



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Eesti kõrg- ja keskpinge võrkudes kasutusel olevate releekaitse sätete arvutamine

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli juhataja Prof. H. Tammoja

Juhendaja Prof. H. Tammoja

Lõpetaja T. Tammeorg

Tallinn 2015

Autori deklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Taavi Tammeorg	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> EESTI KÕRG- JA KESKPINGEVÕRKUDES KASUTUSEL OLEVATE RELEEKAITSE SÄTETE ARVUTAMINE	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2015	57 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Energeetikateaduskond <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika instituut <i>Õppetool:</i> Energiasüsteemide õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> Heiki Tammoja	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva töö eesmärgiks on Eesti kõrg- ja keskpinge võrkudes kasutusel olevate releekaitse sätete arvutamise meetodika uurimine. Lõputöö kirjeldab esmalt elektrisüsteemi talitlust normaal- ning avariolukorras. Seejärel on kirjeldatud releekaitse olemust ning põhilisi omadusi. Välja on toodud ka tähtsamad kaitstavad elemendid võrgus ning nendega seotud kaitsed.</p> <p>Töö põhiosa kirjeldab enim kasutatud kaitsete sätete arvutamise meetodikat. Lisaks on selgitatud, mis tüüpi kaitsetega on tegu ning kus on nende põhiline kasutusala. Suurt rõhku on pandud ülesannetele ning joonistele, et oleks võimalik teoreetilist osa paremini jälgida.</p>	
<i>Märksõnad:</i> releekaitse, sätete arvutamine, liigvoolukaitse, distantskaitse, diferentsiaalkaitse, selektiivsus	

Summary of the diploma work

<i>Author:</i> Taavi Tammeorg	<i>Kind of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> RELAY PROTECTION SETTINGS CALCULATIONS USED IN ESTONIAN HIGH AND MEDIUM VOLTAGE GRID	
<i>Date:</i> 27.05.2015	<i>57 pages</i>
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> Chair of Power Systems	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Heiki Tammoja	
<i>Abstract:</i> The aim of this thesis is the study of relay protection settings calculation methods in Estonian high and medium voltage grid. Firstly the thesis describes the normal and abnormal conditions of the electrical grid. After that the principles and main parameters of relay protection are discussed. Also the most important elements of the grid and the ways of protecting these elements are described in the thesis. The main part of the thesis describes the method of calculating the most frequently used relay protection settings. In addition to that the thesis describes the types of protection and their main field of use. The main focus is on the diagrams and examples of calculating the relay settings in order to follow the theoretical part more easily.	
<i>Key words:</i> relay protection, settings calculations, overcurrent protection, differential protection, distance protection, selectivity	

Sisukord

Lõputöö ülesanne	6
Teema põhjendus:	6
Töö eesmärk:.....	6
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:.....	6
Lähteandmed:.....	7
Lõputöö konsultandid (vajadusel):.....	7
Eessõna	8
Sissejuhatus	9
1. Elektrisüsteemi anormaaltalitus ning ennetus	11
2. Elektrisüsteemi talitluse reguleerimine ja juhtimine	13
3. Releekaitse mõiste	15
3.1. Releekaitse toimimispõhimõtted.....	15
3.2. Selektiivsus	17
3.3. Töökindlus	18
4. Kaitstavad objektid	20
4.1. Ülekandeliinid.....	20
4.2. Trafod.....	21
4.3. Latid.....	21
5. Liigvoolukaitse	23
5.1. Sätete arvutamine	24
5.1.1. Tundlikkus	25
5.1.2. Töökiirus	25
5.1.3. Selektiivsus	26
5.1.4. Voolulõige	27
5.1.5. Maksimaalvoolukaitse.....	27
5.2. Näidisülesanne 1	29
5.3. Näidisülesanne 2	32
5.4. Näidisülesanne 3	34
6. Distantkaitse	37
6.1. Rakenduskarakteristik.....	38
6.2. Sätete määramine	40
6.3. Näidisülesanne 1	41
6.1. Näidisülesanne 2	42
7. Diferentsiaalkaitse	44
7.1. Klassifikatsioon.....	45
7.2. Trafo diferentsiaalkaitse.....	45
7.2.1. Voolutrafode valik ja ühendusviis	46
7.3. Generaatori diferentsiaalkaitse.....	47
7.4. Liinide diferentsiaalkaitse	47
7.5. Lattide diferentsiaalkaitse	47
7.6. Näidisülesanne 1	48
7.7. Näidisülesanne 2	49
Lõputöö kokkuvõte	53

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Eesti kõrg- ja keskpingevõrkudes kasutusel olevate releekaitse sätete arvutamine
Üliõpilane:	Taavi Tammeorg, 132711
Lõputöö juhendaja:	Heiki Tammoja
Õppetool:	Energiasüsteemid
Õppetooli juhataja:	Heiki Tammoja
Lõputöö esitamise tähtaeg:	27.05.2015

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Releekaitse olulisus tänapäeva kõrg- ja keskpingevõrkudes on äärmiselt suur. Vajadus efektiivsele kaitsesüsteemile on nii tarbija, kui ka võrguettevõtja poolne. Tarbijale tähendab see väiksemaid toitekatkestusi ehk stabiilsemat teenust. Võrguettevõtjale on releekaitse olulisem lisaks võrguelementide kaitsmiseks ning süsteemi parameetrite lugemiseks ning edastamiseks juhtimiskeskustesse.

Antud töö põhjal on võimalik saada teadmisi Eestis kasutusel olevatest põhikaitsetest kõrg- ja keskpingsesüsteemides. Töös on näited põhikaitsete kohta, mis annavad selgema ülevaate ning arusaama kuidas teoreetiliselt leitakse releekaitse sätteid.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida Eesti kõrg- ja keskpingevõrkudes kasutusel olevate releekaitse sätete arvutamise metoodikat.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Milline on elektrisüsteemi anormaalitalitus?
- Milline on releekaitse olemus?
- Liigvoolukaitse funktsionaalsus ning arvutamine.
- Distantkaitse funktsionaalsus ning arvutamine.
- Diferentsiaalkaitse funktsionaalsus ning arvutamine.

Lähteandmed:

Olulisemad lähteandmed põhinevad vastavat teemat käsitlevatest raamatutest ning metoodikat käsitlevatest juhenditest ja konspektidest. Ülesannete koostamisel kasutatud lähteandmed pärinevad osaliselt kõrg- ja keskpingevõrkudes kasutusel olevate releekaitse sätete arvutamise projektidest ning osaliselt vastavat temaatikat kajastavatest õpikutest. Lisaks on kasutatud ka autori bakalaureusetöö teoreetilist sissejuhatust antud teemasse.

Lõputöö konsultandid (vajadusel):

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Konsultant nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Lõputöö teema valikul oli suur roll autori enda huvil ning autori üsna tihe eelnev seotus antud teemaga ning töös on kasutatud ka autori bakalaureusetöö teoreetilist põhja. Algse idee valikul ning edasi arendamisel oli abiks Heiki Tammoja Tallinna Tehnikaülikooli Elektroenergeetika Instituudist.

Lõputöö põhiliseks teoreetiliseks aluseks on Heiki Tammoja koostatud releekaitse loengukonspekt.

Põhiliste algandmete kogumise ning ülesannete koostamiseks vajalike andmete jagamise eest soovib autor tänada Elektrilevi OÜ automaatikut Eerik Ennemuisti. Lisaks soovib autor tänada abistava info eest Elering AS-i elektrisüsteemi spetsialisti Rain Maripuud. Samuti soovib autor tänada juhendajat Heiki Tammoja praktiliste nõuannete eest.

Taavi Tammeorg

Olevi 11/1-2, Tallinn, 10920

taavi_tammeorg@hotmail.com

Sissejuhatus

Selleks, et arendada efektiivne releekaitse süsteem on vaja inseneridel luua selge ülevaade süsteemi parameetritest normaaltalitluse olukorras, kui ka anormaaltalitluse olukorras. Lisaks on vajalik teada võimalikke füüsikalisi piiranguid, mis võivad esineda releekaitse sätete määramisel.

Kõrg- ja keskpinge võrkudes aset leidvate rikete minimeerimiseks on laialt kasutusel releekaitse. Releekaitse on vajalik võrgus leiduvate rikete osaliseks ennetamiseks ning kahjude minimeerimiseks. Releekaitse eesmärgiks on rikkega kaitseobjekt või kaitstav võrgu osa välja lülitada ning säilitada võrgu normaaltalitus. Lõputöö eesmärgiks on kirjeldada kõrg- ning keskpingevõrgus kasutatavate kaitsete tööpõhimõtteid ning kaitsete sättearvutuste meetodikat.

Selleks, et oleks võimalik teostada süsteemis efektiivne releekaitse on vajalik täpne ülevaade elektrisüsteemi karakteristikutest ning komponentidest. Süsteemi lähteandmed normaalingimustel ja rikkeolukorras on vajalikud arvutamaks kaitsete sätteid ning võimaldavad luua vastavalt süsteemi eripärale võimalikult efektiivse releekaitse süsteemi [1].

Lõputöö esimene osa kirjeldab süsteemi anormaaltalitlust ning põhilisi rikketüüpe ja releekaitse tööpõhimõtet süsteemi elementide kaitseks. Eesmärgiks on tuua välja olulisemad releekaitse omadused, mis määravad ära kaitse efektiivsuse. Uuritavateks kaitseobjektideks on võetud:

- Ülekandeliinid
- Trafod
- Alajaamade latid

Kaitseobjektide puhul kirjeldatakse töös nende põhikarakteristikuid või põhiparameetreid. Lisaks on toodud iga seadme või objekti põhilised rikke põhjused või põhjustajad. Samuti on kirjeldatud millised on kõige tüüpilisemad kaitsed, mida konkreetsete kaitseobjektide puhul tuleks kasutusele võtta.

Sellele järgnevalt on lõputöö keskendunud kitsendusega kõige olulisematele ja tihedamini kasutatavatele kaitsetele:

- Liigvoolukaitsed (Maksimaalvoolukaitse ja voolulõige)
- Distantkaitse
- Diferentsiaalkaitse

Liigvoolukaitse on kõige enam kasutusel olev kaitse elektrisüsteemis ning töös on põhjalikult kirjeldatud kaitse tunnussuursi ning tüüpilisi kasutuskohti. Liigvoolukaitsete sätete arvutamise põhiliseks aluseks on Elektrilevis väljatöötatud vastav praktiline juhend, mis kirjeldab sätete arvutamise metoodikat põhjalikult.

Distantskaitse puhul on töös kirjeldatud tunnussuursi ning põhilisi kasutuskohti. Samuti on ülevaade kaitse rakenduskarakteristikust ning sätete arvutamise metoodikast. Sätete arvutamise info põhineb nii releekaitse konseptist, kui ka Elering AS-ist pärineva põhjal.

Diferentsiaalkaitse teoreetiline ja praktiline pool põhineb välismaisel kirjandusel, kuid annab üsna hea pildi kus ning miks antud kaitset kasutada. Antud punktis on kirjeldatud erinevaid diferentsiaalkaitse tüüpe ning kohti, kus oleks praktiline neid kasutada. Lisaks on kirjeldatud mõõtetrafode ühendusviise ning mida tuleks erinevate ühenduste korral arvestada.

Töös kasutatud jooniste tegemiseks on kasutatud vabavarana kasutusel olevat joonestusprogrammi DraftSight 2015.

1. Elektrisüsteemi anormaalitalitus ning ennetus

Elektrisüsteemi töö plaanimise ja juhtimise objektiks on elektrisüsteemi talitus. Talitluse all mõistetakse ajas kulgevat protsessi – süsteemi seisundite ajalist järgnevust. Talitlust iseloomustavad seisundiparameetrid: pinge, pingevektorite nurgad, voolud, võimsusvood, koormused, genereeritavad võimsused jm. Need parameetrid muutuvad süsteemi üleminekul ühest seisundist teise. Püsitalitluses muutuvad seisundiparameetrid suhteliselt väikestes piirides ja küllaltki aeglaselt. Püsitalitlusse kuuluvad normaal-, kriitilised ja avariijärgsed talitlused. Siirdetalitlusi iseloomustab parameetrite kiire muutumine suurtes piirides. Siirdetalitlustest pakuvad praktilist huvi avariitalitlused, mille kestus on suhteliselt lühike [2].

Elektrisüsteem peab olema töökindel, säilitama sünkroonse töö ka mitmesuguste talitlushäiringute olukorras. Elektrisüsteemi struktuur ja käit peavad tagama, et ka kõige ebasoodsamate talitlushäiringute tagajärjel ei tekiks süsteemis juhitamatut, laienevat elektrikatkestust. Enamasti nõutakse, et elektrisüsteemi töö säiliks vähemalt siis, kui lülitub välja üks oluline genereeriv või ülekandelement. Seda nõuet nimetatakse n-1 kriteeriumiks [2].

Suurt osa elektrisüsteemi vigadest on võimalik ennetada, et vähendada kahju seadmetele, tootjatele ja tarbijatele ning suurendada süsteemi töökindlust [2].

Elektrisüsteemi anormaalitalitus ehk anormaalsus on elektrisüsteemi talitus, mille korral süsteemi talitusparameetrite väärtused ei vasta normidele. Anormaalsus jaguneb süsteemi elementide rikeks ja süsteemi, selle osa ning elementide talitlustõrgeteks [3].

Elektrisüsteemi rike on elektrisüsteemi anormaalsus, mis on tingitud süsteemi primaarahela, seadme või –aparaadi tõrkest ja mis tavaliselt nõuab rikkis ahela, seadme või aparadi viivitamatut eraldamist elektrisüsteemist vastavate võimsuslülitite väljalülitusega. Eristatakse põik-, piki- ja kombineeritud riket. Põikrike on lühis, pikirike – tavaliselt katkestus [3].

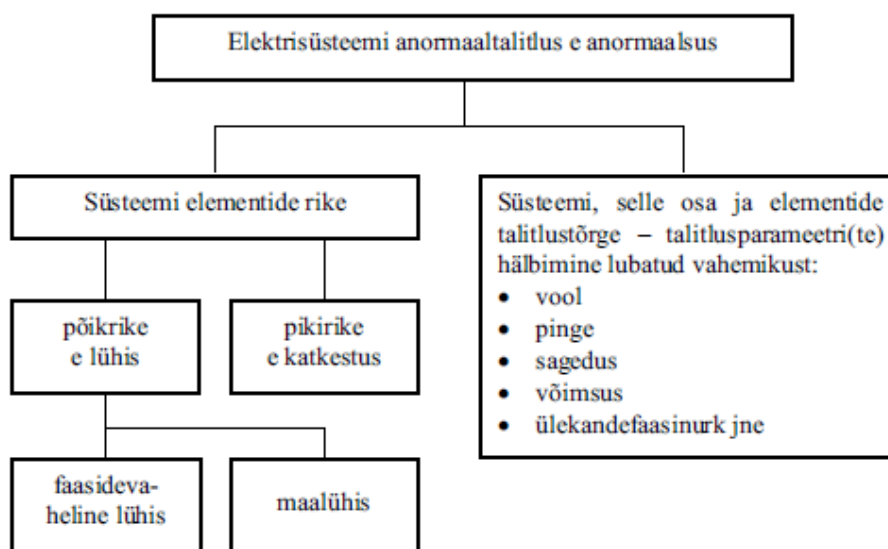
- Põikrike ehk lühis on rike, mida iseloomustab võrgusagedusega vool kahe või enama faasi vahel või faasi(de) ja maa vahel [3].
- Pikirike ehk enamasti katkestus on rike, mida iseloomustab kolme faasi impedantsi ebavõrdsus, mis on tavaliselt põhjustatud ühe või kahe faasi katkemisest [3].
- Kombineeritud rike on samaaegne lühis ja katkestus [3].

Seega on isoleeritud neutraaliga võrgus esinev põikrike lühis, mida on loomulik nimetada maalühiseks. Vastav kaitse on maalühiskaitse. Rikke ega vastava kaitse nimetus ei olene süsteemi neutraali seisust, - olgu see jäikmaandatud, takistusmaandatud, isoleeritud või resonantsmaandatud. Maalühisvool esineb ainult jäikmaanduse ja lühisvoolu piiramiseks kasutatud takistusmaanduse korral. Ülejäänud juhtumitel esineb maahendusvool. Mõlemad voolud on rikkevoolud [3].

Esinemiskoha järgi eristatakse siseriket ja välisriket. Olenevalt vajadusest mõistetakse siin kas kaitseobjektile või konkreetse kaitse kaitsetsoonis või neist väljaspool esinevat riket. Analoogiliselt eristatakse sise- ja välisrikkevoolu [3].

Süsteemi, selle osa ja elemendi talitlustõrge kujutab endast nende talitusparameetrite hälvimist lubatud vahemikust, nagu [3]:

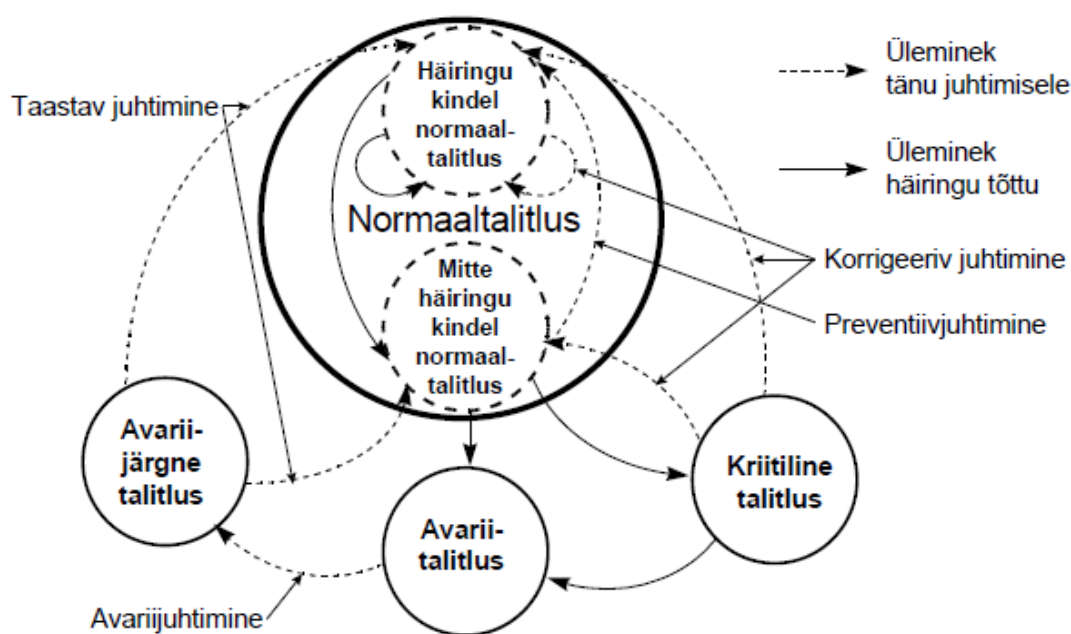
- Elemendi koormuse suurenemine – liigkoormus
- Sõlmepinge alanemine või kadumine
- Süsteemi sageduse alanemine
- Ülekandefaasinurga suurenemine.



Joonis 1.1 Elektrisüsteemi anomaaltalitus [3]

2. Elektrisüsteemi talitluse reguleerimine ja juhtimine

Elektrisüsteemi talitlust jälgitakse ja juhitakse dispetšisüsteemi vahendusel. Vajaduse korral, eriti avariitalitluse vältimiseks või likvideerimiseks teevad dispetšerid muudatusi elektrivõrgu skeemis, lülitavad sisse reservagregaate jms. Inimese tegevus algab siiski mõni minut peale vahelesegamist nõudva olukorra tekkimist. Kiiremini reageerivad mitmesugused automaatikaseadmed, ennekõike releekaitse, mis lülitab avariilised seadmed välja isegi mõne millisekundi jooksul. Ka rutiinsed tegevused, nagu pinge ja sageduse reguleerimine, on automaatide ülesanne. Enam kasutatavate automaatide hulka kuuluvad releekaitseseadmed, reservlülitusautomaadid, taaslülitusautomaadid ja koormusvähendusautomaadid. Elektrienergia kvaliteedi tagavad sageduse ja pinge automaatregulaatorid [2].



Joonis 2.1 Elektrisüsteemi talitluse liigitus [4]

- Normaaltalitus – kõik seisundiparameetrid muutuvad suhteliselt aeglaselt lubatud piirides. Juhtimise eesmärgiks on talitluse seire, optimeerimine ning toitepidevuse tagamine [4].
 - Häiringukindel talitus – häiringute puhul säilib normaalne talitus. Juhtimise eesmärgiks on häiringukindluse säilitamine [4].

- Mittehäiringukindel talitus – häiringute puhul ei säili normaalne talitus. Juhtimise eesmärgiks on häiringukindluse taastamine [4].
- Kriitiline talitus – Seisundiparameetrid muutuvad suhteliselt aeglaselt, kuid üks või mitu neist on väljunud lubatud piiridest. Juhtimise eesmärgiks on normaaltalitluse taastamine [4].
- Avariitalitus – Seisundiparameetrid muutuvad kiiresti suurtes piirides. Juhtimise eesmärgiks on rikke lokaliseerimine, avarii laienemise vältimine ning töotalitluse taastamine [4].
- Avariijärgne talitus – Osa tarbijaid võivad olla väljalülitatud, süsteemi töösse jäänud osa talitus on normaalne. Juhtimise eesmärgiks on normaaltalitluse taastamine kogu süsteemi ulatuses [4].

3. Releekaitse mõiste

Releekaitse on vajalik, et kaitsta lülitusseadmeid, kaableid, trafosid, ülekandeliine ning teisi elektrilisi seadmeid lühiseolukorral. Lisaks on eesmärgiks ennetada eluohtlike olukordade tekkimist sammu- või puutepinge näol. Kaitsete eesmärgiks on rikke äratundmisel hoida ära lühise tekkimine või piirata selle kestvust. Kaitseadmete ülesandeks on avastada, leida ning algatada vigase seadme või süsteemi osa eemaldamine elektrisüsteemist. Äärmiselt tähtis on see, et lühise olukorras reageeriks ainult need kaitseadmed, mis on lühisega seotud [5].

3.1. Releekaitse toimimispõhimõtted

Kaitse toimimist iseloomustatakse viie põhiomaduse järgi [2]:

- Tunnussuurus
- Rakendumise ajaline järgnevus
- Tunnussuuruse muutumise suund kaitse mõõteosa rakendumisel
- Toimekiirus
- Selektiivsuse tagamise viis

Tunnussuurus on füüsikaline suurus, millele kaitse mõõteosa reageerib. Tunnussuurus on kaitseadme kõrval omane ka mõõteosaga lülitus- ja automaatikaseadmetele. Ühel kaitseadmel võib olla mitu tunnussuurst ja nende koguarv ulatuda mitmekümneni. Kompleksarvulise suuruse korral võivad tunnussuursteks olla moodul ja faas või imaginaar- ja reaalosa. Perioodiliselt muutuva kolmefaasilise suuruse korral on tunnussuursteks sümmeetrilise päri-, vastu- või nulljärgnevuskomponendi, nende kombinatsiooni või mingi harmooniku efektiivväärtus, harvemini ka hetkväärtus. Tunnussuursi võib jagada nelja rühma [2]:

- Elektrilised – vool, pinge, sagedus, kahe elektrilise suuruse vaheline faasinurk, impedants, võimsus
- Ühe või mitme elektrilise suuruse funktsioon – voolu ruudu integraal, elektrilise suuruse tuletis, pinge ja sageduse suhe.
- Kaitseobjekti otstes või rööpahelates esinevate elektriliste suuruste erinevus
- Mitteelektrilised – valgus, temperatuur, gaasimaht, gaasi- ja vedelikuvoo kiirus ning rõhk

Rakendumise ajalise järgnevuse järgi jagatakse kaitse põhi- ja reservkaitseks. Põhikaitse on prioriteetne kaitse rikke eraldamisel või anormaaltalitluse lõpetamisel. Jaotusvõrgu ja selle elementide kaitse koosneb paljudest kaitseseadmetest, mis peavad töötama koordineeritult. Koordineeritud kaitse peab tagama rikete kiire, selektiivse, aukudeta ja töökindla väljalülitamise kogu võrgu ulatuses [2].

Kaitse töökindlust tõstetakse reservkaitsega. Reservkaitse peab rakenduma siis, kui etteantud aja jooksul pole rike eraldatud või anormaaltalitus lõpetatud põhikaitse või võimsuslülitite tõrke tõttu. Eristatakse järgmisi reservkaitse liike [2]:

- Ahela lähireservkaitse, mis saab voolu ja pinget põhikaitse mõõtetrafodest või teistest samasse primaarahelasse lülitatud mõõtetrafodest.
- Alajaama lähireservkaitse, mis saab voolu ja pinget põhikaitse mõõtetrafodega samas alajaamas paiknevatest, kuid teistesse primaarahelatesse lülitatud mõõtetrafodest.
- Kaugreservkaitse, mis asub põhikaitsega alajaamast eemal olevas alajaamas.

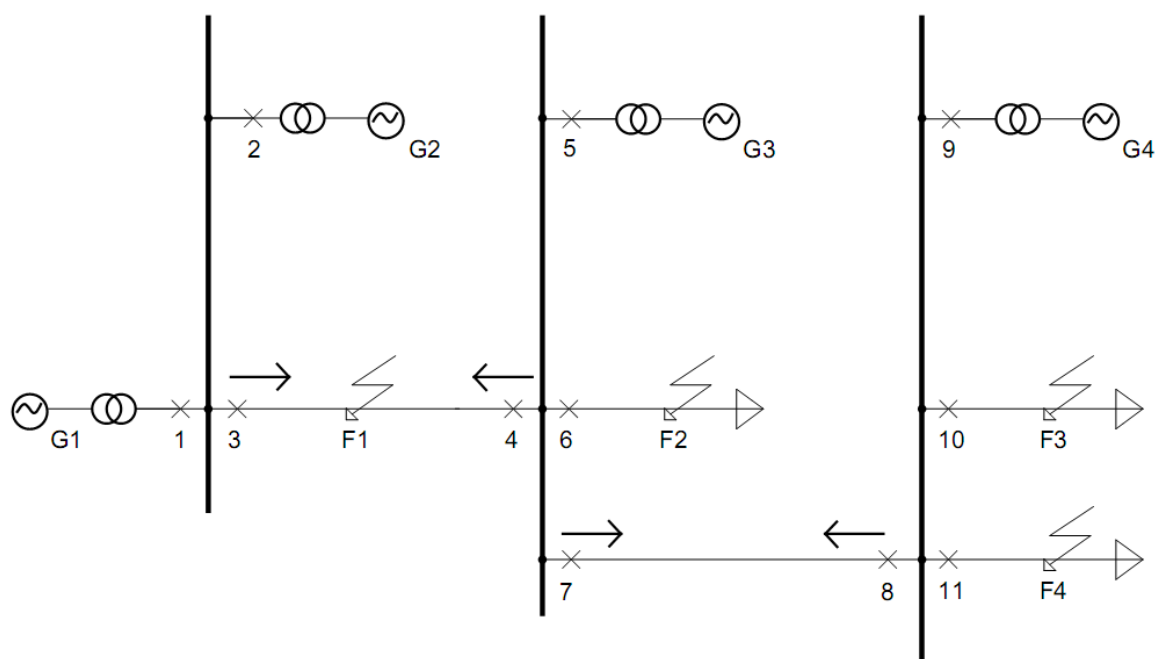
Kaitse rakendumist põhjustava tunnussuuruse muutumissuuna järgi eristatakse üle- ja alakaitseid. Üle- ehk liigkaitse rakendub tunnussuuruse kasvul. Siia kuuluvad näiteks liigvoolukaitse, diferentsiaal-, ja võrdluskaitse, aga ka ülepinge-, ülesagedus, sünkronismikaotus, võimsuslülitite tõrke-, elektrikaare-, gaasi-, termo- ja rõhukaitse. Alakaitse rakendub tunnussuuruse vähenemisel, näiteks distantskaitse, alapinge- ja alasageduskaitse [2].

Toimekiiruse järgi jagatakse kaitseid hetk- ja viitkaitseteks. Kui hetkkaitse rakenduskiirust piiravad vaid tehnilised võimalused, siis viitkaitse rakenduskiirust aeglustatakse tahtlikult mingi viitega. Hetkkaitse toimekiirus peab olema suur ja tagama elektrisüsteemi stabiilsuse säilimise. Kaitse peab olema kiire ka elektrisüsteemi elementide võimalike vigastuste ulatuse piiramiseks, automaatse taaslülituse edukuse suurendamiseks ja remondi kestuse, mahu ja maksumuse vähendamiseks ning tarbijate väiksema häirituse tagamiseks. Lõpptulemusena summeerub lühise kestus relekaitse rakendusajast ja võimsuslülitite väljalülitusajast. Nüüdisaegsete kiiremate kaitsete vähim rakendumisaeg on 5 ms ja võimsuslülitite väljalülitusaeg 20...80 ms. Õhuliinide korral lisandub relee rakendusajale liigpingepiirikute toimeaeg, mis ei ületa 2,5 ms [2].

3.2. Selektiivsus

Selektiivsus on kaitse võime tuvastada rikke asukoht. Kaitse peab olema selektiivne ehk valiv selleks, et eraldada lühisekoht võrgust võimalikult väikese arvu elementide väljalülitamisega. Rikkis objekti tuvastamise korral on tegu objektiselektiivsusega, rikkis faasi tuvastamisel aga faasiselektiivsusega [2].

- Absoluutselt selektiivne kaitse – kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus olenevad kaitseobjekti iga otsa elektriliste suuruste võrdlusest. Siia kuuluvad pikidiferentsiaal- ja võrdluskaitse. Kaitsetsoon hõlmab kogu kaitseobjekti otstes paiknevate voolutrafode vahelise ala. Reeglina üheastmeline, harva kaheastmeline ning alati hetkkaitse. Absoluutselt selektiivne kaitse ei saa olla välisobjektide reservkaitseks [3].
- Suhteliselt selektiivne kaitse – kaitse, mille toimimine ja objektiselektiivsus olenevad elektriliste suuruste mõõtmisest mõõtereleede abil kaitseobjekti ühes otsas. See kaitse on tihti mitmeastmeline. Esimene aste on hetkkaitse, ülejäänud – viitkaitse [3].



Joonis 3.1 Elektrisüsteemi lühiste näide [6]

Joonisel 3.1 on märgitud neli erinevat lühiseolukorda, mille alusel on koostatud tabel (3.1) rakendunud releedest igal lühiseolukorral. Joonise ning tabeli ülesanne on anda ülevaade

millised releed rakendusid, millised rakendusid õigesti ning millised valesti. Joonisele märgitud nooled tähistavad suunatud kaitsete töötamise suundasid.

Tabel 3.1 Rakendunud relee/võimsuslüüti joonisel 3.1 [6]

Lühise- olukord	Rakendunud VL-d	Valesti rakendunud/ mitte rakendunud VL-d	Rakendunud põhikaitsest	Rakendunud reservkaitsest
F1	1, 2, 4	3	4	1, 2
F2	3, 5, 8	6	-	3, 5, 8
F3	10	-	10	-
F4	8, 11	8	11	-

Lühiseolukorras F1 töötas õigesti lüüti number 4 ning lülitas lühisega liini ühe otsa välja. Kuna lüüti number 3 ei rakendunud siis reservkaitse rakendumisega töötanud võimsuslüütid 1 ja 2 eraldasid lühisekoha lühist toitvatest generaatorites (G1 ja G2).

Lühiseolukorras F2 ei rakendunud põhikaitse punktis 6 ning võimsuslüüti jäi sisse. Lühise eemaldamine süsteemist toimus reservkaitsete abil, kui rakendusid lüütid 3,5 ja 8. Lülitite 3 ja 8 puhul olid töötavateks kaitseteks suunatud kaitseid, mis lahutasid liini suunas väljuvad lühisvoolud.

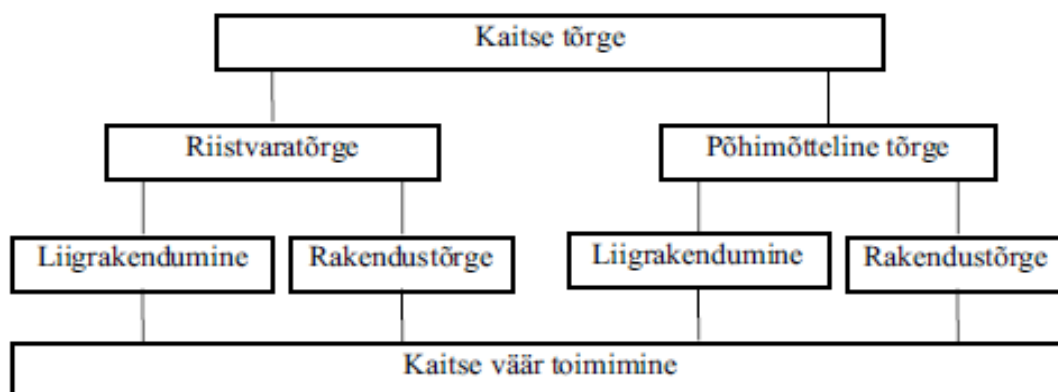
Lühiseolukorras F3 rakendus põhikaitse punktis 10, mille tulemusena lühis lahutati süsteemist. Lühiseolukorras F4 rakendusid kaitseid punktides 8 ja 11. Õige rakendumine punktis 11 tagas süsteemi normaaltalitluse. Kaitse punktis 8 ei oleks tohtinud mingil juhul töötada, sest tegemist on suunatud kaitsega ning antud olukorras oli lühisvoolu suund kaitse töötamise suunale vastupidine.

3.3. Töökindlus

Kaitse õige toimimine tähendab kaitse väljalülitus- ja muu juhttoime väljastamist määratletud reageeringuna elektrisüsteemi rikkele või muule anormaalsusele ning juhttoime mitteväljastamist elektrisüsteemi normaaltalitluse korral. Kaitse väär toimimine jaguneb rakendustõrkeks ja liigrakendumiseks. Kaitse liigrakendumine tähendab kaitse rakendumist kas elektrisüsteemi rikke või elektrisüsteemi muu anormaalsuse puudumisel või elektri

süsteemi rikke või elektrisüsteemi muu anormaalsuse esinemisel, mille korral see kaitse ei tohi rakenduda. Kaitse rakendustõrge on kaitse mitterakendumine rakendusvajaduse korral. Kaitse töökindlust iseloomustab tema vajaliku toimimise tõenäosus määratletud tingimustel kindla ajavahemiku jooksul. Vajalik toimimine on rakendumine rakendusvajaduse korral ja mitterakendumine rakendusvajaduse puudumisel [3].

Kaitse tõrked jagunevad riistvaratõrgeteks ja põhimõttelisteks tõrgeteks. Esimene tähendab kaitse väär toimimist kaitse elemendi tõrke tagajärjel, teine väär toimimist vea tõttu kaitse projekteerimisel, konstrueerimisel, sätestamisel või kasutamisel. Põhimõtteline tõrge on ka numberkaitse tarkvaratõrge. Seda tõrkeliiki ei saa tavaliselt tuvastada hooldetestimisel. Küll saab aga hooldetestimisel tavaliselt tuvastada riistvaratõrget [3].



Joonis 3.2 Kaitse tõrked ja väärtoimimine [3]

4. Kaitstavad objektid

Selleks, et oleks võimalik teostada süsteemis efektiivne releekaitse on vajalik täpne ülevaade elektrisüsteemi karakteristikutest ning komponentidest. Releekaitse sätete arvutamiseks on vajalik teada süsteemi lähteandmeid normaaltingimustel ning kuidas võimaliku rikke tekkimise korral ka süsteemi eripärast lähtuvalt rikkele reageerida [1].

4.1. Ülekandeliinid

Ülekandeliinid on 3-faasilised juhid kindlal valitud pingetasemel ühendades omavahel alajaamasid ning elektrijaamasid. Ülekandeliine kasutatakse suurte võimsuste edastamiseks elektrisüsteemides ning nende vahel. Tähtsaimad karakteristikud on näivtakistus, tööpinge ning maksimaalne läbilaskevool. Ülekandeliini kaitsete arvutamisel on vajalik arvestada liini läbilaskevõimsusega nii normaal kui ka n-1 tingimusel [1].

Tüüpiliselt on ülekandeliini mõlemas otses võimsuslüüti, mis võimaldab liini lühise korral liin süsteemist eraldada. Liinide näivtakistused sõltuvad sellest, kuidas parajasti faasijuhid omavahel paiknevad. Sellest tulenevalt on vajalik liinide projekteerimise käigus vaja teha kindlaks liini näivtakistus [1].

Avariitalitluse olukorras võib liinide lubatud läbilaskevõime olla palju suurem, kui normaalolukorras. Ülekoormatavus on otseselt seotud välistemperatuuriga ning tuule kiirusega. Liinide talutavad koormused on suuremad, kui välistemperatuur on madalam ning õhk nende ümber liigub. Reaalne lubatav ülekoormus on siiski määratud liini projekteerimise käigus ning on määratud liini ristlõikega [1].

Lühised ülekandeliinides võivad olla põhjustatud äikese, tuule, jää, lume, liini vananemise, keemilise reaktsiooni, liini maaühenduse (inimese või looduse poole põhjustatud), mõranenud isolaatori või ülekoormuse poolt. Sarnased lühise põhjused on ka maakaablite puhul [1].

Lühise suurus sõltub lühise tüübist, lühise asukohast, baas impedantsist, liini impedantsist, liiniahelate konstruktsioonist, liinide arvust ja trafo mähiste ühendusviisist. Lühised, mis on toitealajaama ligidal võivad ulatuda kümnetesse tuhandettesse ampritesse ning lühised liini kaugemas otsas võivad olla vaid mõnisada amprit. Liini juhi valikul tuleb arvestada nii maksimaalse lühisvoolutaluvusega, kui ka pikima ajaga mis kulub liini lühise lahutamiseks [1].

Ülekandeliinide sätete määramise peamiseks eesmärgiks on et lühised eemaldatakse süsteemist võimalikult kiiresti ning et süsteemi normaaltöö oleks pärast lühise olukorda taastatud [1]

4.2. Trafod

Tähtsaimad seadmed alajaamas on trafod. Trafode arv alajaamas sõltub sellest, mis piirkonnas alajaam asub, töökindluse nõuetest ning muudest teguritest. Piirkondadesse, kus on väiksem tarbimine ning hajaasustus paigaldatakse tavaliselt üks trafo. Linnades ning tihedama asustusega paikades on töökindluse mõttes paigaldatud vähemalt 2 trafot [2].

Trafode tähtsamateks karakteristikuteks on iga mähise lubatav koormus, mähiste lülitusgrupp, mähiste polaarsus, ülekoormustaluvus, nimipinge, mähiste keerdude arv, astmelüliti tüüp ja võimekus, impedants ja magneetimisvool (*inrush current*). Magneetimisvooluga arvestamisel võib eeldada, et selle suurus jääb väiksemaks maksimaalsest lühisvoolust [1].

Trafo kõige sagedasemaks anormaaltalutluse põhjustajaks on trafo ülekoormus, välislühise liigvoolud ning õlitaseme langus paagis ilma vigastuseta [3].

Trafo kaitsmise esmaseks eesmärgiks on teha kindlaks millist kaitset kasutada. Põhikaitseteks trafode puhul on pikidiferentsiaalkaitse, gaasikaitse (Buchholzi rele) ning rõhukaitse. Diferentsiaalrelee kasutamisel on vaja seadistada rele võimalikult tundlikuks, et kaitse rakenduks trafo sisemise rikke tõttu ning eemaldaks lühise võimalikult kiiresti. Lisaks tuleb tundlikkuse puhul arvestada trafo astmelülitiga ning trafo magneetimisvoolu tõukega [1].

Reservkaitsena kasutatakse trafodes liigvoolukaitseid, kuid väiksemate trafode puhul on voolukaitse ka põhikaitsetena kasutusel. Liigvoolukaitsete puhul on vaja valida sätted, mis reageeriks välislühistele enne, kui on ületatud trafode lubatav ülekoormuse aeg. Seda raskendavad aga asjaolud, et trafod kannatavad küllaltki suurt ülekoormust mõne tunni jooksul ning mitmemähiselistel trafodel võib olla ülekoormuses vaid üks mähis, kui teised mähised on koormamata [1].

4.3. Latid

Lattide puhul on tegemist voolujuhist konstruktsiooniga kindlal pingestmel. Alajaamade ja jaotlate latid on elektrisüsteemi sõlmpunktideks ja nende kaitseks kasutatakse põhiliselt liigvoolukaitset, distantskaitset, kaarekaitset ning pikidiferentsiaalkaitset [1] [3].

Tähtsamateks nimiparameetriteks võib lugeda lati nimipinge, lattide paigutus, maksimaalne lühisvoolutaluvus ning maksimaalne koormusvoolu taluvus [1].

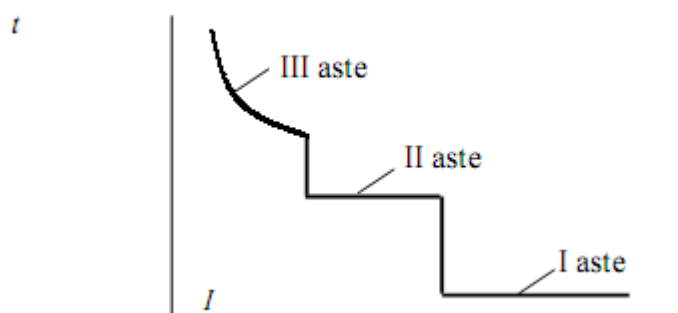
Peamine eesmärk lattide kaitse valikul on välistada kaitse reageerimine lühistele, mis leiavad aset liinil. Tavaliselt on lattide testimisel süstitav minimaalne lühisvool piisav tagamaks, et lattidel toimuv lühis on releele avastatav ning isoleeritav [1]. Relee rakendub, kui lattide sisendid juhivad lattidele lühisvoolu. Lattide puhul kasutatakse ka lati diferentsiaalkaitset [7].

5. Liigvoolukaitse

Liigvoolukaitse on kõige enam kasutusel olev kaitse üle kogu elektrisüsteemi. Kaitse pakub kiiret reageerimisega suurtel liigvooludel ning aeglasemat reageeringut väiksematel liigvooludel. Liigvoolukaitse reageerib tunnussuuruse kasvule ehk tegemist on ülekaitsega. Tunnussuuruseks võib olla voolumoodul või –moodul ja –faas (suundvoolukaitse). Vajadusel täiendatakse voolukaitset pingeloaga. Kuna liigvoolukaitse tunnussuurusi mõõdetakse ühes punktis siis loetakse liigvoolukaitset suhteliselt selektiivseks kaitseks. Selektiivsuse suurendamiseks kasutatakse mitmeastmelist voolukaitset [3].

Relee reageerimiskarakteristikute järgi on võimalik eristada kolme tüüpi liigvoolukaitseid: hetkkaitse, sõltumatu ning sõltuva viitega kaitsed.

- Liigvoolu hetkkaitse rakendub, kui vool ületab määratud sätte väärtuse. Relee säte valitakse nii, et mida kaugemal toitvast alajaamast see asub seda väiksemale nimivoolule see reageerib. Kuid vaadates toitava poole suunas suurenevad alajaamades paiknevate releede sätted ehk need reageerivad suurematele vooludele. Sellist tüüpi kaitse puhul reageerib väiksemale lühisvoolule sellele kõige lähedamal olev kaitserelee, lülitades rikkega süsteemi osa välja. Tegemist on vähe selektiivse kaitsega, kui tegemist on suurte lühisvooludega. Lisaks tekib probleem, kui kahe sätestatava punkti näivtakistuste vahe on marginaalne võrreldes baasnäivtakistusega tuues kaasa vale lahutuse elektrisüsteemis. Hetkkaitse viide ei ole tahtlikult esile kutsutud, vaid on tingitud kaitse vähimast tehniliselt võimalikust rakendusajast. Hetkkaitse rakendumisajag ulatub tänapäeval 0,1...0,005 sekundini. Joonisel 5.1. on hetkkaitse tunnusjoon toodud – I aste [3] [6].



Joonis 5.1. Kolmeastmeline kaitse tunnusjoon [3]

- Sõltumatu viitega kaitse puhul on võimalik valida erinevatele voolusätetele erinevad reageerimisajad. Nii on võimalik lühisele lähimal olev relee sätestada reageerima kõige kiiremini ning toitepoolsemad releed sätestada pikema viitega. Kuna sõltumatu viitega kaitse astmeid on võimalik seadistada vastavalt vajadusele siis on tegemist suhteliselt selektiivse kaitsega. Negatiivseks küljeks võib lugeda toitepoolsemas otsas tekkivate suurte lühiste pikem lahutuse aeg. Relee sätte valikul on võimalik valida voolusäte millest algab viide ning viitepikkus. Sageli on sõltumatu viitega kaitse kaheastmeline, kuid alates teatud voolu väärtusest hakkab kaitse toimima hetkkaitse. Sõltumatu viitega kaitse tunnusjoon on toodud joonisel 5.1 (II aste) [3] [6].
- Sõltuva viitega kaitse rakenduskiirus on pöördvõrdeline voolu suurusega, mis tagab suuremate voolude kiirema väljalülitamise ja väiksemate voolude korral suurema viite. Sõltuva viitega kaitse on üldiselt kirjeldatud tunnusjoonega IEC 60255 standardi kohaselt, ning näitab kaitse rakendusaega. Standardi kohaselt eristatakse nelja sõltuvust (tabel 5.1) [3].

Tabel 5.1 Voolust sõltuva ajaga tunnusjoonte IEC standardi konstandid [3]

Viite tüüp	Parameeter	
	β	α
Normaalsõltuv (NI)	0,14	0,02
Ülisõltuv (EI)	80	2
Väga sõltuv (VI)	13,5	1
Vähesõltuv (LTI)	120	1

Sõltuva viitega kaitse rakendusaeg arvutatakse valemiga [3]:

$$t = \frac{k\beta}{\left(\frac{I}{I>}\right)^\alpha - 1} \quad (5.1)$$

Kus k – sätetegur

I – vool

$I>$ - voolusäte

α, β - tegurid

5.1. Sätete arvutamine

Sätete määramiseks on vajalik teada võimalike võrgu toiteskeeme. Eesti jaotusvõrgus pärineb antud info juhtimiskeskusest. Arvutatav kaitse tuleb sobitada nii toitesuunal eespool asuvate,

kui ka järgnevat kaitsetega. Lisaks tuleb kontrollida uue kaitse lisamisel ka sobivust eelnevate kaitsega, et tagada selektiivne kaitse. Samuti tuleb arvestada releede tehniliste piirangutega. Jaotusvõrgus on kasutusel väga palju vanu elektromehaanilisi kaitsereleesid, mis töötavad kõrvuti uute digitaalsete kaitsereleedega [8].

Peamiseks kaitsetüübiks Elektrilevi poolt hallatavas jaotusvõrgus on liigvoolukaitse. Liigvoolukaitse lihtsus on ka põhjus miks seda kõige tihedamini kasutatakse. Tihti on järjestikku mitu kaitset, kuid kaitstavate elementide lühisvoolud on väga sarnased. Sellisel juhul ei saa alati tagada vajaliku selektiivsuse varu [8].

Sätete valiku juures peab arvestama releekaitse põhinõudeid: tundlikkus, töökiirus ja selektiivsus. Kuna alati kõiki nõudeid pole võimalik täita, siis kindlasti ei tohi kannatada tundlikkus ega töökindlus, sest nende nõuete rikkumise korral on potentsiaalne kahju väga suur [8].

5.1.1. Tundlikkus

Tundlikkus tähendab, et kaitse säte peab olema piisavalt madal, et reageerida oma toimeulatuses esinevatele lühistele. Tundlikkus on mõõdetav tundlikkusteguriga, mis on iseloomult vähima kaitsetsooni jääva kahefaasilise lühisvoolu ja relee voolusätte suhe. Tundlikkustegur arvutatakse valemiga [8]:

$$k = \frac{\sqrt{3} \cdot I_k}{2 \cdot I_s} \quad (5.2)$$

kus I_k on arvutatud kolmefaasiline lühisvool kaitsetsooni kaugeimas punktis ning I_s on relee sättevool.

Nõutav tundlikkustegur on põhikaitse puhul 1,5...2, reserveeriva kaitse puhul vähemalt 1,2. Igat valitud sätte puhul tuleb kindlasti kontrollida ka kaitse tundlikkust [8].

5.1.2. Töökiirus

Töökiirus tähendab, et lühis on vaja võrgust lahutada enne, kui võrk saab kahjustada. Lühised, mis kestavad üle sekundi on süsteemi vaatepunktist juba ohtlikud. Lisaks on vaja arvestada võrgu elementidele lubatava termilise lühisvoolu ajaga, mis on leitavad tootja seadmekataloogidest. Liini termilist vastupidavust saab arvutada valemiga [8]:

$$T = \left(\frac{S \cdot C}{I_{kmax}} \right)^2 \quad (5.3)$$

kus S on liini juhtme ristlõige, I_{kmax} maksimaalne lühisvool liini alguses ning C on konstant, mis sõltub liini paigaldusviisist ning juhtmete materjalist.

Õhuliinil pingsusega alla 1 kg/mm^2 ja 6-10kV alumiiniumsoontega kaablitel $C=92$.

Õhuliinil pingsusega üle 1 kg/mm^2 $C=69,5$.

Lühise lahutuse miinimum ajaks on aeg T (s).

5.1.3. Selektiivsus

Selektiivsus tähendab reaalsuses seda, et kaitse ei tohi töötada väljaspool enda toimeala välja arvatud reserveeriva kaitsena. Iga järgnev süsteemiosa (lühisekoha poolt toite poole vaadates) lahutuskoha kaitse peab töötama sama voolu korral pikema viitega.

$$t_2 = t_1 + \Delta t \quad (5.4)$$

kus Δt on vajalik lisaviide.

Ajaline eristus peaks olema elektromehaaniliste kaitsete puhul 0,5s ning digitaalsete kaitsete puhul vähemalt 0,15s. Samuti peab voolusäte olema lühisekohast kaugematel kaitsetel kõrgem. Rikkekohast kaugema kaitse säte I_2 sõltub lähema kaitse sätest I_1 järgnevalt [8]:

$$I_2 = \frac{k_v \cdot I_1}{k_t} \quad (5.5)$$

kus k_v on kaitse varutegur, mis arvestab võimalikke arvutuste ebatäpsusi, voolutrafoode ja kaitserleede hälbeid jms., üldjuhul võetakse väärtuseks 1,2. K_t on kaitserlee tagastustegur mis arvestab asjaolu, et kord juba käivitunud (voolu tõusmisel sätest kõrgemale) rele ei tagastu kohe voolu langemisel sätest allapoole vaid alles sellest mõnevõrra madalama voolu juures. Tagastustegur on ära toodud releede tehnilistes andmetes ning see võib liigvoolureleedel varieeruda vahemikus 0,6..0,7 (vanad releed) ja 0,9..0,98 (uued digireleed). Arvestades erinevate digirelee tüüpide paljusust on arvutuste lihtsustamiseks soovitatav valida üldjuhul nende tagastusteguriks 0,9. Sedasi tagatakse selektiivsus nii voolulõikel kui maksimaalvoolukaitsel [8].

Lisaks peab kaitse võimaldama töötada ka liigpingepiirikutel, mille töötamisega kaasneb lühiajaline suur vool. Seetõttu on digitaalsetel kaitsetel piirang, et esimese 0,005s jooksul nad kindlasti ei rakenduks [8].

Võib tekkida ka olukordi, kus suur järjestikuste kaitsete arv ei võimalda tagada nõuetekohast selektiivsust. Sellisel juhul tuleks leida kompromiss kaitse tundlikkuse ja selektiivsuse vahel.

Tundlikkust võib vähendada vaid reserveerivatel kaitsetel, põhikaitse peab igal juhul olema nõuetekohase tundlikkusega. Selektiivne välistus võib olla väiksem, kuid peab saavutama olukorra, kus toimub võimalikult vähe ebakorrektselt kaitse rakendumist. Vajadusel võib mõne reserveeriva kaitse tööst välja viia [8].

5.1.4. Voolulõige

Voolulõige töötab ainult lühisvooludele ning toimib üldjuhul hetkkaitseks. Selektiivsuse suurendamiseks kasutatakse mõnikord ka viidet. Ainukaitseks töötava voolulõike tundlikkuse tegur peab olema ≥ 2 , teiste liigvoolukaitsetega koos võib lubada madalamat tundlikkust [8].

Voolulõige ei tohi töötada lühistele mis toimuvad trafo madalpinge poolel. Trafo sekundaarpinge poole lühistel peavad töötama väljuvate madalpingeliinide kaitset ja trafo madalpinge peakaitse. Viimase kasutamisest on Elektrilevi võrgus loobunud [8].

Voolulõike voolusäte I_L peab olema vähemalt 1,3 korda suurem suurimast kaitstavas võrgus esinevast trafo taha jäävast lühisvoolust taandatuna keskpinge poolele [8].

$$I_L \geq 1,3 \cdot I_{kmax_{MP}}^{KP} \quad (5.6)$$

Lisaks tuleb voolulõige sobitada liini sisselülitamisel tekkiva trafode magneetimisvoolu tõukega, või kasutada paljudes digireleedes olevat tõukevoolu (I_2) kaitset.

Kui võrgus on järjestikku kaks või enam voolulõiget, siis tuleb nende sätted omavahel kokku sobitada. Selleks tuleb toitepoolsema kaitse säte sobitada kaugema (tarbijapoolse) kaitse sättega [8]:

$$I_{Ln} = \frac{k_v \cdot I_{Ln+1}}{k_t} \quad (5.7)$$

kus loendamine algab toitepoolt.

Kuigi voolulõige on oma olemuselt hetkkaitse, tuleb kaitsetevahelise selektiivsuse saavutamiseks kasutada viidet [8]:

$$t_{Ln} = t_{Ln+1} + \Delta t \quad (5.8)$$

5.1.5. Maksimaalvoolukaitse

Maksimaalvoolukaitse on mõeldud rakenduma nii lühisele, kui suurele ülekoormusele. Samas ei tohi kaitse töötada normaalkoormusele. Tähelepanu tuleb pöörata kahele terminile, kaitse käivitus (*start*) ja kaitse rakendumine (*trip*). Käivitus on olukord, kus vool ületab valitud

voolusätte väärtuse ja kaitserelee käivitub ning hakkab aega lugema. Etteantud ajaviite möödumisel kaitse rakendub ning annab elektrilise signaali võimsuslüliti väljalülitusahelasse, mis avab võimsuslüliti. Maksimaalvoolukaitse võib töötada nii viitega kaitseena, kui ka voolust sõltuva ajaga karakteristikuga kaitseena. IEC standardile vastavate sõltuva ajaga karakteristikute viiteaeg avaldub vastavalt valemile (5.1). Konstandid alfa ja beeta sõltuvad karakteristikute tüübist vastavalt tabelile (5.1). Ajategur k ning kõvera tüüp tuleb eraldi määrata sätte andja poolt. Sellega on võimalik tekitada lisavälistust kaitseastmete vahel [8].

Selleks, et välistada koormusvoolust rakendumine on vajalik leida kaitstavat elementi läbiv koormusvool, mis avaldub valemiga [8]:

$$I_{liin} = \frac{k_{koormus} \cdot S_{\Sigma}}{\sqrt{3} \cdot U_{arv}} \quad (5.9)$$

kus S_{Σ} on summaarne fiidri koormus (kõikide fiidrist toidetavate trafode summeeritud võimsus), U_{arv} on arvutuslik pinge ning $k_{koormus}$ on koormustegur. Maavõrkudes võetakse $k_{koormus}=0,4\dots0,6$ ja linnas $k_{koormus}=0,5\dots0,9$. Maksimaalvoolukaitse (M) voolusätte avaldub [8]:

$$I_M \geq \frac{k_v \cdot I_{liin}}{k_t} \quad (5.10)$$

ning kaitse viide

$$t_{eelnev} \geq t_M \geq t_{järgnev} \quad (5.11)$$

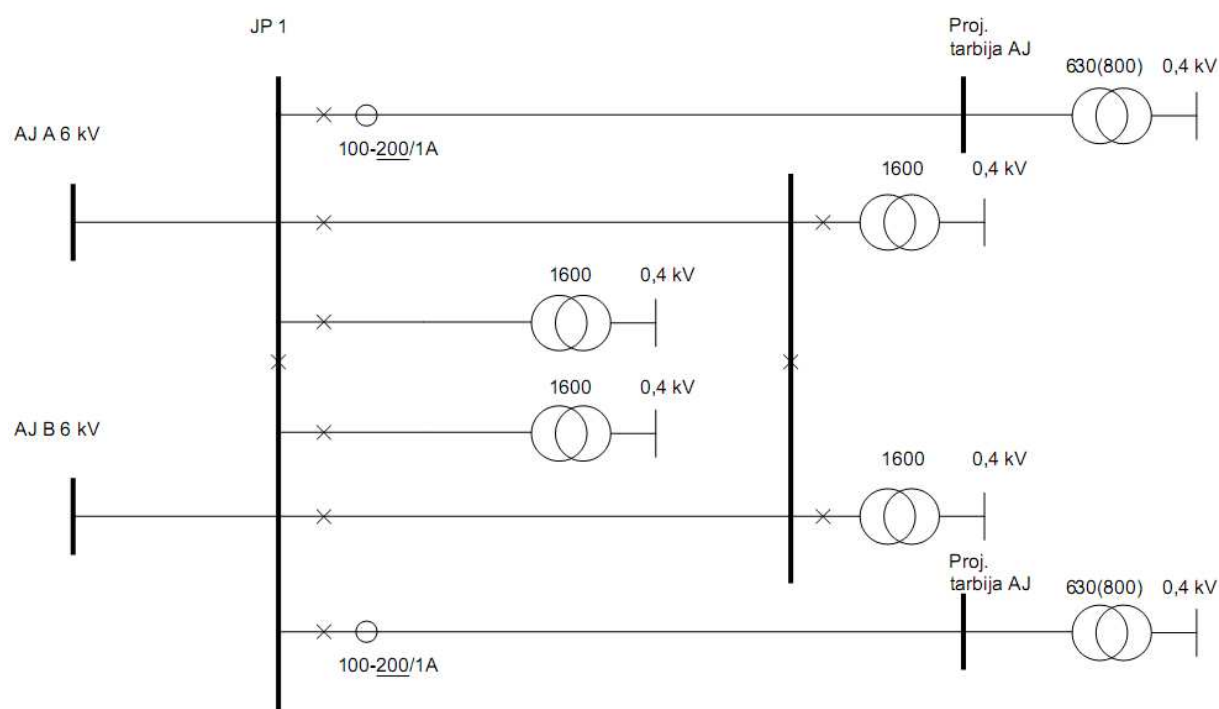
Kui arvutatavale maksimaalvoolukaitsele ei järgne teisi kaitseid siis on soovitav valida kaitse viiteks 0,5s lähtudes järgnevast. Liini sisselülitamisel tekib trafode magneetimisvoolu tõuge, mille väärtus võib ületada maksimaalvoolukaitse sättevoolu. Mainitud tõukevool sumbub kiiresti ja 0,5s pärast ei käivita enam maksimaalvoolukaitset. Olemasolevad koormusvoolud pärinevad juhtimiskeskusest [8].

Maksimaalvoolukaitse peab olema selektiivne kõigi järgnevate (ning eelnevate) kaitsetega. Jaotusvõrgus tuleb arvestada trafode kaitsetega, oluline on just suurim trafo kaitse. Kui trafo kaitse sätte väärtust või kaitsekõverat pole teada, võib kontrollida maksimaalvoolukaitse selektiivsust tingliku rele järgi trafol, mille seadistamise kohta on info leitav vastava rele käsiraamatus [8].

Trafode kaitseks on soovitatav kasutada EI kõverat. See võimaldab mõnevõrra suuremat koormusvoolu (trafo peab üldjuhul ülekoormusele mõnda aega vastu), kuid suurematele vooludele reageerib kiiremini [8].

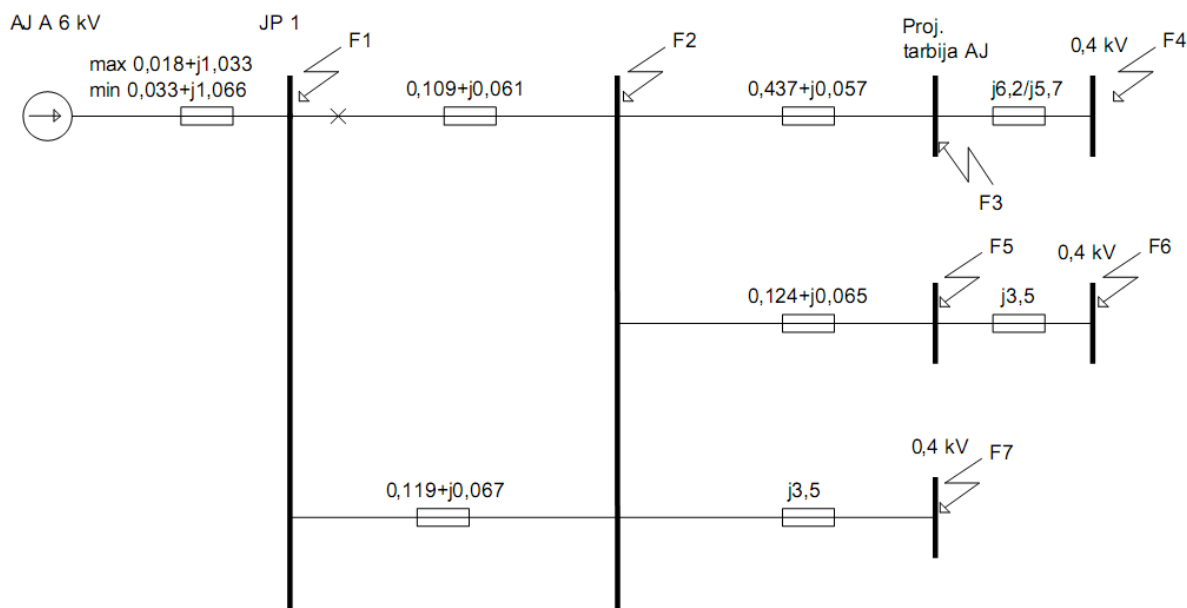
5.2. Näidisülesanne 1

Ülesandes on uurimisel 6 kV võrk, mis on toodud joonisel 5.2. Olemasolevasse jaotuspunkti JP1 on plaanitud lisada kaks uut trafofiidrit. Vaja on leida lisanduvatele fiidritele liigvoolukaitsete sätteid. Skeemi lihtsustamise huvides ei ole näidatud kõiki 6 kV koormus- ja lahküliteid. Arvutustes on arvestatud projekteeritava fiidri algse ja perspektiivse võimsusega (630/800 kVA).



Joonis 5.2 6 kV võrgu selgitav skeem [9]

Selleks, et leida lühisvoole on vaja teada ka võrguelementide takistusi. Aseskeemil (joonis 5.3) on võrgu elementide takistused antud suhtelistes ühikutes. Lisaks on joonisel toodud lühisekohad, kus lühisvoolude väärtused on arvutatud. Olemasolevad elementide andmed on saadud ELV Tehnilise info Põhja piirkonnalt.



Joonis 5.3 6 kV võrgu aseskeem [9]

Baasvõimsuseks on valitud 100 MVA ning baaspingeks 6,3 kV. Nende andmete põhjal on võimalik leida baasvool:

$$I_b = \frac{S_b}{U_b \cdot \sqrt{3}} = \frac{100 \text{ MVA}}{6,3 \text{ kV} \cdot \sqrt{3}} = 9,2 \text{ kA} \quad (5.12)$$

Kolmefaasiline lühisvool otsitavas punktis on leitav valemiga:

$$I_F^3 = \frac{I_b}{Z_b} \quad (5.13)$$

, kus Z_b on summaarne takistus vaadeldavas lühiseahelas.

Näiteks on projekteeritava trafoidri tagune maksimaalne kolmefaasiline lühis (F4) leitav järgnevalt:

$$Z_{bF4} = \sqrt{(0,018 + 0,109 + 0,437)^2 + (1,033 + 0,061 + 0,057 + 5,7)^2} = 6,87$$

Kolmefaasiline lühisvool lühisekohas F4 on seega maksimaalse režiimi korral valemi (5.13) järgi (800 kVA trafo korral):

$$I_{F4}^3 = \frac{9200}{6,87} = 1,33 \text{ kA}$$

Skeemi põhjal arvutatud lühisvoolud on toodud tabelis 5.2.

Tabel 5.2 Arvutuslikud lühisvoolud erinevate režiimide korral.

Lühise- koha nr.	Lühisvool, kA			
	Režiim			
	I	II	III	IV
F1	8,87	8,59	8,87	8,59
F2	8,33	8,04	8,3	8,02
F3	7,16	6,94	7,10	6,89
F4	1,24/1,33	1,24/1,33	1,24/1,33	1,24/1,33
F5	7,70	7,51	7,70	7,45
F6	1,97	1,95	1,96	1,95
F7	1,99	1,98	1,99	1,98

I režiim tähistab maksimaalrežiimi, kus toidab alajaam A. II režiim on minimaalrežiim, kus toidab samuti alajaam A, kuid võrgus on lahutused vastavalt remondiskeemi järgi. Režiimid III ja IV on analoogsed eelnevatele, kuid toitvaks alajaamaks on alajaam B.

Voolulõike sätte määramisel lisanduvatesse trafoidritesse tuleb välistada, et kaitse ei rakendu lühistele, mis on „trafo taga“. Selleks valin arvutusse suurima trafo taga oleva lühise (valem 5.6).

$$I_L \geq 1,3 \cdot 1240(1330) = 1612(1729)$$

Sulgudes toodud arvud on perspektiivse 800 kVA trafo puhul. Säte võiks olla perspektiivselt 1800A. Kontrollin sätte tundlikkust vähima fiidrit läbiva lühisvoolu suhtes, mis asub režiimis IV olevas lühisekohas F3 (valem 5.7):

$$k = \frac{0,87 \cdot 6890}{1800} = 3,3$$

Tundlikkus on täiesti piisav, ning kuna voolulõikele ei järgne antud juhul ühtegi kaitset siis võib kasutada minimaalset relee poolt võimaldatavat viidet. Arvestan selleks viiteks 0,04 sekundit.

Lisaks voolulõikele on võimalik kasutusele võtta maksimaalvoolukaitse reserveeriva kaitsena. Selleks on vaja leida trafo koormusvool ning sobitada see trafo 1,1-kordse koormusega (valem 5.9)

$$I_{lin} = \frac{1,1 \cdot 630(800)}{6,3 \cdot \sqrt{3}} = 64(81) A$$

Fiidri maksimaalvoolukaitse sätte leidmisel võtan arvesse, et koormusvoolu arvutamisel on arvestatud trafo 1,1-kordse koormusega, seega (valem 5.10):

$$I_M = \frac{64(81)}{0,9} = 71(90) \text{ A}$$

Arvutan leitud maksimaalvoolusätete tundlikkuse väikseimale lühisele fiidril (režiimis IV lühisekohas F4):

$$k = \frac{0,87 \cdot 1240(1330)}{71(90)} = 15,1(12,9)$$

Tundlikkus on piisav. Kuna tegemist on üsna suurte vahedega voolukaitsete esimese ja teise astme vahel valin ülisõltuvusega IEC kõvera (*extremely inverse*) ning ajateguriks $k=0,3$. Kontrollin, mis suuruses voolule kaitse reageerib, kui võtta kontrollpunkti ajaks 0,5s. Valitud parameetritele vastava rakendusvoolu leian valemiga 5.1.

Kontrollpunktideks on 630 kVA trafo puhul 497A/0,5s ning 800 kVA puhul 630A/0,5s. Kontrollpunktid ilmestavad valitud kõverat ning näitavad nominaalse aja, millega kaitse peaks kontrollpunktide arvutamisel leitud lühisvooludele reageerima.

Tabel 5.3 Releekaitsetsätete tabel

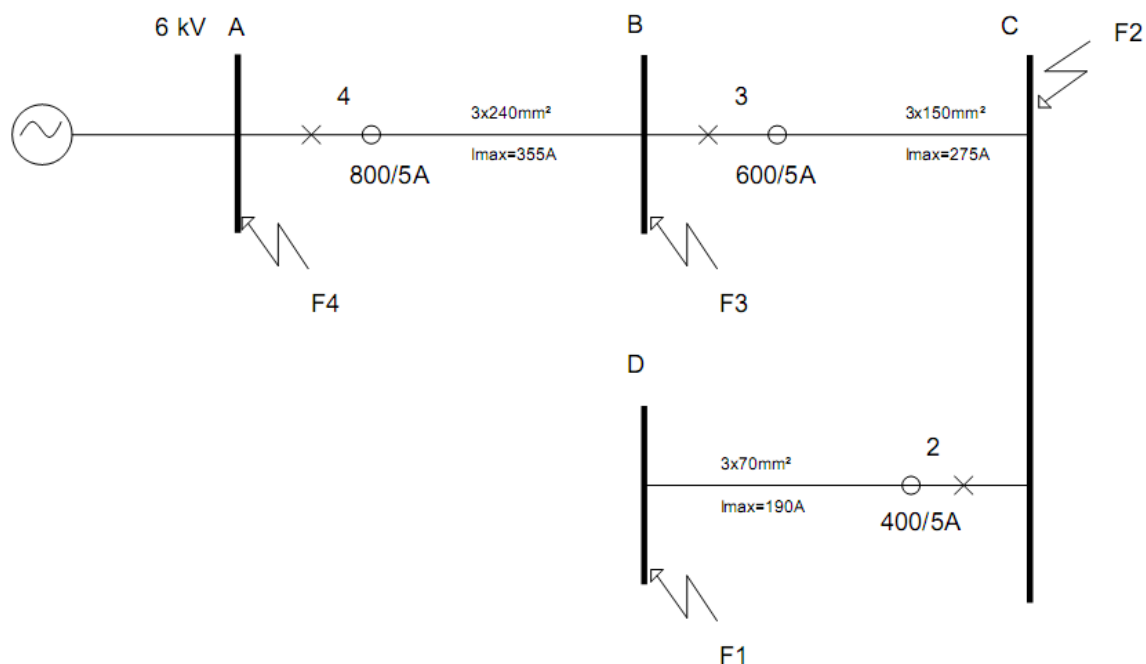
Kaitstav ühendus	Kaitse nimetus	Mõõtetrafod	Rakendussuurus			Kontrollpunkt
		Ülekanne	Vool		Aeg	
			I_{prim} , A	I_{sek} , A	t_{rak} , S	
Trafofiider	Maks.kaitse	200/1	71 (90)	0,36 (0,45)	IEC EI $k=0,3$	497A/0,5s(630A/0,5s)
	Voolulõige	200/1	1800	9	0,04	

Tabelis 5.3 on toodud lõplikud valitud sätted võrku lisanduvatele trafofiidritele.

5.3. Näidisülesanne 2

Uurimiseks on joonisel 5.4 toodud 6 kV kaabelvõrk. Ülesande eesmärgiks on leida punktides 2,3 ja 4 olevatele releedele voolukaitsetsätteid lähtudes kaablitele lubatavast maksimaalsest voolust. Kaablite maksimaalsed lubatavad voolud ning alajaamade lattidel esinevad maksimaalsed kolmefaasilised lühised on märgitud joonisel 5.4.

Lisatingimusena tuleks arvestada, et toitepoolsemal kaitstel peaks säte olema 30-40% suurem, kui eelnevas punktis sätestatud kaitstel.



Joonis 5.4 6 kV kaabelvõrgu skeem [3]

Esmalt on vajalik arvutada säte kõige tarbijapoolsemal liinil (punkt 2). Arvutustes lähtun kaabli maksimaalvoolust, mis kõige tarbijapoolsemal kaablil on 190A. Lisaks on vajalik liigrakendumise ennetamiseks arvestada välistusteguriga (arvestan $k_v=1,3$) ning elektrimootori isekäivitusteguriga (3). Punkti 2 primaarvoolu säte avaldub seega:

$$I'_{S2} = 1,3 \cdot 3 \cdot 190 = 741 \text{ A}$$

Arvutades sekundaarpoole sätet on vaja arvestada voolutrafo ühendusega, mis on antud ülesandes ühendatud kõikides punktides tähtühendusse (skeemitegur $k_{sk}=1$). Punkti 2 sekundaarpoole säte avaldub:

$$I''_{S2} = 741 \cdot \frac{5}{400} = 9,26 \text{ A}$$

Ümardan sekundaarpoole sätte lähima täisarvuni ($I_{S2}=9\text{A}$), kuna mõnede vanemate releede puhul ei pruugi nii täpne sätestamine võimalik olla. Seega releed rakendavaks primaarvoolusätteks on 720A.

Kontrollin sätte tundlikkust vähimale lühisele (kahefaasiline lühis).

$$k = \frac{0,87 \cdot 4300}{720} = 5,2$$

Tegemist on põhikaitsega, mis tähendab et tundlikkustegur peaks olema suurem, kui 1,5 mis on ka antud juhul täidetud.

Punktide 3 ja 4 põhikaitsete sätted ning tundlikkustegurid on arvutatud analoogselt esimesele punktile ning toodud allolevas tabelis 5.4.

Tabel 5.4 Voolukaitsetsätete tabel

Kaitstav punkt	Max. lubatav koormusvool, A	Voolusäte		tundlikkustegur põhikaitisel
		I _{prim} , A	I _{sek} , A	
3	275	1080	9	6,8
4	355	1440	9	6,3

Järgnevalt on vaja kontrollida leitud voolukaitse sätete tundlikkust reservkaitsena. Tundlikkusteguri arutamisel on võetud järgneva tarbijapoolsema punkti kahefaasiline lühisvool. Punkti 3 voolukaitse tundlikkus reservkaitsena avaldub:

$$k = \frac{0,87 \cdot 4300}{1080} = 3,5$$

Sarnaselt leian punkti 4 voolukaitse tundlikkuse reservkaitsena.

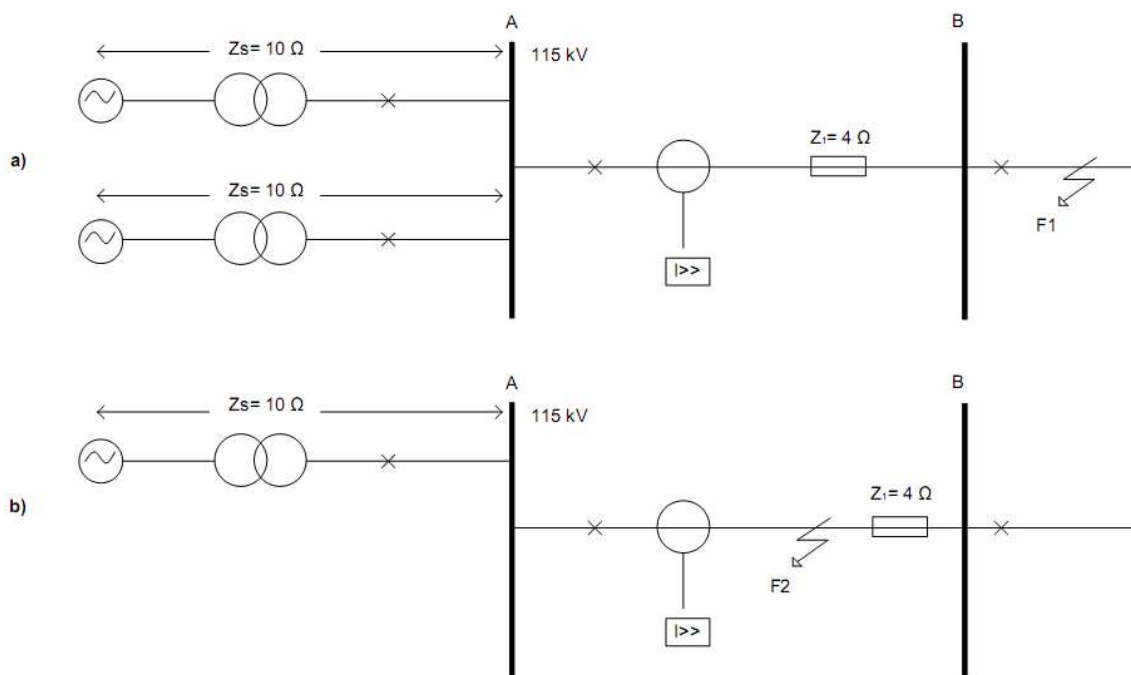
$$k = \frac{0,87 \cdot 8400}{1440} = 5,1$$

Mõlemal juhul on tundlikkustegurid tunduvalt suuremad minimaalsest nõutavast tundlikkustegurist ($k_{min} > 1,2$), mis tähendab seda, et põhikaitse rikke korral rakendub järgnevas (tarbijapoolsemas) kaitsepunktis reservkaitse.

Lisaks on täidetud ka lisatingimus ehk kõik toitepoolsemad kaitsed on vähemalt 30% suuremad, kui eelnevas punktis.

5.4. Näidisülesanne 3

Antud ülesanne näitab miks ei ole alati otstarbekas või võimalik kasutada liigvoolukaitset. Võrgu skeem on toodud joonisel 5.5.



Joonis 5.5 a) Elektrivõrgu skeem kahe toitva generaatoriga b) Elektrivõrgu skeem ühe toitva generaatoriga [10]

Paralleellinide korral võib tekkida olukord, kus voolukaitse sätte valimine on raskendatud ning kaitse ulatus võib eri režiimide korral kas üle- või alaulatuda [10]. Enamikel mikroprotsessorreleedel on võimalus kasutada ühe kaitse puhul kahte erinevat sättegruppi ning need on kaugeltjuhitavad. Seega on võimalik juhtimiskeskuse dispetšeril vastavalt skeemi konfiguratsioonile muuta voolukaitse sättegruppi.

Joonise 5.5 variant a korral on lühisekoha F1 maksimaalne kolmefaasiline lühisvool:

$$I_{F1} = \frac{115 \text{ kV}}{(5 + 4) \cdot \sqrt{3}} = 7377 \text{ A}$$

Variant b korral avaldub lühisvool aga:

$$I_{F2} = \frac{115 \text{ kV}}{10 \cdot \sqrt{3}} = 6640 \text{ A}$$

Seega on lühisvool fiidris, ühe generaatoriga toite korral, isegi liini takistust arvestamata väiksem. Valides voolusätte variant a järgi on lühisvoolud liini lõpus ühe generaatoriga toite korral liiga väikesed, et ületada sätte väärtus. Teise variandi puhul tuleb arvutatav voolusätte

väiksem ning kahe generaatoriga töötava skeemi puhul rakendaksid ka tarbijale ligemal asuvad väiksemad voolud voolurelee. Antud ülesandes on ebapraktiline kasutada voolukaitset ning selle asemel tuleks kasutada kas distantskaitset või elemendipõhist kaitset. Distantskaitse tööpõhimõtetest ning sätete määramisest peatükis 6.

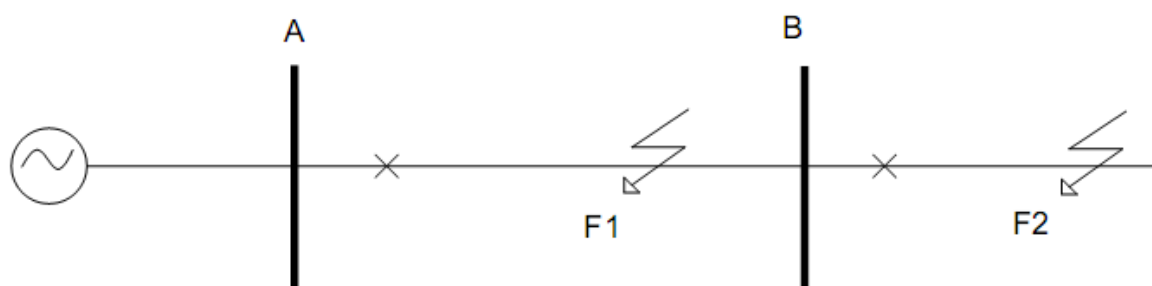
6. Distantkaitse

Distantkaitse tunnussuuruseks on takistus, enamasti impedants. Tegemist on alakaitsega ehk kaitse rakendub tunnussuuruse langemisel allapoole sätestatud väärtust. Distantkaitse on suhteliselt selektiivne kaitse (sisendsuuruste mõõtmine toimub kaitsetsooni ühes otsas) ning on üldjuhul mitmeastmeline. Kasutatakse nii faasidevaheliste lühiste kui maalühiskaitseksena [3].

Antud kaitse mängib olulist rolli üha uuenevas elektrisüsteemis, sest distantkaitse puhul on tegemist kõige rohkem edasi arendatava kaitsega. Kaitse tööpõhimõtetes pole suuri muudatusi toimunud, kuid juurutamise viis uutesse süsteemidesse on küllaltki paindlik [11].

Maandatud neutraaliga võrkudes kasutatakse läänes nii faasidevaheliste lühiste kaitseks, kui maalühiskaitseks ühte ja sama distantkaitset (nt ka Paide-Sindi, Püssi-Balti, Püssi-Kiisa 330 kV liinid (Siemensi 7SA513 ja 7SA511)), Sindi trafo 110 kV poole reservkaitse (siemensi 7SA511 – üks kaitseaste on suunatud taha, trafo poole ja Sindi alajaamast väljuvad 110 kV liinid ABB REL511), seejuures maalühiskaitse rollis tihti sõltuva rakendusajaga (ka pingel 400 kV, Eestis ei kasutata, kaitseseadmetes on see olemas). Vanemad Ida distantkaitset maalühiste tavaliselt ei reageeri. Siis kasutatakse maalühiskaitseks mitmeastmelist summavoolukaitset [3].

Distantkaitse ei ole elemendipõhine kaitse ning töötab tsoonide kaupa võimaldades mõõdetud näivtakistuse kaudu lahutada süsteemist rikke tsoon. Selleks mõõdab rele lühisvoolu ja pinget, et leida lühiskoha takistus [6] [1].

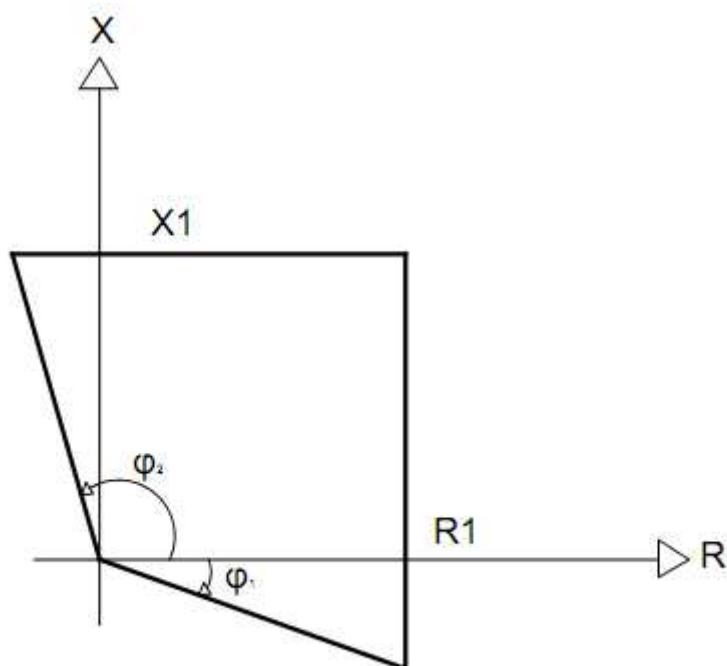


Joonis 6.1 Elektrisüsteemi lühised [6]

Joonisel 6.1 on toodud lihtsustatud süsteemiosa skeem. Punktides A ja B paiknevad distantskaitse releed, mis mõõdavad voolu ja pinget. Lühise F1 puhul on lühisekoha näivtakistuseks Z_{AF1} ning lühise F2 puhul on lühisekoha näivtakistuseks $Z_{AB} + Z_{BF2}$ [6].

6.1. Rakenduskarakteristik

Tänapäevaste mikroprotsessorreleede seas on kasutusel hulknurkse karakteristikuga distantsreleed. Sellist tüüpi karakteristikuga releel on võimalus sisestada releesse aktiiv- ning reaktiivtakistus eraldi [12]. Lühikeste liinide korral on reaktiivtakistuse releed praktilisem kasutada kuna mainitud rele tagab kiirema ja selektiivsema kaitse. See on tingitud kuna reaktiivtakistuse releel on praktiliselt mõjutamatu kaaretakistusest, mis võib olla küllaltki suur võrreldes liini näivtakistusega [13].



Joonis 6.2 Ühe tsooni tööpiirkond [12]

Joonisel 6.2 aktiiv- ja reaktiivteljestiku esimesse sektorisse jääb distantskaitse ühe tsooni tööpiirkond. Hulknurkse karakteristikuga distantsreleel reaktiivtakistuse säte seab horisontaalse piiri ning aktiivtakistuse säte vertikaalse piiri. Täielik rakenduspiirkonna tsoon tekib diagrammile, kui arvestada ka näivtakistuse nurka [12].

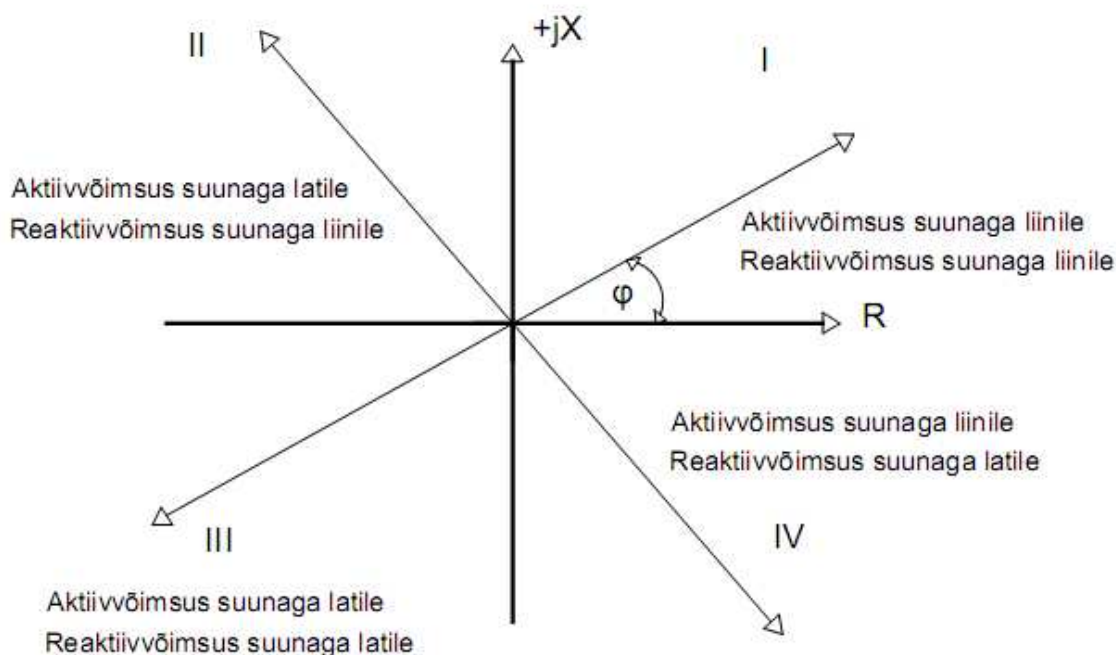
Kui on teada süsteemi ülekandeliini ülekantavaid võimsusi on võimalik ka nende abil leida koormustakistus ning kujutada seda aktiiv- reaktiivtakistuse diagrammil. Võimsuste ja takistuste vahelise suhted on toodud valemities 6.1 ja 6.2 [14].

$$R = \frac{U_n^2 \cdot P}{P^2 + Q^2} \quad (6.1)$$

$$X = \frac{U_n^2 \cdot Q}{P^2 + Q^2} \quad (6.2)$$

, kus R ja X on vastavalt aktiiv- ja reaktiivtakistused ning P ja Q on aktiiv- ja reaktiivvõimsused.

Selleks, et oleks võimalik koormustakistust kujutada teljestikul on vaja veel võimsustegurit (aktiivvõimsuse suhe näivvõimsusse) ning võimsuse suunda. Joonisel 6.3 on toodud R - X teljestik, kus on märgitud igasse sektorisse (I, II, III, IV) võimsuste suunad ning võimsusteguri nurk.

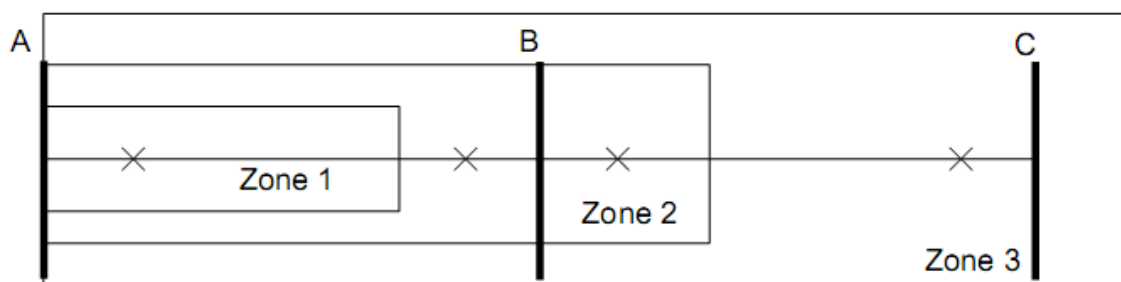


Joonis 6.3 Võimsuse suunad ning võimsustegur [14]

Kui aktiiv- ja reaktiivvõimsuse suund on joonise 6.1 järgi A latilt B latile, siis R-X teljestikul (joonis 6.3) asuvad need koordinaadid esimeses sektoris (joonis 6.3). Kui võimsustegur on null ehk liinil pole reaktiivkoormust siis on tegemist süsteemiga, mis juhib aktiivvõimsust ning kus vool ja pinge on faasis [14].

6.2. Sätete määramine

Põhiliseks eeliseks distantsreleede puhul on see, et kaitsetsoon sõltub kaitstava liini näivtakistusest, mis on konstantne ning võrdlemisi ei sõltu voolu ja pinge suurustest. Seega on distantsreleel kindel ulatus võrreldes liigvoolukaitsega mille ulatus sõltub vastavalt rele kaitsealast ning süsteemi eripärast [6]. Kuna elektrisüsteem muutub üha keerulisemaks ning lühisvoolud muutuvad süsteemi eripära tõttu siis on järjest keerulisem lisada süsteemi liigvoolukaitseid, kuid samas on võimalik kasutada distantskaitset, mille sätted jäävad konstantseks [15].



Joonis 6.4 Distantskaitse tsoonid [15]

Üldiselt on liinil 3 kaitsetsooni lühise suunas piki liini (joonis 6.4), et tagada liini põhikaitse ning kaugemate liinide reservkaitse. Mõnel juhul kasutatakse latikaitse puudumisel lisaastet alajaama lattide kaitsmiseks. Sellisel juhul on distantskaitse suunatud lattide poole ning peab olema kooskõlas alajaamast väljuva distantskaitse esimese astmega. Ulatus valitakse üldiselt küllaltki väike, kuna eesmärgiks on ainult lattide kaitse [6].

Distantskaitse esimene aste ehk tsoon ei tohi töötada üle liini ning valitakse tavaliselt kuni 85% liini pikkusest. Esimene aste on hetkkaitse ning rakendub ideaalsel juhul ilma lisa viiteta.

$$Z^I = 0,85 \cdot Z_{liin} \quad (6.3)$$

, kus Z^I on distantkaitse esimene aste ning Z_{liin} on kaitstava liini impedants.

Distantkaitse teine aste peab töötama liini lõpuni ning olema kooskõlas järgmisest alajaamast väljuva liini distantkaitse esimese astmega. Teine tsoon ulatub järgmisele liinile 20-72%.

$$Z^{II} = Z^I + k_v \cdot Z_{liin2}^I \quad (6.4)$$

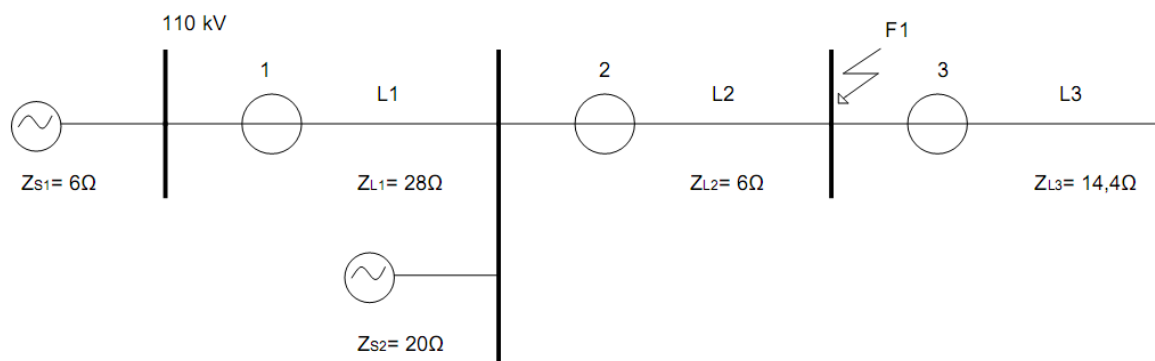
, kus Z^{II} on distantkaitse teine aste, k_v on välistustegur, Z_{liin2}^I on järgneva liini esimene aste.

Distantkaitse kolmandat astet kasutatakse latikaitse puudumisel, suunatuna taha (*backward*) ning eesmärgiga kaitsta alajaama latte. Antud kaitsel valitakse kaitse ulatusala väga väike, nii kaitstes alajaama latte kõige efektiivsemalt.

Distantkaitse neljas aste on kasutusel kaugreservkaitsena ning peab ulatuma üle järgmisest alajaamast väljuva kõige pikema liini.

6.3. Näidisülesanne 1

Joonisel 6.5 on toodud elektrivõrgu skeem, kus on lühis teise liini (L2) lõpus. Vaja on leida esimese liini (L1) distantkaitse esimese ja teise astme sätted. Sätete leidmiseks vajalikud liinide näivtakistused on toodud joonisel 6.5.



Joonis 6.5 Elektrivõrgu aseskeem [16]

Esmalt on tarvis vaja arvutada esimese ja teise liini (L1 ja L2) kõige kiirem aste (valem 6.3).

$$Z_{L1}^I = 0,85 \cdot 28 = 23,8 \Omega$$

$$Z_{L2}^I = 0,85 \cdot 6 = 5,1 \Omega$$

Antud skeemi järgi toidavad lühist F1 mõlemad generaatorid. Seega on vajalik leida ka jaotustegur, mis näitab esimest kaitsepunkti läbiva lühisvoolu ning kogu vaadeldavat lühisepunkti läbiva lühisvoolu suhet. Selleks on vaja leida aga lühisvool, mis liigub lühisepunkti läbi liini L1 ning samuti on vaja leida kogu lühisvool, mis läbib liini L2 [3] [16].

$$I_{L1} = \frac{110 \text{ kV}}{(6 + 28 + 6) \cdot \sqrt{3}} = 1,59 \text{ kA}$$

$$I_{L2} = \frac{110 \text{ kV}}{(20 + 6) \cdot \sqrt{3}} + 1,59 = 4,03 \text{ kA}$$

Jaotustegur k_{jt} avaldub:

$$k_{jt} = \frac{I_{L1}}{I_{L2}} = \frac{1,59}{4,03} = 0,39 \quad (6.5)$$

Arvutatud sätete põhjal on võimalik leida esimese liini teine aste. Välistusteguriks on võetud teisel astmel 0,78.

$$Z_{L1}^{II} = Z_{L1}^I + \frac{0,78 + Z_{L2}^I}{k_{jt}} = 23,8 + \frac{0,78 + 5,1}{0,39} = 34 \Omega \quad (6.6)$$

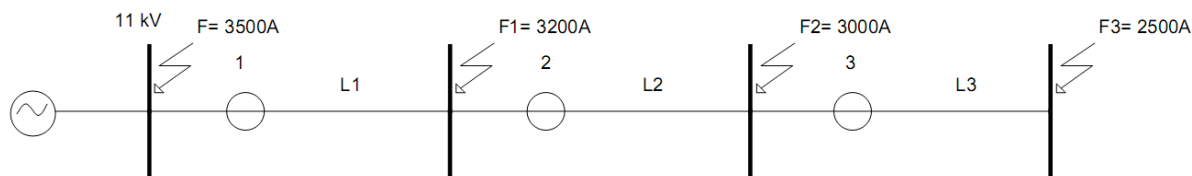
Esimese liini teise astme tundlikkustegur avaldub:

$$k_T = \frac{Z_{L1}^{II}}{Z_{L1}^I} = \frac{34}{28} = 1,21 \quad (6.7)$$

Tundlikkusteguri alusel on võimalik öelda, et teine aste ulatub 21% järgmisele liinile, mis on üldiselt ka kasutusel.

6.1. Näidisülesanne 2

Joonisel 6.6 on toodud võrgu lihtsustatud skeem. Skeemile on märgitud liinide lõpus olevad maksimaalsed kolmefaasilised lühised. Leida on vaja lühiste järgi süsteemi ning liinide takistused ning määrata esimese ja teise astme sätted liinile üks.



Joonis 6.6 Elektrivõrgu aseskeem [7]

Süsteemitakistus avaldub nimipinge ja esimese lühisvoolu kaudu:

$$Z_s = \frac{U_n}{I_F \cdot \sqrt{3}} = \frac{11}{3500 \cdot \sqrt{3}} = 1,8 \, \Omega$$

Liinide L1, L2 ja L3 takistused vastavalt:

$$Z_{L1} = \frac{U_n}{I_{F1} \cdot \sqrt{3}} - Z_s = \frac{11}{3200 \cdot \sqrt{3}} - 1,8 = 0,19 \, \Omega$$

$$Z_{L2} = \frac{U_n}{I_{F2} \cdot \sqrt{3}} - Z_s - Z_{L1} = \frac{11}{3000 \cdot \sqrt{3}} - 1,8 - 0,19 = 0,12 \, \Omega$$

$$Z_{L3} = \frac{U_n}{I_{F3} \cdot \sqrt{3}} - Z_s - Z_{L1} - Z_{L2} = \frac{11}{2500 \cdot \sqrt{3}} - 1,8 - 0,19 - 0,12 = 0,43 \, \Omega$$

Leitud takistustest leian esimese ja teise liini distantiskaitse esimese astme sätteid (valem 6.3):

$$Z_{L1}^I = 0,85 \cdot Z_{L1} = 0,16 \, \Omega$$

$$Z_{L2}^I = 0,85 \cdot Z_{L2} = 0,10 \, \Omega$$

Esimese liini teine aste avaldub seega:

$$Z_{L1}^{II} = Z_{L1}^I + 0,78 \cdot Z_{L2}^I = 0,23 \, \Omega$$

Esimese liini teise astme tundlikkustegur (valem 6.7):

$$k_T = \frac{Z_{L1}^{II}}{Z_{L1}} = \frac{0,23}{0,19} = 1,21$$

Tundlikkustegur on lubatavas piirides ning ulatub 21% üle esimese liini.

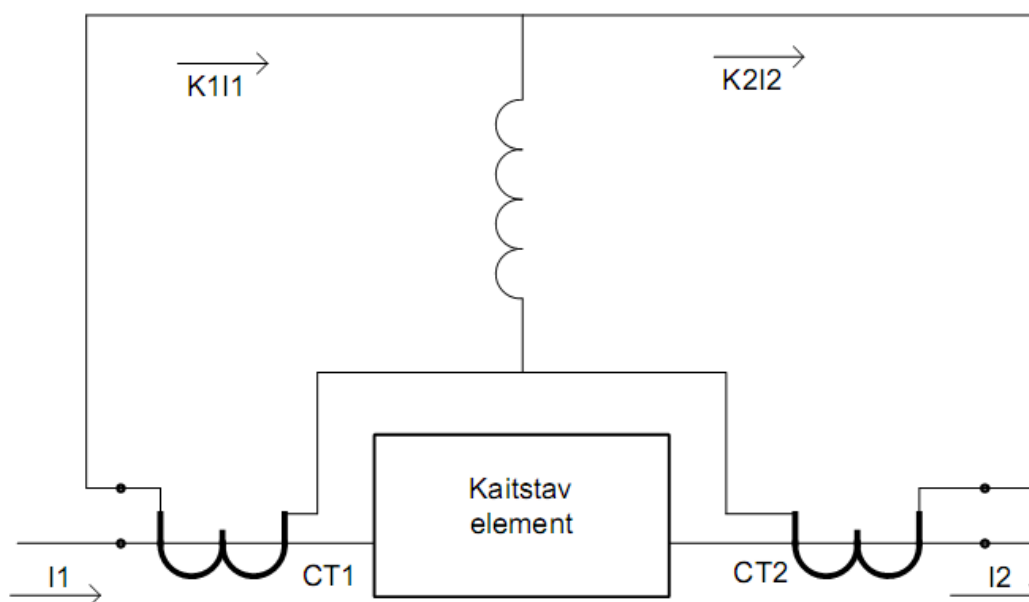
7. Diferentsiaalkaitse

Diferentsiaalkaitse puhul on tegemist absoluutselt selektiivse viiteta kaitsega. Kaitse reageerib, kui tunnussuurus ületab sätte väärtus ehk diferentsiaalkaitse on ülekaitse.

Diferentsiaalkaitse tunnussuuruseks on voolumoodulite või voolumoodulite ja –faaside erinevus kaitseobjekti otstes. Eristatakse kahte pikidiferentsiaalkaitse liiki [3]:

- Suurimpedantsdiferentsiaalkaitse
- Väikeimpedantsdiferentsiaalkaitse

Mõeldud on kaitstes kasutatava diferentsiaalvoolurelee näivtakistust võrreldes kaitse küllastunud voolutrafo sekundaarahela näivtakistusega. Suurimpedantsdiferentsiaalkaitset kasutatakse peamiselt põhivõrgus lattide kaitkena [3].



Joonis 7.1 Diferentsiaalkaitse skeem [6]

Lihtsustatud diferentsiaalkaitse näide on toodud joonisel 7.1. Voolutrafode sekundaarmähised on omavahel ühendatud diferentsiaalvoolureleega. Kuigi voolud I_1 ja I_2 võivad omavahel erineda on õigete voolutrafode ülekannete ja ühendusskeemide valikul välistatud olukord, kus normaaltingimustel võiks diferentsiaalkaitse rakenduda. Lühise korral kahe voolutrafo vahel on mõlemad primaarvoolud lühise suunalised ning sekundaarmähiste voolud liituvad ning

rakendavad diferentsiaalrelee. Diferentsiaalrelee sisendiks on vooluvektorite vahe (vahe moodustub kaitstava elemendi sisendvoolust ning väljundvoolust) [6].

7.1. Klassifikatsioon

Diferentsiaalkaitset on võimalik liigitada kaitstava elemendi või süsteemiosa järgi järgnevalt: [6]

- Transformaatorite kaitse
- Generaatorite kaitse
- Liinide ning lattide kaitse

7.2. Trafo diferentsiaalkaitse

Diferentsiaalkaitse süsteem võimaldab efektiivselt kaitsta trafot, kuna releede sisemine töökindlus on suur ning primaar- ja sekundaarmähistes tekkinud amper-keerdude suurus on ekvivalentne. Kaitstava trafo primaar- ja sekundaarmähise voolutrafod on ühendatud omavahel nii, et tekiks voolude ring sarnaselt joonisele 7.1. Lühised trafode klemmidel või mähistes on trafo kaitsetsoonis ning põhjustavad liigset koormust trafodele ja tuleks süsteemist võimalikult kiiresti eemaldada. Suur osa sisemistest lühistest, mis tekivad mähistes on maalühised või keerdude vahelised lühised. Lühise tõsidus sõltub trafo ehitusest ning maandusviisist [6].

Lisaks on diferentsiaalkaitse võimeline tunnetama ja eemaldama isolatsioonirikkeid trafo mähistes. Peamisteks taoliste rikete põhjusteks on kaare tekkimine trafo isolaatorites ning rikked trafo astmelülitites. Antud kaitse ei reageeri ainult faasidevaheliste ning faasi ja maa vahelistele lühistele vaid ka keerdudevahelistele lühistele. Kuigi kolmefaasiliste trafode puhul on keerdude faasidevaheline lühis harva esinev. Sisemine lühis või rike, mis ei ole tõsine või ei rakenda releed võib mitte avastamise korral areneda tõsiseks lühiseks. Peamised lühised isolatsioonirikete all on trafo südamikus ning mis on põhjustatud südamiku isolatsiooni lagunemisest [6].

Kui trafo on ühendatud täht/delta viisil on sekundaarvoolul faasinihe 30° võrreldes primaariga. Probleemi on võimalik lahendada kasutades sobilikku voolutrafode ühendusviisi. Lisaks ei indutseeri tähtühenduse poolel olev nulljärgnevusvool delta ühendusega pooles sarnast komponenti. Seega on võimalik eemaldada nulljärgnevusvool tähtühendusega poolest,

kui ühendada voolutrafod kolmnurk ühendusse. Samal põhjusel on vajalik ühendada ka kolmnurk ühenduse poolel voolutrafod tähtühendusse. Kui voolutrafod on ühendatud kolmnurk ühendusse on nende sekundaarvoolud vaja korrutada $\sqrt{3}$ tagamaks voolude võrdsuse tähtühendusse ühendatud voolutrafode omaga [6].

Kui trafol on astmelüliti on võimalik valida erinevaid pingeastmeid. Toitealajaamade trafodel on reguleerimisastmeid rohkem. Välja võib tuua 110 kV trafo millel on võimalik pinget reguleerida $\pm 9 \times 1,78\%$. Toitealajaamade trafod on koormuse all reguleeritavad, jaotustrafod aga mitte. Sellistel trafodel on võimalik pingeastet muuta ainult väljalülitatud olukorras. Kuna voolutrafode ülekandeid ei ole otstarbekas muuta peab diferentsiaalreaktsioonil olema sobiv tolerantsi ala mida saaks muuta vastavalt valitud pingeastmele [6] [2].

Kui trafot pingestatakse või kui primaarpinge normaliseerub pärast lühise lahutamist võrgust läbib trafot tõukevool (*magnetisation inrush*). Tõukevool tekitab trafo primaarpooles voolu, kuid sekundaarpooles see üle ei kandu ning tekib trafo siserikkele sarnane olukord. Kuna rele näeb seda, kui siseriket on vajalik releel eristada tõukevoolu ning lühisvoolu. Nendeks meetoditeks on [6] [17]:

- Kasutada sobiva tundlikkusega diferentsiaalreleed, mis tuleks toime tõukevooluga. Tüüpiliselt kasutatakse ajaviidet, mis katab tõukevoolu tipu kestvuse.
- Kasutada harmooniku blokeeringut koos diferentsiaalreleega.
- Trafo sisselülitamise hetkel blokeerida diferentsiaalrelee.

7.2.1. Voolutrafode valik ja ühendusviis

Diferentsiaalreaktsiooni puhul on vaja arvestada voolutrafode valikul ja ühendusviisil järgnevate punktidega [6]:

- Üldiselt on tarvis ühendada täht/kolmnurk ühenduses oleva trafo voolutrafod täht ühenduse poole peal kolmnurka, ning kolmnurk ühenduse poolel tähtühendusse. Sellisel korral on kompenseeritud trafo ülekandel tekkiv faasinurga muutus ning blokeeritud on nulljärgnevusvool väliste maalühiste korral.
- Releed peavad olema suutelised vastu võtma koormusvoolusid, mis sisenevad trafo primaarpooles ja väljuvad sekundaarpooles. Rohkem kui kahe mähisega trafo puhul on vajalik uurida kõiki võimalikke kombinatsioone.

- Voolutrafode ülekandesuhte valikul tuleb lähtuda süsteemi maksimaalkoormusest nii primaarpoolel, kui ka sekundaarpoolel.

7.3. Generaatori diferentsiaalkaitse

Generaatori diferentsiaalkaitse on mitmel viisil sarnane trafo kaitsega. Generaatori sisesteks lühisteks on faasidevahelised lühised, lühistunud keerud, avatud vooluahelad ning maalühised. Selleks, et saavutada kõige efektiivsem kaitsetase peab olema generaatori neutraal maandatud kas jäigalt, läbi takistuse või läbi induktiivsuse. Generaatori diferentsiaalkaitse peaks vastama järgnevatele tingimustele [6]:

- Kaitse peab olema piisavalt tundlik, et reageerida staatori mähiste isolatsiooniriketele ning samas mitte rakenduma väliste rikete korral.
- Kaitse peab töötama piisavalt kiiresti, et generaator lülitatakse välja enne kui seadmele võib tõsine kahju tekkida.
- Kaitse peab olema projekteeritud nii, et kaitse rakendumisel lülitatakse välja kõik generaatori lülitid ning kustutatakse väli.

7.4. Liinide diferentsiaalkaitse

Joonisel 7.1 toodud diferentsiaalkaitse lahendus ei ole sobilik liinide kaitseks kuna pikkade liinide puhul on kaitstava liini otspunktid üksteisest liiga kaugel, et ühendada voolutrafod. Selle asemel on vajalik ühendada liini otstesse eraldi releed ning ühendada need omavahel sobiva sideühendusega [6].

Kaitse tööpõhimõte on sarnane trafo ja generaatori diferentsiaalkaitsega, kuid otstes paiknevatel releedel on erinevad sätted, mis tingitud võimsuslülitite vahelisest kaugusest ning vaid ühte releed (mis töötaks mõlemale võimsuslülitile) ei tohi kasutada. Antud kaitse on ideaalne teoreetilisest vaatepunktist kuna lühise korral liinil lahutatakse mõlemad liini võimsuslülitid. Lisaks ei rakenda kaitset lühised väljaspool kaitstavat ala, mis muudab kaitse absoluutselt selektiivseks. Vanade sidelahenduste puhul võisid indutseeritud voolud halvendada diferentsiaalkaitse töökindlust, kuid uuemate fiiberoptiliste kaablite kasutuselevõttuga on probleemid lahenenud [6].

7.5. Lattide diferentsiaalkaitse

Lati diferentsiaalkaitse tööpõhimõte põhineb trafo ja generaatori diferentsiaalkaitisel. Süsteemi normaalolukorras on lattidele sisenevad ja väljuvad voolud identsed. Lühise olukorras on

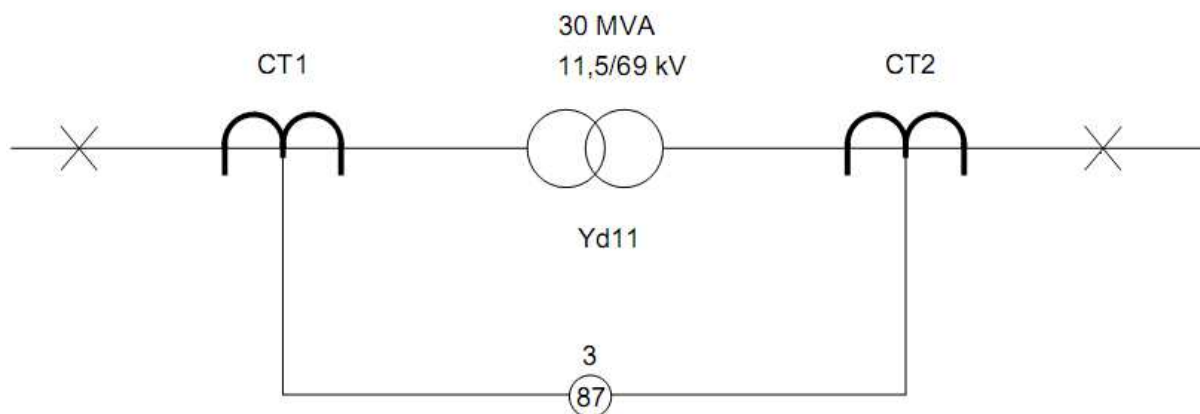
diferentsiaalkaitse süsteemis eabilanss ning relee mähises on vool, mis rakendab kaitse lülitades kõik latiga seonduvad võimsuslülitid välja [6].

Kuna lattidega on ühenduses mitu ahelat on vaja kasutada ka mitut voolutrafit paralleelühenduses. Ilma raskusteta on võimalik ühendada 6 kuni 8 voolutrafit paralleeli. Kasutatakse ka suure näivtakistusega releesid nende töökindluse poolt. Suure impedantsiga releed sunnivad vale diferentsiaal voolu läbi voolutrafode mis ei põhjusta relee valet rakendumist [6].

Suur osa lühistest on faasi ja maa vahelised ning põhjustajateks on kas äike või rike jaotusseadme isolatsioonis [6].

7.6. Näidisülesanne 1

Joonisel 7.2 on toodud trafo parameetritega 30 MVA, 11,5/69 kV. Leida on vaja voolutrafode ülekandesuhe ning kasutatav vooluvahemik. Antud diferentsiaalrelee valitavad vooluvahemikud on: 5.0-5.0, 5.0-5.5, 5.0-6.0, 5.0-6.6, 5.0-7.3, 5.0-8.0, 5.0-9.0 ja 5.0-10.0 A [6].



Joonis 7.2 Ühejoone skeem näidisülesandes 1 [6]

Voolutrafode ülekannetesuhete tarbeks on vajalik leida koormusvoolud trafo primaar- ja sekundaarahelates. Selleks saab kasutada valemit 5.9.

$$I_{koormus(69kV)} = \frac{30 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 69 \text{ kV}} = 251 \text{ A}$$

Koormusvool alampinge poolel:

$$I_{koormus(11,5kV)} = \frac{30 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 11,5 \text{ kV}} = 1506 \text{ A}$$

Selleks, et suurendada tundlikkust on mõistlik sekundaarpoolele valida voolutrafo, mille nimivool on võimalikult ligilähedane maksimaalse koormusvooluga. Selleks on sobiv voolutrafo suhtega 1500/5A. Voolutrafode valikul tuleb arvestada et sekundaarvoolud oleksid balansis. Seega kõrgema pinge poole tuleks valida voolutrafo nimivooluga: $1506 \cdot (5/1500) \cdot \sqrt{3} = 251 \cdot (5/X)$, lahendades võrrandi saame tulemuseks, et $X=144$. Antud lahend soovitaks valida trafo suhtega 150/5, mis on tulemile kõige lähedasem. Kui võtta arvesse fakti, et diferentsiaalreleel on mitu valitavat vooluvahemikku (mis ühtlustavad erinevate voolutrafode ülekannete kasutamise korral tekkiva vea) siis ei ole tingimata vaja kasutada ülesandes leitud ülekannet. Antud ülesandes on võetud ülempinge poole peal kasutusse voolutrafo ülekandesuhtega 250/5A, mille nimivool on lähedasem koormusvoolule [6].

Viimaks on vajalik kontrollida, kas valitud voolutrafode ülekanded on sobivad rele vooluvahemikega. Selleks on vaja leida voolutrafode sekundaarvoolud ülem- ja alampinge poolel:

$$I_{relee(69kV)} = 251 \cdot \frac{5}{250} = 5,02 \text{ A}$$

$$I_{relee(11,5kV)} = 1506 \cdot \frac{5}{1500} \cdot \sqrt{3} = 8,69 \text{ A}$$

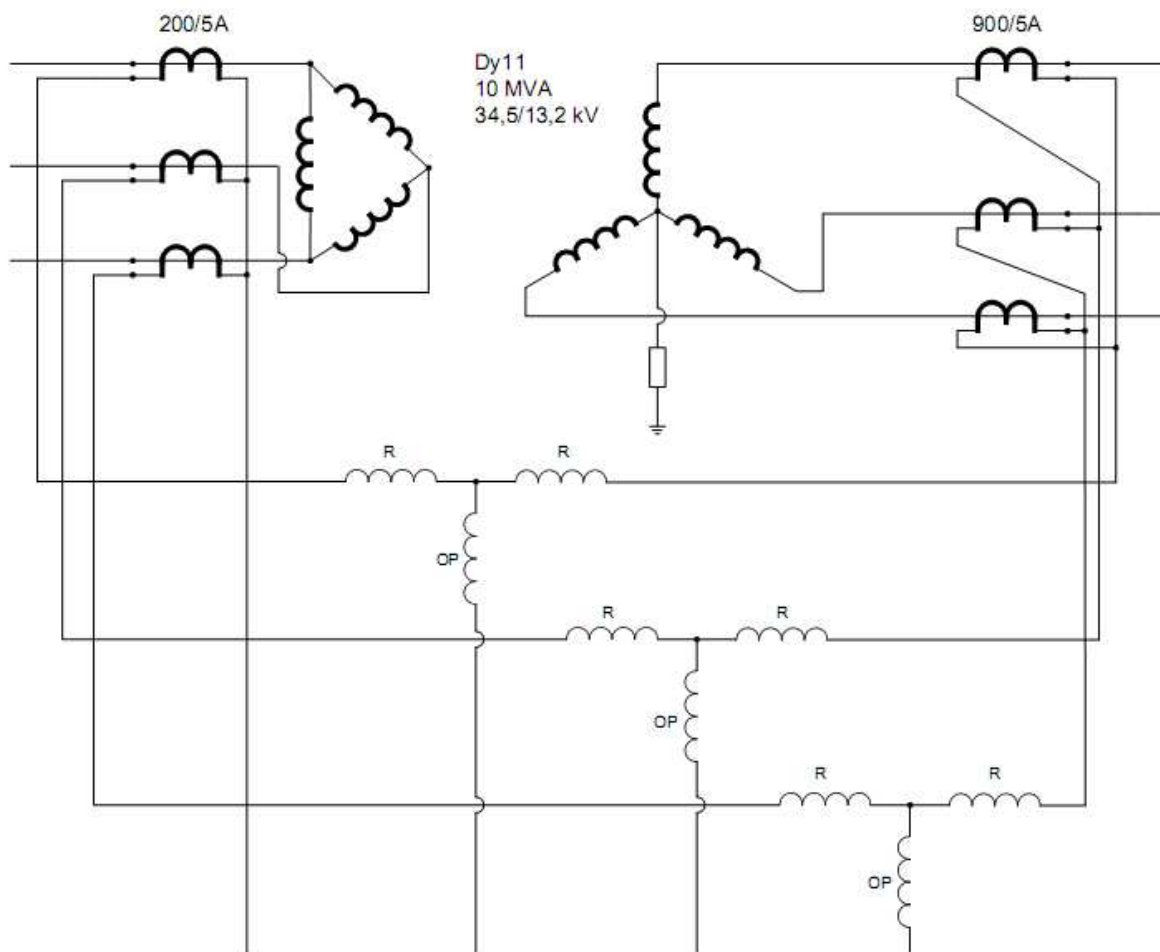
Sobivaks vooluvahemikuks tuleks valida 5.0-9.0 A.

7.7. Näidisülesanne 2

Joonisel 7.3 on toodud trafo parameetritega 10 MVA, 34,5/13,2 kV. Voolutrafode ülekanded 34,5 kV poolel on 200/5A ning 13,2 kV poolel 900/5A.

Leida on vaja primaar- ning sekundaarvoolude suurused ning faasinurgad.

Diferentsiaalrele minimaalne tööpiirkond on 20% nominaalvoolust, milleks on 5A. Seega on rakenduspiiriks vähemalt 1A. Kontrollida tuleb, kas normaalolukorras rele mähist läbiv vool võib rakendada rele.



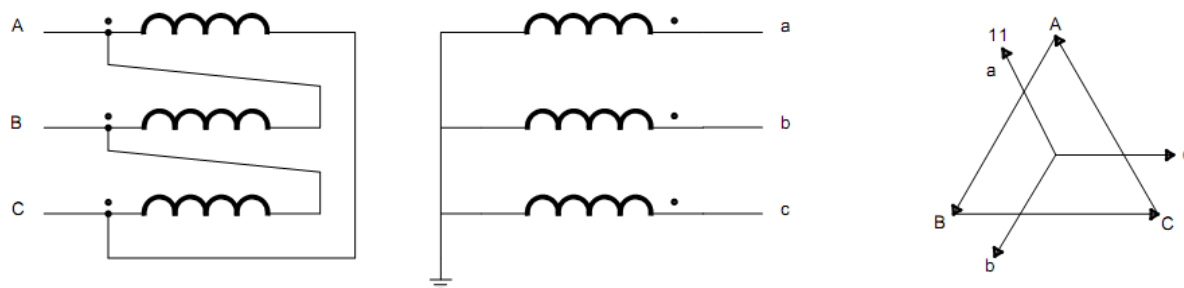
Joonis 7.3 Voolutrafode ühendusskeem näidisülesandes 2 [6]

Esmalt on vaja leida jõutrafo primaar- ning sekundaarpoole koormusvoolud sarnaselt ülesandele 1.

$$I_{koormus(34,5kV)} = \frac{10 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 34,5 \text{ kV}} = 167,35 \text{ A}$$

$$I_{koormus(13,2kV)} = \frac{10 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \cdot 13,2 \text{ kV}} = 437,39 \text{ A}$$

Trafo ühendusskeem koos vektordiagrammiga on toodud joonisel 7.4.



Joonis 7.4 Trafo ühendusskeem ja vektordiagramm [6]

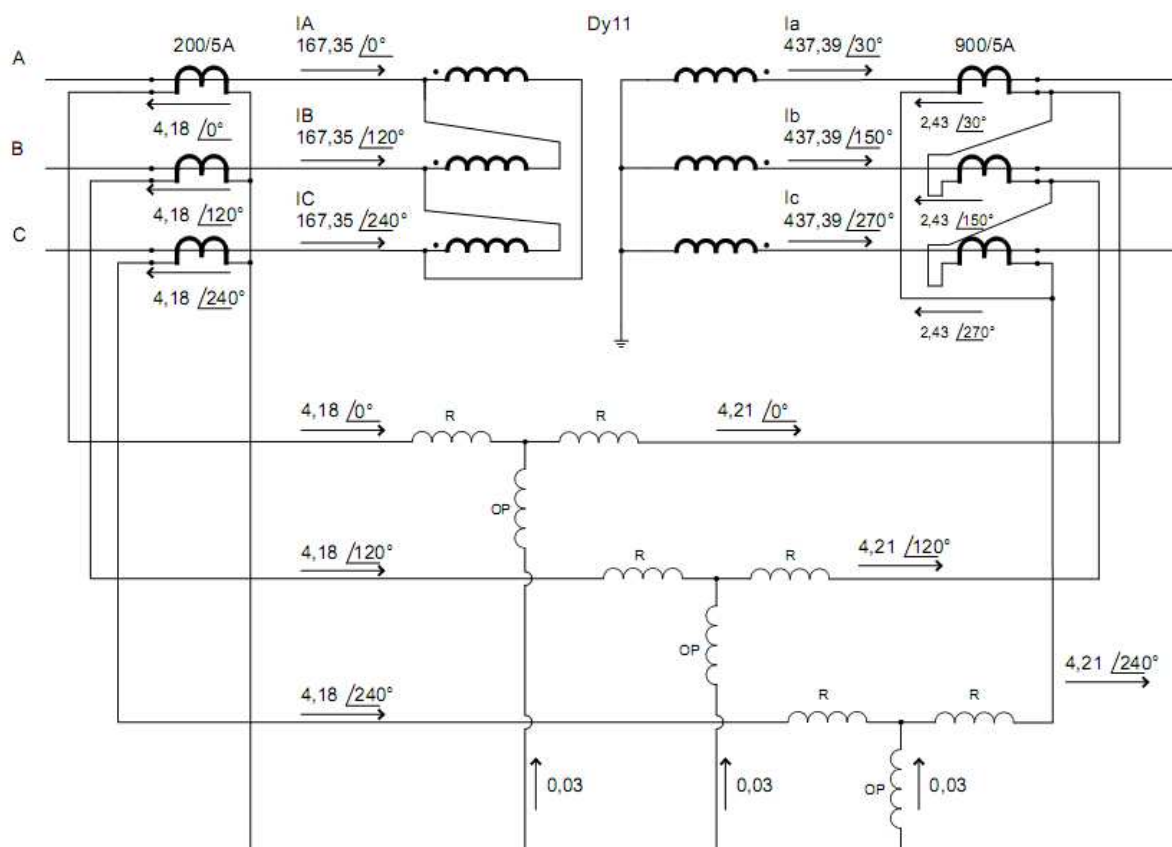
Joonisel 7.5 on toodud nii primaar- kui sekundaarvoolud normaaltingimustel. Sekundaarvoolud, mis jõuavad diferentsiaalreleesse avalduvad:

$$I_{relee(34,5kV)} = 167,35 \cdot \frac{5}{200} = 4,18 \text{ A}$$

$$I_{relee(13,2kV)} = 437,39 \cdot \frac{5}{900} \cdot \sqrt{3} = 4,21 \text{ A}$$

Sekundaarvoolude arvutamisel tuleb kindlasti arvesse võtta, et trafo tähtühenduse poolel on voolutrafo ühendatud kolmnurka. Sellisel juhul voolud, mis jõuavad diferentsiaalrele mähisesse on $\sqrt{3}$ korda suuremad, kui kolmnurk ühenduses olevates voolutrafo mähistes.

Reaalse sätte arvutamisel tuleb arvestada sellega, et vooluandurite magnetimiskõverad on erinevad ning lisanduvate mõõtevigadega koos tekib hälbevool, mis võib viia rele liigrakendumiseni (ebavajalik kaitse rakendumine). Selle jaoks on vajalik sätte arvutamisel arvesse võtta nii lühisvoolu aperioidiline komponent, kui ka voolutrafo viga arvestav tegur [3].



Joonis 7.5 Sekundaar- ja primaarvoolude skeem normaaltingimustel [6]

Normaalolukorras voolab läbi diferentsiaalrelee vool suurusega 0,03A. Kuna tegemist on väga väikese vooluga mis on väiksem relee rakendusvoolust, milleks on 1A siis võib kindel olla, et relee ei rakendu normaalolukorras diferentsiaalrelee mähist läbivale voolule.

Lõputöö kokkuvõte

Antud töö eesmärgiks oli kirjeldada Eesti kõrg- ja keskpingevõrkudes kasutusel olevate releekaitse sätete valikute põhimõtteid ning arvutamise meetodikat. Teema on äärmiselt vajalik kuna kõrg- ja keskpingevõrkudes on releekaitse rikete minimeerimiseks väga laialdaselt kasutuses.

Releekaitse ja elektrisüsteemi anormaaltalitluse paremaks mõistmiseks on töös välja toodud põhjalik kirjeldus nende olemusest. Kirjeldatud on süsteemi talitlust iseloomustavaid parameetreid ning põhilisi rikkeid:

- Põikrike
- Pikirike
- Kombineeritud rike

Lõputöö teises peatükis on kirjeldatud elektrisüsteemi talitluse reguleerimist ning juhtimist. Selgitatud on kuidas peaks süsteem ning süsteemis paiknevad automaatseadmed reageerima riketele ning millised on peamised süsteemi talitluse olekud:

- Normaaltalitlus
- Kriitiline talitlus
- Avariitalitlus
- Avariijärgne talitlus

Järgmine peatükk keskendub releekaitse olemuse ja mõiste selgitamisele. Jaotise eesmärk on välja tuua releekaitse põhilised omadused ning kuidas need mõjutavad elektrisüsteemi talitluse efektiivsust. Koordineeritud releekaitse peab tagama rikete kiire, selektiivse ja töökindla väljalülituse kogu elektrivõrgu ulatuses.

Uuritud on millised on põhilised kaitstavad objektid ning milliseid kaitseid erinevate elementide puhul peaks rakendama. Põhilised uurimise all olevad kaitseobjektid on:

- Ülekandeliinid
- Trafod
- Alajaamade latid

Põhilisteks kaitseteks kõrg- ja keskpingevõrkudes on liigvoolukaitsed. Kaitse põhimõte on reageerida suurtele liigvooludele kiirelt ning väiksematele liigvooludele viitega.

Liigvoolukaitse puhul on tegemist ülekaitsega, mis on suhteliselt selektiivne. Voolukaitse jaguneb reageerimisaja järgi kolmeks eri tüüpi kaitseks, milleks on:

- Hetkkaitse – I aste
- Sõltumatu viitega – II aste
- Sõltuva viitega kaitse – III aste

Sätete arvutamise meetodikas on tähtsalt kohal tundlikkustegur, mis näitab et kaitse tööalal tekkiv lühis käivitab voolurelee. Lisaks on olulisel kohal töökiirus ja selektiivsus. Kaitse rakendusaja määramisel tuleb arvestada liinile lubatava lühisvoolu ajaga ning eelnevate kaitsete viidete aegadega. Töös toodud liigvoolukaitse ülesannetes on väljatoodud milliste varuteguritega peaks arvestama ning kuidas peaks tundlikkustegurit arvutama. Iga ülesande puhul on valitud andmed nii, et lahenduskäik oleks erinev.

Järgnevalt on autor kirjeldanud distantskaitse tööpõhimõtet ning arvutamise printsiipe. Sarnaselt liigvoolukaitsele on distantskaitse suhteliselt selektiivne, kuid reageerib tunnussuuruse langemisele ehk on alakaitse. Lisaks on distantskaitse astmeline ning astmeid on töös kirjeldatud järgnevalt:

- I aste – Esimene aste ehk tsoon ei töötada üle liini ning valitakse tavaliselt kuni 85% liini pikkusest.
- II aste – Teine aste peab töötama liini lõpuni ning olema kooskõlas järgmisest alajaamast väljuva liini distantskaitse esimese astmega. Teine tsoon ulatub järgmisele liinile 20-72%.
- III aste – Kolmandat astet kasutatakse latikaitse puudumise suunatuna taha ning eesmärgiga kaitsta alajaama latte.
- IV aste – Neljas aste on kasutusel kaugreservkaitsena ulatudes üle järgmisest alajaamast väljuva kõige pikema liini.

Distantskaitse näidisülesannetes on arvatud liinidele esimese ja teise astme sätteid ning leitud ka kaitsete tundlikkustegurid.

Kolmanda põhiliselt kasutatud kaitsena on kirjeldatud diferentsiaalkaitset, mis on absoluutselt selektiivne ülekaitse. Lõputöös on kirjeldatud antud kaitse põhilisi kasutuskohti ning millega tuleks kaitse projekteerimisel arvestada. Diferentsiaalkaitse ülesannetes on keskendunud normaaltalitluse voolude arvutamisele ning kontrollimisele kas hälbevool on piisavalt väike. Ülesandeid on illustreeritud joonistega, mis annavad selgema pildi, kuidas diferentsiaalreele tööpõhimõte toimib.

Magistritöö peamiseks eesmärgiks oli kirjeldada Eesti kõrg- ja keskpingevõrkudes kasutatavate põhiliste releekaitse sätete arvutamise meetoodikat. Lõputöö väljundiks on sätete määramise juhendid ning nende rakendamise illustreerimiseks koostatud ja otsitud näidisülesanded.

Kirjandus

- [1] A. F. Sleva, Protective Relay Principles, Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [2] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, Jaotusvõrgud, Tallinn: TTÜ, 2007.
- [3] H. Tammoja, Automaatika ja releekaitse, Tallinn: TTÜ, 2001.
- [4] R. Peeter, Elektrivõrkude talitluse analüüs ja juhtimine I osa, Tallinn: TTÜ, 2000.
- [5] C. Bayliss ja B. Hardy, Transmission and Distribution Electrical Engineering, 2011.
- [6] J. M. Gers ja E. J. Holmes, Protection of Electricity Distribution Networks 2nd Edition, London: IEE, 2004.
- [7] M. E. El-Hawary, Electrical Power Systems, New York: IEEE, 1995.
- [8] S. I. Nopri, *Releekaitsearvutused*, Tallinn: Elektrilevi, 2013.
- [9] M. Ärmpalu, *Releekaitse sätete arvutuse projekt*, Tallinn: Elektrilevi, 2014.
- [10] E. Csanyi, „Principles and Characteristics of Distance Protection,“ Electrical Engineering portal, 2012.
- [11] N. Ashton, K. A. Coates ja P. C. Colbrook, Power System Protection 2 Systems and Methods, New York: Peter Peregrinus Ltd., 1986.
- [12] ABB Oy, „ABB,“ 2008. [Võrgumaterjal]. Available: https://library.e.abb.com/public/602e9601f9afb4f2c1257520002ca2d8/appl_REF542plus_distance%20protection_756605_ENa.pdf. [Kasutatud 14 Mai 2015].
- [13] GE Digital Energy, „<http://www.gedigitalenergy.com>,“ 2015. [Võrgumaterjal]. Available: <http://www.gedigitalenergy.com/multilin/notes/artsci/art14.pdf>. [Kasutatud 15 Mai 2015].
- [14] C. Rincon, J. Perez ja R. Midence, „Calculating loadability limits of distance relays,“ Protective Relay Engineers, 65th Annual Conference, 2012.
- [15] L. L. Grigsby, Power System Stability and Control, Boca Raton: CRC Press, 2012.

- [16] А. М. Авербух , Релейная защита в задачах с решениями и примерами, Leningrad, 1975.
- [17] A. Hosny ja V. K. Sood, „Transformer differential protection with phase angle difference based inrush restraint,“ *Electric Power Systems Research*, nr 115, pp. 57-64, 2014.