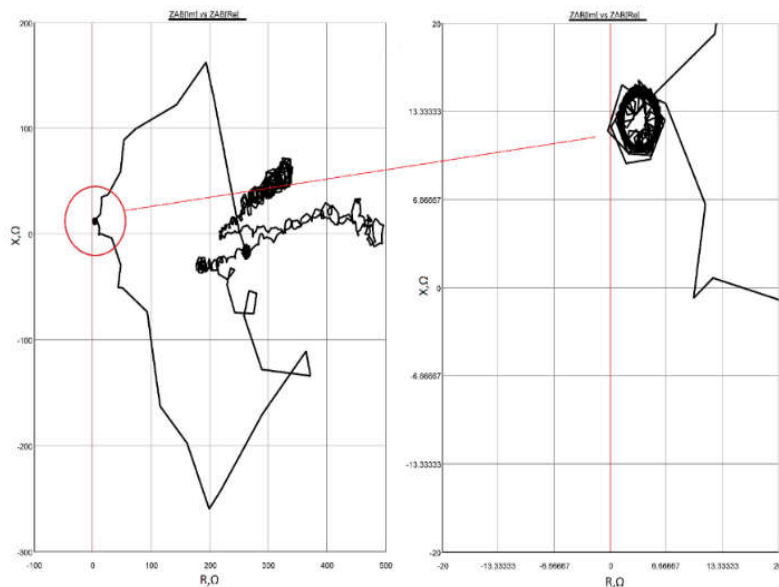
Tulemustest on näha, et teine matemaatiline relee ei suuda reageerida teise tsooni lühisele. Esimene matemaatiline relee on reageerinud teise ja esimese tsooni piiri peal olevale lühisele. Kuna esimesel matemaatilisel releel ei ole mehaanilistest seadmetest tulevaid mõõtevigu, siis selline reageerimine on võimalik. Joonisel 3.14 on toodud RSCADi poolt mõõdetud liini takistus lühise ajal.

Tabel 3.22. Kahefaasilise lühiskatse tulemused liini lõpus sünkroongeneraatori võimsusel 20 MVA ja tuulepargi võimsusel 30 MVA

Trip	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
1	567	413	434	432
2	567	Ei reageerinud	435	430
3	555	411	441	430
4	567	Ei reageerinud	435	431
5	726	411	435	430

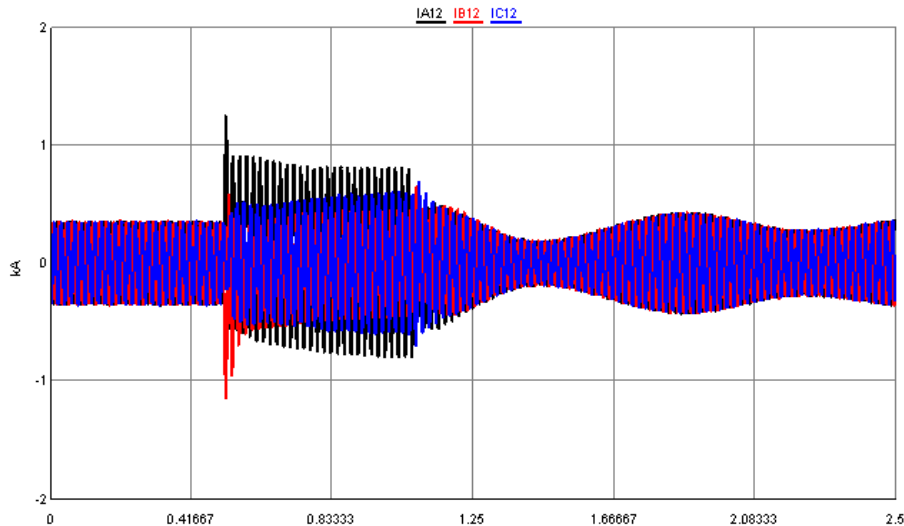
Täpsematest katsetulemustest on näha, et teise matemaatilise rele töö ei ole järjepidev. Relee suutis kolmel korral viiest (reageerimise tõenäosus 60%) tuvastada lühist. Samas olukordades, kus rele reageeris, on tulemused väga head.

Joonisel 3.15 on kujutatud 100% kaugusel asuva lühiskatse liini takistus.



Joonis 3.15. Mõõdetud pärijärnevustakistus (kaugusel 100%)

Jooniselt on näha, et enne sünkroongeneraatori võnkumist läbib liini takistus releekaitse teise tsooni sätteväärtust. Esimene matemaatiline rele ei oleks pidanud lühiskatsele reageerima, sest liini takistus ei läbinud tema kaitsetsooni. Liini vool lühiskatsel on toodud joonisel 3.16.



Joonis 3.16. Vool liinis lühiskatsel

Jooniselt on näha, et lühise lõpus teeb generaator võnke. Peale 1,5 sekundit lühise algusest on generaator taastunud lühisest. Selline generaatori käitumine saab toimuda sellepärast, et mudelis ei ole releedel tagastussignaali. Signaali puudumine tähendab seda, et releerakendamisel ei toimu liini väljalülitumist. Reaalses olukorras oleks liin välja lülitatud ja generaator ei oleks saanud võnkuma hakata.

Järgmise katse käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.23 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused viienda stsenaariumi korral.

Tabel 3.23. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 15 MVA ja tuulepargi võimsusel 35 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	28	22	22	27
50	30	23	22	28
85	Ei reageerinud	412	435	431
100	Ei reageerinud	414	435	431

Katsete tulemusest on näha, et kõik releed reageerisid nii nagu oli ettenähtud. Esimene matemaatiline rele ei pidanud reageerima liini teises tsoonis, kuna tal puudub teine kaitsetsoon. Katsetulemused annavad rele teise tsooni reageerimisajaks kahel korral 1006 ms ja ühel korral 30 ms, ülejäänud kaks korda rele ei reageerinud. Selline reageerimine viitab sellele, et kaitse

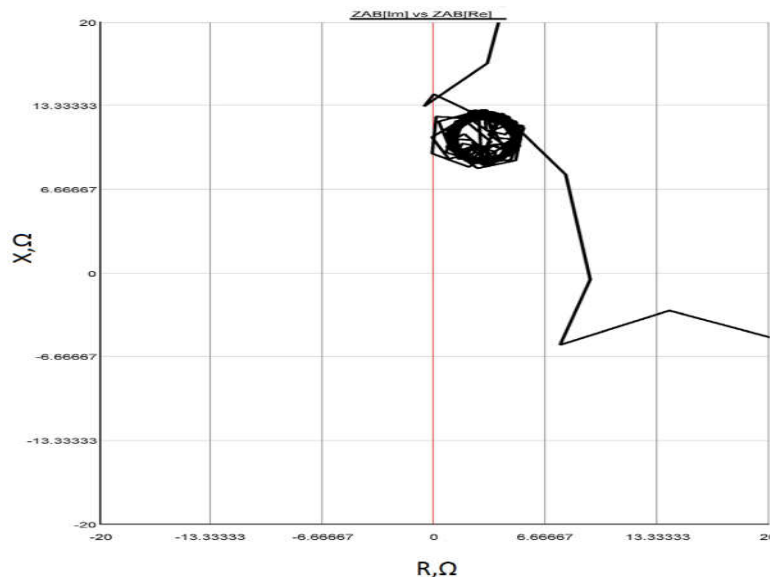
tuvastas rikke peale lühise lõppu, ajal kui sünkroongeneraatoril oli asünkroonkäik. Reaalsed releed reageerisid katsetele oodatud tulemusega.

Järgmise katse käigus vähendati sünkroongeneraatori võimust 5 MVA võrra ja tuulepargi võimsust tõsteti 5 MVA võrra. Tabelis 3.24 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused kuuenda stsenaariumi korral.

Tabel 3.24. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 10 MVA ja tuulepargi võimsusel 40 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	27	21	18	26
50	30	22	22	26
85	47	505	450	429
100	65	483	488	430

Tulemustest on näha, et kõik releed, välja arvatud esimese matemaatiline rele, said lühise tuvastamisega hakkama nii nagu oli eeldatud. Esimene matemaatiline rele suutis reageerida teise tsooni lühisele alla 65 ms. Sellist käitumist võib pidada ülereageerimiseks. Joonisel 3.17 on toodud liini takistused lühiskatsel.



Joonis 3.17. Mõõdetud A-B faaside vaheline pärijärgnevustakistus

Jooniselt on näha, et faasidevaheline takistus läheb lühise alguses läbi releekaitse esimese tsooni. Liini pärijärgnevustakistus aga ei liigu lühiskatse ajal kaitsetsooni.

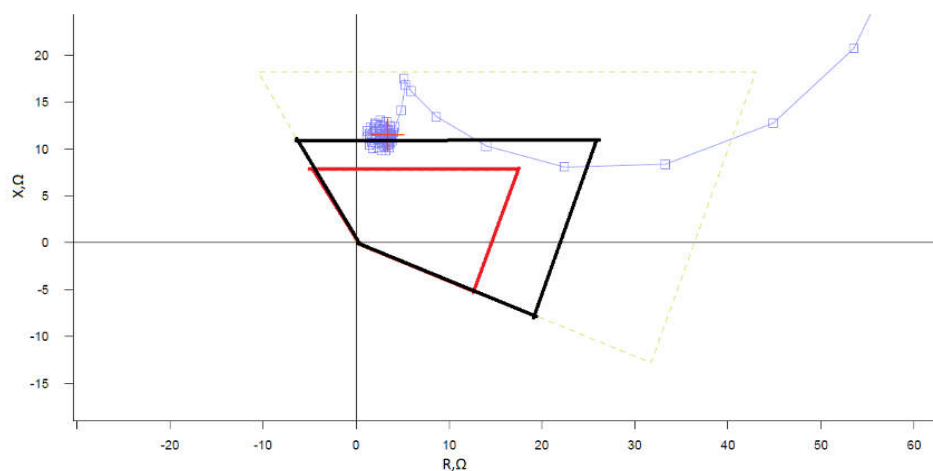
Järgmise katse käigus jäeti alles ainult üks tootmisüksus. Sünkroongeneraator võeti välja ja alles jäi tuulepark võimsusega 50 MVA. Tabelis 3.25 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused seitsmenda stsenaariumi korral.

Tabel 3.25. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 50 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	27	20	18	27
50	30	22	22	26
85	85	77	Ei reageerinud	506
100	90	273	Ei reageerinud	508

Esimesel matemaatilisel releel esinesid mõningased raskused lühise tuvastamisega esimese ja teise tsooni piiril. Relee suutis lühist tuvastada neljal korral viiest (80% tõenäosusega). Liini lõpus reageeris rele kolmel korral viiest (60% tõenäosusega). Kuna esimesel matemaatilisel releel puudub teine tsoon, siis selline käitumine ei ole soovitud tulemus (tegemist on ülereageerimisega, mis võib põhjustada tõsiseid tagajärgi elektrisüsteemis). Teine matemaatiline rele reageeris liini lõpus kolmel korral 79 ms ja kahel korral 566 ms. Alla 400 ms reageerimist liini lõpus võib pidada sarnaselt esimesele matemaatilisele releele ülereageerimiseks.

Reaalsetest releedest ei saanud tootja 1 rele hakkama teise tsooni lühise tuvastamisega. Tootja 2 rele reageerimiskiirus oli ligikaudu 70 ms pikem kui eelnevatel katsetel. Joonisel 3.18 on toodud tootja 1 poolt mõõdetud liini takistus lühiskatsel.



Joonis 3.18. Liini takistus lühiskatse ajal, tootja 1

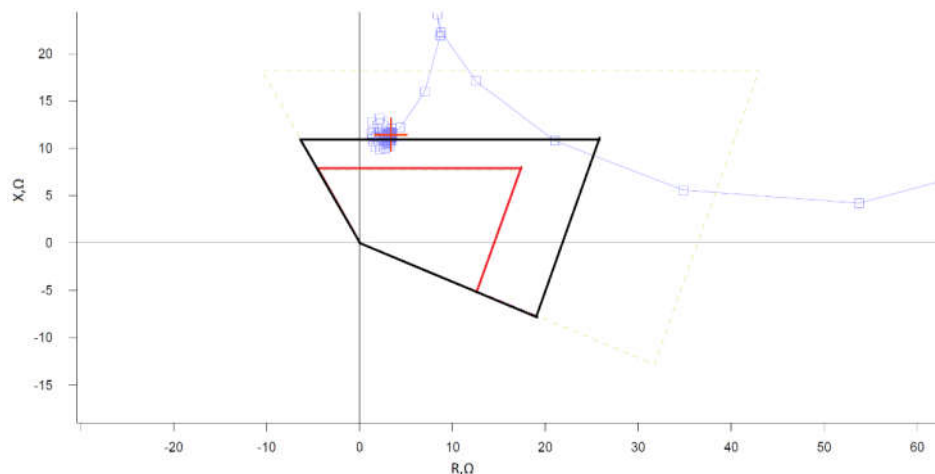
Jooniselt on näha, et tootja 1 poolt mõõdetud liini takistus lühiskatsel jääb teise ja kolmanda tsooni vahele. Kuna releel on teise tsooni viiteks pandud 400 ms, siis sellest tulenevalt reageerimist ei toimunud (lühis viibis tsoonis vähem aega kui oli määratud viide). Antud juhul oleks kolmanda tsooni seadistamine taganud relee reageerimise.

Järgmise katse käigus vähendati tuulepargi võimsust veelgi 25 MVA võrra. Tabelis 3.26 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused kaheksanda stsenaariumi korral.

Tabel 3.26. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 25 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	29	23	22	63
50	334	23	31	42
85	Ei reageerinud	432	Ei reageerinud	483
100	Ei reageerinud	448	Ei reageerinud	483

Tulemustest on näha, et tootja 1 relee ei reageerinud teise tsooni lühisele. Esimeses tsoonis oli relee kiirem kui tootja 2. Joonisel 3.19 on toodud teise tsooni liini takistus lühiskatsel.

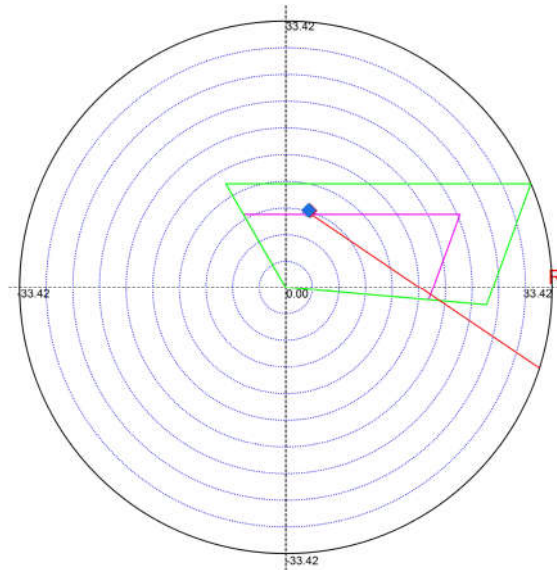


Joonis 3.19. Liini takistus lühiskatsel, tootja 1

Jooniselt on näha, et tootja 1 poolt mõõdetud liini takistus lühiskatsel jääb teise ja kolmanda tsooni vahele. Relee poolt mõõdetud liini takistus on sarnane olukorrale, kus süsteemis oli tuulepargi võimsus 50MVA.

Kuna esimesel matemaatilisel releel puudub teine tsoon, siis mittereageerimine on aktsepteeritav tulemus. Teine matemaatiline ja tootja 2 relee reageerisid nii esimese kui ka teise

tsooni lühisele. Omavahelises võrdluses oli teine matemaatiline rele teises tsoonis kiirem. Joonisel 3.20 on toodud tootja 1 poolt mõõdetud liini takistus teise tsooni lühiskatsel.



Joonis 3.20. Liini takistus lühiskatsel, tootja 2

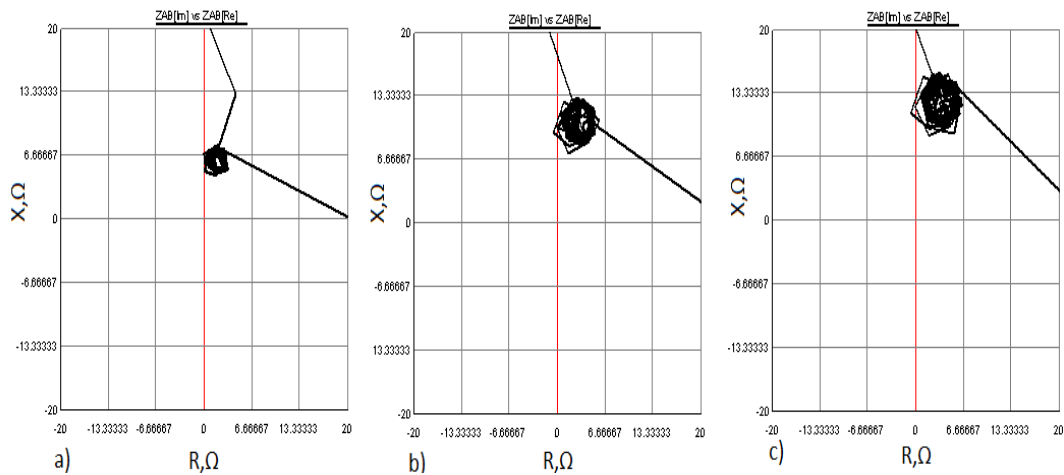
Jooniselt on näha, et lühise ajal jääb liini takistus kindalt reelekaitse teise tsooni. Kuna mõlemal reaalsel releel on samad liini sätted, siis erinevus võib tulla rele sees olevatest mõõteahelatest ja loogika ülesehitusest.

Viimase kahefaasilise lühise katse käigus vähendati tuulepargi võimsust 5 MVA-le. Tabelis 3.27 on toodud kahefaasilise lühiskatse tulemused üheksanda stsenaariumi korral.

Tabel 3.27. Kahefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 5 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud
50	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud
85	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud
100	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud	Ei reageerinud

Tabelist on näha, et mitte ükski rele ei suutnud kahefaasilisele lühisele reageerida, kui sünkroongeneraator on võrgust välja lülitatud ja tuulepargi võimsus on 5 MVA. Joonisel 3.21 on toodud liini takistus lühise hetkel.



Joonis 3.21. Mõõdetud A-B faaside vaheline pärijärgnevustakistus (a-50%, b-85% ja c-100% kaugusel)

Jooniselt on näha, et faasidevaheline liini takistus jääb lühiskatsel relee kaitsetsooni sisse. Sellest tulenevalt oleks pidanud matemaatilised releed reageerima. Kuna 5 MVA tuulepargi osakaalu juures on vool liinis ligikaudu 26 A ja tuulepargi maksimaalne lühisvool sellisel juhul on 33,8 A, siis reaalse teade jaoks on lühisvool liiga väike, et reageerida.

3.5 Ühefaasiline lühis

Ühefaasiline lühis tekitab B faasi ja maa vahel. Esimese tsooni lühise pikkuseks oli 200 ms ja teise tsooni pikkuseks 550 ms. Valitud aeg on piisav selleks, et relee suudaks reageerida teises tsoonis. Kui pikendada teise tsooni lühise aega, siis võib tekkida olukord, kus generaator läheb asünkroonkäiku ning selle peale reageerivad releed. Sedaviisi reageerides ei ole katse tulemused adekvaatsed. Kokku tehti igal tootmisvõimsuse osakaalul 20 ühefaasilist lühiskatset, millest igal lühise kaugusel tehti viis katset. Tabelis 3.28 on toodud ühefaasilise lühiskatse tulemused esimese stsenaariumi korral.

Tabel 3.28. Ühefaasilise lühiskatse koondtulemused sünkroongeneraatori võimsusel 40 MVA ja tuulepargi võimsusel 10 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline relee 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline relee 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	35	17	16	37
50	29	22	45	42
85	53	410	451	41
100	Ei reageerinud	412	450	438

Tulemustest on näha, et releed reageerisid vastavalt neile seatud sätetele. Teine matemaatiline releer osutus kiiremaks kui reaalsed releed. 85% kaugusel liini algusest tuvastas tootja 1 releer lühise teises tsoonis ja tootja 2 releer esimeses tsoonis. Reaalsete releede omavahelistest sätetest on erinevad ainult kompenseerimistegurid. Kuna mõlemad kasutavad erinevaid kompenseerimise loogikaid, siis sellest tulenevalt võivad releed reageerida kahe tsooni piiri peal olevale lühisele erinevalt.

Tabelis 3.29 on kokku koondatud teise kuni kuuenda stsenaariumi ühefaasilise lühiskatse tulemused.

Tabel 3.29. Ühefaasilise lühiskatse koondtulemused tootmise osakaalul 30/20, 25/25, 20/30, 15/35 ja 10/40

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline releer 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline releer 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	25	47	32	38
50	31	27	41	40
85	51	425	458	40
100	Ei reageerinud	426	454	453

Antud tootmisvõimsuste juures töötasid kõik releed vastavalt ootustele. Reageerimine oli kiire ja järjepidev. Kõik releed saavad ühefaasilise lühise tuvastamisega hakkama.

Tootmise osakaalu 0/50 juures jäeti alles ainult üks tootmisüksus. Sünkroongeneraator võeti välja ja alles jäi tuulepark võimsusega 50 MVA. Tabelis 3.30 on toodud ühefaasilise lühiskatse tulemused seitsmenda stsenaariumi korral.

Tabel 3.30. Ühefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 50 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline releer 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline releer 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	25	31	19	38
50	31	58	32	340
85	36	685	435	39
100	168	428	436	525

Katse tulemustest on näha, et mida vähemaks jääb inerts võrgus, seda raskem on releedel lühist tuvastada.

Kui 10/40 tootmise osakaalu juures reageeris tootja 2 relele liini lõpus olevale lühisele keskmiselt 450 ms, siis 0/50 tootmise osakaalu juures on see aeg 525 ms.

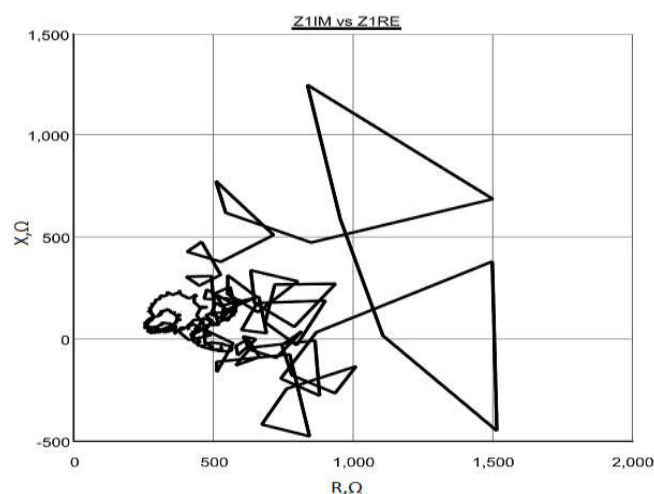
Eelviimase katsegrupi käigus vähendati tuulepargi võimsust veelgi 25 MVA võrra. Tabelis 3.31 on toodud ühefaasilise lühiskatse tulemused kaheksanda stsenaariumi korral.

Tabel 3.31. Ühefaasilise lühiskatse koondtulemused tuulepargi võimsusel 25 MVA

Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	27	28	18	37
50	35	35	28	37
85	90	559	451	38
100	130	Ei reageerinud	450	Ei reageerinud

Tulemustest on näha, et matemaatilistel releedel ja tootja 2 releel tekkis raskuseid lühise tuvastamisega. Esimene matemaatiline rele saab 85% kaugusel oleva lühise tuvastamisega vaevaliselt hakkama. Reageerimisaeg jääb vahemikku 34-127 ms. Teine matemaatiline rele suutis reageerida tekitatud lühisele kolm korda viiest (reageerimise tõenäosus 60%). Lisaks mitte täielikule tööle on rele reageerimisajad küllaltki pikad – keskmiselt 559 ms (eelnevalt on rele 85% lühisele reageerinud keskmiselt 450 ms).

Kui varasemalt oli reaalistest releedest lühisele reageerimisega probleeme tootja 1 releel, siis praeguses olukorras jääb hätta tootja 2 relele. Joonisel 3.22 on toodud liini takistus lühiskatsel.



Joonis 3.22. Mõõdetud pärijärgnevustakistus (100% kaugusel)

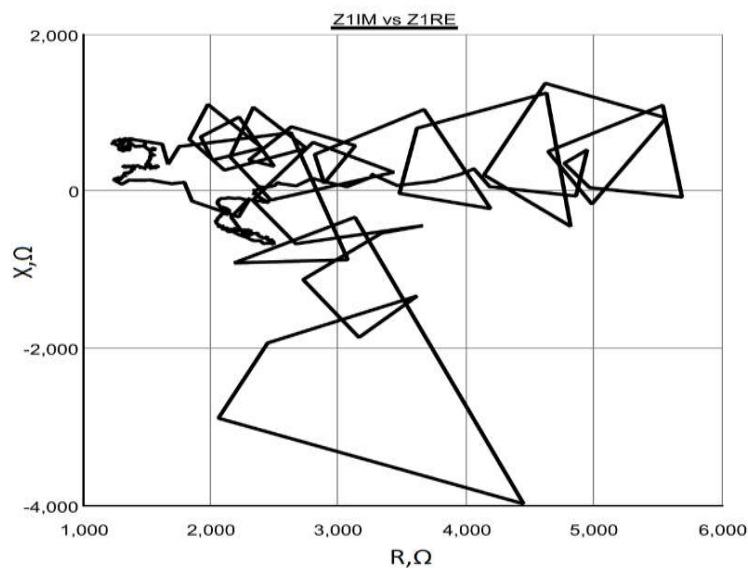
Jooniselt on näha, et liini takistus lühiskatsel ei jää releede kaitsetsooni. Sellest tulenevalt ei saanud releed aru, et liinil on lühis.

Viimase ühefaasilise lühise katsegrupi käigus vähendati tuulepargi võimsust 5 MVA-le. Tabelis 3.36 on toodud ühefaasilise lühiskatse tulemused üheksanda stsenaariumi korral.

Tabel 3.32. Ühefaasilise lühiskatse koordtulemused tuulepargi võimsusel 5 MVA

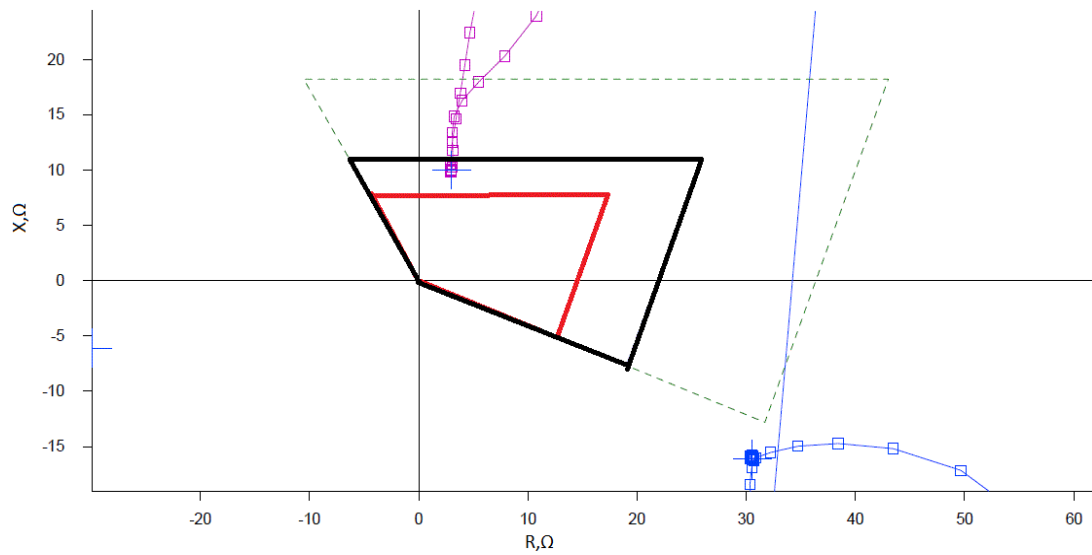
Lühise kaugus [%]	Matemaatiline rele 1 reageerimisaeg [ms]	Matemaatiline rele 2 reageerimisaeg [ms]	Tootja 1 reageerimisaeg [ms]	Tootja 2 reageerimisaeg [ms]
10	88	20	18	25
50	87	22	41	25
85	102	499	451	37
100	185	448	451	Ei reageerinud

Tabelist on näha, et tootja 2 rele ei suuda tuvastada lühist liini lõpus. Teistel releedel ei ole lühise tuvastamisega probleeme. Joonisel 3.23 ja 3.24 on toodud liini takistus lühiskatsel.



Joonis 3.23. Mõõdetud pärijärgnevustakistus (100% kaugusel)

Jooniselt on näha, et liini pärijärgnevustakistus ei liigu lühiskatsel releede kaitsetsooni. Seevastu liini nulljärgnevus liigub läbi rele kaitsetsooni.



Joonis 3.24. Liini takistus lühiskatsel, tootja 1

Jooniselt on näha, et tootja 1 releele ei valmistatud raskuseid lühise ära tundmine. Relee on lühise ajal mõõtnud liini takistust teise kaitsetsooni sees.

Kokkuvõte

Magistritöö eesmärgiks oli uurida kahte matemaatilist ja kahte reaalselt distantskaitset muutuva inertsiga elektrisüsteemis. Kaitsete talitluse jälgimiseks viidi läbi erinevaid katseid reaalaajasimulaatoris.

Töös tutvustati lühidalt elektrisüsteemi põhilisi seisundeid ja anti ülevaade releekaitse olulisusest, seejärel kirjeldati elektrivõrgus aset leidvaid lühiseid. Selgitati, mis toimub generaatoriga, kui võrgus toimub lühis.

Lisaks traditsioonilisele generaatorile tutvustati tuulegeneraatori inverterit ja erinevaid viise, kuidas ühendada tuulepark suurema elektrisüsteemiga. Toodi välja erinevate ühenduste positiivsed ja negatiivsed küljed ja anti graafiline ülevaade tuulegeneraatorite ühendusviiside väljundvõimsusest samal tuulekiirusel. Inverteri tutvustamiseks kasutati RSCAD programmis olevat mudelit.

Kirjanduse ülevaate viimases peatükis selgitati releekaitse tööpõhimõtet ja seadmete vajalikkust. Releede tööpõhimõtete juures täpsustati distantskaitsele iseloomulikke tunnussuursusi ja toodi välja erinevad kaitsetsoonide kujutamise viisid. Seoses kaitsetsoonidega kirjeldati releekaitse esimese ja teise tsooni sätte valikut.

Elektromehaaniliste releede puhul kirjeldati täpsemalt nende rakendumise tehnoloogiat. Selgitati, kuidas tekib relees magnetvoog ja sellest tulenevalt rele rakendumine.

Mikroprotsessor releede puhul tutvustati nende levimise ajalugu. Toodi välja, et mikroprotsessor releede kasutuselevõtt on tihedalt seotud arvutusvõimekuse kasvuga. Koos arvutite arenguga hakkasid 60-ndatel ja 70-ndatel arenema ja ka rohkem kasutusele tulema mikroprotsessor tehnoloogial põhinevad releed. Lisaks releede levikule toodi esile kaasaegsete releede peamised eelised mehaaniliste ees.

Releekaitse peatüki lõpus anti ülevaade releedest, milliseid kasutati praktilises osas. Kirjeldati tootja 1 rele tööpõhimõtet, anti ülevaade rele funktsioonidest ja tutvustati seadme esimest kahte kaitsetsooni ning nende rakendumisloogikat. Samuti anti ülevaade kasutatud rele tootja 2 omadustest ja seadme distantskaitse funktsioonist.

Viimaseks releeploki teemaks jäid matemaatilised releed. RSCADi sisseehitatud releede puhul anti ülevaade sisend- ja väljundsignaalidest. Teise matemaatilise releepuhul selgitati rele juhtimisloogikat.

Magistritöö praktilises osas tutvustati esmalt kasutatavat mudelit. Esitati mudeli skeem ja kirjeldati tähtsamaid sõlmi ning seadmeid. Seejärel kirjeldati mudeli juhtimist.

Mudeli juhtimiseks kasutati arvutiprogrammi RSCAD. Programmiga on võimalik muuta valitud parameetreid ja anda juhtimiseks käsklusi reaalajasimulaatorile. Simulaator on oluline osa mudelist, sest seadme ülesanne on käidelda mudelit. Peale mudeli juhtimise kirjeldamist anti ülevaade katsete läbiviimiseks kasutatud seadmetest.

Praktilise osa raames arvutati vastavalt eelnevalt koostatud mudelile releekaitse sätteid. Selleks kasutati kindlaksmääratud liini parameetreid ja mudeli poolt arvutatud nulljärgnevus ja vastujärgnevus komponente. Leides vajaminevad sätteid, arvutati need ümber sekundaarpoolele, arvestades voolu- ja pingetrafo parameetreid. Arvutatud sätteid sisestati releesse kasutades selleks vastavaid relee tootjapoolseid arvutiprogramme.

Kokku teostati 540 katset, sealjuures iga lühise tüübiga 180 katset. Lisaks erinevatele lühise tüüpidele, määrati iga katse jaoks kindel lühise kaugus ja tootmisvõimsus. Kindlaksmääratud parameetritega tekitati viis lühist liinil, et olla kindel kaitsete käitumises.

Kolmefaasilise lühise katsete läbiviimisel selgus, et

- Esimene matemaatiline relee suudab esimese tsooni lühist tuvastada ilma probleemideta kuni kaheksanda stsenaariumini;
- Esimese stsenaariumi korral tekib esimesel matemaatilisel releel raskusi lühise tuvastamisega. Vähendatud inertsi tingimustes suudab relee ära tunda kümnest lühisest seitse (reageerimise tõenäosus 70%);
- Teisele matemaatilisele releele valmistas raskusi lühise äratundmine nii liini alguses kui ka liini lõpus. Esimese stsenaariumi korral ei suutnud relee reageerida liini algusest 10% kaugusel olevale lühisele ja lisaks oli raskusi liini lõpus oleva lühise ära tundmisega;
- Kokkuvõtvalt võib öelda, et teine matemaatiline relee ei sobi magistritöös kirjeldatud tingimustel kolmefaasilise lühise tuvastamiseks;
- Reaalsed releed said kolmefaasilise lühise tuvastamisega hakkama kuni hetkeni, mil tuulepargi võimus oli minimaalne ja sünkroongeneraator puudus;
- Kui süsteemis vähendati inertsi vastavalt üheksandale stsenaariumile, siis ei suutnud mitte ükski relee ilma probleemideta lühist tuvastada.

Kahefaasilise lühise puhul selgus, et

- Esimesel matemaatilisel releel oli raskuseid üheksanda stsenaariumi juures lühise tuvastamisega. Ülejäänud tootmisvõimsuste osakaalu juures saab rele reageerimisega hästi hakkama;
- Esimesel matemaatilisel releel keskmine esimese tsooni reageerimise aeg oli 30 ms;
- Lisaks esimese tsooni (10% ja 50%) lühisele, suutis esimene matemaatiline rele osadel juhtudel reageerida teise tsooni (85% kaugusel) lühisele esimeses tsoonis;
- Teine matemaatiline rele suutis teise tsooni (85% ja 100%) lühist ära tunda juhtudel, kui sünkroongeneraatori võimsus oli alla 20% tootmisvõimsusest;
- Kui võrrelda esimest ja teist matemaatilist releed omavahel, siis esimene rele toimis esimese tsooni lühise tuvastamisel paremini;
- Kirjeldatud tingimustel ei ole soovitatav teise matemaatilise rele kasutamine kahefaasilise lühise kaitseks;
- Reaalsed releed töötasid väga hästi kahefaasilise lühise tuvastamisel kuni hetkeni, mil sünkroongeneraatori võimsus oli olemas;
- Seitsmenda ja kaheksanda stsenaariumi korral ei suutnud tootja 1 rele teise tsooni lühist tuvastada;
- Tootja 2 rele saab seitsmenda ja kaheksanda stsenaariumi korral lühise tuvastamisega hakkama, kuid see võttis tavapärasest ajast ligikaudu 60 ms rohkem aega;
- Üheksanda stsenaariumi korral ei tulnud mitte ükski rele toime lühise tuvastamisega.

Ühefaasilise lühise puhul selgus, et

- Kõik releed saavad lühise tuvastamisega hakkama kuni kaheksanda stsenaariumini;
- Tootja 2 suutis kahe tsooni piiripealsed lühised ära tunda esimeses tsoonis;
- Tootja 1 reageeris 85% kaugusel olevale lühisele teises tsoonis;
- Teise tsooni alguses erinev reageerimine reaalseste releede poolt tuleneb arvatavasti sellest, et mõlemad seadmed kasutavad erinevaid kompenseerimistegureid;
- Vastupidiselt kahefaasilisele lühisele, kus vähendatud inertsi olukorras suutis tootja 2 reageerida, suudab ühefaasilise lühise juures paremini hakkama saada tootja 1;
- Kaheksanda stsenaariumi korral suudab tootja 1 liini lõpus olevat lühist tuvastada tavapärase reaktsiooni kiirusega. Tootja 2 aga ei reageeri üldse;
- Üheksanda stsenaariumi korral suudavad kõik releed reageerida kuni 85% kaugusel olevale lühisele. Liini lõpus olevale lühisele reageerib ainult tootja 1 rele ja teine matemaatiline rele.

Käesolevas magistritöös ei uuritud, miks üks reaalne relee suutis vähendatud inertsi tingimustes lühist ära tunda ja teine ei suutnud ning see võiks olla autori edasiseks uurimisallikaks. Samuti vajaks täiendavat uurimist olukorrad, kus süsteemis on minimaalselt inverterpõhist tootmist. Selline võrgu konfiguratsioon on reaalses ülekandevõrgus küllaltki tõenäoline ja relee mitte reageerimise korral võivad rikke tagajärjed olla väga ulatuslikud.

Lisaks reaalsete releede edasisele uurimisele, võiks tähelepanu pöörata teisele matemaatilisele releele. Täpsemalt tuleks uurida, mis põhjusel teine matemaatiline relee ei rakendunud, kui kõik teised releed rakendusid

Kirjandus

- [1] H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2007.
- [2] M. Meldorf ja J. Kilter, Elektrisüsteemi stabiilsus, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [3] Ü. Treufeldt, Lühised elektrisüsteemides, Tallinn, 2002.
- [4] „Wind Power Capacity reaches 539 GW, 52,6 GW added in 2017,“ 2018. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.wwindea.org/2017-statistics/>. [Kasutatud 17.5.2018].
- [5] E. T. Assotsiatsiooni. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <http://www.tuuleenergia.ee/about/statistika/>. [Kasutatud 22.5.2018].
- [6] „Taastuvenergiast toodetud elektrienergia kogused ja prognoos,“ Elering AS, 2018. [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://elering.ee/toodang-ja-prognoos>. [Kasutatud 17.5.2018].
- [7] Q. Zhong ja T. Hornik, „Control of Power Inverters in Renewable Energy and Smart Grid Integration,“ 2013.
- [8] G.-H. Kim, Y.-J. Kim, M. Parl, I.-K. Yu ja B.-M. Song, „RTDS-based real time simulations of grid-connected wind turbine generator systems,“ %1 *Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE*, Palm Springs, CA, USA, 2010.
- [9] *Modelling of permanent magnet generator based wind turbine systems in the RTDS.*
- [10] J. Jia, G. Yang ja A. Nielsen, „A Review on Grid-Connected Converter Control for Short-Circuit Power Provision Under Grid Unbalanced Faults,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017.
- [11] „Võrgueeskiri,“ [Võrgumaterjal]. Kättesaadav: <https://www.riigiteataja.ee/akt/116022016014>. [Kasutatud 21.5.2018].

- [12] H. Tammoja, „Automaatika ja releekaitse loengukonspekt,“ 2003.
- [13] L. Grigsby, Power system stability and control, Taylor & Francis, 2012.
- [14] Y.Jacome ja C.F.Henville, „An Example Distance Protection Application with Complicating Factors.,“ *Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, USA, 2009.
- [15] „SIPROTEC 7SA61 Distance Protection manual,“ Siemens AG, 2003.
- [16] „Instruction manual Line differential protection IED GR200 series (GRL200),“ Toshiba.
- [17] „Multi-Function Distance,“ *RDTS manual*.