



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

MITTEKONVENTSIONAALSE TOOTMISALLIKA MÕJU ANALÜÜS DISTANTSKAITSE TOIMELE

ANALYSIS OF NON-CONVENTIONAL POWER PLANT ON DISTANCE
PROTECTION OPERATION

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Aleksander Dolgi

Üliõpilaskood: 163907

Juhendaja: Marko Tealane, doktorant-nooremteadur

Tallinn, 2019

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.

“.....” 2019

Autor:

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“.....” 2019

Juhendaja:

Kaitsmisele lubatud

“.....”2019 .

Kaitsmiskomisjoni esimees

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Aleksander Dolgi

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Mittekonventsionaalse tootmisallika mõju analüüs distantkaitse toimele

Kuupäev: 23.05.2019

39 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja(d): doktorant-nooremteadur Marko Tealane

Töö konsultant (konsultandid): -

Sisu kirjeldus:

Töö eesmärgiks on uurida tuuleelektrijaama lahtris oleva kaitserelle valesti toimimist lühiskatsel ja selle põhjuste väljaselgitamine ning lahenduste väljapakkumine. Lähteandmed saadi juhendajalt ja Tallinna Tehnikaülikoolist (TTÜ) sisedokumentide näol. Nimetatud andmete alusel reprodutseeriti TTÜ laboris reaalarajalektrivõrgusimulaatori ning olemasoleva distantkaitsega lühiskatsed. Katsetulemusi analüüsisid selgus, et lühise ajal muutusid voolude suunad vastupidiseks, mispärast distantkaitse reageeris rikkele vales suunas, lülitades nii välja tuulepargi. Toetamaks ideed ajalise viite lisamise näol vastassuunalisele kaitsetsoonile, võrreldi katsetest saadud tulemusi sarnasel teemal põhineva teadusartikli katsetulemuste ja järeldustega.

Märksõnad: lühis, lühiskatse, tuulepark, distantkaitse, reaalarjavõrgusimulaator, RTDS, Tallinna Tehnikaülikool, Elering AS

ABSTRACT

<i>Author:</i> Aleksander Dolgi	<i>Type of the work:</i> Bachelor Thesis
<i>Title:</i> Analysis of non-conventional power plant on distance protection operation	
<i>Date:</i> 23.05.2019	39 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisor(s) of the thesis:</i> Early stage researcher Marko Tealane	
<i>Consultant(s):</i> -	
<i>Abstract:</i> <p>The aim of this paper is to study the incorrect behaviour of the distance protection in a specific wind park during short circuit acceptance test and to find the reasons for misoperation and to offer solutions to the problem. Source data was recieved from the supervisor and Tallinn University of Technology (TALTECH) in the form of internal documents. Short circuit tests were reproduced in a TALTECH labortory using a real time electrical grid simulator and an existing distance protection using the aforementioned data. Analysis of test results showed that currents were reversed during the short circuit fault. This was the reason for the incorrect behaviour of the distance protection which registered a fault in the opposite side and disconnected the wind park from the rest of the grid. To support the idea of an additional time delay to the reverse direction protection zone a paper on a similar subject was studied.</p>	
<i>Keywords:</i> short circuit, short circuit test, wind park, distance protection, real time electrical grid simulator, RTDS, Tallinn University of Technology, Elering AS	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Mittekonventsionaalse tootmisallika mõju analüüs distantkaitse toimele
Lõputöö teema inglise keeles:	Analysis of non-conventional power plant on distance protection operation
Üliõpilane:	Aleksander Dolgi, 163907
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	bakalaureusetöö
Lõputöö juhendaja:	Marko Tealane
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	01.02.2020
Lõputöö esitamise tähtaeg:	25.05.2019

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Antud lõputöö raames sooritav rele käitumise uuring on vajalik selgitamiseks välja lühise katsel kaitseseadme valesti toimimise põhjused. Uuringu tulemus aitab tulevikus vältida sarnaste ohtlike olukordade tekkimist. Töö analüüs ning järelalus põhineks realselt toimunud katse imiteerimisel laboritingimustes sama tüüpi kaitseseadmega, üritades releele erinevaid tingimusi luues leida valesti käitumise põhjus.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on uurida tuuleelektrijaama lahtris oleva kaitserelee valesti toimimist lühiskatsel ja selle põhjuste väljaselgitamine.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Töös uuritava kaitserelee tööõhimitte selgeks tegemine
- Laboris realselt olnud katse tingimuste taasloomine reaalajasimulaatoriga

C) Katsetatavale releele erinevaid tingimusi luues leida valesti käitumise põhjuse leidmine

D) Võimalike leevendusmeetodite leidmine edasise vale töö vältimiseks

4. Lähteandmed

Elering AS poolt kaitsetest välja loetud info, TTÜ poolt tehtud mõõdistused katse ajal, kaitserelee tootja poolne käsiraamat, õpikud ja muud teatmikud.

5. Uurimismeetodid

Peamisteks uurimismeetoditeks on katsetamine ning lähteandmete analüüs

6. Graafiline osa

Graafiline osa paikneb enamuses töö põhiosas

7. Töö struktuur

1. Sissejuhatus

2. Katses osalenud kaitserelee tööpõhimõte

- a. Distantkaitse tööpõhimõte
- b. Konkreetse kaitse tööpõhimõte
- c. Kaitserelee sätted katsetuse korral

3. Kaitse vale töö lähteolukord ja katsetused

- a. Võrguolukord
- b. Mõõteandmete analüüs
- c. Katse reprodutseerimine reaalajasimulaatoris
- d. Katsetused reaalse releega laboritingimustes

4. Katsetulemuste analüüs

- a. Relee käitumine laboritingimustes
- b. Järeldused katsetest
- c. Võimalikud meetodid vale töö vältimiseks tulevikus

5. Kokkuvõte

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Siemens „Siprotec Distance protection 7SA6“ manual,

P.M. Anderson „Power system protection“

P.M. Anderson „Analysis of faulted power systems“

G. Ziegler „Numerical distance protection“

J.C. Das „Power system protective relaying“

9. Lõputöö konsultandid

Hans-Konrad Klaos; Priit Visnapuu; Uku Salumäe – releekaitse üldküsimumused ja koordinaatsioon.

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse otsimine ja lähteandmete kogumine (01.03.19)
- Töö teoreetilise osa kirjutamine (01.03.19-15.03.19)
- Olukorra simuleerimine reaajasimulaatoris (15.03.19-01.04.19)
- Reaalse releega testide teostamine (01.04.19-12.04.19)
- Testi tulemuste analüüs ja järelduste kirjutamine (12.05.19-19.04.19)
- Töö esimene versioon valmis (19.04.19)
- Juhendajale esimeseks lugemiseks saatmine (20.04.19)
- Paranduste sisseviimine (01.05.19)
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (07.05.19)
- Töö lõplik versioon valmis (20.05.19)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE.....	3
ABSTRACT	4
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	5
EESSÕNA.....	9
SISSEJUHATUS	10
1. ELEKTRISÜSTEEMI OLEMUS NING KATSES OSALENUD KAITSEREELE TÖÖPÕHIMÕTE	12
1.1 Elektrisüsteemi olemus.....	12
1.2 Distantkaitse tööpõhimõte.....	15
1.3 Siemens 7SA6 distantkaitse tööpõhimõte	18
2. Kaitse vale töö lähteolukord	21
2.1 Võrguolukord	21
2.2 Kaitserelee sätted ebaõnnestunud lühiskatse ajal	24
3. Katsete reprodutseerimine	25
4. Katsetulemuste analüüs ja võrdlus	29
4.1 Kaitse töö analüüs.....	29
4.2 Võrdlus teadusartikliga	31
KOKKUVÕTE	37
SUMMARY	38
KASUTATUD KIRJANDUS.....	39

EESSÕNA

Lõputöö teema pakuti välja juhendaja Marko Tealase poolt. Põhilised algandmed saadi Tallinna Tehnikaülikoolist. Töö teoreetilised andmed põhinevad autori teadmistel ning viidatud kirjanduse allikatel. Siinkohal autori poolt tänud juhendajale.

SISSEJUHATUS

Moodsas maailmas on üheks oluliseks riikide arengut ja elanike elatustaset iseloomustavaks näitajaks elektrienergia tarbimise hulk – iga majapidamine vajab vee keetmiseks ja tehased tootmiseks voolu ning kõik see eeldab elektrienergia tootmismahu suurendamist ning võrgu arendamist. Elektrit toodetakse elektrijaamades, kantakse üle eemal paiknevatesse tarbimispiirkondadesse kõrgepingeülekandevõrkude ja alajaamade kaudu ning jaotatakse tarbijatele kesk- ja madalpingejaotusvõrkude abil. Elektrivõrgu normaalset talitlust häirivad mitmesugused rikked, millest üks ohtlikumaid on lühis. Lühis on olematu või väikese takistusega ebanormaalne ühendus vooluahelas kahe või enama normaalselt erineva potentsiaaliga punkti vahel. Selle nähtuse tagajärjel väheneb järsult elektriahela üldine takistus, millega kaasneb voolu ohtlik suurenemine ning pinge märgatav alanemine. Lühise tõttu tekib toiteallikatest ära lõigatud tarbijatel toitekatkestus, muudel tarbijatel pingelohk. Suur vool põhjustab elektrijuhtide liigkuumenemist ja tekitab juhtide vahel ohtlikke mehaanilisi jõudusid. Sagedasemad rikete põhjustajad on välgulöögid, seadmete rikked või väärtõimimised, inimeste eksimused ja liigkoormused. Mistahes elektrilise rikke esinemisel on prioriteediks rikkekoha eraldamine ülejäänud võrgust. See eeldab esiteks rikke kiiret avastamist ning teiseks asukoha kindlaksmääramist, et järgnevad lülitustoimingud oleksid õiged. Tänapäeval on võrgu ja selle elementide kaitseks on kasutusel kiiretoimelised, multifunktsionaalsed kaitseseadmed – peamised neist on distants- ning diferentsiaalkaitsereleed. Mõlema peamiseks ülesandeks on võrgu elementide (liinide, trafode jne.) kaitsmine lühisvoolude eest kus kumbki töötab omamoodi, aga tihti leiavad rakendust sama elemendi kaitseks mõlemad seadmed samaaegselt. Peamiseks erinevuseks on see, et diferentsiaalkaitse kasutab rikke tuvastamiseks ainult voolu, aga distantskaitse, millest esimeses peatükis täpsemini kirjeldatud, kasutab rikke ja selle asukoha tuvastamiseks mõõtetrafodelt saadud pingete ja voolude väärtusi. [1]

Viimaste aastate trend, eriti Euroopas, on olnud taastuvenergiaallikate kasutamise suurendamine elektri tootmiseks, millest üks neist on tuul ja seda ära kasutavad tuulegeneraatorid. Antud töös ongi vaatluse alla võetud Eestis asuva tuulepargi vastuvõtu lühiskatsel esinenud kaitseseadme väärtõiming – täpsemalt distantskaitse valesti käitumise analüüs lühise ilmnemisel. Võrgueeskirjas riigiteataja kodulehel on välja toodud nõuded üle 5 MW nimiaktiivvõimsusega elektrijaama suhtes, millest üks neist on see, et sellise võimsusega elektrijaama generaatoritele on kohustuslik paigaldada välis- ning siselühisekaitse (§ 17 punkt 2) ning et 110 kV võrgus tuleb lühised kõrvaldada 0,6 sekundi jooksul (erandjuhtudel 1s jooksul). [2]

Käesolevas töös uuritakse Eestis rajatud tuulepargi vastuvõtulühiskatsel distantskaitse valesti käitumise põhjuseid ja selle vältimiseks võimalikke lahendusi. Selle jaoks kõigepealt selgitatakse välja distantskaitse tööpõhimõtte ning täpsemalt reaalses alajaamas kasutust leidnud distantskaitse funktsioone ning tööprintsipe. Seejärel analüüsitakse realselt toimunud katsete läbiviija poolt antud mõõtetulemusi ning selgitatakse välja erinevused ebaõnnestunud ja hiljem sooritatud õnnestunud lühiskatse tulemustel. Lisaks mõõdetud võrguolukorrale vaadatakse üle lühiskatsel osalenud distantskaitse sätted. Üheks töö eesmärgiks ongi välja selgitamine, mis relee sätteid muutes ja kas üldse saaks vältida kaitseseadme valesti toimimist. Selle kindlakstegemiseks reprodutseeritakse reaalaja võrgusimulaatori abil distantskaitsele täpselt samad alajaamas mõõdetud pingete ja voolude väärtused nägemaks kuidas relee võib käituda ja kas mitmete katsete jooksul töötamine muutub või mitte. Peale kõike eelnevat tehakse kokkuvõtte tehtule ning antakse lõplik vastus kaitserelee sätete muutmise võimaluste kohta.

1. ELEKTRISÜSTEEMI OLEMUS NING KATSES OSALENUD

KAITSEREELE TÖÖPÕHIMÕTE

Järgnevas kahes alapeatükis käsitletakse teoreetilist tausta toetamaks arusaamist elektrisüsteemi ning seal esinevate rikete ja nende kaitseks toimiva distantskaitse kohta. Kolmandas alapeatükis tuuakse välja Siemens 7SA611 põhifunktsioonid ja opereerimise põhimõtted.

1.1 Elektrisüsteemi olemus

Kõik elektriga seonduv on taandatav füüsika ja matemaatika kaudu lihtsatele seostele, mille alusel on tänapäeval üles ehitatud elektrisüsteemid, elektroonikaseadmed jne. Kõigepealt tuleb mõista elektrivaldkonnas kolme enim levinud mõistet ja nende tähendust, et nende põhjal aru saada millest järgnevates peatükkides on juttu.

Esiteks vool (ühik: Amper, A; tähis: I) – see on õpikutes selgitatud kui suunatud elektronide liikumine. Elektron on füüsikast tuntud osake, millel on negatiivne laeng, mis tiirleb ümber positiivselt laetud aatomituuma. Elektroni mass on tunduvalt väiksem kui aatomituum, mille ümber ta ringi liigub ja neid võib olla ühe aatomi kohta mitmeid kihtide kaupa. Kui välja arvata pooljuhttehnika, siis elektronid on need, mis liiguvad elektrijuhtide sees, olles ise niiöelda energiakandjad. Lihtsamalt öeldes paneb elektrone liikuma pinge.

Pinge (ühik: Volt, V; tähis: U) – Pinge on see, mille tõttu saab tekkida vool. Pinge iseloomustab kahe punkti vahelist elektrivälja potentsiaalide erinevust ning näitab kui palju tööd tuleb teha ühiklaengu ümberpaigutamiseks ühest punktist teise. Kui kahe eseme pingete erinevus on null, siis voolu ei teki.

Takistus (ühik: Ohm, Ω ; tähis: R) – Takistus on objekti omadus avaldada voolu liikumisele takistavat mõju. Ehk mida suurem on objekti takistus, seda vähem saab liikuda voolu ja vastupidi. Erinevatel ainetel ja materjalidel on erinev elektriline takistus, mistõttu peamiselt kasutatakse elektrienergiat edasi kandes teiste ainetega võrreldes madalama takistusega metalle nagu vask ja alumiinium. Lisaks aktiivtakistusele R esineb vahelduvvoolu kasutamisel ka reaktiivtakistus (ühik: Ohm, Ω ; tähis: X), mis tuleneb muutuva voolu tõttu esinevast muutuvast magnetväljast.

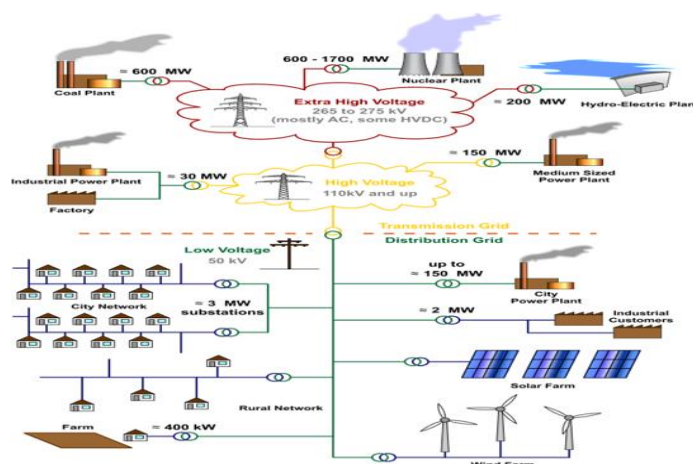
Nende kolme suuruse kaudu saab tekitada elektrivaldkonnas vaieldamatult tähtsaima seose, mille nimi on Ohmi seadus. See seos on aluseks kõigele järgnevale:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.1)$$

Valemi (1.1) järgi sõltub voolu suurus eseme elektrilisest takistusest ja talle rakendatud pingest. Teades nüüd elementaarselt kuidas ja miks tekib vool, võib edasi selgitada kahte elektrisüsteemis kasutatavat voolu tüüpi:

- Alalisvool – Kõige lihtsam voolu liik, mis esineb konstantsel pingel, mistõttu vool on muutumatu takistuse puhul samuti konstantne ning ühesuunaline.
- Vahelduvvool – Voolu liik, mis tekib vahelduvpinge olemasolul. Voolu väärtus sõltub otseselt sellest, mis sagedusega pinge muutub.

Elektrisüsteemides kasutatakse mõlemat vooluliiki sõltuvalt vajadusest. Kumbki on omamoodi kasulik ja enda nüanssidega. Suuremates riikides nagu Hiina ja India, kus on tarvis suuri võimsusi edastada mitmete tuhandete kilomeetrite kaugusele kasutatakse väga kõrge pingega alalisvooluliine, sest sellistel distantsidel on liinides tekkivad energiakaod väiksemad võrreldes vahelduvvoolu kasutamisega. Enamuses ülejäänud elektrivõrgus kasutatakse vahelduvvoolu mitmel põhjusel. Esiteks vahelduvvoolu puhul saab ära kasutada muutuvate magnetväljade nähtust, et muuta pinget. Kahe omavahel ühendamata pooliga vastastikinduktsiooni nähtusel toimivadki kõik transformatorid. Teiseks vahelduvvoolu on lihtsam tekitada – elektrigeneraatorid iseenesest pöörlemise tõttu tekitavad vahelduvvoolu ja seepärast ei ole tarvis juurde lisada alaldeid, mis muundaks voolu alalisvooluks. Nii ongi suuremas pildis elektrisüsteemi alused kaetud – elekter toodetakse elektrijaamades, kus auru või muu kütuse põletamisel pannakse rõhuga pöörlema generaatorid, mis on ühendatud jõutransformatoriga, mis muundab generaatorist väljuva pinge kõrgemaks vajalikule pingeastmele. Sealt edasi edastatakse võimsus läbi erinevate pingeastmete liinide ja alajaamade kaudu lõpuks tarbijani.



Joonis 1.1 Moodne elektrivõrk [3]

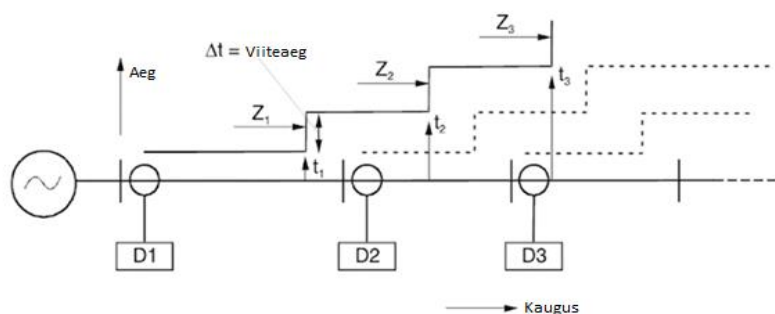
Minnes elektrisüsteemi olemuselt konkreetsemaks, saab jaotada selle süsteemi peamiselt kaheks osaks: ülekande- ning jaotusvõrguks (joonis 1.1, lk 13). Ülekande võrgu alla kuuluvad kõik alajaamad, liinid ja muud elemendid, mis nii-öelda kannavad üle elektrit tootmisallikatest kõrge pingega jaotusvõrku. Eestis kasutatakse ülekandevõrgus peamiselt nimipingeid 330 kV ning 110 kV, mõni üksik 220 kV liin on ka veel alles. Kõrgematel pingetel saab rohkem võimsust edastada ning võrgus esinevad kaod on ka väiksemad. Jaotusvõrgu eesmärk on elektrienergia edastamine lõpptarbijateni. Selleks muundatakse ülekandevõrgust sissetulev kõrgepinge kesk- ja madalpingeks, kasutades selleks jõutransformaatoreid. Jaotusvõrgus võib leida pingeastmeid 35, 20, 10, 6 ning 0,4 kV, millest viimane jõuab tavatarbijale pistikupessa. Et elekter jõuaks tarbijani ohutult kasutataval kujul, peab elekter vastama teatud nõuetele ehk ta peab olema elektrisüsteemi mõistes kvaliteetne. Elektri kvaliteedi all mõeldakse elektrivarustuskindlust ja talitusparameetrite vastavust nimisuurustele. Elektrivarustuskindlust mõjutavad kõiksugu võimalikud võrgus esinevad rikked nagu lühised, liigpinged ja -voolud jne. Tänapäeval tagatakse varustuskindlus elektrivõrgu laiendamisega, alajaamade ja liinide renoveerimisega ja uute tootmisallikate lisamine. Võrgu stabiilsuse seisukohalt on tähtis rikke esinemisel selle kiire eemaldamine, et see ei rikuks elektri kvaliteeti ülejäänud terves süsteemis. Esimene asi on rikke tuvastamine ja selle asukoha kindlakstegemine. Selle jaoks on võrku paigaldatud spetsiaalsed kaitseseadmed nagu distants- ja diferentsiaalkaitse, mis kasutavad rikke tuvastamiseks alajaamades olevatelt pinge- ja voolutrafodelt mõõdetud vastavaid väärtusi. Nimetatud kaitseseadmed lisaks rikke tuvastamisele juhivad ka alajaamades olevaid lülitusseadmeid – peamiselt võimsuslülitid, mille ülesandeks on ahela lahutamine nii normaal- kui ka rikketalitlusel, kus viimases esinevad väga suured voolud, mis liiga kaua kestes võivad tekitada nii seadmetele ise kui ka ülejäänud võrgu elementidele suurt elektrilist, termilist ja mehaanilist kahju. Lisaks installeeritud seadmetele jälgitakse Eestis ja mujal arenenud riikides elektrisüsteemi olukorda tsentraalsest juhtimiskeskusest, kust saab näha reaajas võrgu parameetreid, alajaamades olevate seadmete olekut ja käitumist rikete korral. Juhtimiskeskusest saavad dispetšerid teostada kaugelt lülitustoiminguid läbi SCADA süsteemi (*Supervisory Control and Data Inquisition*). [1]

1.2 Distantkaitse tööpõhimõte

Tänapäeval kasutuses olevad multifunktsionaalsed mikroprotsessoritel põhinevad distantkaitsed kaitsevad elektrivõrgu seadmeid lühisvoolude eest ning neid on võimalik juhtida kohapeal või kaugelt tsentraliseeritud juhtimiskeskusest. Nad on tavaliselt peamiseks kaitseks õhu- ning kaabelliinidele ja sekundaarseks kaitseks teistele võrgu osadele nagu latid, trafod ja edasiminevad fiidrid. Digitaalsed distantkaitsed on võimelised ka rikke asukohta määrama, mistõttu leiab see seade kasutust ka radiaalvõrkudes. [4]

Distantkaitse tööpõhimõte seisneb kaitstava objekti takistuse jälgimisel kasutades selle arvutamiseks kaitstava võrgu osa pinget ning voolu, mille väärtused saadakse vastavalt pingening voolutrafodelt relee asukohas. Mikroprotsessikaitsel on iga võrgu silmuse kohta oma mõõteelement, mis teostab mõõtmisi mitmeid kordi ühe perioodi jooksul ning mille mõõtetulemused salvestatakse pidevalt tsüklilisse puhvrise. Saadud takistuste väärtusi võrreldakse liini teadaoleva takistusega ning kui mitu järjestikku leitud väärtust on väiksemad määratud takistusest saadab distantkaitse signaali võimsuslülile ahela lahutamiseks. [4] [5]

Mõõtetrafode mõõte- ning modelleerimisvigade tõttu ei ole liini võimalik kindlalt kaitsta täies ulatuses mistõttu distantkaitse reageerimine lühisele on jaotatud vastavalt rikke asukohale tsoonideks (joonis 1.2). Esimene tsoon, kus distantkaitse reageerib viiteta, katab relee asukohast liinide näitel 85% pikkuse ulatuses. Esimene tsoon on alati mõeldud kaitstava objekti kaitsmiseks ehk see on osa võrgust, millele on määratud oma kindel distantkaitse. Riketele, mis asuvad esimesest tsoonist väljaspool, rakendub distantkaitse ajalise viitega, et esiteks kindlalt veenduda rikke olemasolust ning teiseks, et enne jõuaks ahela lahutada rikkele lähim kaitseseade ning ei lülitataks ebavajalikult suurt osa võrgust välja. Digitaalsetele distantkaitsetele on võimalik määrata mitmeid kaitsetsoone ajaliste rakendusviidetega kattes nii lisaks primaarseks määratud kaitseobjekti ka sellest kaugemale jäävaid võrgu osi. [4]



Joonis 1.2 Kaitsetsoonid [4]

Distantkaitse rele kasutab liini takistuse arvutamiseks voolu- ning pingetrafoode sekundaarpoole mõõteväärtusi. Seega takistus avaldub valemiga (1.2):

$$Z_{sec} = \frac{I_{prim}/I_{sec}}{U_{prim}/U_{sec}} \cdot Z_{prim} \quad (1.2)$$

kus Z_{sec} – takistus sekundaarpoolel, Ω

I_{prim} – vool primaarpoolel, A

I_{sec} – vool sekundaarpoolel, A

U_{prim} – pinge primaarpoolel, V

U_{sec} – pinge sekundaarpoolel, V

Z_{prim} – takistus primaarpoolel, Ω

Distantkaitse käitumise hindamiseks kasutatakse takistuste diagrammi (joonis **1.3**, lk **17**), mille horisontaalteljel on aktiiv- ning vertikaalteljel reaktiivtakistus. Liini normaaltalitusel vastab rele poolt mõõdetud takistus pöördvõrdeliselt koormusega (3) ning pinge ja voolu vaheline nurk vastab koormuse nurgale φ_{load} , mis sõltub reaktiiv- ja aktiivvõimsuste suhtest (4).

$$Z_{load} = \frac{U_{line}^2}{P_{load}}$$

kus Z_{load} – koormustakistus, Ω (1.3)

U_{line} – liinipinge, V

P_{load} – koormusvõimsus, W

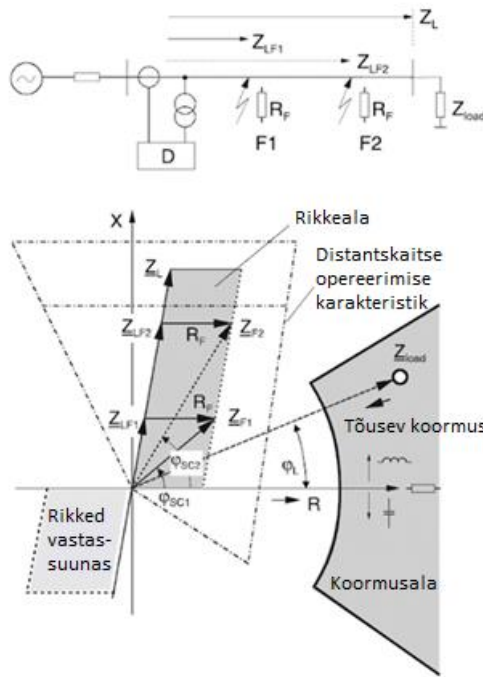
$$\varphi_{load} = \tan^{-1}\left(\frac{P_{reactive}}{P_{real}}\right)$$

kus φ_{load} – koormusnurk, ° (1.4)

$P_{reactive}$ – reaktiivvõimsus, W

P_{real} – aktiivvõimsus, W

Lühise korral kaitstava objekti takistus väheneb – selle väärtus vastab rele ning lühisekoha vahelisele takistusele. Elektriakaare või muu aktiivtakistuse olemasolul lühise takistuse vektor nihkub horisontaalteljel edasi ning lühisvoolu ja -pinge vahele tekib lühise nurk φ_{sc} . Distantkaitse suudab eristada ka lühist, mis asub kaitstava objekti suhtes vastassuunas ehk releest tagapool. Sel juhul on voolu suund vastupidine ning takistuse vektor nihkub teljestikul kolmandasse veerandisse ning võrreldes seda mälus oleva takistusega selgub, et see on vastasmärgiline ehk rike on rele taga.



Joonis 1.3 Kaitsetsoonide selgitav skeem [4]

Joonisel 1.3 punktiiriga piiratud ala koordinaatteljestikul tähistab distantskaitse reageerimiseks seadistatud kaitsetsooni. Kõik relee poolt mõõdetud komplekstakistuse väärtused, mis jäävad alast välja ei käsitleta rikkena ning distantskaitse sellele ei reageeri. Juhul, kui mõõdetud takistuste vektorid ei ulatu kaitsepiiridest välja, hakkab distantskaitse toimima. Vertikaalteljel alumine horisontaalne punktiirjoon kaitsepiirkonnas eraldab esimese ja teise tsooni, kust alates mööda telge ülespoole minnes rakendub distantskaitsel lülitamiskäsu andmisel ajaline viide.

Rikkekooha kaugus releest lihtsatel fiidritel on proportsionaalne lühisekoha reaktiivtakistusega, mille saab leida lühisvoolu- ning pingega kaudu (valem 1.5). [4]

$$L_{(km)} = \frac{X_{F(Ohm)}}{X'_{(Ohm/km)}}, X_F = \frac{U_{SC}}{I_{SC}} \cdot \sin \varphi_{SC}$$

kus $L_{(km)}$ – rikkekoha kaugus mõõteasukohast, km

$X_{F(Ohm)}$ – lühisekoha reaktiivtakistus, Ω

$X'_{(Ohm/km)}$ - liini reaktiivtakistus kilomeetri kohta, $\frac{\Omega}{km}$

(1.5), (1.6)

U_{SC} – lühispinge, V

I_{SC} – lühisvool, A

$\sin \varphi_{SC}$ – lühispinge ja -voolu vaheline nurk

Rikke asukoha arvutamine käivitub distantskaitsel automaatselt kohe peale rikke avastamist ja lõppeb enne võimsuslüliti käivitust. Siemensi 7SA5 ning 7SA6 releede puhul jääb rikkeasukoha määramiseks alla 2,5% kogu liini pikkusest.

1.3 Siemens 7SA6 distantskaitsese tööpõhimõte

Distantskaitsese põhifunktsioonid [6]:

- Kaitsese võimalus igat sorti lühiste korral nii maandatud-, resonantsmaandatud kui ka isoleeritud neutraaliga võrkudes.
- Võimalus seadistada kaitsese funktsioonid vastavalt võrgu olukorrale ning kasutaja nõuetele (kaitsese käivitumine liigvooludele, liigpingetele, nendevaheliste nurkade ning takistuse muutumisel).
- Tundlikkus nõrgalt koormatud süsteemidel ning stabiilsus koormuste kõikumistel.
- Kokku kuus määramisüksust igale kaitsesele.
- Kokku kuus kaitsese tsooni, mida saab määrata kas ette-, tahapoole või suunata ulatusega. Ühe tsooni saab määrata ajalise viitega kaugema ulatusega kui ettenähtud kaitsese tsoonid.
- Võimalus määrata kokku üheksa ajalist viidet kaitsese tsoonidele.
- Suuna määramine rikketa faaside pingete ja mällu salvestatud pingete võrdlemisel, mida ei mõjuta mahtuvuslike pingetrafode transiendid.
- Voolutrafo küllastumise avastamine ning selle nähtuse kompenseerimine.
- Paralleelse liini mõju kompenseerimine.
- Lühim rakendusaeg 15 ms (võrgu sagedusel 60 Hz) või 17 ms (sagedusel 50 Hz).
- Maaühendusvoolu suuna määramisel kasutatakse nulljärgnevussüsteemi väärtusi (I_0 , U_0), nulljärgnevusvoolu ning jõutrafo neutraali voolu (I_1 , I_2) või vastujärgnevussüsteemi väärtusi (I_2 , U_2).
- TLA käivitamine peale ühe-, kolme- või ühe- ja kolmepooluselise rikkele rakendamisel.
- Liigpinge ja alapinge avastamine erinevate astmetega.
- Rikke asukoha kalkuleerimine määramisüksuste alusel. Võimalus väljastada tulemus takistusena, kilomeetrites, miilides või protsendina liini pikkusest.
- Lülitusseadmete (võimsus-, lahk- ja maanduslüliti) juhtimise võimalus kohapeal.

Siemensi 7SA6 seadme üks põhifunktsioonidest on distantskaitsena töötamine. See aparaat suudab eristada kas esineb maalühis või mitte, kasutades selleks stabiliseeritud maavoolu määramist, nulljärgnevusvoolu võrdlust ning neutraali nihkepinget. Lisaks on seadmesse ehitatud meetmed eiramaks väga madalaid maaühendusvoolu isoleeritud- või resonantsmaandatud süsteemis. [6]

Maaühendusvoolu mõõtmine $3I_0$

Maaühendusvoolu mõõdetakse faaside kaupa ning summeeritakse ja juhul kui voolude summa ületab seadistatud väärtuse, rakendub kaitsefunktsioon. Konkreetne seade on stabiliseeritud liigse rakendumise vastu maaühenduseta lühiste korral, kus võib tekkida olukord, et voolutrafode sekundaarahelates esinevad ebasümmeetrilised voolud mõõtemähiste erinevatest küllastusastmetest. [6]

Vastujärgnevusvoolude mõõtmine $3I_2$

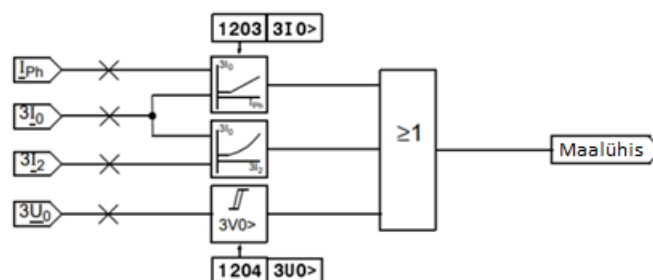
Pikkadel suure koormusega liinidel võib maaühendusvoolu mõõtmine olla ülestabiliseeritud suutre voolude tõttu. Sellistel juhtudel mõõdetakse lühise avastamiseks vastujärgnevusvoole. Ühe faasilise lühise korral on vastujärgnevusvoolu amplituud praktiliselt võrdne nulljärgnevusvooluga. Juhul, kui nende kahe voolude suhe ületab ettemääratud väärtuse, rakendub distantskaitse. [6]

Neutraali nihkepinge mõõtmine $3U_0$

Neutraali nihkepinge avastamiseks filtreeritakse digitaalselt nihkepinge ning samal ajal jälgitakse fundamentaalset sagedust, et märgata kas see ületab ettemääratud läveme. [6]

Maalühise tuvastamine maandatud ahelas

Maandatud süsteemis kasutab 7SA6 maalühise tuvastamiseks voolu ning pinge mõõtmistulemusi ning rakendab need kahes VÕI-funktsioonis maalühise kindlaks tegemisel. [6]



Joonis 1.4 Siemens distantskaitse tööloogika [6]

Joonisel 1.4 kasutatakse maalühise kindlaks määramisel maandatud ahelas kahte lisatingimust:

1. Neutraali nihkepinge suureneb, kui null- ning pärijärgnevustakistuse suhe on suur.
2. Maaühendusvool suureneb, kui null- ning pärijärgnevustakistuse suhe on väikse.

Kummagi ülalmainitud nähtuse olemasolu põhjal ei rakenda relee kaitsefunktsiooni, vaid neid kasutatakse lisaks teistele mõõtmistulemustele maalühise olemasolu kinnitamiseks. [6]

Maalühise tuvastamine maandamata ahelas

Maandamata süsteemides ei kasutata neutraali nihkepinget rikke tuvastamiseks. Sellistes süsteemides kaitseseade eeldab ühe faasilise rikke puhul lihtsat maalühist ning rikke tuvastamine surutakse esialgu maha ajalise viitega vältimaks mööduvate (transient) mõõteandmete arvestust, mis esinevad maalühise alguses. Viite lõppemisel algab rikke kindlaks tegemine uuesti, et tuvastada võimalik kahefaasiline maalühis olukorras, kus üks faasi ots on tupikfiidril. Kaitsefunktsioon

rakendub viiteta juhul kui tuvastatakse lühisele omane suur neutraali nihkepinge. Sellest järeldatakse, et maalühise olemasolu on võimalik ainult kahefaasilisel maalühisel. Samuti käsitleb seade riket kahefaasilise maalühisena, kui rike tuvastatakse rohkem kui ühes faasis. Sellisel viisil on võimalik tuvastada kahefaasilisi maalühiseid olukorras, kus mõõtepunkti läbib väga vähe maaühendusvoolu. [6]

Rikke tuvastamine

Rikke tuvastamisel peab seade kindlaks määrama rikke tüübi ning seejärel rakendama kõik vajalikud protseduurid selektiivseks rikke eemaldamiseks:

- Käivitama ajalised viited kaitsavast seadmest kaugemate rikete puhul.
- Vigaste ahelate kindlaks määramine
- Takistuse arvutustulemuse ning suuna andmete väljastamine
- Rikkesignaali väljastamine
- Täiendavate funktsioonide rakendamine
- Vigaste faaside indikeerimine

Sõltuvalt mudelitüübist on 7SA6 seadmel mitmeid rikketuuvastamise režiime, millest saab valida vastavalt süsteemi tingimustele sobivaima. Juhul, kui seadmel on ainult takistusepõhine rikke tuvastamise töörežiim, käivituvad ülalnimetatud protseduurid automaatselt nii pea kui on tuvastatud rike mõnes kaitsetsoonis. [6]

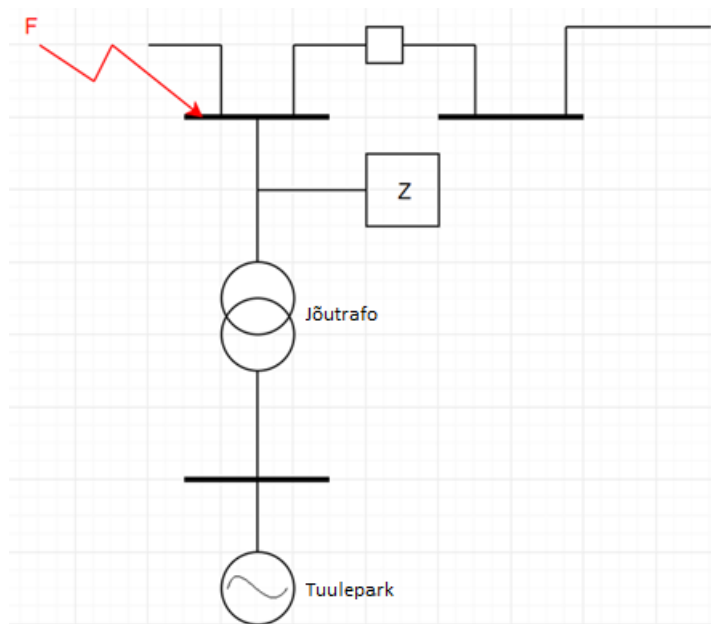
2. Kaitse vale töö lähteolukord

Järgnevas kahes peatükis selgitatakse tuulepargi vastuvõtulühiskatse ajal olnud võrgu parameetreid ning kasutusel olnud distantkaitseriele sätteid.

2.1 Võrguolukord

Seoses tuuleelektrijaama vastuvõtukatsetega sooritati 17. ja 20. veebruaril 2015 lühiskatse 110 kV alajaamas. 17. veebruaril toimunud vastuvõtekatse ebaõnnestus, aga järgmisel korral toimis kaitse õigesti. Lühise analüüsiks vajalike andmete kogumiseks teostati kolmefaasiline maalühiskatse 110 kV alajaama lattidel ning mõõtmisteks kasutati Chauvin Arnoux CA 8352 analüsaatorit, mis oli ühendatud pinge ja voolu mõõtmiseks vastavalt kombimõõtetrafo sekundaarahelatesse.

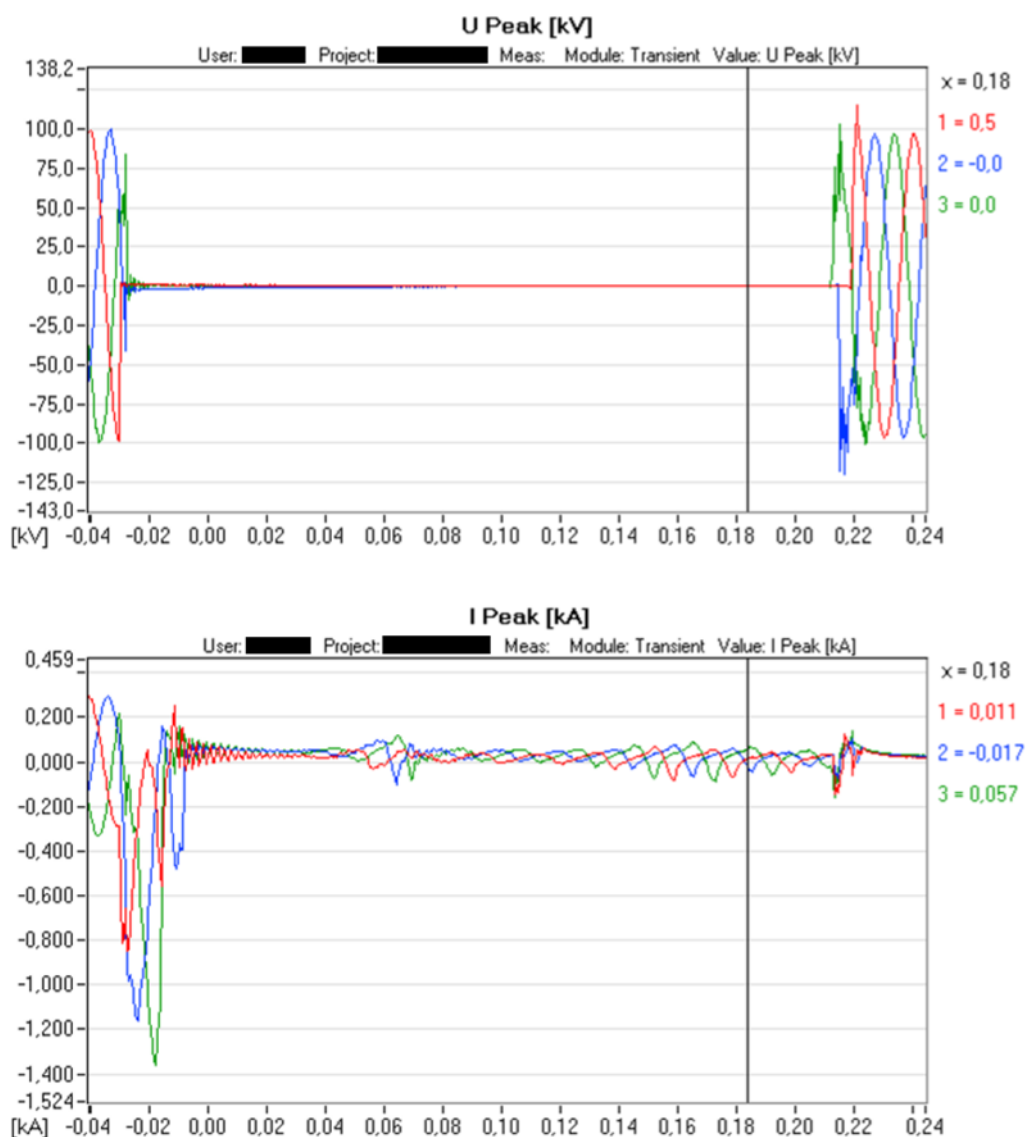
Katsete ajal mõõdeti kõikide faaside pingeid (U_F), voolusid (I_F), võimsusi (P , Q , S) ja suuruste järsust muutusest põhjustatud siirdeprotsesse. Mõõtmised salvestati sammuga 0,2 s ning transient tihedusega 9600 punkti sekundis. [7] [8]



Joonis 2.1 Reaalselt katsetatud võrgu osa skeem

Joonisel 2.1 on näidatud osa alajaama skeemist, kus teostati lühiskatse. Punase noolega on märgitud asukoht, kus tekitati lühis (F). Jämeda joonega on näidatud latid ja tühi ruut on võimsuslüliti. Z tähistab distantkaitset, millest allpool asub jõutrafo, mis oli ühendatud generaatori tingmärgi all tuulepargiga. Mõlemal katsel tekitati lühis samas kohas.

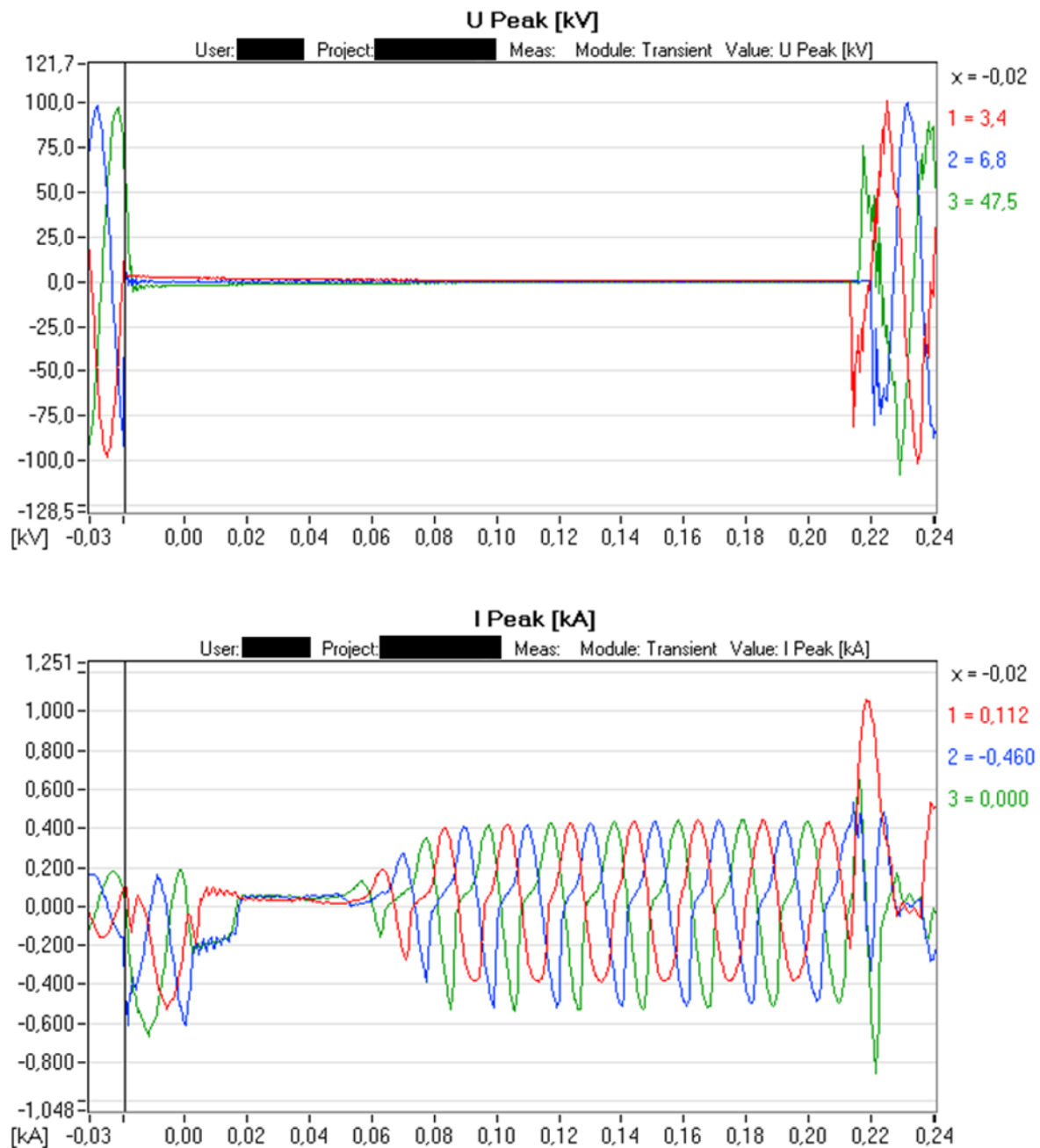
17. veebruaril toimunud katse mõõtetulemused



Joonis 2.2 Ebaõnnestunud vastuvõtulühiskatse ajal mõõdetud pingete ja voolude graafikud [7]

Joonisel 2.2 on näha faaside pingete ning voolude hetkväärtusi enne ja pärast katse sooritamist. Hetk enne lühist oli võrgu liinipinge (U_L) 100 kV, mis teeb faasipingeks (U_F) 70,7 kV ning faase läbisid voolud keskmise efektiivväärtusega 0,14 kA (I_F). Lühise kestvus oli 0,239 sekundit. Voolude graafikult on näha, et lühise lõppemisel kui pinge taastus, vool ei muutunud normaalseks. See on tingitud asjaolust, et lühise ajal distantskaitse sattus lühise asukoha määramisel segadusse ning lühise ajal, et lühis on hoopis jõutrafos ning lülitas seejärel terve tuulepargi välja mistõttu tuulepark ei saanud rahuldavat tulemust lühiskatsele kirja. [7]

20. veebruaril toimunud katse mõõtetulemused



Joonis 2.3 Õnnestunud vastuvõtülühiskatse ajal mõõdetud pingete ja voolude graafikud [8]

Joonisel 2.3 on näha õnnestunud lühiskatse pingete ning voolude amplituudväärtusi enne ja pärast lühist. Voolude graafikul on näha, et lühise hetkel voolud suurenevad ning seejärel langevad hetkeks praktiliselt nulli ja seejärel taastuvad. Ajavahemikus 0,02 kuni 0,06 s on voolude omapärane kuju tingitud tuulepargis olevate konverterite käitumisest lühistel, mis tingib faaside suundade muutused.

2.2 Kaitserellee sätted ebaõnnestunud lühiskatse ajal

Tabelis 2.1 on väljatoodud tähtsamad kaitserellee sätted 17. veebruaril toimunud lühiskatse ajal. Distantkaitse jaoks *forward* ehk ettepoole jäävad kaitsetsoonid olid määratud jõutrafo kaitseks ning *reverse* ehk kaitsest tahapoole jäid alajaama jaotla latid. Teisisõnu tsoonid Z1, Z2 ning Z5 olid määratud jõutrafo kaitsetsoonideks vastavate ajaliste viidetega ning tsoon Z3 oli lattide kaitseks vastava ajalise viitega. Z1B on kasutusel lühisele lülitamise kaitseks ja Z4 reeglina reserveerib liinide kaitseks, aga antud juhul on sätetes mõlemad kaitsetsoonid määratud *inactive* ehk nad on sättega tööst välja viidud.

Tabel 2.1 Distantkaitse sätted

Device Configuration/	Distance protection pickup program	Z< (quadrilateral)	
Power System Data 1/Power System/	System Starpoint is	Solid earthed	
Power System Data 1/Power System/	Rated Frequency	50 Hz	
Power System Data 1/Power System/	Phase Sequence	L1 L2 L3	
Power System Data 1/Power System/	Distance measurement unit	km	
Power System Data 1/Power System/	Setting format for zero seq.comp. format	Zero seq. comp. factor K0 and angle(K0)	
Power System Data 1/Transformers/	CT Starpoint	Towards line	
Setting/0012 - Distance General/1_General/	Distance protection is	On	
Setting/0012 - Distance General/Earth faults/	criterion of earth fault recognition	3I0> OR 3U0>	
Setting/0012 - Distance General/Time Delays/	Condition for zone timer start	on Zone Pickup	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1/	Operating mode Z1	Forward	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1/	T1-1phase, delay for single phase faults		0,1 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1/	T1multi-ph, delay for multi phase faults		0,1 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1/	Zone Reduction Angle (load compensation)		0 °
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1B/	Operating mode Z1B (overreach zone)	Inactive	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1B/	T1B-1phase, delay for single ph. faults		0 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1B/	T1B-multi-ph, delay for multi ph. faults		0 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z1B/	Z1B enabled before 1st AR (int. or ext.)	No	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z2/	Operating mode Z2	Forward	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z2/	T2-1phase, delay for single phase faults		1 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z2/	T2multi-ph, delay for multi phase faults		1 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z3/	Operating mode Z3	Reverse	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z3/	T3 delay		0,3 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z4/	Operating mode Z4	Inactive	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z4/	T4 delay		2,9 s
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z5/	Operating mode Z5	Forward	
Setting/0013 - Distance Zones/Zone Z5/	T5 delay	∞	s

3. Katsete reprodutseerimine

Lühiskatsed mängiti läbi Tallinna Tehnikaülikooli laboris Siemens 7SA611 distantkaitsega, mis ei ole küll täpselt samasugune seade, mida kasutati eelmainitud alajaamas, aga on lihtsalt rohkema funktsionaalsusega. Katsetamise ajaks olid lisafunktsioonid kaitstes välja lülitatud ning kasutati ainult lühiskatse ajal kaitstes töös olnud funktsioonid. Katsete teostamist ning tulemusi teist tüüpi kaitserellee kasutamine ei mõjuta.

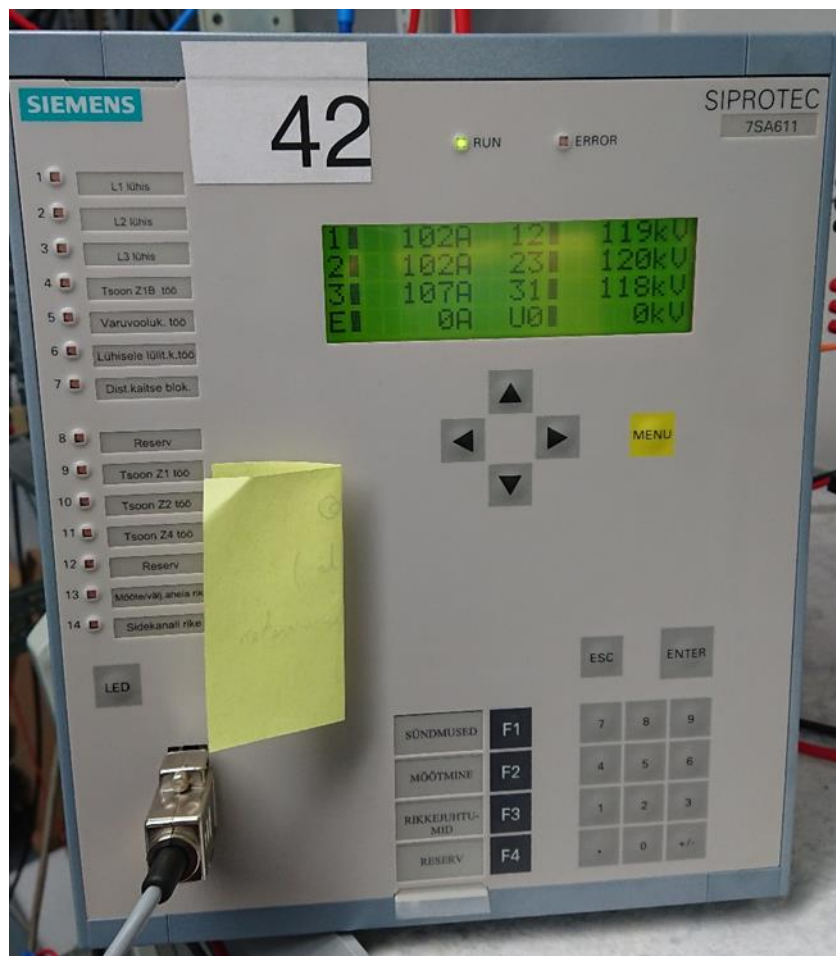
Katsetulemuste reprodutseerimiseks kasutati RTDS reaajasimulaatorit, mille väljundväärtusi võimendati distantkaitse jaoks Omicron CMS 356 võimendiga. RTDS simulaator on seade, millega saab simuleerida reaalseid võrke kaitse- ning juhtimiseadmete testimiseks. Antud aparaat sisaldab kohandatud riistvara ning seda saab juhtida spetsiaalse tarkvara abil nimega RSCAD. RTDS on võimeline andma täpseid tulemusi alalispingel ja kuni kolme kilohertsise sagedusega vahelduvvooluga. Seade suudab simuleerida keerukaid võrke ajasammuga 25 – 50 μ s. Riistvara koosneb modulaarsest raamist, kus igas moodulis on võimas mitmetuumaline protsessor. [9]



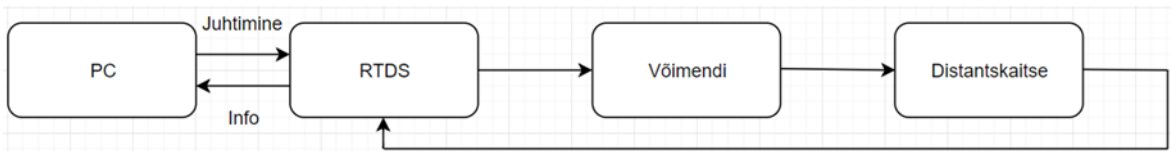
Joonis 3.1 Võrgusimulaator



Joonis 3.2 Omicron võimendi



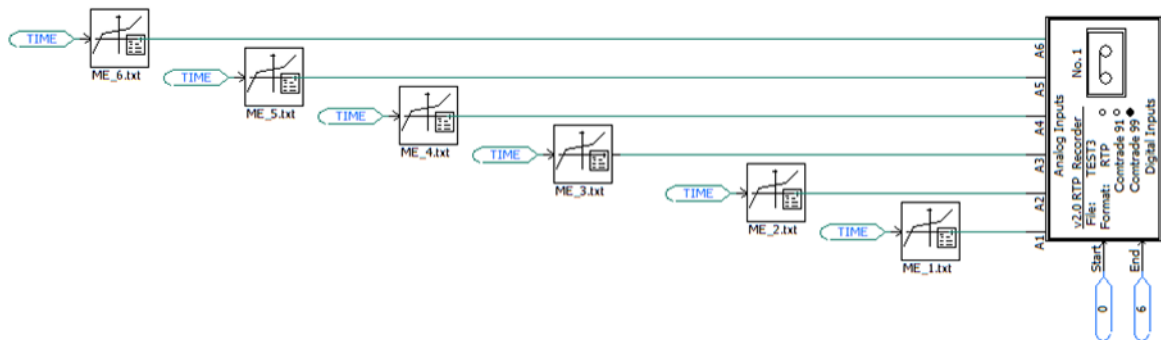
Joonis 3.3 Distsantskaitserelee Siemens 7SA611



Joonis 3.4 Labori katseseadmete ühendusskeem

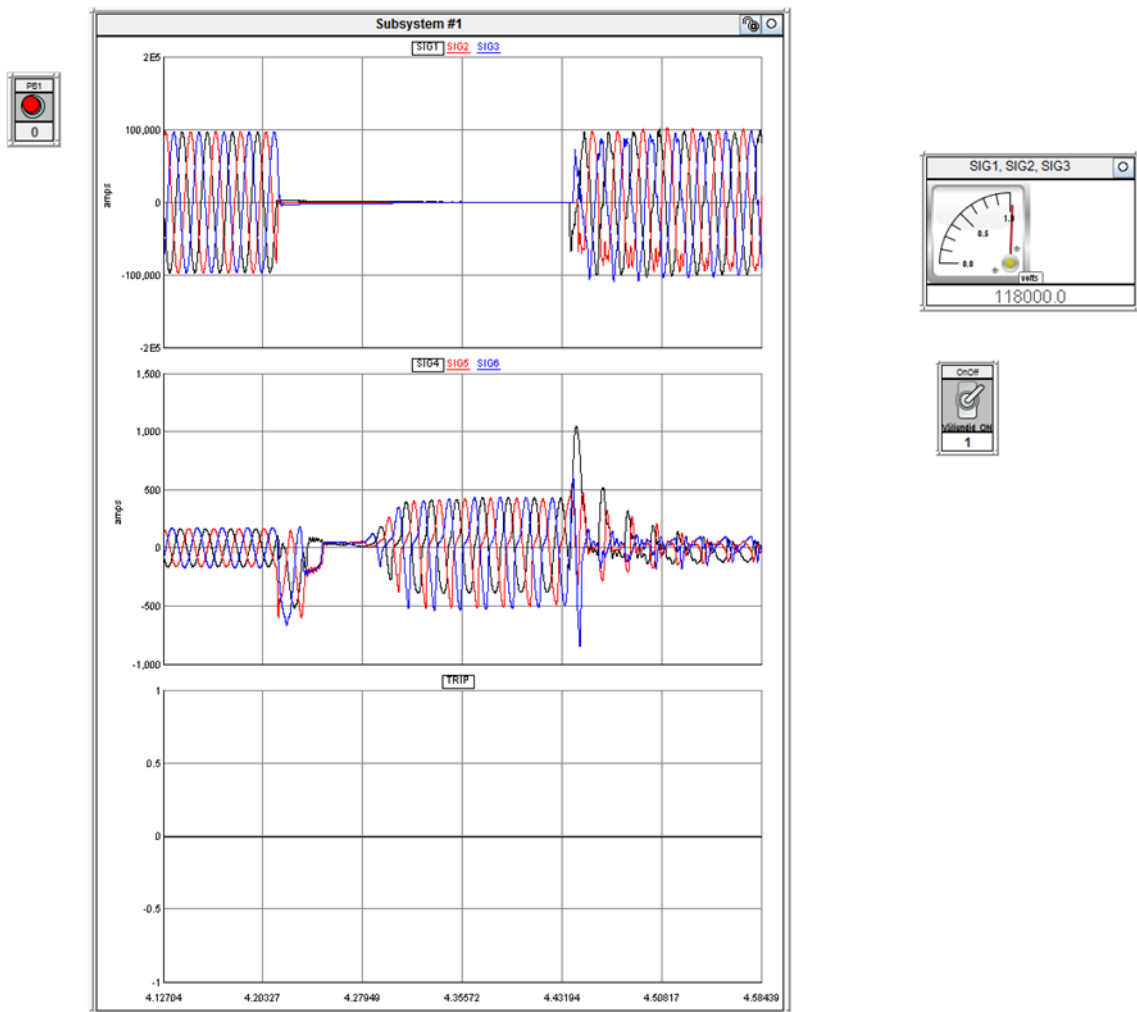
Laboriseadmete omavahelised ühendused on toodud joonisel 3.4. Distantkaitse oli lisaks RTDS-ile ühendatud lauarvutiga sätete määramiseks, mis sisestati käsitsi vastavalt antud sätete failile läbi DIGSI 4 tarkvara.

RSCAD tarkvaras katsete simuleerimiseks oli tarvis muuta etteantud .cfg laiendiga fail .dat-iks, et programm suudaks välja lugeda ja selle alusel simuleerida lühiskatset. Algses .cfg failis olid antud mõõdetud pinged (UL1, UL2, UL3) ja voolud (IL1, IL2, IL3) koos mõõtmisajaga. Proovides kasutada algset faili löi RSCAD ette tõrke, et mõõtmiste ajaintervall on liiga väike, mis aga ei olnud tõsi. Selle lahendamiseks üritati esialgu lähtefaili aja väärtuste vormi muutmist, asendades ühikute vahelised komad punktidega, mis aga kahjuks tulemust ei toonud. Lõpplahendusena tekitati kokku kuus eraldi .txt faili, kus esimeses tulbas oli määratud aeg alates nullist ning teises tulbas mõõdetud suurus (kolm faili voolude ning kolm pingete jaoks). Seejärel kasutades loodud .txt faile programmis PSCAD saadi lõpuks kätte RSCAD-ile sobiv COMTRADE (.cfg) fail, kasutades esimese nimetatud programmi funktsioone.



Joonis 3.5 PSCAD-is loodud skeem COMTRADE faili kättesaamiseks

Joonisel 3.5 blokid ME_1.txt kuni ME_6.txt on eelmainitud tekstifailid, mis sisaldasid endas vastavalt järjekorrale esimese, teise ning kolmanda faasi voolude hetkväärtusi ja ülejäänud kolm olid pingete hetkväärtustega. RTP RECORDER blokile olid tekstifailid sisenditeks ning selle väljundiks oli vajalik COMTRADE fail, mida sai kasutada RSCAD-is võrgu simuleerimiseks. COMTRADE (*Common format for Transient Data Exchange for power systems*) on faililaiend, mis sisaldab endas ostsillograafi ja olukorra andmeid seoses energiasüsteemi transienthäiretega. [10]



Joonis 3.6 RSCAD programmi juhtimisaken

Ülemisel joonisel 3.6 on näha simuleeritavaid voole ja pingeid. Paremal asuv näidik nimega SIG1, SIG2, SIG3 kuvab kolmefaasilise pinge efektiivväärtust ning selle all olev lüliti saadab käsu RTDS-ile simuleerimaks lühise eelset võrguolukorda, mida on näha joonisel ruudustiku esimeses veerus. Vasakul olev punane nupp käivitab lühise, antud juhul õnnestunud lühiskatse voolud ja pinged. RTDS-ilt väljuvad voolude ja pingete väärtused võimendati läbi Omicron võimendi, kust edasi läks ühendus distantskaitsele. Võrreldes RTDS-i voolusid ja pingeid reaalselt mõõdetud väärtustega (joonis 2.3, lk 23) selgub, et nad on identsed.

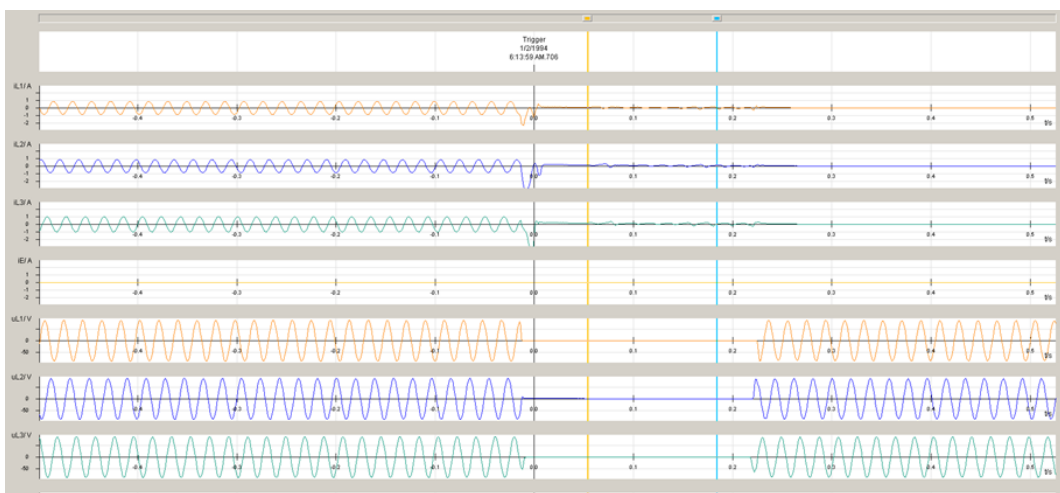
Lühiskatseid sooritati kokku 50 korda – 25 ebaõnnestunud lühiskatse ning 25 õnnestunud lühiskatse mõõteandmetega selgitamiseks välja, kuidas distantskaitse reageerib kummagi lühiskatse korral. Iga lühiskatse järel salvestati distantskaitse mällu jäänud andmed.

4. Katsetulemuste analüüs ja võrdlus

Esimeses alapeatükis analüüsitakse reprodutseeritud lühiskatsete tulemusi ning teises alapeatükis võrreldakse saadud tulemusi sarnasel teemal tehtud teadusartikli tulemuste ning järeldustega.

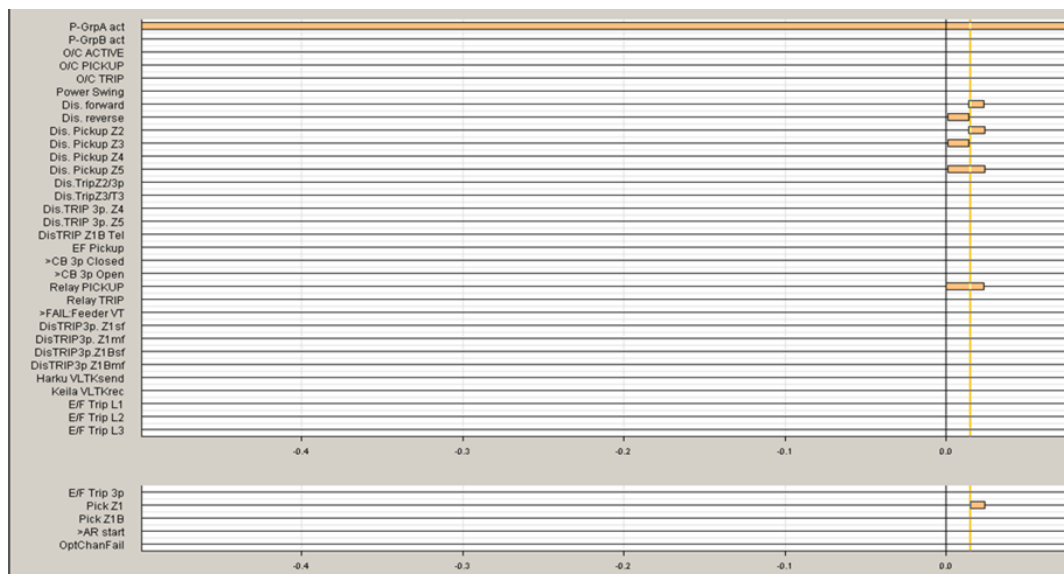
4.1 Kaitse töö analüüs

Distsantskaitse käitumist lühistele analüüsiti SIGRA 4-ga, mis kuulub Siemensi DIGSI 4 distantskaitsete juhtimisprogrammide hulka.



Joonis 4.1 Ebaõnnestunud lühiskatse võrgu parameetrite graafikud

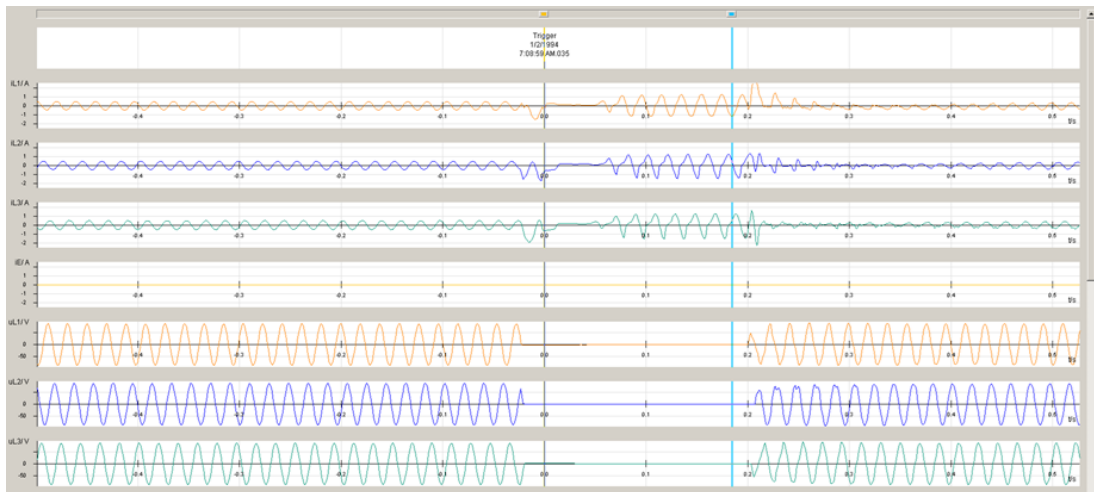
Joonisel 4.1 on volude ja pingete hetkväärtused, mida mõõtis distantskaitse – antud juhul ebaõnnestunud lühiskatse olukorda. Keskel on vertikaalse musta joonega näha hetke, mil kaitse registreeris lühise olukorra ning alumisel joonisel 15 on näha, kuidas kaitse reageeris.



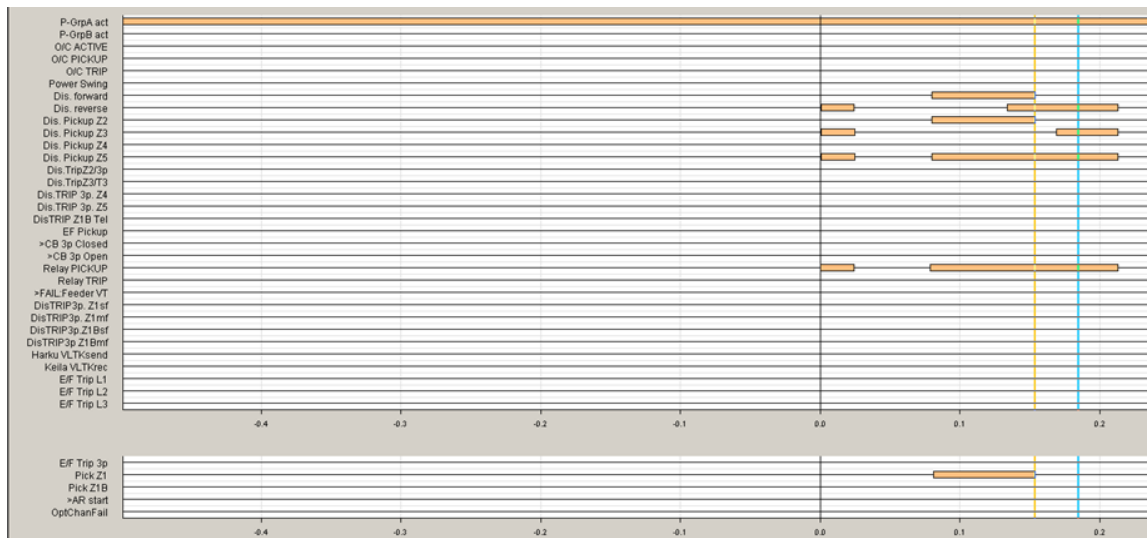
Joonis 4.2 Distsantskaitse poolt registreeritud rikked ebaõnnestunud lühiskatse reprodutseerimisel

Eelmisel joonisel 4.2 (lk 29) on näha, et poole lühise pealt näis distantskaitsele, et lühis asub valel pool (jõutrafo suunal). Kahekümneviie ebaõnnestunud lühiskatse simuleerimisel reageeris distantskaitse sama moodi, ehk iga kord nägi distantskaitse lühist vales suunas.

Alloleval joonisel 4.3 on näha, kuidas distantskaitse reageeris õnnestunud lühiskatse simulatsioonile.



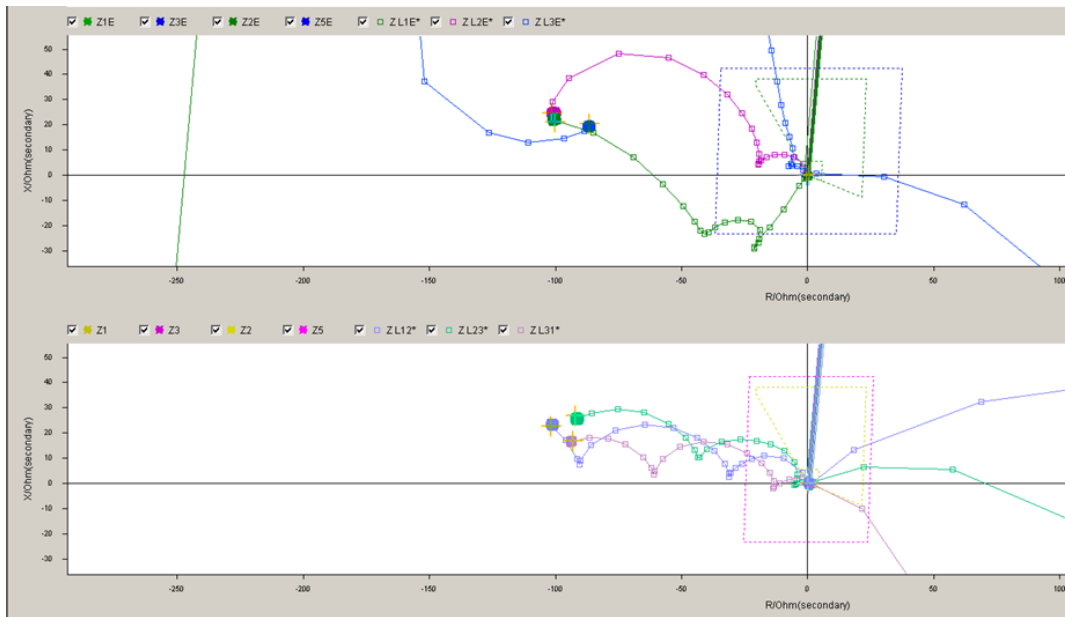
Joonis 4.3 Õnnestunud lühiskatse võrgu parameetrite graafikud



Joonis 4.4 Distantskaitse poolt registreeritud rikked õnnestunud lühiskatse reprodutseerimisel

Ülemisel joonisel 4.4 on näha distantskaitse reaktsiooni õnnestunud lühiskatse simuleerimisel. Nendel kahekümne viiel katsel käitus distantskaitse omapäraselt, registreerides lühise algul ühes (õiges) suunas ning mõne aja pärast jälle teises suunas ning lõpus jälle avastas lühise teises suunas.

Lisaks kaitserelle käitumise piltidele sai SIGRA 4 programmis näha mõõdetud takistuste väärtusi igal ajahetkel. Järgneval lehel joonisel 4.5 on välja toodud ebaõnnestunud ning õnnestunud lühiskatse simuleerimistel mõõdetud takistuste graafikut, mis mõlemal lühiskatsel tuli sama.



Joonis 4.5 Distantkaitse poolt mõõdetud takistuste trajektoorid

Lisaks eelnevalt mainitud kogutud informatsioonile mõõdeti õnnestunud lühiskatse reprodutseerimisel SIGRA 4 programmi abil aega, mil distantkaitse registreeris lühise eest ehk jõutrafo (tuulepargi) suunast. Sinna suunas oli aktiivseks kaitsetsooniks määratud Z3 (tabel 1.1, lk 24). Kahekümne viiest katses oli Z3 kaitsetsoon rakendunud keskmiselt 74,12 ms – kõige lühemalt 72 ms ning kõige pikemalt 81 ms. Siit koorubki välja põhjus, miks esimesel lühiskatsel lülitati tuulepark välja ning teisel korral mitte - halbade asjaolude kokkulangemisel mõõtis kaitse seljatagasu suuna asemel lühist eespool välja 100 ms ja kaitse rakendus, aga teisel lühiskatsel oli viidet pikendatud 200 ms-ini ning seega kaitse ei rakendunud. Kuna katsete reprodutseerimisel ei ületanud Z3 rakendumisaeg viidet, ei lülitatud tuuleparki välja.

4.2 Võrdlus teadusartikliga

Tulemuste võrdluseks võib esile tuua teadusartikli [11] „*Behavior of Distance Protections near Wind Farms*“, milles samuti analüüsitakse distantkaitse käitumist tuulepargi lähedal lühiskatse ajal. Sarnaselt antud töö katsetega, produtseeriti lühiskatseid tarkvara abil – PSS/E. Vaatluse all olid Portugalis enim levinud tuulegeneraatorite tüübid, nende mõju elektrilisele sagedusele ning taasliitumisel võrguga peale pingelangu ja distantkaitse käitumist võimsuste kõikumistel. Kaitserielee sätted lühiskatsete ajal on välja toodud allolevas tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Teadusartiklis kajastatud distantkaitse sätted

Kaitsetsoon	Suund	Ulatus, %	Viide, ms
Z1	Edasi	90%	<40
Z2	Edasi	>100%	200-500
Z3	Edasi	>>100%	1000

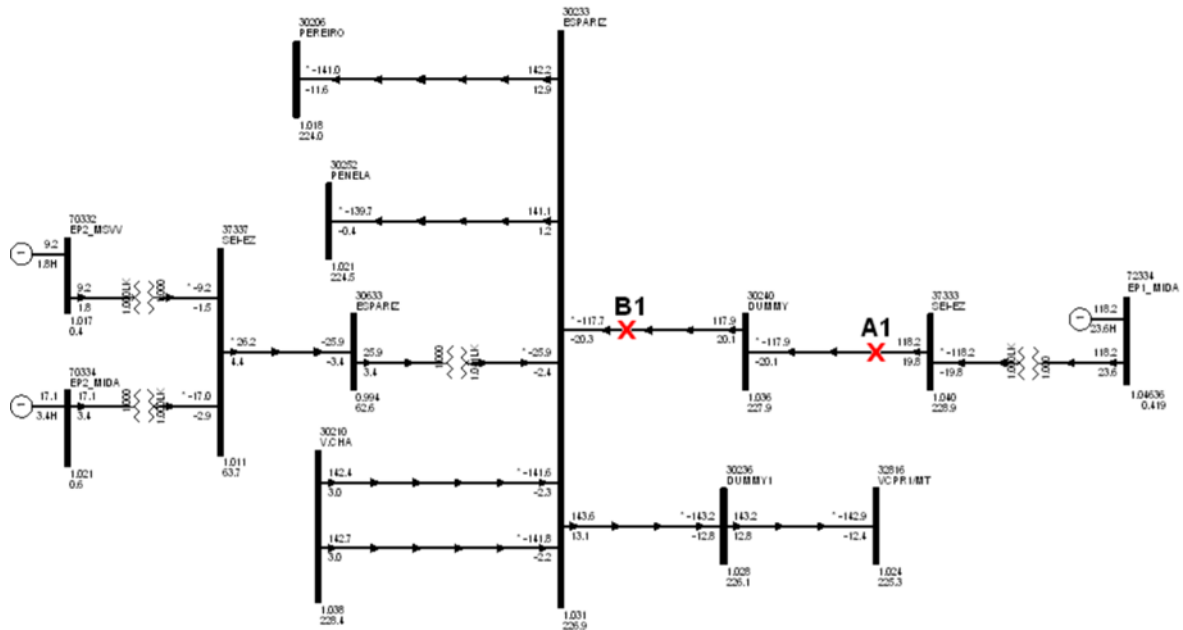
Elektromehaanilise muundamise alusel jaotatakse tuulegeneraatorid kaheks:

- *Double Fed Induction Generator (DFIG)* – sellist tüüpi tuulegeneraatoril on rootor ühendatud generaatoriga läbi käigukasti, mis muudab labadega ühendatud rootori ja generaatori pöörlemiskiiruste suhet vastavalt generaatori pöörlemiskiirusele. Generaatori staator ehk paigalseisev osa on ühendatud elektrivõrku läbi AC/DC/AC konverteri ja pinget tõstva jõutrafo.
- *Variable Speed Synchronous Generator (VSSG)* – seda tüüpi tuulegeneraatoril puudub rootori ja generaatori vaheline käigukast, mis tähendab seda, et generaatori pöörlemiskiirus on sama mis tuulikul. Nõutav elektriline sagedus saavutatakse AC/DC/AC konvertersüsteemi abil. Sarnaselt esimesele tüübile on antud variandil samuti pinget tõstev jõutrafo, mille kaudu ühendatakse tuulegeneraator võrku.

Artiklis [11] on veel välja toodud, et mõlemad ülalmainitud tüübid on väga tundlikud pingelangudele, mis tekitavad liigvoole ja liigpingeid, võimalikult hävitades konverterite elektrilised komponendid. Moodsad *DFIG* ning *VSSG* suudavad pingelangud üle elada ülejäänud võrgust lahti ühendamata, aga kumbki reageerib nimetatud nähtuse tekkele omamoodi:

- *DFIG* hakkab rikke ajal elektrivõrku reaktiivvõimsust tootma, aga juhul kui pinge langeb alla 0,1 pu ühendatakse tuulegeneraator ülejäänud võrgust lahti.
- *VSSG* tüüpi tuulegeneraatoril on rikketalitlusel töötamiseks kolm režiimi:
 - 1) Null-võimsus režiim (*Zero Power Mode; ZPM*) – pingelangu esinemisel lõpetab tuulegeneraator aktiiv- ja reaktiivvõimsuse edastamise võrku seni kuni pinge tõuseb tagasi üle kindla väärtuse, mis hetkest saati taastatakse normaaltalitlus ja jätkatakse võimsuse edastamist.
 - 2) Aktiivvõimsuse režiim (*Active Power Mode; APM*) – alapinge ajal tuulegeneraator edastab ainult aktiivvoolu.
 - 3) Voolunurga režiim (*Current Angle Mode; CAM*) – alapinge ajal tuulegeneraator edastab voolu koos seadistatava pinge argumendiga.

Töörežiimid *APM* ning *CAM* on rakendatavad ainult juhul kui pinge generaatori klemmidel on suurem kui 0,1 pu. Vastasel juhul saab generaator töötada ainult *ZPM* režiimis. Kõik tuulegeneraatori tüübid on kaitstud alapinge eest, mis ühendab generaatorid lahti ülejäänud võrgust juhul kui pinge langeb alla 0,8 pu.

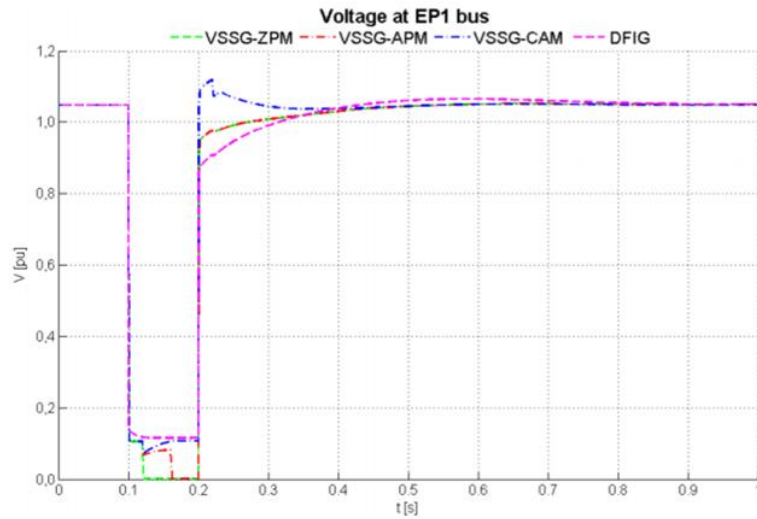


Joonis 4.6 Simuleeritud võrgu skeem [11]

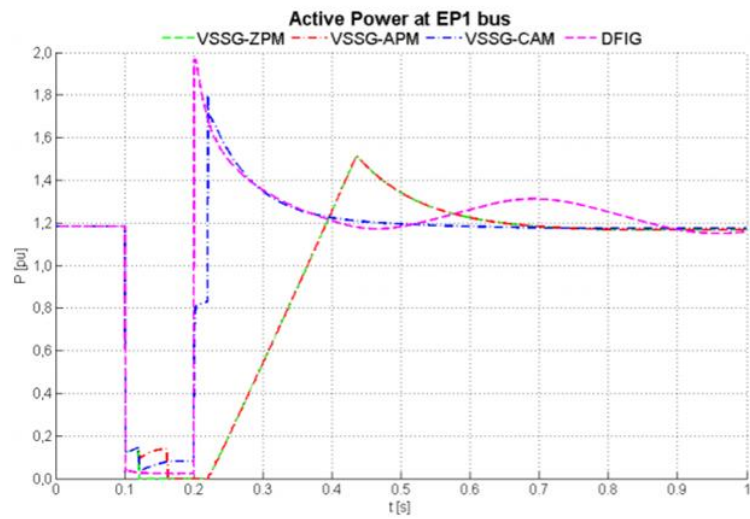
Joonisel 4.6 on näidatud simuleeritud võrgu skeem. Lühis tekitati Pereiro [30206] – Espariz [30233] vahelisel latil kasutades igat eelmainitud tuulegeneraatori tüüpi. Kaitseseadmeteks on kaks distantskaitset SEI-EZ – Espariz liinil, millest esimene kaitseb võrku otsesuunaliste lühisvoolude eest ning teine, mis asub Esparizi lati juures, kaitseb võrku vastusuunaliste lühiste eest. Allolevatel graafikutel (joonis 4.7, lk 34) on näha simuleeritud pingete, aktiiv- ning reaktiivvõimsuste väärtusi. Lühis tekitati ajahetkel $t = 100$ ms ning ajahetkel $t = 200$ ms eemaldati rike distantskaitse rakendumisega.

Tuulegeneraatorite käitumine lühise ajal (joonis 4.7, lk 34):

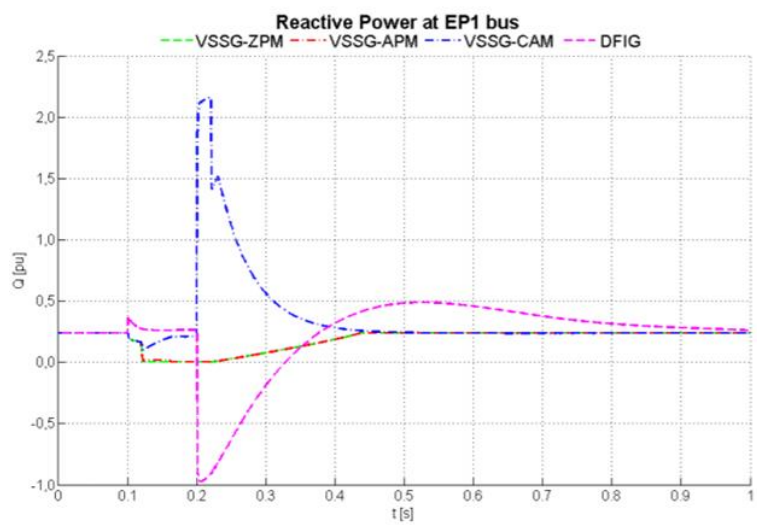
- DFIG tuulepark asukohas EP1, latil [72334] – kuna pinge on suurem kui 0,1 pu, püsib tuulepark elektrivõrguga ühendatud. Edastatav aktiivvõimsus on praktiliselt olematu, aga reaktiivvõimsuse tootmine võrku 20 ms jooksul lühise ajal on suurem kui enne lühist.
- VSSG tuulepark ZPM režiimil asukohas EP1, latil [72334] – juhtimissüsteemil on pinge mõõtmisel 20 ms viide ning mõõdetud pinge väärtus latil EP1 on null generaatori ja võrgu vahelise inverteri tõttu. Lühise lõppemisel taastus näivvõimsuse edastus.
- VSSG tuulepark CAM režiimil asukohas EP1, latil [72334] – nimetatud rikketalitlusel edastatav reaktiivvõimsuse eesmärgiks on pinge alanemise takistamine, et tuulepark ei peaks lülituma ümber ZPM režiimi.



(a)

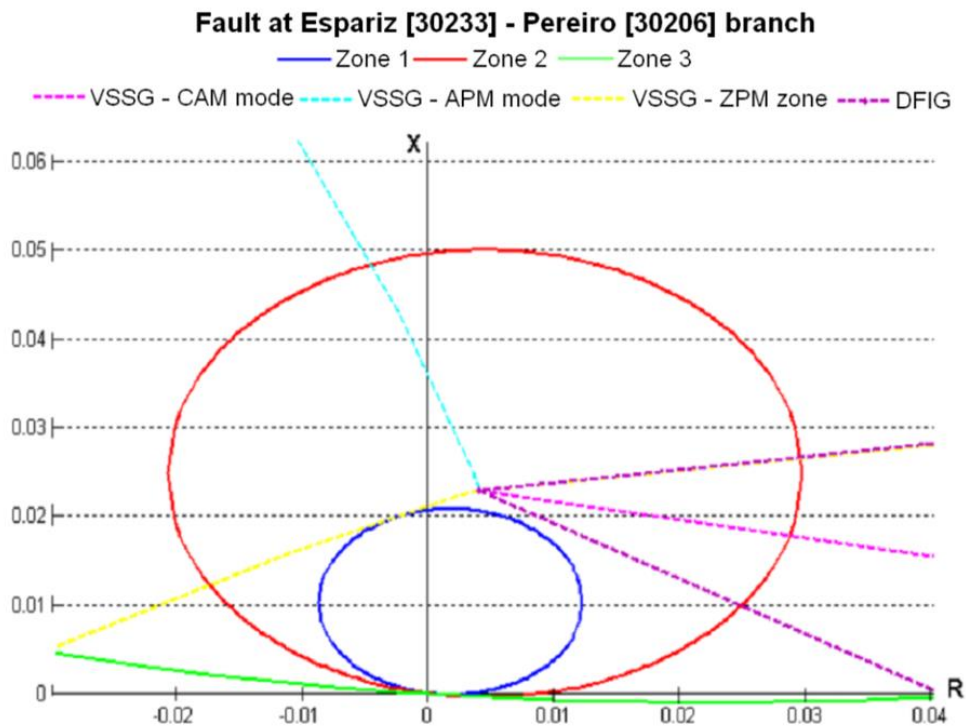


(b)



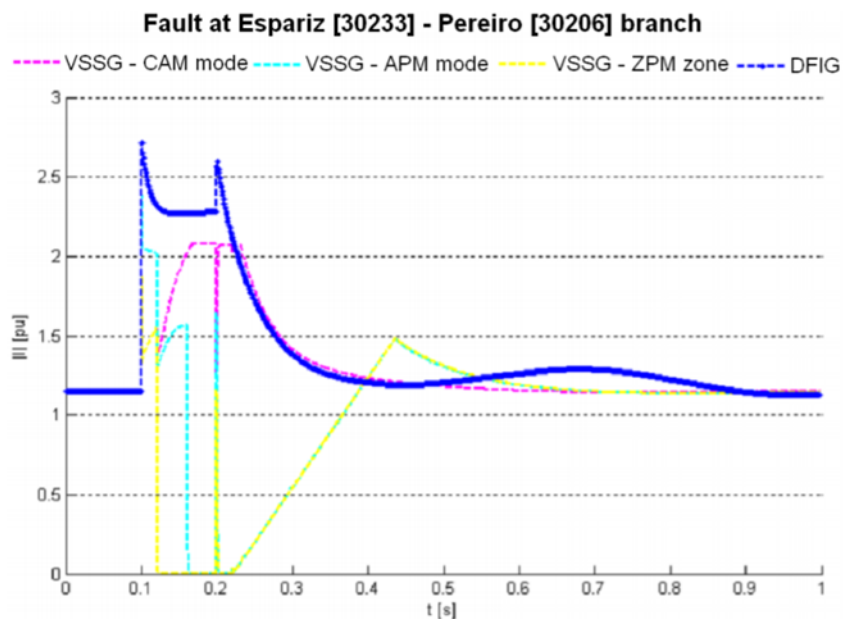
(c)

Joonis 4.7 Simuleeritud tuuleparkide pingete ja võimsuste graafikud [11]



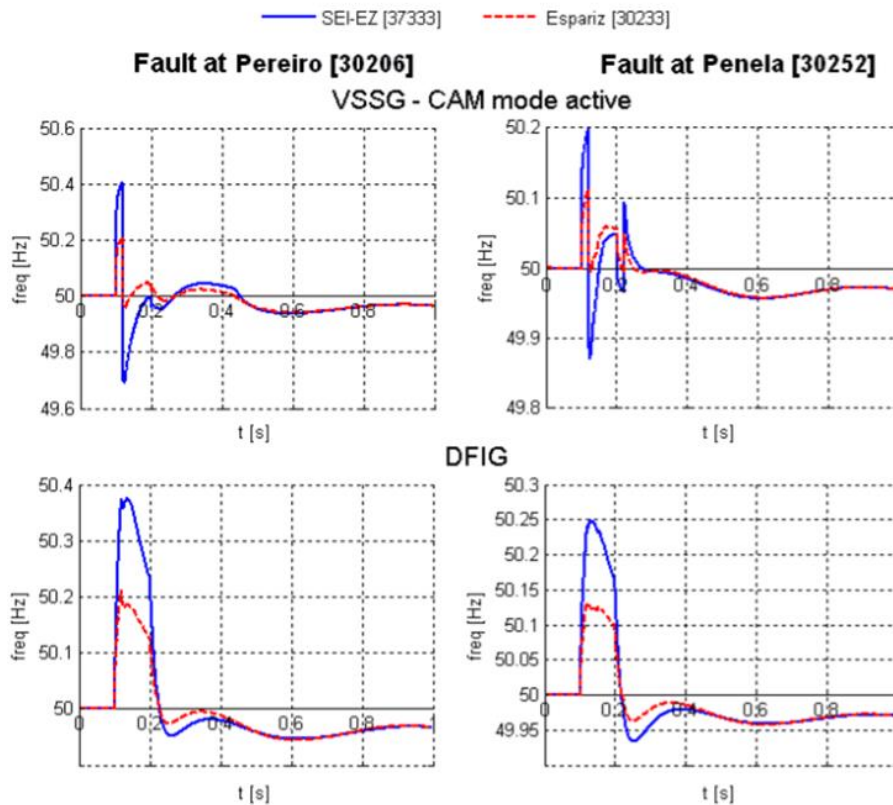
Joonis 4.8 Kaitsetsoonid ja mõõdetud tuuleparkide takistused [11]

Joonisel 4.8 on näha komplekstakistuse koordinaatteljestikul sinise, punase ja rohelisega vastavalt esimest, teist ning kolmandat kaitsetsooni ning punktiirjoontega on märgitud erinevate tuuleparkide takistusi. Lisaks on jooniselt näha, et distantskaitse registreerivad lühise asukohas EP1 latil ning rakenduvad ettearvatud tsoonides sõltumata tuulepargi tüübist. Ainukeseks erinevuseks on välja toodud asjaolu, et distantskaitse mõõdab takistusi erinevatel tuuleparkidel erinevalt peale lühise lõppemist.



Joonis 4.9 Tuuleparkide voolude absoluutväärtused baassuurustena [11]

Joonisel 4.9 (lk 35) on näha erinevate tuuleparkide voolude absoluutbaasväärtusi baassuurustena. Artiklis on märgitud, et mõõdetud voolud ZPM ja APM režiimidel opereerivatel tuuleparkidel kukub alla määratud miinimumi 0,8 pu, sundides distantskaitseid välja lülituma. Lisaks eelnevale on välja toodud, et rikke korral tuvastati elektrivõrgus sageduse kõikumist, mis on tingitud generaatorite erinevate pöörlemiskiiruste tõttu (joonis 4.10).



Joonis 4.10 Erinevate tuuleparkide sageduste graafikud [11]

Samuti on artiklis kirjutatud joonise 4.10 alusel, et DFIG tüüpi tuulepargid tekitavad suurimaid sageduse kõikumisi rikke ajal. Sageduse mõju takistusele on suurem kui VSSG generaatorid on ühendatud EP1 latile, aga kui samale latile oleks ühendatud DFIG tuulepark, oleks sageduse mõju takistusele triviaalne – mõõdetud takistus erineks ühe protsendi võrra.

Teadusartikli kokkuvõttes tähtsamad järeldused:

- Generaatori tüüp määrab ainult distantskaitse poolt mõõdetud takistuse trajektoori
- Sageduse kõikumised ei mõjuta arvestatavalt distantskaitse toimimist.
- Distantskaitse rakendub soovimatult võrgus esinevatele võimsuste kõikumistele, mis seade tunnistab ebanormaalsseteks.
- Distantskaitse töötamist ei häirinud tuuleparkide käitumine lühise esinemisel.

Tuginedes ülaltoodud järeldustele saab öelda, et väljapakutud ajalise viite lisamine on ainuke lahendus.

KOKKUVÕTE

Töö eesmärgiks oli tuulepargi vastuvõtulühiskatsel distantskaitse valesti käitumise analüüs. Lähteandmed saadi Tallinna Tehnikaülikoolist ning juhendajalt. Kaitserelee valesti käitumise uurimiseks reprodutseeriti lühiskatsed Tallinna Tehnikaülikooli laboris kasutades sealolevat reaalaajavõrgusimulaatorit RTDS, mida juhiti tarkvaraga RSCAD. RTDS-i väljundpinged ja -voolud võimendati Omicron CMS356 seadmega, kust edasi jõudsid võrgu parameetrid reaalsele distantskaitsele Siemens 7SA611. Kaitserelee ja arvuti vahelise ühenduse kaudu saadi kätte distantskaitse poolt mõõdetud väärtuste ning käitumise andmed. Kokku sooritati 50 katset samade relee sätetega – 25 ebaõnnestunud ning 25 õnnestunud lühiskatse andmetega leidmaks erinevusi distantskaitse käitumisel mõlemate olukordadega.

Katsetulemuste analüüsist selgus, et lühise ajal muutsid voolud suunda, mida saab selgitada tuulepargis olevate konverterite reageerimisega lühisele. Selline nähtus on põhjus, miks lühise ajal registreeris distantskaitse lühise vastassuunas, lülitades selle tõttu välja tuulepargi. Juhendajalt saadud informatsiooni kohaselt lisati pärast ebaõnnestunud vastuvõtulühiskatset kaitsereleel vastassuunalisele kaitsetsoonile 100 ms pikkune rakendumisviide. Uurimaks, kas selline viiteaeg konkreetse tuulepargi jaoks ka pädeb mõõdeti õnnestunud katsete reprodutseerimistel distantskaitse poolt vastassuunas asuva lühise kestvus – keskmiseks saadi 74,12 ms ning pikimaks 81 ms. Saamaks kinnitust, et viite lisamine on ainuke lahendus, uuriti sarnasel teemal tehtud teadusartiklit, kus samuti simuleeriti lühiseid reaalse võrgu alusel erinevat tüüpi tuuleparkidega. Artikli järel dustes oli kirjas, et kuigi tuulepargid reageerivad lühisele veidi erinevalt kui traditsioonilised generaatorid, siis erinevused ei ole piisavad, et distantskaitset oleks tarvis erilist moodi seadistada. Tekstis ei mainitud konverterite poolt voolu suundade muutmist lühise ajal kuid käesoleva töö ainukesele pakutud lahendusele annab tuge teadusartiklis toodud järeldused, et muutuvad sagedused ja muud parameetrid, mida antud töös vaatluse alla ei võetud, ei mõjuta distantskaitse käitumist.

Kokkuvõtteks saab öelda, et konkreetse tuulepargi õigesti kaitsmiseks lühiste eest on ainus võimalus distantskaitsele vastassuunalise kaitsetsoonile ajalise viite lisamine, mis kompenseeriks konverterite poolt voolude suundade muutused lühise ajal.

SUMMARY

The aim of this paper was to analyze the incorrect behavior of the distance protection installed in the wind park during short circuit acceptance test. Source data was received from Tallinn University of Technology (TALTECH) and the supervisor. To study the incorrect behavior of the distance protection short circuit tests were reproduced in a laboratory of TALTECH using a real time electrical grid simulator RTDS, which was operated with RSCAD software. RTDS output voltages and currents were amplified with Omicron CMS356, from which the electrical grid parameters were given to a physical distance protection Siemens 7SA611. Measured data and behavior from the distance protection was received by a connection between the device itself and a personal computer. 50 tests in total were conducted with the same relay settings to find differences in the behavior of the distance protection in both situations – 25 with unsuccessful and 25 with successful short circuit test parameters.

Analysis of the conducted test data revealed that the current changed direction during fault which can be explained by the reaction of converters in the wind park to short circuits. This phenomenon is the reason why the distance protection registered a fault in the opposite direction during the short circuit acceptance test and disconnected the wind park from the grid. Based on the information given by the supervisor a 100-millisecond time delay was added to the reverse protection zone after the failed acceptance test. To find out if the added time delay is enough to avoid unnecessary disconnections in the future the registered reverse fault durations were measured from the short circuit tests reproduced with the successful acceptance test parameters. It was calculated that the average registered reverse fault was 74,12-milliseconds and the longest 81-milliseconds. To ensure that an added time delay is the only solution a paper on a similar topic was studied. The studied paper concluded that although wind parks react to short circuits a bit differently than traditional generators, the difference is not enough to validate separate protection settings. Although the paper doesn't mention converters changing the directions of currents all the other conclusions support the only offered solution since other factors like variable frequencies do not interfere with the operation of the distance protection.

In conclusion the only solution for the short circuit protection of the specific wind park is an added time delay to the reverse protection zone to compensate the changes of current direction by converters.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ kirjastus, 2007.
- [2] V. Valitsus, „Riigi Teataja,“ 26 06 2003. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/121022019003>. [Kasutatud 23 05 2019].
- [3] MBizon, „Electrical grid,“ 07 03 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_grid#/media/File:Electricity_Grid_Schematic_English.svg. [Kasutatud 23 05 2019].
- [4] G. Ziegler, Numerical Distance Protection, Erlangen: Publicis Publishing, 2011.
- [5] M. Tealane, „Automaatika ja releekaitse loeng 6,“ Tallinn, 2019.
- [6] Siemens, „Distance Protection 7SA6 V4.0 Manual“.
- [7] T. Tehnikaülikool, „Ebaõnnestunud lühiskatse aruanne (sisedokument),“ 2015.
- [8] T. Tehnikaülikool, „Õnnestunud lühiskatse aruanne (sisedokument),“ 2015.
- [9] „RTDS,“ RTDS Technologies Inc., 2019. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.rtds.com/real-time-power-system-simulation/>. [Kasutatud 23 05 2019].
- [10] J. Gosalia ja D. Tierney, „Doble,“ 2002. [Võrgumaterjal]. Saadaval: http://sistemaselectricos.com/cpe_box/comtrade.htm. [Kasutatud 23 05 2019].
- [11] R. Isabel ja A. Lúcio, „Behavior of Distance Protections near Wind Farms,“ 2012. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://pdfs.semanticscholar.org/b34e/420a55247cf83b1c6139a8ca463cf5c87e50.pdf>. [Kasutatud 23 05 2019].