



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**MAAÜHENDUSKAITSE KOORDINEERIMINE
RESONANTSMAANDATUD VÕRGUS**

**COORDINATION OF EARTH FAULT PROTECTION IN
RESONANCE GROUNDED NETWORKS**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Henry Kapp

Üliõpilaskood: 176802AAVM

Juhendaja: Marko Tealane, nooremteadur

Tallinn 2021

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.

"....." 202.....

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." 202.....

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

"....."202... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Henry Kapp

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Maaühenduskaitse koordineerimine resonantsmaandatud võrgus“, mille juhendaja on Marko Tealane

1.1 reprodutseerimiseks lõputöö säilitamise ja elektroonse avaldamise eesmärgil, sh Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogusse lisamise eesmärgil kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

1.2 üldsusele kättesaadavaks tegemiseks Tallinna Tehnikaülikooli veebikeskkonna kaudu, sealhulgas Tallinna Tehnikaülikooli raamatukogu digikogu kaudu kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni.

2. Olen teadlik, et käesoleva lihtlitsentsi punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

3. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest ning muudest õigusaktidest tulenevaid õigusi.

18.05.2021

¹ Lihtlitsents ei kehti juurdepääsupiirangu kehtivuse ajal vastavalt üliõpilase taotlusele lõputööle juurdepääsupiirangu kehtestamiseks, mis on allkirjastatud teaduskonna dekaani poolt, välja arvatud ülikooli õigus lõputööd reprodutseerida üksnes säilitamise eesmärgil. Kui lõputöö on loonud kaks või enam isikut oma ühise loomingu tegevusega ning lõputöö kaas- või ühisautor(id) ei ole andnud lõputööd kaitsvale üliõpilasele kindlaksmääratud tähtajaks nõusolekut lõputöö reprodutseerimiseks ja avalikustamiseks vastavalt lihtlitsentsi punktidele 1.1. ja 1.2, siis lihtlitsents nimetatud tähtaja jooksul ei kehti.

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Henry Kapp

Lõputöö liik: Magistritöö

Töö pealkiri: Maaühenduskaitse koordineerimine resonantsmaandatud võrgus

Kuupäev: 18.05.2021

100 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendaja: nooremteadur Marko Tealane

Sisu kirjeldus:

Lõputöös uuritakse resonantsmaandatud jaotusvõrgu suunatud maaühenduskaitset teostavate terminalide omavahel selektiivse töö saavutamise võimalusi. Käsitletakse püsivat ja vilkuva kaarena kulgevat ühefaasilist lühist ja levinumate maaühenduskaitse algoritmide tööpõhimõtteid. Analüüsitakse maalühise siirdeprotsessi transiente ja näidatakse, kuidas maaühenduskaitseid neid lühiste tuvastamiseks kasutavad.

Maaühenduskaitse testimiseks koostati Elektrilevi 20 kV võrgu mudel reaajasimulaatoril RTDS. Mudelit rakendati Elektrilevi võrgus kasutatava tundliku suunatud maaühenduskaitse ja transientkaitse testimiseks. Võrdluseks testiti ABB mitmesageduslikku juhtivuskaitset. Katsetel kasutati kahte reaajasimulaatoriga seotud ABB REF620 terminali. Kaitsete tundlikkust, selektiivsust ja töökindlust uuriti eri toiterežiimidel püsivatel ja vilkuva elektriakaarega lühistel.

Leiti, et tundlik suunatud maaühenduskaitse ja transientkaitse ei võimalda resonantsmaandatud režiimil terminalide omavahel selektiivset tööd. Mitmesagedusliku juhtivuskaitsega saavutati selektiivsus, kui jadamisi kaitsete vaheline viide ületas kaarepooli transiendi sumbumisaega. Pakuti välja mitmesageduslikul juhtivuskaitseel põhinev koordineeritud maaühenduskaitse skeem.

Jadamisi võimsuslüliteid kasutava resonantsmaandatud võrgu koordineeritud kaitse on võimalik, kui kasutada selleks sobivaid algoritme. Algoritmi sobivust võib hinnata testidega jaotusvõrgu RTDS mudelil.

Märksõnad: elektrijuhtivus, jaotusvõrgud, releekaitse, resonants

ABSTRACT

<i>Author:</i> Henry Kapp	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Coordination of Earth Fault Protection in Resonance Grounded Networks	
<i>Date:</i> 18.05.2021	<i>100 pages</i>
<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	
<p><i>Abstract:</i></p> <p>This Master's thesis investigates the feasibility of creating a selective tripping scheme for directional earth fault protection in a compensated distribution network. Steady-state and arcing single-phase earth faults are studied along with commonly used earth-fault protection functions. Earth fault transients and methods for their detection are described.</p> <p>To test earth fault protection functions, a Real Time Digital Simulator model of Elektrilevi's 20 kV network was designed. Sensitive Directional Earth Fault Protection and Intermittent Earth Fault Protection functions used in Elektrilevi's networks were tested along with the novel ABB Multi-Frequency Admittance Protection. Two ABB REF620 terminals were used in conjunction with the Real Time Digital Simulator. The sensitivity, selectivity and reliability of protection functions were studied by simulating steady-state and arcing faults in different network configurations.</p> <p>The results suggest that Sensitive Earth-Fault Protection and Intermittent Earth Fault Protection are not suitable for selective tripping in compensated networks. Multi-Frequency Admittance Protection achieved selective tripping of terminals on the same earth fault current path, if the difference in operating times was sufficient for ASC transient damping. A Multi-Frequency Admittance Protection based earth fault protection coordination scheme was proposed. Coordinated protection of compensated networks can be achieved by using suitable protection functions. Protection functions can be assessed with tests on the distribution network's RTDS model.</p>	
<i>Keywords:</i> Admittance, Distribution Networks, Power System Protection, Resonance	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Maaühenduskaitsese koordineerimine resonantsmaandatud võrgus
Lõputöö teema inglise keeles:	Coordination of Earth Fault Protection in Resonance Grounded Networks
Üliõpilane:	Henry Kapp, 176802AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Marko Tealane
Lõputöö kaasjuhendaja:	
(ettevõtte, amet ja kontakt)	
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	31.01.2022
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

1. Teema põhjendus

Elektrilevi võrk on elektromehhaanilistelt digitaalsetele kaitsetele ülemineku protsessis ja maaühenduskaitseid on võrgus vähe uuritud. Hetkel on Elektrilevis levinuim praktika ühefaasiliste lühiste manuaalne välja lülitamine. Perspektiivikam lahendus on aga maalühiste automaatne väljalülitamine. Seetõttu uuritakse töös erinevaid Elektrilevi seadmetepargi maaühenduskaitsete algoritme ja püütakse leida kõige tõhusamaid konfiguratsioone, et saavutada lühise võimalikult kiire ja selektiivne väljalülitus. Erinevate piirtingimuste ja kaitsete jaoks keerulisemate võrgu sündmuste simuleerimine võimaldab õigemini valida maaühenduskaitsete funktsioone ja sätteid ning rakendada automaatset väljalülitust väiksema eksimuse ohuga.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärgiks on selgitada parim viis maaühenduskaitse koordineerimiseks resonantsmaandatud võrgus ja Elektrilevi võrgus väljalülitamisele töötavate võrguosade maaühenduskaitse koordineerimismetoodika väljatöötamine.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Kuidas ühefaasilist lühist modelleeritakse ja millisel viisil levinumad maaühenduskaitsete algoritmid seda tuvastavad? Kuidas käituvad Elektrilevi võrgus kasutusel olevate seadmete maaühenduskaitse funktsioonid erinevates rikkeolukordades – milliste võrgu sündmuste korral pruugib kaitse töötada mitteootuspäraselt? Milliseid maaühenduskaitse funktsioone ja sätteid valida, et maaühenduse isoleerimine toimuks kõige töökindlamalt?

4. Lähteandmed

Teaduskirjandus IEEE andmebaasist, maaühenduskaitse koolituste ja seminaride materjalid, seadmete manuaalid tootjate kodulehtedelt, standardid, Elektrilevi infosüsteemid (NIS, IPS jt.), releekaitse terminalide ja kvaliteedi analüsaatorite salvestused. Instituudis varem maaühenduskaitse teemal kirjutatud tööd nagu „Keskpinge võrkude maalühiskaitse“ Gabitov, V. „Isoleeritud neutraaliga ja resonantsmaandatud võrkude maalühiskaitse“ Rikken, R. ja „Maaühenduskaitse isoleeritud neutraaliga ja resonantsmaandatud keskpingevõrgus“ Klaos, H. K.

5. Uurimismeetodid

Analüüsitakse teaduskirjandust ja maaühenduskaitsete tootjate materjale. Seejärel modelleeritakse Elektrilevi võrku RTDS tarkvaras. Mudel verifitseeritakse võrgus olevate seadmete häiresalvestuse info alusel. Mudelil viiakse läbi võrgu rikete simulatsioone RTDS seadmega, kasutades kaitsetena füüsilisi võrgus levinud maaühenduskaitse terminale. Analüüsitakse simulatsioonide tulemusi ning teaduskirjanduse ja simulatsioonide tulemuste alusel optimeeritakse maaühenduskaitse algoritmide ja sätete valik.

6. Graafiline osa

Ühefaasilise lühise teket ja kaitset kirjeldavad teoreetilised mudelid ja faasordiagrammid. RTDS mudeli ja simulatsioonide tulemuste joonised.

7. Töö struktuur

Esimeses peatükis ühefaasilise lühise teoreetiline kirjeldus ja selle modelleerimine. Teises peatükis maaühenduskaitse algoritmide kirjeldused. Kolmandas peatükis RTDS mudeli koostamine ja verifitseerimine. Neljandas peatükis simulatsioonide tulemused ja nende analüüs. Viiendas peatükis soovitused maaühenduskaitsete koordineerimiseks.

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Teaduskirjandus: teadusartiklid, diplomitööd, erialased raamatud. Koolituste ja seminaride materjalid, seadmete manuaalid. IEC, IEEE standardid. Elektrilevi dokumentatsioon: juhendid, võrgustandardid, tegevuskavad.

9. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine ja analüüs. (november - detsember 2020)
- Teoreetilise osa kirjutamine. (dets 2020 – 25.01.2021)
- Kaitsemudeli loomine ja testimine. (25.01.2021 – 15.02.2021)
- Katsetuste teostamine. (15.02.2021 – 01.03.2021)
- Katsetulemuste kirjeldamine ning analüüs. (15.03.2021 – 12.04.2021)
- Järelduste kirjutamine. (12.04.2021 – 14.04.2021)
- Kokkuvõtte kirjutamine. (14.04.2021 – 19.04.2021)
- Juhendajale esimeseks lugemiseks saatmine. (19.04.21)
- Paranduste sisseviimine.
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine. (11.05.21)
- Töö lõplik versioon valmis. (18.05.21)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT.....	5
LÕPUTÖÖ ÜLESANNE	6
EESSÕNA	12
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU	13
SISSEJUHATUS	16
1. ÜHEFAASILISE LÜHISE TEOREETILINE KÄSITLUS	18
1.1 Sümmeetriliste komponentide meetod	18
1.2 Jaotusvõrk normaaltalitusel	23
1.3 Ühefaasiline lühis isoleeritud võrgus	27
1.4 Ühefaasiline lühis kompenseeritud võrgus	33
2. ÜHEFAASILISE LÜHISE PRAKTILINE KÄSITLUS.....	38
2.1 Staatilised suunatud maaühenduskaitseid	38
2.1.1 Vooluline suunatud maaühenduskaitse.....	44
2.1.2 Staatiliste maaühenduskaitsete selektiivsus.....	46
2.1.3 Juhtivuslik suunatud maaühenduskaitse.....	48
2.2 Ühefaasilise lühise siirdeprotsess	51
2.3 Dünaamilised suunatud maaühenduskaitseid	58
2.3.1 Transient-maaühenduskaitse.....	58
2.3.2 Korduva maalühise kaitse	59
2.4 Mitmesageduslik juhtivuskaitse.....	60
3. REAALAJASIMULAATORI MUDELI KOOSTAMINE.....	66
3.1 Võrgu modelleerimine.....	67
3.2 Võrgu mudeli verifitseerimine	67
3.3 Lühiste modelleerimine	68
4. KATSED	74
4.1 Rikkestsenaariumite koostamine	74
4.2 Simulatsioonide sätete valik	75
4.3 Simulatsioonide tulemused.....	77
5. MAAÜHENDUSKAITSETE KOORDINEERIMINE	82
KOKKUVÕTE	84
KASUTATUD KIRJANDUS	86
LISAD	89
Lisa 1.1 MFA algoritmi katsetulemused: püsiv lühis kompenseerimata režiimil	90
Lisa 1.2 MFA algoritmi katsetulemused: püsiv lühis kompenseeritud režiimil	91
Lisa 1.3 MFA algoritmi katsetulemused: vilkuv kaar kompenseerimata režiimil	93

Lisa 1.4 MFA algoritmi katsetulemused: vilkuv kaar kompenseeritud režiimil.....	94
Lisa 2.1 Suunatud maaühenduskaitse katsetulemused: püsiv lühis kompenseerimata režiimil	95
Lisa 2.2 Suunatud maaühenduskaitse katsetulemused: püsiv lühis kompenseeritud režiimil	96
Lisa 2.3 Suunatud maaühenduskaitse katsetulemused: vilkuv kaar kompenseerimata režiimil	98
Lisa 2.4 Suunatud maaühenduskaitse katsetulemused: vilkuv kaar kompenseeritud režiimil	99
Lisa 3 Transientkaitse katsetulemused: vilkuv kaar kompenseerimata režiimil	100

EESSÕNA

Elektrilevis automaatika spetsialistina töötades uurisin, kuidas Elektrilevi võrgu automaatika kvaliteeti võiks teadustöö abil parandada. Leidsin, et Elektrilevil puudub maaühenduskaitsete selektiivselt tööle seadistamiseks vajalik metoodika.

Praegu Elektrilevis kasutusel olevate algoritmide tööpõhimõtted pole oluliselt muutunud ajast, kui instituudis kirjutati eelmine maaühenduskaitsete alane magistr töö (Gabitov, 2009). Selle aja tehnilisel tasemel polnud kaitsete omavahelise selektiivsuse saavutamine Elektrilevi võrgus võimalik. Vahepeal on võrgu tehniline tase tõusnud ja kasutusele on tulnud uusi ja tõhusamaid maaühenduskaitse algoritme. Seetõttu tundsin, et uus maaühenduskaitsete käsitlus on vajalik.

Maaühendust uurivat kirjandust lugedes nägin, et barjäär teema mõistmiseks on kõrge. Maaühendust ja maaühenduskaitset kirjeldatakse erinevatelt lähtekohtadelt ja kasutatavaid mudeleid ei selgitata piisavalt. Kuna olemasolev käsitlus polnud intuiitiivne, pöördusin algmaterjalide poole ja kirjeldasin maaühendust sümmeetriliste komponentide teooriast laenatud võrgu sümmeetrilise ja asümmeetrilise juhtivuse idee läbi. See lähenemine võimaldas põhjendada maaühenduse mudeleid ja koostada terviklik maaühenduskaitse käsitlus.

Kuigi töö eesmärgiks oli uurida maaühenduskaitsete koordineerimist, oli mu pikaajalisem motivatsioon maaühendusest ja maaühenduskaitsetest aru saada. Kuna see protsess oli keeruline, siis loodan, et lõputööga jõutakse sammu võrra lähemale eestikeelse hõlmava maaühenduskaitse kirjelduse loomisele, mis võimaldaks automaatikutel maaühenduskaitsest ühtemoodi aru saada. Loodan automaatika kogukonna tagasisidele, et luua materjalile selleks vajalik usaldusväärsus ja tänan kõiki, kes sellele kaasa aitavad.

LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU

a	-	pöördoperaator, $1\angle 120^\circ$
a	-	asümmeetriategur
a_C	-	mahtvusliku asümmeetria tegur
B_P	-	kaarekustutuspooli reaktiivjuhtivus, S
B_0	-	nulljärgnevusjuhtivuse reaktiivkomponent, S
B_{0Bg}	-	rikkeahela taustvõrgu reaktiivjuhtivus, S
B_{0C}	-	kompenseerimata võrgu rikkeahela reaktiivjuhtivus, S
B_{0Ln}	-	rikkeahela fiidri n reaktiivjuhtivus, S
B_{0Rv}	-	hinnatud neutraali reaktiivjuhtivus taustvõrgu lühisel, S
C_A	-	A faasi mahtuvus maa suhtes, F
C_B	-	B faasi mahtuvus maa suhtes, F
C_C	-	C faasi mahtuvus maa suhtes, F
C_L	-	faaside vaheline mahtvuslik sidestus, F
C_0	-	nulljärgnevusmahtuvus, F
d_0	-	võrgu sumbumistegur
δ	-	võnkeahela sumbuvus, Np
E	-	toitava süsteemi elektromotoorjõud, V
f_c	-	rikkeahela võnkesagedus, Hz
G_A	-	A faasi aktiivjuhtivus maa suhtes, S
G_B	-	B faasi aktiivjuhtivus maa suhtes, S
G_C	-	C faasi aktiivjuhtivus maa suhtes, S
G_P	-	kaarekustutuspooli aktiivjuhtivus, S
G_0	-	nulljärgnevusjuhtivuse aktiivkomponent, S
G_{0Bg}	-	taustvõrgu aktiivjuhtivus, S
G_{0Ln}	-	fiidri n aktiivjuhtivus, S
G_{0Rv}	-	hinnatud neutraali aktiivjuhtivus taustvõrgu lühisel, S
I_A	-	A faasi maaühendusvool, A
I_{AC}	-	A faasi maaühendusvoolu mahtvuslik komponent, A
I_{AG}	-	A faasi maaühendusvoolu aktiivkomponent, A
I_B	-	B faasi maaühendusvool, A
I_{BC}	-	B faasi maaühendusvoolu mahtvuslik komponent, A
I_{BG}	-	B faasi maaühendusvoolu aktiivkomponent, A
I_C	-	C faasi maaühendusvool, A
I_{CC}	-	C faasi maaühendusvoolu mahtvuslik komponent, A
I_{CG}	-	C faasi maaühendusvoolu aktiivkomponent, A
I_d	-	sumbumisvool, A

I_{FC}	-	rikkevoolu mahtuvuslik komponent, A
I_{FCn}	-	fiidri n genereeritud rikkevoolu mahtuvuslik komponent, A
$I_{FCosStab}^1$	-	stabiliseeritud põhisagedusliku rikkevoolu aktiivosa, A
$I_{FSinStab}^1$	-	stabiliseeritud põhisagedusliku rikkevoolu reaktiivosa, A
I_{FStab}^1	-	stabiliseeritud põhisageduslik rikkevool, A
I_v	-	lahkhäälustusvool, A
I_0	-	nulljärgnevusvool, A
I_{0Bg}	-	taustvõrgu genereeritud rikkevool, A
I_{0C}	-	summavoolu mahtuvuslik komponent, A
I_{0CPS}^1	-	faasorsummeeritud põhisageduslik nulljärgnevusvool, A
I_{0FW}	-	kaitstava fiidri rikked mõõdetud summavool, A
I_{0L}	-	summavoolu induktiivkomponent, A
I_{0Ln}	-	fiidri n genereeritud rikkevool, A
I_{0Rv}	-	taustvõrgu rikked mõõdetud summavool, A
I_{0W}	-	summavoolu aktiivkomponent, A
I_1	-	pärijärgnevusvool, A
I_2	-	vastujärgnevusvool, A
j	-	pöördoperaator, $1 \angle 90^\circ$
k	-	kaitse sätte varutegur
K	-	maaühendusvoolu kompenseerimistegur
L_P	-	kaarekustutuspooli induktiivsus, H
P_0	-	nulljärgnevusvõimsuse aktiivkomponent, W
Q_0	-	nulljärgnevusvõimsuse reaktiivkomponent, Var
q_0	-	faasi mahtuvuslik laeng maa suhtes, C
ΔR	-	lühistakistus, Ω
U_{AE}	-	A faasi pingeline maa suhtes, V
U_{AN}	-	A faasi pingeline neutraali suhtes, V
U_{BE}	-	B faasi pingeline maa suhtes, V
U_{BN}	-	B faasi pingeline neutraali suhtes, V
U_{CE}	-	C faasi pingeline maa suhtes, V
U_{CN}	-	C faasi pingeline neutraali suhtes, V
U_{FE}	-	faasi pingeline maa suhtes, V
U_{FN}	-	faasi pingeline neutraali suhtes, V
U_N	-	võrgu nimipinge, V
U_{NE}	-	neutraali ja maa vaheline pingeline (neutraali nihkepinge), V
U_0	-	nulljärgnevuspingeline, V

U_{0CPS}^1	-	faasorsummeeritud põhisageduslik nulljärgnevuspinge, V
U_1	-	pärijärgnevuspinge, V
U_2	-	vastujärgnevuspinge, V
v	-	lahkhäälestustegur
Y_a	-	võrgu juhtivuslik asümmeetria, S
Y_{aC}	-	võrgu mahtuvusjuhtivuslik asümmeetria, S
Y_{aG}	-	võrgu aktiivjuhtivuslik asümmeetria, S
Y_d	-	sumbumisjuhtivus, S
Y_F	-	rikkekoha juhtivus, S
Y_N	-	neutraali juhtivus, S
Y_N^Σ	-	mitmesageduslik neutraali juhtivus, S
Y_{NCPS}^Σ	-	faasorsummeeritud mitmesageduslik neutraali juhtivus, S
Y_{NStab}^1	-	stabiliseeritud põhisageduslik neutraali juhtivus, S
Y_P	-	kaarekustutuspooli juhtivus, S
Y_s	-	rikkeahela sümmeetriline juhtivus, S
Y_v	-	lahkhäälestusjuhtivus, S
Y_Σ	-	rikkeahela summaarne juhtivus, S
Y_0	-	nulljärgnevusjuhtivus, S
Y_{0Bg}	-	taustvõrgu juhtivus, S
Y_{0C}	-	rikkeahela sümmeetriline mahtuvuslik juhtivus, S
Y_{0FW}	-	hinnatud neutraali juhtivus fiidri lühisel, S
Y_{0L}	-	rikkeahela sümmeetriline induktiivne juhtivus, S
Y_{0RV}	-	hinnatud neutraali juhtivus taustvõrgu lühisel, S
Y_{0W}	-	rikkeahela sümmeetriline aktiivjuhtivus, S
Z_A	-	rikkeahela A faasi takistus, Ω
Z_B	-	rikkeahela B faasi takistus, Ω
Z_C	-	rikkeahela C faasi takistus, Ω
Z_F	-	lühistakistus, Ω
Z_N	-	neutraali takistus (rikkevoolu sulgumisteedekonna takistus), Ω
Z_0	-	nulljärgnevustakistus, Ω
Z_1	-	pärijärgnevustakistus, Ω
Z_2	-	vastujärgnevustakistus, Ω
ω	-	nurksagedus, rad/s
FW	-	fiidril oleva lühise tuvastustsoon (<i>forward zone</i>)
MFA	-	mitmesageduslik juhtivuskaitse (<i>Multi-Frequency Admittance Protection</i>)
RTDS	-	digitaalne reaajasimulaator (<i>Real Time Digital Simulator</i>)
RV	-	taustvõrgu lühise tuvastustsoon (<i>reverse zone</i>)

SISSEJUHATUS

Elektrilevi eesmärkideks on kõrge varustuskindluse ja elektriohutuse tagamine. Elektrilevi võrku on ajalooliselt ehitatud kõrget varustuskindlust võimaldava isoleeritud neutraaliga maandusrežiimis. Kõrgenenud nõuded elektriohutusele tingisid võrgu ümberehituse resonantsmaandatud režiimile [1]. Resonantsmaandatud režiimil on ühefaasilise lühise tuvastamine aga levinud maandusrežiimidest kõige keerulisem.

Kuna ühefaasilise lühise tuvastamine pole olnud piisavalt töökindel ja võrgu automatiseerituse tase piisavalt hea, on suunatud maaühenduskaitsed siiani kasutatud signaliseerival režiimil. Maaühenduskaitsed on aidanud rikkekohta leida, kuid rikke isoleerimine on toimunud manuaalselt, dispetšeri ja operatiivbrigaadi koostöös. Inimelule ohutu puutepinge on rikke eemaldamiseni taganud võrgu automaatne resonantsilähedane häälestus.

Elektrilevi uutes võrkudes, kus kasutatakse ainult digitaalseid kaitsed, on ühefaasilist lühist võimalik selektiivselt ja automaatselt võrgust eraldada. Lühise kohesel välja lülitamisel pole automaatne resonantshäälestus vajalik, juhul kui võrgu fikseeritud kompenseerimisega saavutatakse ohutut puutepinget tagav rikkevoolu piirmäär. Seetõttu ehitab Elektrilevi uut võrku odavamalt, ilma resonantshäälestust hoidva automaatikata. See kohustab aga suunatud maaühenduskaitsed kasutama väljalülitusele töötavas režiimis.

Suunatud maaühenduskaitsete kasutamine väljalülitusele töötavas režiimis tõstab oluliselt nende vastutust. Ohutuse tagamiseks peavad kaitsed töötama tundlikult ja töökindlalt. Varustuskindluse tagamiseks tuleb saavutada kaitsete omavaheline selektiivsus. Elektrilevi võrgus praegu kasutatavate kaitsealgoritmide töökindlus on resonantsmaandatud režiimil madal [2]. Kaitsete omavahelist selektiivsust pole testitud.

Elektrilevil on väljalülitusele töötavate maaühenduskaitsetega vähe kogemust. Kuna Elektrilevi kasutatav jadamisi võimsuslülititega võrgu skeem on resonantsmaandatud võrkudes vähelevinud, on suunatud maaühenduskaitsete omavahelist selektiivsust vähe uuritud. Selleks, et kaitsed vastutusrikkas režiimis tööle panna, tuleb kõigepealt selgeks teha, milliseid kaitsealgoritme Elektrilevi võrgus eelistada ja kuidas nende tööd koordineerida.

Lõputöös analüüsitakse Elektrilevis hetkel kasutusel olevaid suunatud maaühenduskaitsete algoritme ja moodsamat, Elektrilevi võrgus testimata, mitmesageduslikku juhtivuskaitset. Antakse hinnang Elektrilevi praeguse

maaühenduskaitsesüsteemi sobivusele väljalülitusele töötavasse resonantsmaandatud võrku. Pakutakse välja suunatud maaühenduskaitsesüsteemi koordineerimise skeem.

Kaitsealgoritmide testimise eelduseks on maaühendusest ja maaühenduskaitsesüsteemist hõlmava ja süstemaatilise arusaama kujundamine. Lõputöö esimeses osas näidatakse, kuidas ühefaasilist lühist sümmeetriliste komponentide meetodil analüüsida. Kirjeldatakse võrgu parameetrite vahelisi seoseid staatilisel maalühisel.

Lõputöö teises osas näidatakse, kuidas maaühenduskaitsesüsteemi võrgu parameetrite vahelisi seoseid rikke tuvastamiseks rakendavad. Uuritakse ühefaasilise lühise siirdeprotsesse, lahutades need erinevates võnkeahelates tekkivateks transientideks. Selgitatakse, kuidas transientide analüüs võimaldab maaühenduskaitsesüsteemil lühist tundlikumalt ja töökindlamalt tuvastada.

Lõputöö kolmandas osas valitakse tüüpne Elektrilevi võrgu osa ja koostatakse selle reaajasimulaatori mudel. Mudel verifitseeritakse häiresalvesti andmetega. Mudelis koostatakse vilkuva kaarega lühist imiteeriv loogika. Simuleeritud vilkuva kaarega lühise lainekuju verifitseeritakse kirjandusest leitud lühiskatsete andmetega.

Lõputöö neljandas osas rakendatakse koostatud mudelit Elektrilevi võrgus levinud ABB Relion seeria terminali REF620 suunatud maaühenduskaitsesüsteemi algoritmide testimiseks. Simuleeritakse erinevaid rikkestsenaariume, millega uuritakse üldkasutatavaid tundlikku suunatud maaühenduskaitsesüsteemi ja transientkaitsesüsteemi ning ABB patenteeritud mitmesageduslikku juhtivuskaitset.

Lõputöö viiendas osas tehakse maaühenduskaitsesüsteemi teoreetilisel analüüsil ja võrgu mudelil läbi viidud katsetel baseeruvad järeldused. Antakse hinnang Elektrilevi praegusele maaühenduskaitsesüsteemi skeemile. Pakutakse välja uus Elektrilevi võrgu mudelil testitud suunatud maaühenduskaitsesüsteemi koordineerimise skeem.

1. ÜHEFAASILISE LÜHISE TEOREETILINE KÄSITLUS

Eesti Vabariigi standard EVS-EN 50522 defineerib maaühenduse ehk maalühise kui rikke, mis tekib juhi ühendumisel maaga või isolatsioonitakistuse vähenemisel maa suhtes alla määratletud väärtust [3]. Tavaliselt räägitakse maalühisvooludest võrgus, kus neutraal on maaga jäigalt ühendatud ja maaühendusvooludest seal, kus neutraal on maandatud läbi suure aktiivtakistuse, induktiivsuse või on maast isoleeritud. Eesti jaotusvõrk on maandatud läbi induktiivtakistuse või maast isoleeritud, mistõttu ühefaasilisel maalühisel tekivad maaühendusvoolud. Ühefaasilisel lühisel tekkivatele maaühendusvooludele reageerivaid kaitseid kutsutakse maaühenduskaitseteks. Maaühenduskaitsed lähtuvad rikkekoha tuvastamisel lühise korral muutuvate võrgu parameetrite analüüsist. Ühefaasilise lühise tingitud asümmeetrilise võrgu seisundi uurimiseks kasutatakse sümmeetriliste komponentide meetodit.

1.1 Sümmeetriliste komponentide meetod

Sümmeetrilise võrgu lahendamisel võib kasutada selle ekvivalentset ühefaasilist aseskeemi. Lühis põhjustab võrgus asümmeetria. Kuna ühefaasilise aseskeemi kasutamine eeldab võrdsete parameetritega faase, pole asümmeetrilise süsteemi lahendamine sellisel kujul võimalik. Selleks, et vältida keeruka kolme paralleelalalaga võrgu lahendamist, kasutatakse sümmeetriliste komponentide meetodina tuntud matemaatilist teisendust.

Kirjeldades mitmefaasilise sümmeetrilise võrgu muutujat, näiteks faasi- ja maa vahelist pinget, võib selle väärtused kõikides faasides määratleda vaid kahe parameetriga – faasori pikkus ja nurk, eeldades et faasovektorite sümmeetria on üheselt määratud. Asümmeetrilises süsteemis tuleb sümmeetria puudumise tõttu kirjeldada eraldi igat faasorit. Seetõttu on n -faasilise süsteemi kirjeldamiseks vaja $2n$ sõltumatut parameetrit – süsteemil on $2n$ vabaduse astet.

Sümmeetriliste komponentide meetod lahutab asümmeetrilise võrgu muutuja faasiväärtuste komplekti sümmeetrilisteks süsteemideks, mida võib lahendada analoogselt sümmeetrilise võrguga. Kuna sümmeetrilisel süsteemil on kaks sõltumatut parameetrit, tuleb kolmefaasilise asümmeetrilise süsteemi muutuja kõigi kolme faasi väärtuste kirjeldamiseks kasutada kolme sümmeetrilist süsteemi (kokku kuus vabaduse astet).

Sümmeetriline süsteem sisaldab kolme faasorit, mis on osadeks lahutatavate asümmeetriliste faasorite komponendid. Iga süsteem on kirjeldatav ühe faasori ja sümmeetriatingimusega. Päri- ja vastujärgnevussüsteemide faasorid on tsentraalsümmeetrilised. Pärijärgnevussüsteem on defineeritud ühe pärijärgnevusfaasori ja allikaga samapidise faasijärgnevusega. Vastujärgnevussüsteem on defineeritud ühe vastujärgnevusfaasori ja allikaga vastupidise faasijärgnevusega. Nulljärgnevussüsteem on defineeritud nulljärgnevusfaasoriga, mille väärtus on kõikides faasides võrdne. [4]

Süsteemide defineerimiseks kasutatavaid faasoreid kutsutakse päri- vastu- ja nulljärgnevuskomponendiks. Järgnevuskomponendid valitakse tavaliselt nii, et need summeeruks A faasi faasoriks. B ja C faasi parameetrid leitakse sümmeetriliste komponentide kaudu, pöörates tsentraalsümmeetrilisi päri- ja vastujärgnevusfaasoreid järgnevusgrupi omadusele vastavalt operaatoriga a või a^2 120° päri- või vastassuunas. Nulljärgnevuskomponendid on kõikides faasides võrdsed.

Asümmeetriliste faasorite lahutamise tingimused sümmeetrilisteks komponentideks on kirjeldatud faas-maa pingete näitel valemitega 1.1.

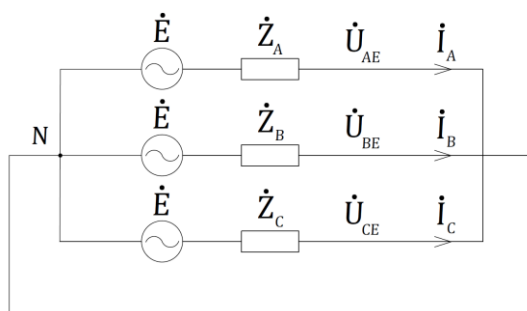
$$\begin{aligned}\dot{U}_{AE} &= \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 \\ \dot{U}_{BE} &= \dot{U}_0 + a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 \\ \dot{U}_{CE} &= \dot{U}_0 + a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2\end{aligned}\tag{1.1}$$

Päri- vastu- ja nulljärgnevuskomponendid U_1 , U_2 , U_0 võib valemitega 1.1 määratletud tingimustest avaldada valemitega 1.2.

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 &= \frac{1}{3} \left(\dot{U}_{AE} + \dot{U}_{BE} + \dot{U}_{CE} \right) \\ \dot{U}_1 &= \frac{1}{3} \left(\dot{U}_{AE} + a \dot{U}_{BE} + a^2 \dot{U}_{CE} \right) \\ \dot{U}_2 &= \frac{1}{3} \left(\dot{U}_{AE} + a^2 \dot{U}_{BE} + a \dot{U}_{CE} \right)\end{aligned}\tag{1.2}$$

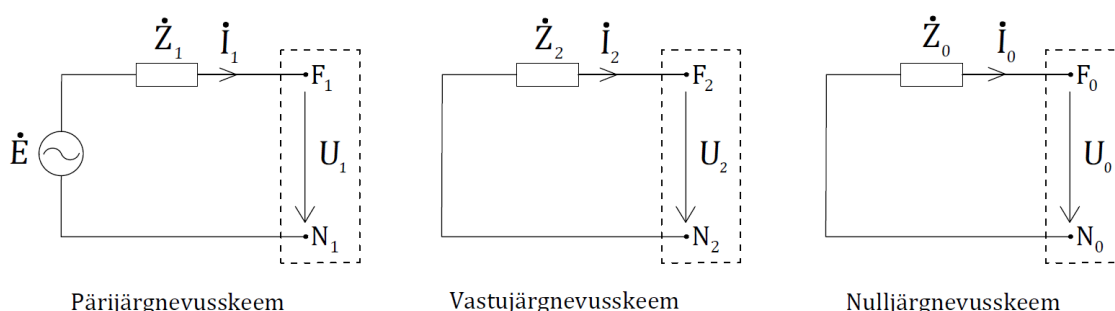
Asümmeetriliste võrguparameetrite lahutamine sümmeetrilisteks süsteemideks võimaldab asümmeetrilise võrgu skeemi teisendamist võrgu sümmeetrilisteks aseskeemideks.

Joonisel 1.1 on kolmefaasilise võrgu lihtsustatud skeem.



Joonis 1.1 Kolmefaasilise võrgu lihtsustatud skeem

Joonisel 1.2 on skeem teisendatud sümmeetrilisteks aseskeemideks.



Pärjärgnevusskeem

Vastujärgnevusskeem

Nulljärgnevusskeem

Joonis 1.2 Päri- vastu- ja nulljärgnevussüsteemide skeemid

Asümmeetrilise võrgu lahendamiseks defineeritakse rikkekoht kui punkt, mis põhjustab asümmeetria sümmeetrilises süsteemis [5]. Sellega eraldatakse järgnevusskeemid sümmeetriliseks ja asümmeetriliseks osaks. Rikkekoht on skeemidel ümbritsetud kriipsjoonega. Lühise korral on rikkekohaks lühispunkt, mis põhjustab faaside takistuste erinevuse. Normaaltalitusliku asümmeetria korral kasutatakse asümmeetria matemaatilist rikkekohta teisendamist. Normaaltalituslikku asümmeetriat modelleeritakse takistuse või juhtivusega, mis on proportsionaalne võrgu pingete asümmeetriaga.

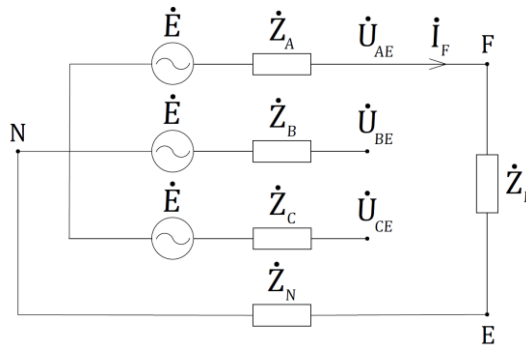
Asümmeetria eraldamine võimaldab süsteemi sümmeetrilist osa uurida kui sõltumatut lineaarset elektrihaelat. Rikkekohta parameetreid uuritakse skeemi sümmeetrilise osa abil. Voolu järgnevusfaasorite suunad defineeritakse rikkekoha poole, mistõttu rikkekoha pingefaasorid avalduvad valemitega 1.3.

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= \dot{E} - \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 \\
 \dot{U}_2 &= 0 - \dot{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 \\
 \dot{U}_0 &= 0 - \dot{Z}_0 \cdot \dot{I}_0
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

Ühefaasilisel lühisel voolavad rikkevoolu järgnevuskomponendid rikkekohani kolmefaasilises sümmeetrilises ahelas, kuid sealt edasi, neutraali sulgudes, ühist juhti

pidi. Ühises juhis neutraali sulguv rikkevool peab olema võrdne kolmefaasilises ahelas voolanud rikkevoolu kõikide sümmeetriliste komponentide summaga. Päri- ja vastujärgnevusvoolud summeeruvad nulliks. Nulljärgnevusvoolud summeeruvad kolmekordse nulljärgnevusvooluga võrdseks rikkevooluks. Seega lõpeb päri- ja vastujärgnevusvoolu teekond rikkekohas, kuid nulljärgnevusvool läbib lisaks sulgumisteedkonna ehk neutraali takistuse.

Joonisel 1.3 on ühefaasilise A faasi lühise skeem, kus on näidatud neutraali takistus Z_N , ja võrgu asümmeetriat põhjustav rikkekoha takistus Z_F .



Joonis 1.3 Ühefaasilise lühise skeem

A faasi lühise rikkekohaks on lühises olev faas – A faasi ja maa vaheline takistus väheneb, põhjustades takistuste asümmeetria Z_F . Normaaltalituslikke faaside ja maa vahelisi takistusi võib lugeda lõpmatult suurteks. Maalühist uurides võib sümmeetrilised koormusvoolud lugeda nulliks. Teades, kuidas rikkekoha pinge sõltub voolust ja takistusest ning lihtsustavaid tingimusi B ja C faasi voolude kohta, võib valemi 1.1 järgi kirjutada vastavad ühefaasilise lühise avaldised.

$$\begin{aligned} \dot{Z}_F \cdot \dot{I}_F &= \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 \\ 0 &= \dot{I}_0 + a^2 \dot{I}_1 + a \dot{I}_2 \\ 0 &= \dot{I}_0 + a \dot{I}_1 + a^2 \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (1.4)$$

Kuna B ja C faasi voolud loeti nulliks, selgub valemist 1.2, et kõik rikkevoolu järgnevusfaasid on võrdsed kolmandikuga A faasi voolust, ehk kolmandikuga rikkevoolust.

$$\dot{I}_F = \dot{I}_0 + \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 3\dot{I}_0 \quad (1.5)$$

Seega on rikkevool võrdne suvalise kolmekordse järgnevuskomponendiga või voolude järgnevuskomponentide summaga.

Valemi 1.4 võib avaldada valemi 1.3 abil. Resulteeruva valemi 1.6 abil võib leida voolu nulljärgnevusfaasori ja rikkevoolu väärtused.

$$\dot{Z}_F \cdot \dot{I}_F = \dot{E} - \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 - \dot{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 - \dot{Z}_0 \cdot \dot{I}_0 \quad (1.6)$$

$$\dot{I}_0 = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_F} \quad (1.7)$$

$$\dot{I}_F = 3\dot{I}_0 = \frac{3\dot{E}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_F} \quad (1.8)$$

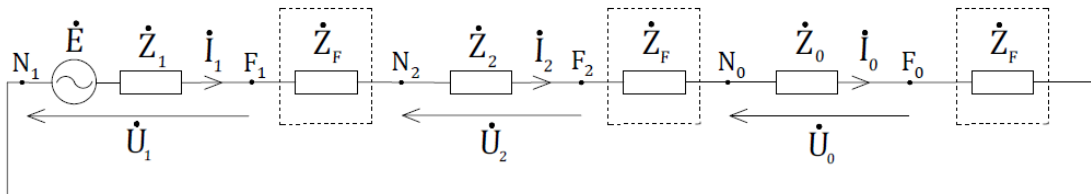
Pingete järgnevuskomponendid võib valemist 1.3 avaldada nulljärgnevusvoolu kaudu.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{E} - \dot{Z}_1 \cdot \dot{I}_1 = \dot{I}_0 (\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_F) - \dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_1 = \dot{I}_0 (\dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_F) \\ \dot{U}_2 &= -\dot{Z}_2 \cdot \dot{I}_2 = -\dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_2 \\ \dot{U}_0 &= -\dot{I}_0 \cdot \dot{Z}_0 \end{aligned} \quad (1.9)$$

Avaldades valemid 1.9 valemi 1.7 kaudu võib leida pingete järgnevuskomponentide väärtused.

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \frac{\dot{E} \cdot (\dot{Z}_0 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_F)}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_F} \\ \dot{U}_2 &= \frac{-\dot{E} \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_F} \\ \dot{U}_0 &= \frac{-\dot{E} \cdot \dot{Z}_0}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + \dot{Z}_0 + 3\dot{Z}_F} \end{aligned} \quad (1.10)$$

Valemite kirjelduseks võib joonestada ühefaasilise lühise sümmeetriliste komponentide askeemi – joonis 1.4 [6].



Joonis 1.4 Ühefaasilise lühise sümmeetriliste komponentide askeem

Juhul kui neutraali takistus on oluliselt suurem kui kolmefaasilise rikkeahela osa takistus, nagu isoleeritud ja resonantsmaandatud võrgus, võib nulljärgnevustakistuse lugeda võrdseks kolmekordse neutraali takistusega Z_N .

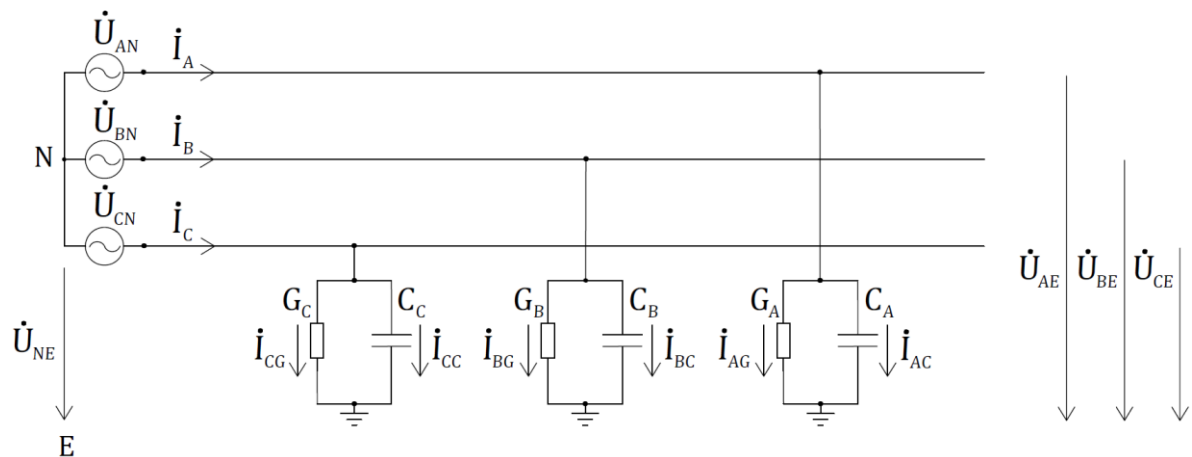
Sellisel juhul on sulgumisteedkonna takistusel tekkiv neutraali nihkepinge U_{NE} võrdne nulljärgnevuspingega.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{I}_F \dot{Z}_N = -3\dot{I}_0 \dot{Z}_N = -\dot{I}_0 \dot{Z}_0 = \dot{U}_0 \quad (1.11)$$

Nulljärgnevustakistuse võrdsustamisel kolmekordse neutraali takistusega võetakse arvesse, et neutraali takistust läbib kolmekordne nulljärgnevusvool. Teisendus on vajalik sümmeetriliste aseseemide koostamisel, kus ühefaasilisel aseseemil on korruga nii kolmefaasiline kui ühefaasiline rikkeahela osa. Maalühise tuvastamisel kasutatakse summavoolu $3I_0$ mõõtmist. Sümmeetrilises süsteemis puudub faasivooludes nulljärgnevuskomponent. Summavoolu mõõtmine võimaldab rikkevoolu sümmeetrilisest koormusvoolust isoleerida.

1.2 Jaotusvõrk normaaltalitusel

Arutelu lähtepunktiks on joonisel 1.5 esitatud isoleeritud elektrivõrgu mudel [7].



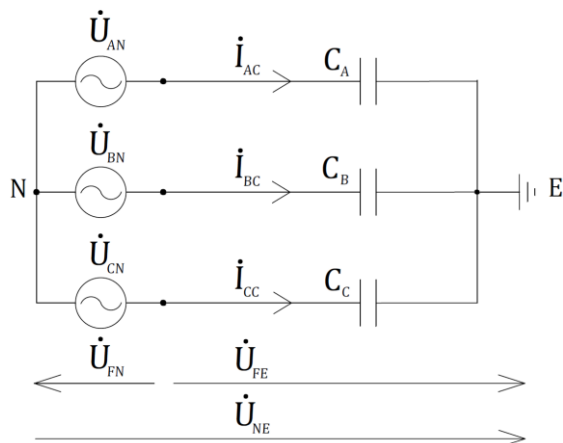
Joonis 1.5 Isoleeritud elektrivõrgu mudel

Mudeli parameetriteks on faaside mahtuvused maa suhtes C_A, C_B, C_C , mis on määratud liini ja maa geomeetriaga; aktiivjuhtivused maa suhtes G_A, G_B, G_C , mis on normaaltalitusel võrdsed faaside lekkejuhtivustega; faaside pinged neutraali U_{AN}, U_{BN}, U_{CN} ja maa suhtes U_{AE}, U_{BE}, U_{CE} ning maaühendusvoolud läbi aktiiv- I_{AG}, I_{BG}, I_{CG} ja mahtuvusjuhtivuste I_{AC}, I_{BC}, I_{CC} . Isoleeritud süsteemi toitetrifol puudub füüsiline neutraal, mistõttu indeksiga N tähistatakse kujutletavat potentsiaali, mis tekiks trafo sekundaarmähiste ühendamisel tähte.

Faaside aktiivjuhtivused maa suhtes võib lugeda võrdseteks, kuna faasid on identselt isoleeritud. Ühefaasilise lühise uurimisel vaadeldakse galvaaniliselt ühendatud võrgu summaarseid parameetreid, kuna võrgu tasakaaluoleku kujunemisest võtab osa kogu füüsiliselt ühendatud ahel. Mudelis on tehtud lihtsustused, mis sobivad isoleeritud võrgu rikketalitluse uurimiseks – võrgu pikiparameetrite, faasidevaheliste sidestuste ja

koormustega pole arvestatud, kuna nende mõju asümmeetria tekkele on oluliselt väiksem põikiparameetrite omast.

Jaotusvõrgus on faaside ja maa vahelised aktiivjuhtivused mahtuvusjuhtivustest oluliselt väiksemad. Aktiivjuhtivuslike voolude tase ületab harva 2-6% võrgu mahtvuslikust voolust [8]. Seega on isoleeritud võrku võimalik modelleerida vaid mahtuvusjuhtivusi arvestades (joonis 1.6) [9].



Joonis 1.6 Normaaltalitusel isoleeritud võrgu lihtsustatud skeem

Neutraalpunkti ja maa vahelise juhi puudumise tõttu peavad maha voolavad mahtvuslikud voolud summeeruma nulliks. Sellise skeemi jaoks võib neutraali nihkepinge maa suhtes avaldada sõlmepingete meetodil.

$$\begin{aligned} \dot{U}_{NE} &= -\frac{\dot{U}_{AN} \dot{Y}_A + \dot{U}_{BN} \dot{Y}_B + \dot{U}_{CN} \dot{Y}_C}{\dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C} = -\frac{\dot{U}_{AN} \cdot j\omega C_A + \dot{U}_{BN} \cdot j\omega C_B + \dot{U}_{CN} \cdot j\omega C_C}{j\omega C_A + j\omega C_B + j\omega C_C} = \\ &= -\dot{U}_{FN} \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Operaator a kirjeldab pööramisoperatsiooni 120° pärisuunas. Valemis 1.12 on faasipinge U_{FN} võrdne faasoriga U_{AN} . On teada, et tsentraalsümmeetrilised faasorid liituvad nulliks.

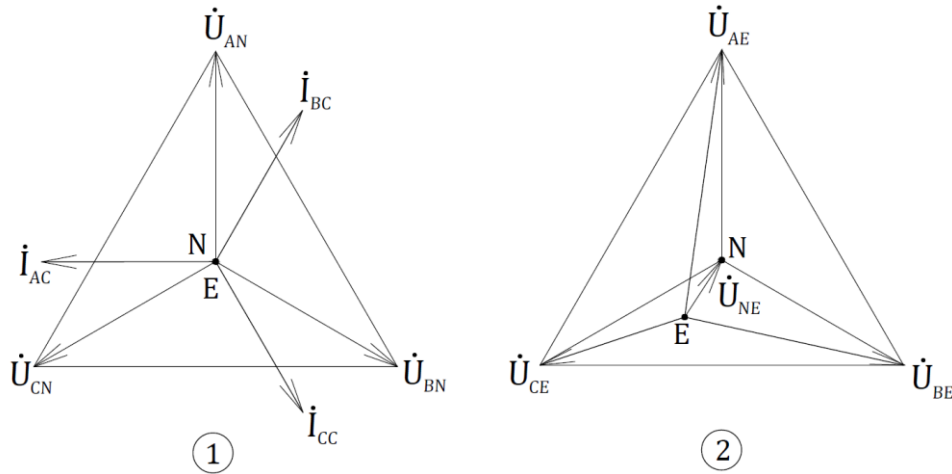
$$1 + a^2 + a = 0 \quad (1.13)$$

Võrgu faasid on maa suhtes sarnaste kaugustega, mistõttu faaside ja maa vahelised mahtvused on lähedaste väärtustega.

$$\frac{C_A + C_B + C_C}{3} \approx C_A \approx C_B \approx C_C \quad (1.14)$$

Valemist 1.12 on selge, et kui faaside ja maa vahelised mahtvused oleksid võrdsed, oleks neutraali nihkepinge väärtus võrdne nulliga.

Joonise 1.7 diagrammil 1 on kujutatud olukorda, kus isoleeritud võrgu faaside ja maa vahelised mahtuvused on võrdsed, mistõttu mahtuvustele avalduvad pinged põhjustavad neist 90 kraadi ees olevaid voolusid. Tsentraalsümmeetrilised voolud summeeruvad maas nulliks nii, et neutraali ja maa vahele ei teki nihkepinget.



Joonis 1.7 Normaaltalitusel isoleeritud võrgu faasordiagrammid

Diagrammil 2 on näidatud neutraali nihkepinge teke, kui mahtuvused pole võrdsed. Faaside pinged on neutraali suhtes endiste väärtustega, kuid pinged maa suhtes on muutunud. Jooniselt 1.7 on selge, et neutraali nihkepinge faasor määrab faas-maa pingete asümmeetria. Valemiga 1.12 seotakse pingete asümmeetria mahtuvusliku asümmeetriaga A faasi pinge kaudu. Proportsionaalset seost kirjeldab mahtuvusliku asümmeetria tegur a_c [10].

$$\dot{\alpha}_c = \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C} \quad (1.15)$$

Nihkepinge kirjeldamisega A faasi kaudu valemis 1.12 valiti rikkekohaks A faas. Teguri a_c võib avaldada mahtuvusjuhtivuste Y_C kaudu.

$$\dot{Y}_C = j\omega C \quad (1.16)$$

$$\dot{\alpha}_c = \frac{j\omega(C_A + a^2 C_B + a C_C)}{j\omega(C_A + C_B + C_C)} = \frac{\dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_\Sigma} \quad (1.17)$$

Valemi 1.17 lugejas on võrgu mahtuvusjuhtivuslik asümmeetria Y_{aC} ja nimetajas faaside ja maa vaheline summaarne juhtivus Y_Σ .

$$\dot{Y}_{aC} = j\omega(C_A + a^2 C_B + a C_C) \quad (1.18)$$

Summaarne juhtivus on sümmeetrilise Y_s ja asümmeetrilise juhtivuse Y_{aC} summa.

$$\dot{Y}_\Sigma = \dot{Y}_A + \dot{Y}_B + \dot{Y}_C = j\omega(C_A + C_B + C_C) = \dot{Y}_s + \dot{Y}_{aC} \quad (1.19)$$

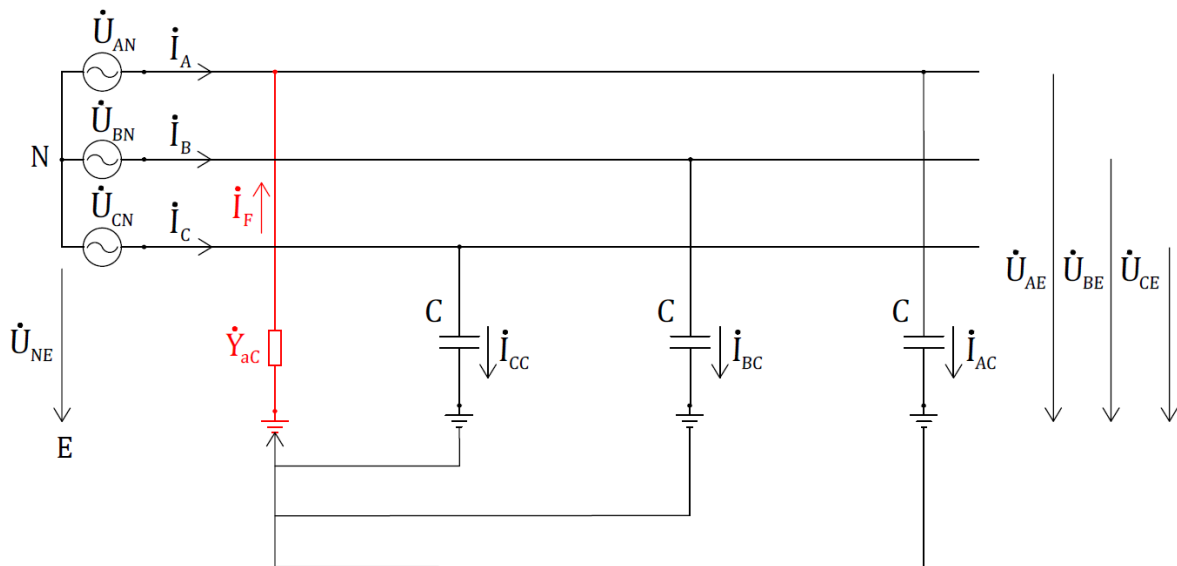
Normaaltalituslikult asümmeetrilises võrgus avaldub neutraali nihkepinge mahtvusjuhtivusliku asümmeetria Y_{aC} kaudu.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{U}_{FN} \frac{C_A + a^2 C_B + a C_C}{C_A + C_B + C_C} = -\dot{U}_{FN} \cdot \alpha_C = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_\Sigma} \quad (1.20)$$

Valemiga 1.20 täidetakse sümmeetriliste komponentide meetodi rakendamise esimene eeldus – võrgu asümmeetria kirjeldatakse rikkekoha juhtivusega.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_\Sigma} = \dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_s + \dot{Y}_{aC}} \quad (1.21)$$

Valemiga 1.21 täidetakse sümmeetriliste komponentide meetodi rakendamise teine eeldus – võrgu sümmeetrilist ja asümmeetrilist osa käsitletakse eraldi. Valemi 1.21 alusel võib koostada normaaltalitusel isoleeritud võrgu mudeli (joonis 1.8).



Joonis 1.8 Normaaltalitusel isoleeritud võrgu mudel

Võrgu asümmeetria on modelleeritud punaselt tähistatud mahtvusjuhtivusliku asümmeetriaga Y_{aC} . Kuna Y_{aC} põhjustab pingete asümmeetria sümmeetrilises süsteemis, on tegemist rikkekoha juhtivusega ja mudelit võib analüüsida sümmeetriliste komponentide meetodil.

1.3 Ühefaasiline lühis isoleeritud võrgus

Ühefaasiline lühis tekib ühe faasi ja maa vahelise juhtivuse suurenedes. Lõputöös uuritakse riket A faasi näitel. Ühefaasilisel lühisel esineb aktiivjuhtivuslik asümmeetria Y_{aG} .

$$\dot{Y}_{aG} = G_A + a^2 G_B + a G_C \quad (1.22)$$

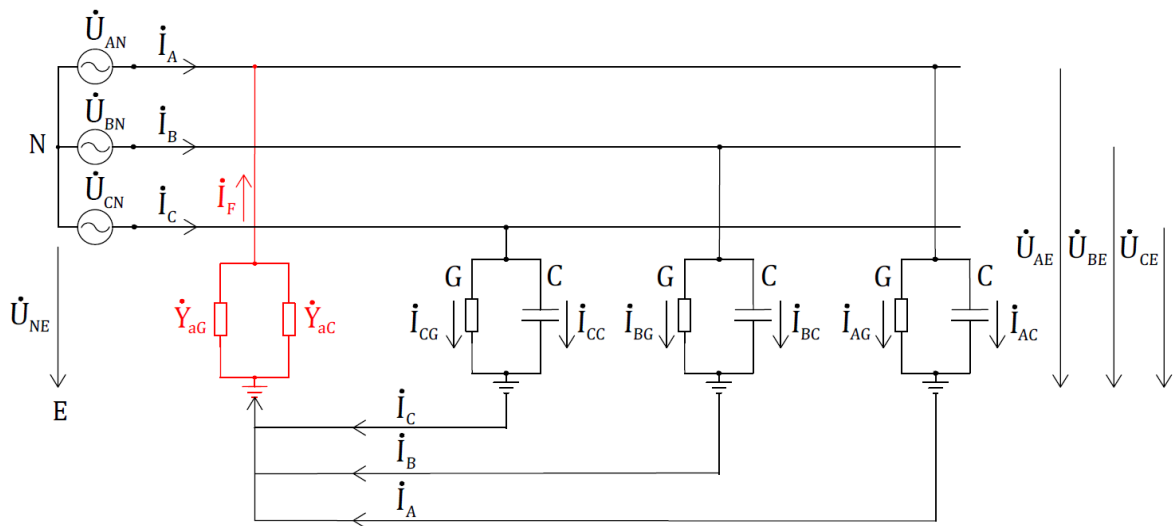
Võrgu asümmeetria tegur α kirjeldab rikkeahela juhtivusliku asümmeetria Y_a suhet rikkeahela summaarsesse juhtivusse Y_Σ .

$$\alpha = \frac{\dot{Y}_a}{\dot{Y}_\Sigma} = \frac{\dot{Y}_{aC} + \dot{Y}_{aG}}{\dot{Y}_\Sigma} \quad (1.23)$$

Rikkelises võrgus esinevad nii mahtvuslik kui aktiivjuhtivuslik asümmeetria ja nende põhjustatud neutraali nihkepinge avaldub asümmeetria teguri kaudu.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_a}{\dot{Y}_\Sigma} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aG} + \dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_\Sigma} = -\dot{U}_{FN} \cdot \alpha \quad (1.24)$$

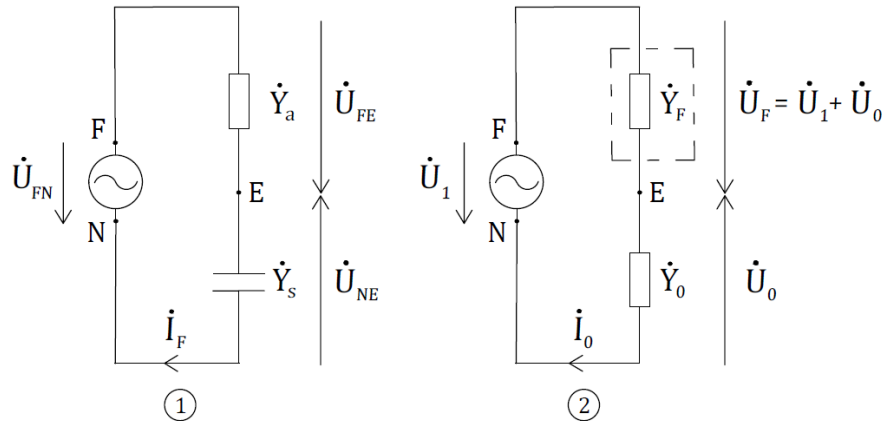
Valemi 1.24 alusel võib koostada isoleeritud võrgu ühefaasilise lühise mudeli (joonis 1.9). Võrgu asümmeetria on modelleeritud punaselt tähistatud rikkekoha juhtivusega. Võrgu ja maa vahelisi juhtivusi käsitletakse sümmeetrilistena.



Joonis 1.9 Isoleeritud võrgu ühefaasilise lühise mudel

Valemi 1.24 alusel koostati isoleeritud võrgu ühefaasilise asümmeetria üldistatud aseskeem.

Joonise 1.10 skeemil 1 näidatud isoleeritud võrgu ühefaasilise asümmeetria aseskeemi võib kasutada ühefaasilise lühise või normaaltalitlusliku asümmeetria uurimiseks.



Joonis 1.10 Isoleeritud võrgu ühefaasilise asümmeetria üldistatud aseskeem

Ühefaasilisel lühisel on lühisjuhtivus mahtvusjuhtivuslikust asümmeetriast üldjuhul oluliselt suurem, mistõttu Y_{aC} komponendiga tihti ei arvestata.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aG} + \dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_{\Sigma}} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aG} + \dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_s + \dot{Y}_{aG}} \approx -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aG}}{\dot{Y}_s + \dot{Y}_{aG}} \quad (1.25)$$

Aktiivjuhtivuslik asümmeetria on võrdne lühistakistuse ΔR pöördväärtusega.

$$\dot{Y}_{aG} = \left(G_A + \frac{1}{\Delta R} \right) + a^2 G_B + a G_C \approx \frac{1}{\Delta R} \quad (1.26)$$

Sümmeetrilise juhtivuse aktiivkomponent on mahtvuslikust oluliselt väiksem, mistõttu sellega võib tihti mitte arvestada.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aG}}{3j\omega C_0 + \dot{Y}_{aG}} = -\dot{U}_{FN} \frac{1}{1 + \frac{3j\omega C_0}{\dot{Y}_{aG}}} = -\dot{U}_{FN} \frac{1}{1 + 3j\omega C_0 \cdot \Delta R} \quad (1.27)$$

Ühefaasilise asümmeetria aseskeemi võib teisendada sümmeetriliste komponentide meetodil – joonis 1.10 skeem 2.

$$\begin{aligned} \dot{Y}_s &= 3\dot{Y}_0 = 3(j\omega C_0 + G_0) \approx j3\omega C_0 \\ \dot{Y}_a &= \dot{Y}_F = \frac{1}{\Delta R} \\ \dot{I}_F &= 3\dot{I}_0 \end{aligned} \quad (1.28)$$

Kuna rikkeahelas domineerib neutraali takistus, sisaldab sümmeetriline juhtivus vaid nulljärgnevuskomponenti. Nulljärgnevusvoolu teekonnale jäävad sümmeetriline

mahtuvus ja aktiivjuhtivus on defineeritud kui nulljärgnevusmahtuvus C_0 ja nulljärgnevus-aktiivjuhtivus G_0 . Joonise 1.10 skeemilt 1 võib avaldada ühefaasilise lühise rikkevoolu.

$$\dot{U}_{FN} = \dot{I}_F \left(\frac{1}{\dot{Y}_s} + \frac{1}{\dot{Y}_{aG}} \right)$$

$$\dot{I}_F = \frac{\dot{U}_{FN}}{\frac{1}{j3\omega C_0} + \Delta R} = \dot{U}_{FN} \frac{1}{1 + j3\omega C_0 \Delta R} = \dot{U}_{FN} \frac{j3\omega C_0}{1 + j3\omega C_0 \Delta R} \quad (1.29)$$

Joonise 1.10 skeemilt 2 võib avaldada nulljärgnevuspinge.

$$\dot{U}_0 = -\dot{I}_0 \dot{Z}_0 = -\dot{I}_F \left(\frac{1}{j3\omega C_0} \right) = \dot{U}_1 \frac{-1}{1 + j3\omega C_0 \Delta R} \quad (1.30)$$

Nulljärgnevuspinge on maksimaalselt võrdne faasipingega. Nulljärgnevuspinge võib suhtühikutes avaldada pärijärgnevuspinge kaudu.

$$\dot{U}_0[p.u.] = \left| \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} \right| = \frac{1}{1 + j3\omega C_0 \Delta R} \quad (1.31)$$

Nulljärgnevusvool on põhjustatud nulljärgnevuspingest nulljärgnevusjuhtivusel, mille väärtus rikkeli ei muutu. Rikkevool on kolmekordne nulljärgnevusvool, mistõttu rikkevool skaleerub koos nulljärgnevuspingega.

$$\dot{I}_F = \dot{I}'_F \cdot \dot{U}_0[p.u.] \quad (1.32)$$

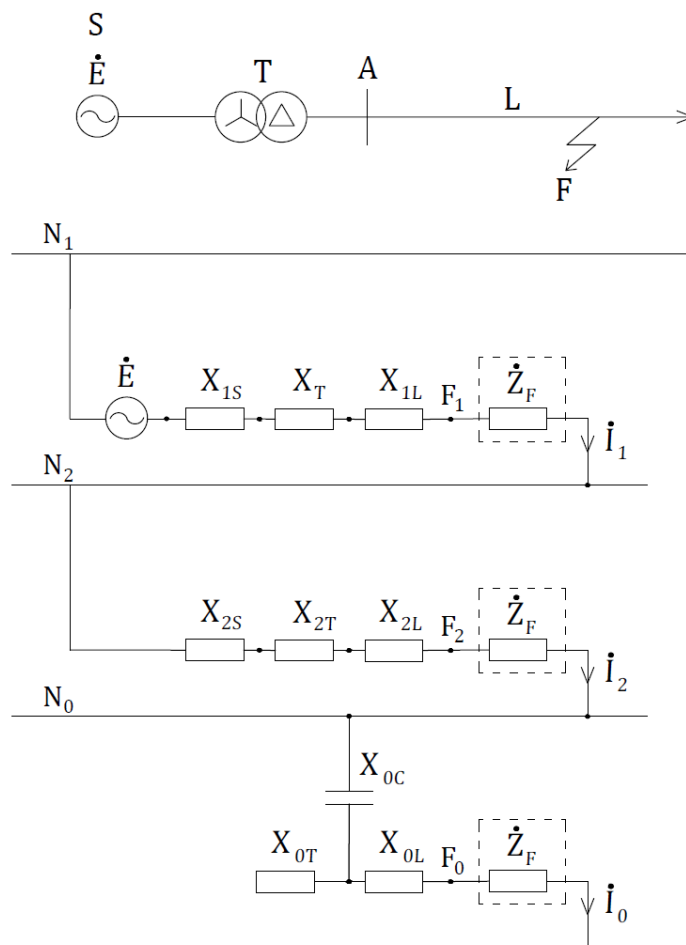
Rikkevool I_F on maksimaalsel väärtusel I'_F , kui lühistakistuse ΔR väärtus on null.

$$\dot{I}_F = \dot{I}'_F \cdot \dot{U}_0[p.u.] = \sqrt{3} \dot{U}_N \cdot j\omega C_0 \cdot \dot{U}_0[p.u.] \quad (1.33)$$

Lühistakistuse väärtuse võib leida pinge järgnevuskomponentide kaudu [11].

$$\Delta R = \frac{\dot{U}_{FE}}{\dot{I}_F} = \frac{\dot{U}_{FE}}{3\dot{I}_0} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_0}{3\dot{U}_0 \cdot \dot{Y}_0} = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_0}{\dot{U}_0 \cdot j3\omega C_0} = \frac{\sqrt{U_1^2 - U_0^2}}{j3\omega C_0 \cdot U_0} \quad (1.34)$$

Ühefaasilise lühise analüüsimiseks koostati lihtsa ühe fiidriga võrgu sümmeetriliste komponentide aseskeem – joonis 1.11 [6].

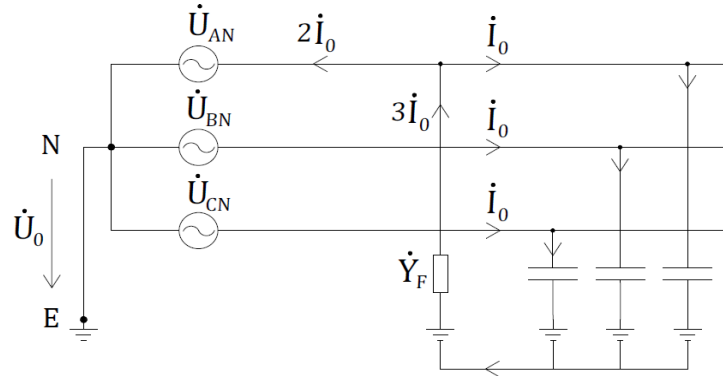


Joonis 1.11 Isoleeritud võrgu ühefaasilise lühise sümmeetriliste komponentide aseskeem.

Joonise ülemises osas on võrgu ühejooneskeem. Koormusi toidetakse süsteemist S läbi trafo T ja alajaama A liiniga L. Liinil esineb ühefaasiline lühis rikk kohas F. Ühejooneskeemi all on selle sümmeetriliste komponentide aseskeem. Võrgu päri- vastu- ja nulljärgnevusskeemid on ühendatud jadamisi, vastavalt joonisel 1.4 kirjeldatud ühefaasilise lühise aseskeemile. Järgnevussüsteemide takistuskomponendid on tähistatud võrgu elementidele vastavate indeksitega.

Päri- ja vastujärgnevusvoolu teekond on toitevast süsteemist rikk kohani. Nulljärgnevusahel ei ole toitva süsteemiga seotud trafo Y-Delta lülitusgrupi tõttu. Nulljärgnevusvool liigub samuti liini pidi rikk kohani, kuid peab sealt edasi leidma sulgumisteedkonna neutraali. Kuna isoleeritud süsteemis puudub füüsiline neutraalpunkt, on rikkevoolu sulgumisteedkond vähima takistusega ahel, mis tekitab suletud vooluringi. See tähendab, et nulljärgnevusvoolud levivad faas-maa mahtuvusjuhtivuste ja lühise juhtivuse kaudu rikk lisse faasi ja sealt läbi trafo mähiste tervetesse faasidesse (joonis 1.12).

Isoleeritud süsteemi ühefaasiline lühis erineb maandatud süsteemi rikkest seega selle poolest, et rikkalise fiidri genereeritud nulljärgnevusvool sulgub läbi sama liini, milles rikkekohani voolab. Kuigi fiidri kõikides faasides voolab võrdne nulljärgnevusvool, pole see mõõtepunktis summavooluna tuvastatav.



Joonis 1.12 Nulljärgnevusvoolu teekond ühefaasilisel lühisel

Päri- ja vastujärgnevusvoolu teekonna takistused on pikitakistuste $X_{1S}, X_{1T}, X_{1L}, Z_F$ ja $X_{2S}, X_{2T}, X_{2L}, Z_F$ summad. Nulljärgnevusvoolu sulgumisteedkonnal olevate faas-maa mahtuvuste takistus on oluliselt kõrgema väärtusega kui võrgu pikitakistused, mistõttu nulljärgnevustakistuse Z_0 võib lugeda võrdseks takistusega X_{0C} ning päri- ja vastujärgnevustakistustega ei pea arvestama.

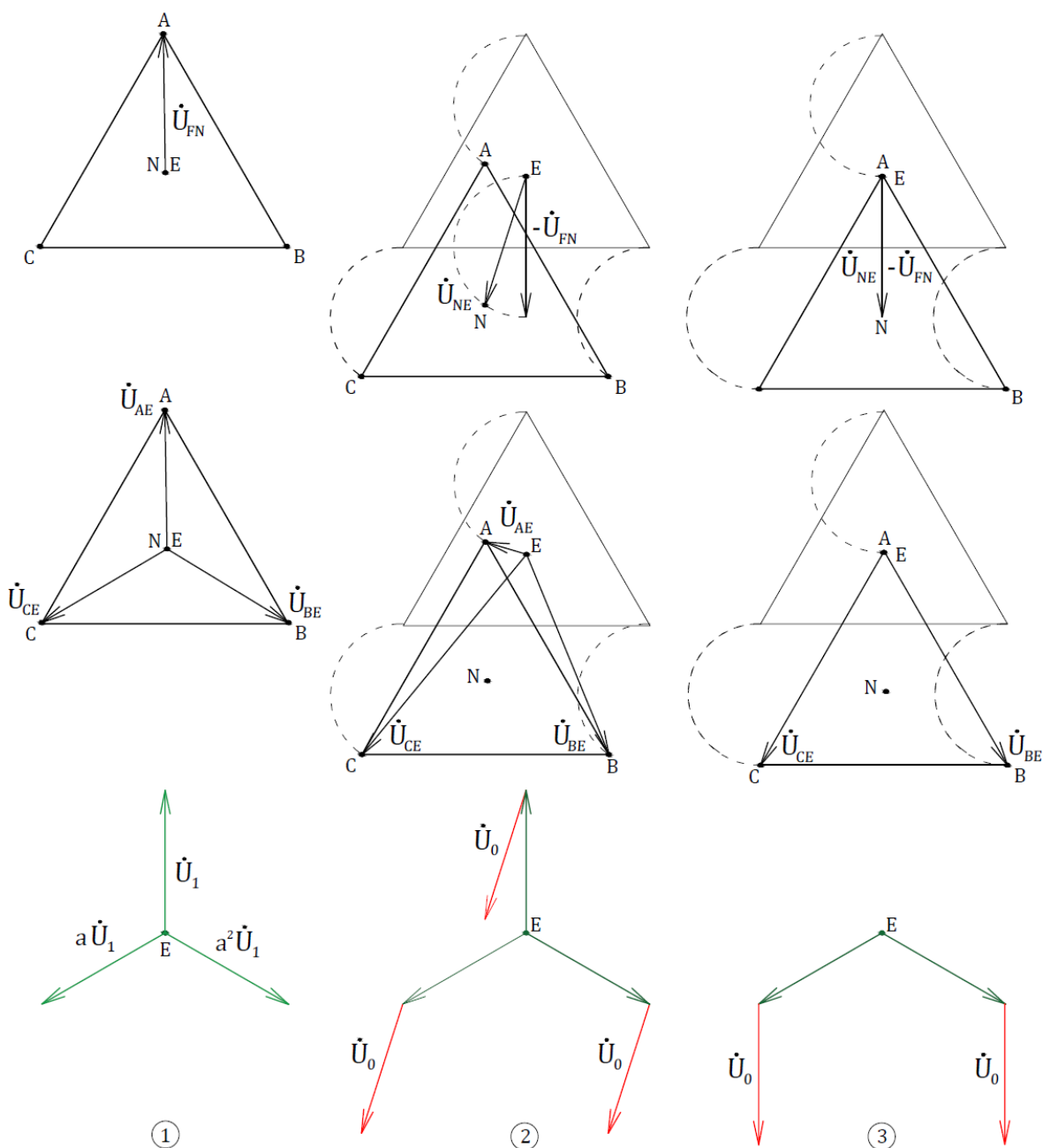
$$\dot{I}_F = 3\dot{I}_0 = \frac{3\dot{E}}{\dot{Z}_0 + \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2 + 3\dot{Z}_F} \approx \frac{3\dot{E}}{\dot{X}_{0C} + 3\dot{Z}_F} \quad (1.35)$$

Ühefaasilisel lühisel on rikkevoolu sümmeetrilised komponendid võrdsed, kuid nulljärgnevustakistus on päri- ja vastujärgnevustakistusest oluliselt kõrgem. Seetõttu tekib võrku nulljärgnevuspinge, kuid märkimisväärset vastujärgnevuspinget ei teki ja pärijärgnevuspinge rikkal ei muutu.

$$\begin{aligned} \dot{U}_{AE} &= \dot{U}_0 + \dot{U}_1 + \dot{U}_2 = \dot{U}_0 + \dot{U}_1 \\ \dot{U}_{BE} &= \dot{U}_0 + a^2\dot{U}_1 + a\dot{U}_2 = \dot{U}_0 + a^2\dot{U}_1 \\ \dot{U}_{CE} &= \dot{U}_0 + a\dot{U}_1 + a^2\dot{U}_2 = \dot{U}_0 + a\dot{U}_1 \end{aligned} \quad (1.36)$$

Arutlusega kinnitati, et ühefaasilisel lühisel tekkiv faas-maa pingete asümmeetria on määratud nulljärgnevuspingega U_0 , mis on isoleeritud süsteemis võrdne neutraali nihkepingega U_{NE} .

Ühefaasilise lühise põhjustatud pingete asümmeetriat illustreeritakse joonisel 1.13.



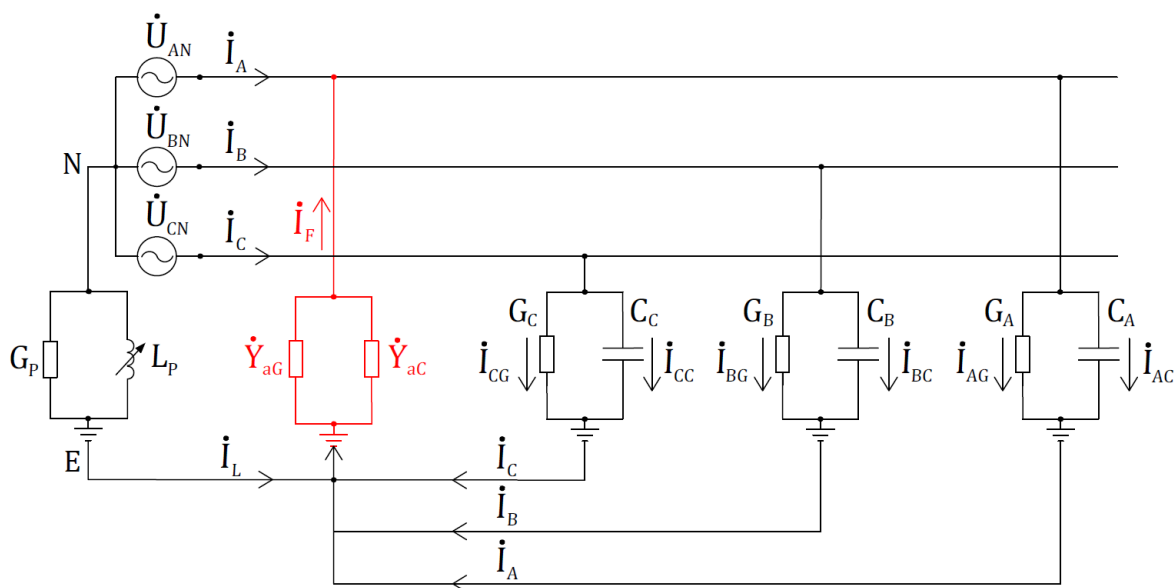
Joonis 1.13 Ühefaasilise lühise pingete faasordiagrammid

Võrku toitev süsteem loetakse sümmeetriliseks, mistõttu võib diagramme vaadelda kui liinipingete muutumatu kolmnurga liikumist maa suhtes, mille nihke määrab neutraali nihkepinge faasor U_{NE} . Joonise ülemistel diagrammidel on näidatud neutraali nihkepinge faasorit rikketa olukorras (1) takistusega (2) ja jäigal maalühisel (3), keskmistel vastavaid faasi- ja maa vahelisi pingeid. Nihkepinge faasor U_{NE} pöörduv lühistakistuse ΔR väärtuse muutumisel mööda punktirajoonega näidatud poolringi, vastavalt valemile 1.30. Joonise alumistel diagrammidel on faasi- ja maa vahelised pinged lahutatud sümmeetrilisteks komponentideks, illustreerides valemit 1.36.

1.4 Ühefaasiline lühis kompenseeritud võrgus

Isoleeritud võrgu ühefaasilisel lühisel tekkivad maaühendusvoolud ulatuvad kaablivõrkudes sadade ampriteni [12]. Sellistel voolu väärtustel on puutepinged lubamatult kõrged ja rikkekohta võib tekkida püsiv kaar, mis soodustab maalühise arenemist mitmefaasiliseks lühiseks. Seetõttu püütakse maaühendusvoolusid vähendada. Kuna ühefaasiline lühis on valdavalt mahtvusliku iseloomuga, on suurem osa maaühendusvoolust võimalik rikkekohta genereeritava induktiivse voolukomponendiga kompenseerida. Induktiivse voolukomponendi tootmiseks lisatakse võrgu neutraalpunkti ja maa vahele reguleeritava induktiivsusega kaarekustuspool, mida kutsutakse ka Peterseni pooliks. Ühefaasilisel lühisel tekkiv neutraali nihkepinge põhjustab poolis rikkekohta voolava induktiivse voolu I_L .

Peterseni pooli võib modelleerida reguleeritava induktiivsuse L_p ja aktiivjuhtivusega G_p . Aktiivjuhtivus sisaldab kaarepooli enda ja temaga paralleeli lisatava summutustakisti summaarset juhtivust.



Joonis 1.14 Kompenseeritud võrgu ühefaasilise lühise mudel

Kompenseeritud ehk resonantsmaandatud võrku kirjeldatakse isoleeritud võrgu alusel. Joonisel 1.14 lisati isoleeritud võrgu ühefaasilise lühise mudelile kaarepooli elemendid parameetritega L_p ja G_p .

$$\dot{Y}_s = 3\dot{Y}_0 = 3(j\omega C_0 + G_0) + \frac{1}{j\omega L_p} + G_p \quad (1.37)$$

Kaarepooli lisamisel muutus rikkeahela sümmeetriline juhtivus.

Kompenseeritud võrgu kirjeldamisel kasutatakse sumbumis- d_0 ja lahkähälestustegurit v . Tegurid kirjeldavad resonantsmaandatud võrgu sümmeetrilise juhtivuse aktiiv- ja reaktiivkomponendi suhet võrgu mahtvuslikku juhtivusse Y_{0C} . [13]

$$d_0 = \frac{\operatorname{Re}(\dot{Y}_s)}{Y_{0C}} = \frac{3G_0 + G_P}{3\omega C_0} \quad (1.38)$$

$$v = \frac{\operatorname{Im}(\dot{Y}_s)}{Y_{0C}} = \frac{3\omega C_0 - \frac{1}{\omega L_P}}{3\omega C_0} = 1 - \frac{1}{3\omega^2 L_P C_0} \quad (1.39)$$

Sumbumis- ja lahkähälestustegur võimaldavad kompenseeritud võrgu sümmeetrilise juhtivuse avaldada isoleeritud võrgu mahtvusjuhtivuse Y_{0C} kaudu.

$$Y_s = |Y_{0C}(d_0 - jv)| = Y_{0C}\sqrt{d_0^2 + v^2} = |Y_d - jY_v| \quad (1.40)$$

$$Y_d = \operatorname{Re}(\dot{Y}_s) = d_0 \cdot Y_{0C} \quad (1.41)$$

$$Y_v = \operatorname{Im}(\dot{Y}_s) = v \cdot Y_{0C} \quad (1.42)$$

Kordaja j on valemite negatiivne, juhul kui tegemist on ülekompensatsiooniga. Sumbumis- ja lahkähälestusjuhtivustele Y_d ja Y_v vastavad sumbumis- ja lahkähälestusvoolud I_d ja I_v on kompenseeritud võrgu jäiga lühise rikkevoolu I'_F reaali- ja imaginaarkomponendid.

$$I_d = d_0 \cdot I'_{FC} \quad (1.43)$$

$$I_v = v \cdot I'_{FC} \quad (1.44)$$

$$I'_F = |I'_{FC}(d_0 - jv)| = I'_{FC}\sqrt{d_0^2 + v^2} = |I_d - jI_v| \quad (1.45)$$

I'_{FC} tähistab jäiga lühise rikkevoolu mahtvuslikku komponenti. See on võrdne isoleeritud võrgu jäiga lühise rikkevooluga, kui ei arvestata võrgu lekkejuhtivusega (valem 1.33). Isoleeritud võrku kirjeldavad valemid võib sumbumis- ja lahkähälestusteguri abil kohaldada resonantsmaandatud võrgule. Normaaltalitlusliku neutraali nihkepinge võib avaldada valemite 1.17 ja 1.40 abil.

$$\dot{U}_{NE} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_\Sigma} \approx -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{aC}}{\dot{Y}_s} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_{0C} \cdot \dot{\alpha}_C}{\dot{Y}_{0C}(d_0 - jv)} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{\alpha}_C}{(d_0 - jv)} \quad (1.46)$$

Ühefaasilist lühist kirjeldavad valemid võib avaldada valemitest 1.29-1.33.

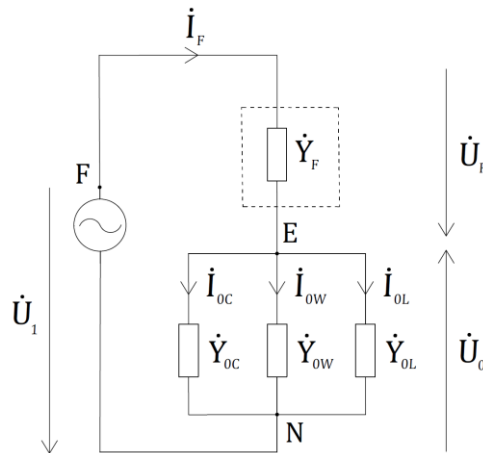
$$\dot{I}_F = \frac{\dot{U}_{FN}}{\frac{1}{\dot{Y}_S} + \Delta R} = \frac{\dot{U}_{FN}}{\frac{1}{Y_{0C}(d_0 - j\nu)} + \Delta R} = \dot{U}_{FN} \frac{1}{\frac{1}{j3\omega C_0(d_0 - j\nu)} + \Delta R} = \dot{U}_{FN} \frac{j3\omega C_0(d_0 - j\nu)}{1 + j3\omega C_0 \Delta R(d_0 - j\nu)} \quad (1.47)$$

$$\dot{U}_0 = -\dot{I}_F \left(\frac{1}{\dot{Y}_S} \right) = -\dot{I}_F \left(\frac{1}{Y_{0C}(d_0 - j\nu)} \right) = -\dot{I}_F \left(\frac{1}{j3\omega C_0(d_0 - j\nu)} \right) = \dot{U}_1 \frac{-1}{1 + j3\omega C_0 \Delta R(d_0 - j\nu)} \quad (1.48)$$

$$\dot{U}_0 [p.u.] = \left| \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_1} \right| = \frac{1}{1 + j3\omega C_0 \Delta R(d_0 - j\nu)} \quad (1.49)$$

$$\dot{I}_F = \dot{I}'_F \cdot U_0 [pu] = (I_d - jI_v) \cdot U_0 [pu] \quad (1.50)$$

Seega võib resonantsmaandatud võrku kirjeldada isoleeritud võrgu alusel täiendava sumbumis- ja lahkähälestusteguri abil. Maaühenduskaitsete uurimisel on rikkevool I_F kasulik lahutada aktiiv- reaktiiv- ja mahtvuslikuks komponendiks – joonis 1.15.



Joonis 1.15 Kompenseeritud võrgu ühefaasilise lühise aseskeem

Rikkeahela sümmeetriline juhtivus Y_s lahutati sümmeetriliseks aktiivjuhtivuseks Y_{0W} , mahtvuslikuks juhtivuseks Y_{0C} ja reaktiivjuhtivuseks Y_{0L} .

$$\begin{aligned} \dot{Y}_{0W} &= 3G_0 + G_p \\ \dot{Y}_{0C} &= j3\omega C_0 \\ \dot{Y}_{0L} &= \frac{1}{j\omega L_p} \end{aligned} \quad (1.51)$$

Rikkevoolu aktiiv- induktiiv- ja mahtvuslikud komponendid on proportsionaalsed vastavatel juhtivuskomponentidel avalduva nulljärgnevuspingega.

$$\begin{aligned} \dot{I}_{0W} &= \dot{Y}_{0W} \dot{U}_0 \\ \dot{I}_{0C} &= \dot{Y}_{0C} \dot{U}_0 \\ \dot{I}_{0L} &= \dot{Y}_{0L} \dot{U}_0 \end{aligned} \quad (1.52)$$

Neutraali nihkepinge võib avaldada juhtivuskomponentide kaudu, et uurida võrgu resonantsi.

$$\dot{U}_0 = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_a}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_s} = -\dot{U}_{FN} \frac{\dot{Y}_a}{\dot{Y}_a + \dot{Y}_{0C} + \dot{Y}_{0W} + \dot{Y}_{0L}} \quad (1.53)$$

Peterseni pooli induktiivsuse L_p väärtus on reguleeritav. Induktiivsuse valikuga võib võrgu mahtvusliku ja kaarepooli induktiivjuhtivuse reguleerida absoluutväärtuselt võrdseteks.

$$\begin{aligned} Y_{0L} &= Y_{0C} \\ \frac{1}{\omega L_p} &= 3\omega C_0 \\ L_p &= \frac{1}{3\omega^2 C_0} \end{aligned} \quad (1.54)$$

Sellega minimeeritakse rikkeahela sümmeetriline juhtivus Y_s võrdseks sümmeetrilise aktiivjuhtivusega Y_{0W} .

$$\dot{Y}_s = 3(G_0 + j\omega C_0) - j3\omega C_0 + G_p = 3G_0 + G_p = \dot{Y}_{0W} \quad (1.55)$$

Mahtvusjuhtivuse täielikul kompenseerimisel on võrgu nulljärgnevuspinge maksimaalne. Suure juhtivusliku asümmeetriaga võrgus tähendab see kõrget pingete asümmeetriat. Selle vältimiseks kasutatakse võrgu mahtvuse üle- või alakompenseerimist, mida iseloomustatakse kompenseerimisteguriga K [10].

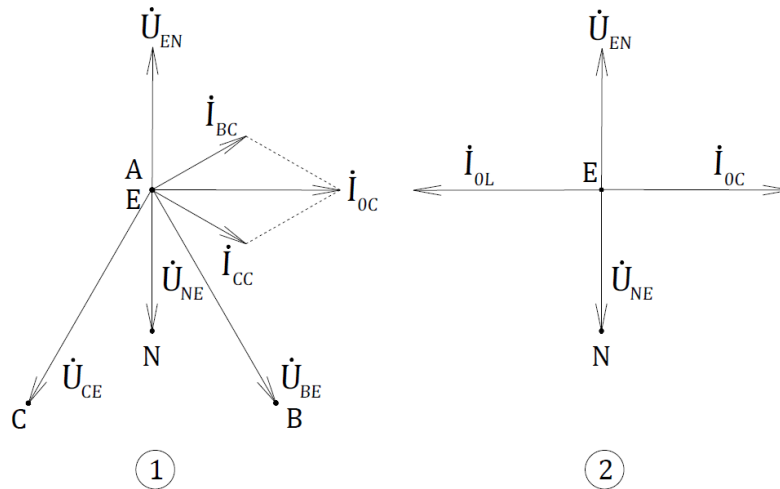
$$K = \frac{Y_{0L}}{Y_{0C}} = \frac{I_{0L}}{I_{0C}} \quad (1.56)$$

Automaatselt reguleeritava tsentraalse kaarepooliga võrgus valitakse soovitud kompenseerimisteguri väärtus ja kaarepooli hoitakse vastaval induktiivsusel L_p .

$$L_p = \frac{1}{3\omega^2 C_0 K} \quad (1.57)$$

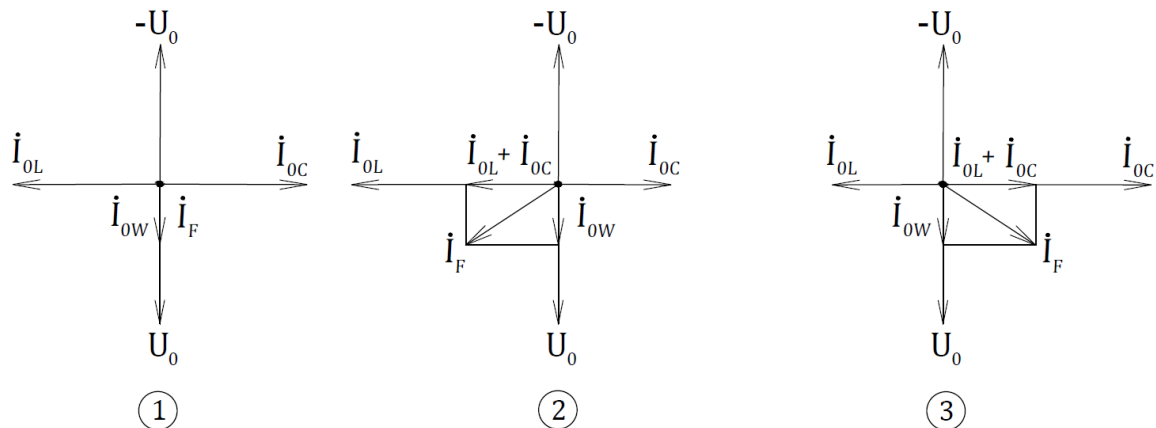
Eestis kasutatakse võrgu ülekompenseerimist. Ülekompenseerimine tagab, et fiidri välja lülitamisega kaasneva mahtvusliku juhtivuse vähenemisel ei teki resonantsolekut.

Joonise 1.16 faasordiagrammidel on illustreeritud võrgu mahtuvuse täielikku kompenseerimist jäiga lühise näitel.



Joonis 1.16 Täielikult kompenseeritud võrgu jäiga lühise faasordiagrammid

Tervete faaside ja maa vaheliste pingete U_{BE} ja U_{CE} põhjustatud mahtvuslikud voolud I_{BC} ja I_{CC} summeeruvad neutraali nihkepinge suhtes mahtvuslikuks summavooluks I_{OC} (1). Rikkevoolu mahtvuslik komponent I_{OC} kompenseeritakse nihkepinge suhtes induktiivse kaarepooli vooluga I_{OL} (2). Rikkeahela sümmeetrilise aktiivjuhtivuse Y_{OW} tõttu pole rikkevoolu täielikult võimalik kompenseerida. Joonisel 1.17 on rikkevoolu faasor I_F erinevatel kompenseerimisteguri väärtustel.



Joonis 1.17 Võrgu ala- ja ülekompenseerimine

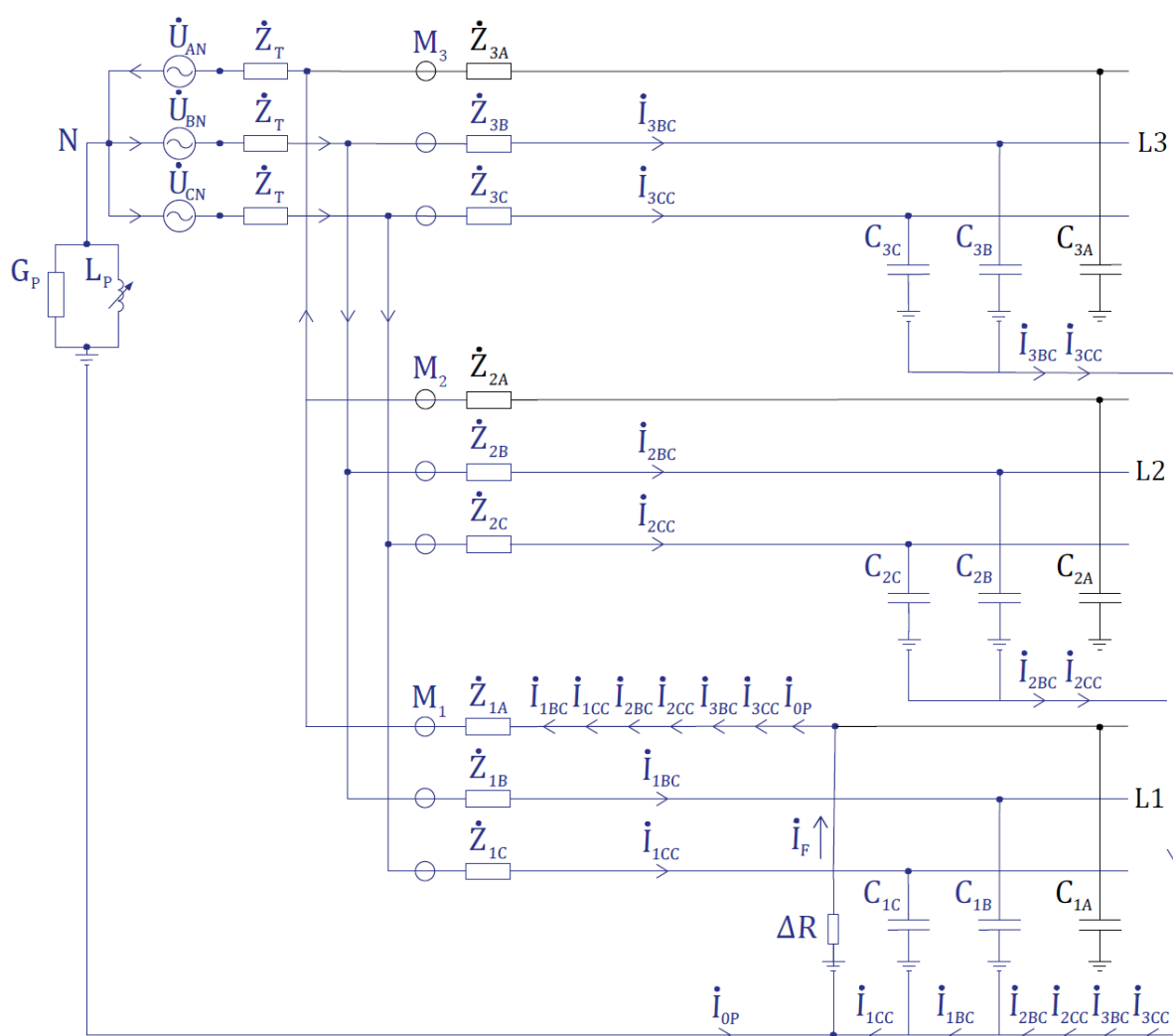
Diagrammil 1 $K = 1$ ja mahtvuslik rikkevoolu komponent on täielikult kompenseeritud. Diagrammil 2 $K > 1$, võrk on ülekompenseeritud ja rikkevool I_F on nulljärgnevuspinge U_0 suhtes induktiivse iseloomuga. Diagrammil 3 $K < 1$, võrk on alakompenseeritud ja rikkevool on nulljärgnevuspinge U_0 suhtes mahtvusliku iseloomuga.

2. ÜHEFAASILISE LÜHISE PRAKTILINE KÄSITLUS

Ühefaasilise lühise teoreetilises käsitluses uuriti isoleeritud ja resonantsmaandatud võrgu rikkeahelaid ja neid kirjeldavaid seoseid võrgu püsitalitlusel. Praktilises käsitluses uuritakse lühist mitme fiidriga võrgus, võttes arvesse lühiste dünaamikat.

2.1 Staatilised suunatud maaühenduskaitsed

Maaühenduskaitsete töö uurimiseks koostati mitme fiidriga resonantsmaandatud võrgu ühefaasilise lühise skeem - joonis 2.1. Võrgul on kolm fiidrit, millest esimesel on A faasis maalühis.



Joonis 2.1 Mitme fiidriga resonantsmaandatud võrgu ühefaasilise lühise skeem

Trafo takistus on tähistatud Z_T , faaside pikitakistused Z_{nA}, Z_{nB}, Z_{nC} , faaside põikimahtuvused C_{nA}, C_{nB}, C_{nC} ning põikimahtuvusi läbivad voolud I_{nBC} ja I_{nCC} , kus n on fiidri indeks. Kaarepooli genereeritud vool on tähistatud I_{OP} . Kaitseterminalid mõõdavad voolu mõõtepunktidest M_n . Rikkeahel on joonisel tähistatud sinise värviga.

Skeemilt võib avaldada rikkes fiidri kaitseterminali mõõdetud summavoolu I_{0Fw} (*forward current*), liites mõõtepunkti M_1 läbivad voolud.

$$\dot{I}_{0Fw} = -(\dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{1CC} + \dot{I}_{2BC} + \dot{I}_{2CC} + \dot{I}_{3BC} + \dot{I}_{3CC} + \dot{I}_{0P}) + (\dot{I}_{1BC} + \dot{I}_{1CC}) = -(\dot{I}_{0Bg} + \dot{I}_{0P}) \quad (2.1)$$

Taustvõrgu rikkevoolu panus I_{0Bg} (*background current*) defineeritakse kui kõikide tervete fiidrite genereeritud rikkevoolu komponentide I_{0Ln} (*line current*) summa.

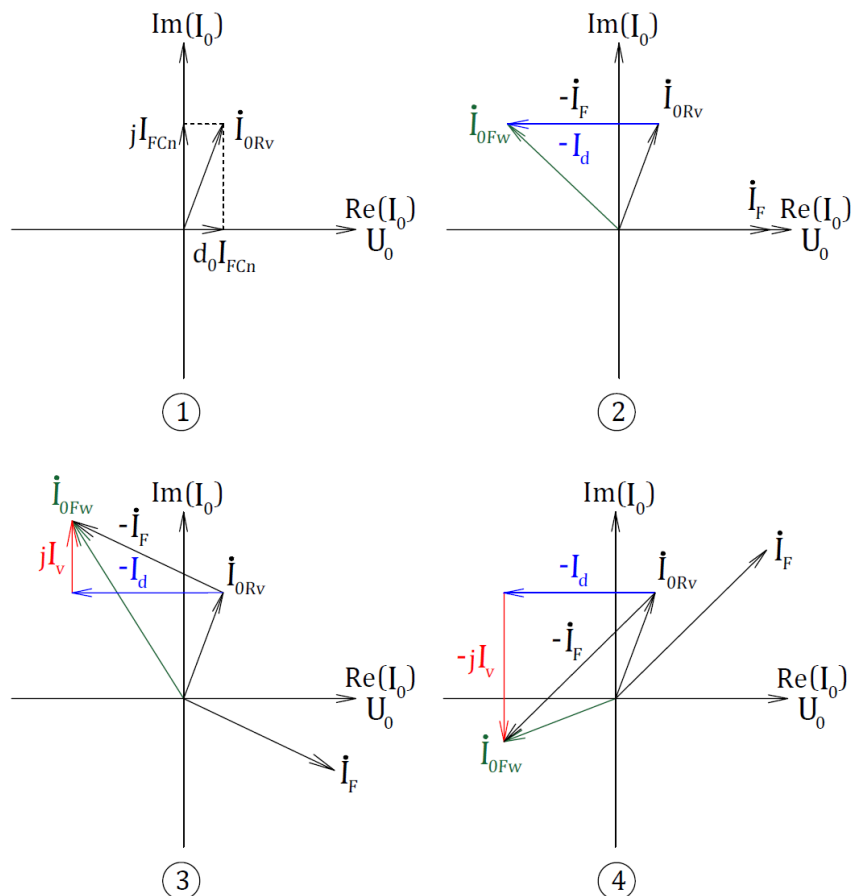
$$\dot{I}_{0Bg} = \sum_{n=2} \dot{I}_{0Ln} = \dot{I}_{0L2} + \dot{I}_{0L3} \quad (2.2)$$

$$\dot{I}_{0Ln} = \dot{I}_{nBC} + \dot{I}_{nCC} \quad (2.3)$$

Iga võrgus esineva lühise võib valitud fiidri jaoks liigitada kas fiidril olevaks või taustvõrgu lühiseks. Taustvõrgu lühise korral on terminali mõõdetud summavool I_{0Rv} (*reverse current*) võrdne fiidri enda genereeritud rikkevooluga I_{0Ln} .

$$\dot{I}_{0Rv} = \dot{I}_{0Ln} = I_{FCn} \cdot (d_{0N} + j) \quad (2.4)$$

Fiidri mahtuvuslik rikkevoolu panus I_{FCn} on leitav valemiga 1.33. Kompenseerimata võrgu sumbumisteguriga d_{0N} võetakse lisaks arvesse fiidri aktiivjuhtivusest tulenevat rikkevoolu osa.



Joonis 2.2 Terminali tuvastatud summavoolu faasordiagrammid

Fiidrile jääva lühise korral tuvastatakse summavool I_{0Fw} , mis on rikkevoolule vastassuunaline ja ei sisalda fiidri enda genereeritud rikkevoolu komponenti (joonis 2.1).

$$\dot{I}_{0Fw} = -(\dot{I}_F - \dot{I}_{0Ln}) = -(\dot{I}_F - \dot{I}_{0Rv}) = \dot{I}_{0Rv} - \dot{I}_F \quad (2.5)$$

Rikkelse ja terve fiidri mõõtepunkte ühefaasilisel lühisel läbivad summavoolud on illustreeritud joonisel 2.2. Diagrammil 1 on kujutatud tervel fiidril mõõdetud summavool I_{0Rv} . Diagrammidel 2-4 on rikkelse fiidri summavool I_{0Fw} võrgu resonants- (2), üle- (3) ja alakompensatsiooni korral (4).

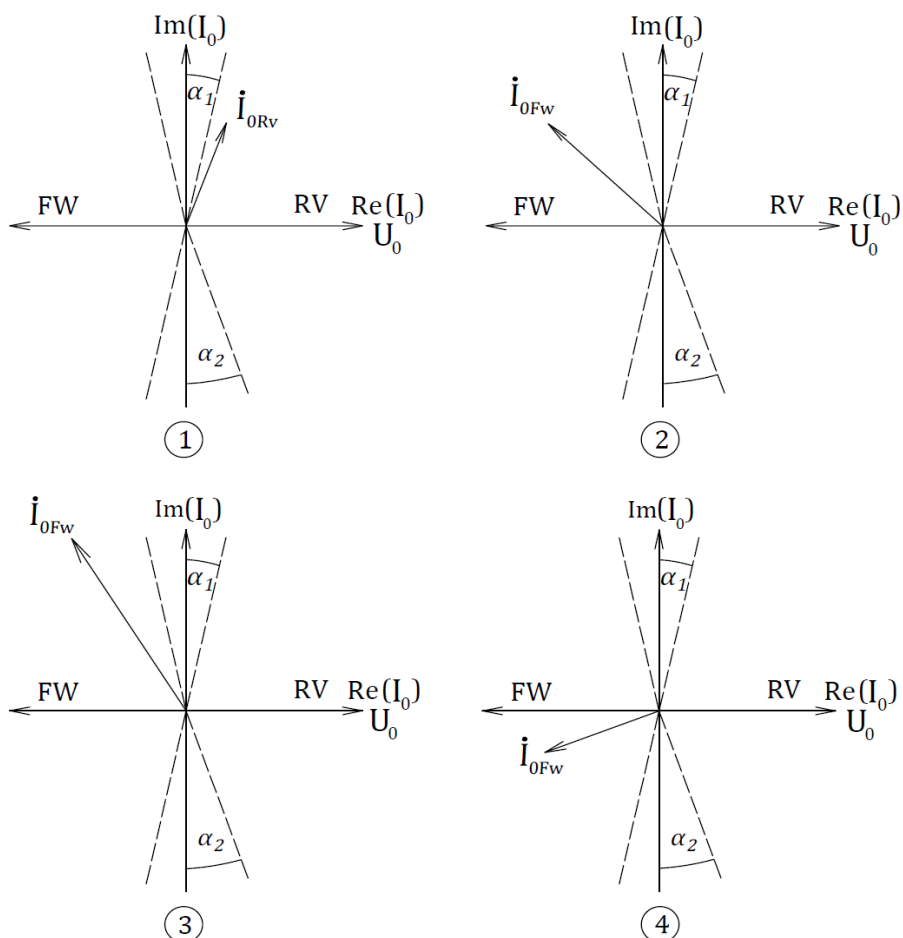
Diagrammil 2 on võrk täielikult kompenseeritud ja esineb vaid siniselt tähistatud rikkevoolu reaalkomponent – sumbumisvool I_d . Kolmandal faasordiagrammil on võrk ülekompenseeritud – rikkevool I_F on induktiivse iseloomuga. Neljandal faasordiagrammil on võrk alakompenseeritud – rikkevool I_F on mahtuvusliku iseloomuga. Kui võrk pole täielikult kompenseeritud, esineb alati ka punaselt tähistatud rikkevoolu imaginaarkomponent, lahkäälestusvool I_v .

Joonise 2.2 faasordiagrammid on staatilistele maaühenduskaitsetele rikke suuna tuvastamise aluseks. Kaitse määrab rikke suuna, võrreldes rakendussuuruse suunda polariseeriva suuruse suuna suhtes. Lihtsaima suunatud kaitse rakendussuuruseks on terminali tuvastatud summavoolu vastandväärtus. Polariseeriv suurus on referentsparameeter rakendussuuruse suuna määramiseks – üldiselt kasutatakse selleks nulljärgnevuspinget.

Rikkekohta läbivat maaühendusvoolu pole fiidriterminalil võimalik mõõta. Rikke suuna määramisel kasutatakse summavoolu vastandväärtust. Seetõttu tekib rikkelse fiidri rikkevoolu hinnangul viga, mis on võrdne fiidri enda genereeritud rikkevoolu komponendiga I_{0Rv} . Rikke suuna tuvastamiseks määratakse kaitsetsoonid. Rikkevoolu suund loetakse tuvastatuks, kui summavoolu vastandväärtuse faasor jääb määratud kaitsetsooni ehk kaitsesektorisse.

Voolulise maaühenduskaitses kaitsetsooni suund määratakse eeldatava rikkevoolu suunda osutava faasoriga. Resonantsmaandatud režiimil sõltub fiidri mõõdetud summavoolu nurk võrgu lahkäälestusest. Seetõttu valitakse tsooni suund rikkevoolu aktiivkomponendi järgi, mis on püsivalt nulljärgnevuspingele vastassuunas.

Joonisel 2.3 on näidatud, et selline tsooni valik sobib kõikidele joonisel 2.2 illustreeritud kompenseerimisrežiimidele.

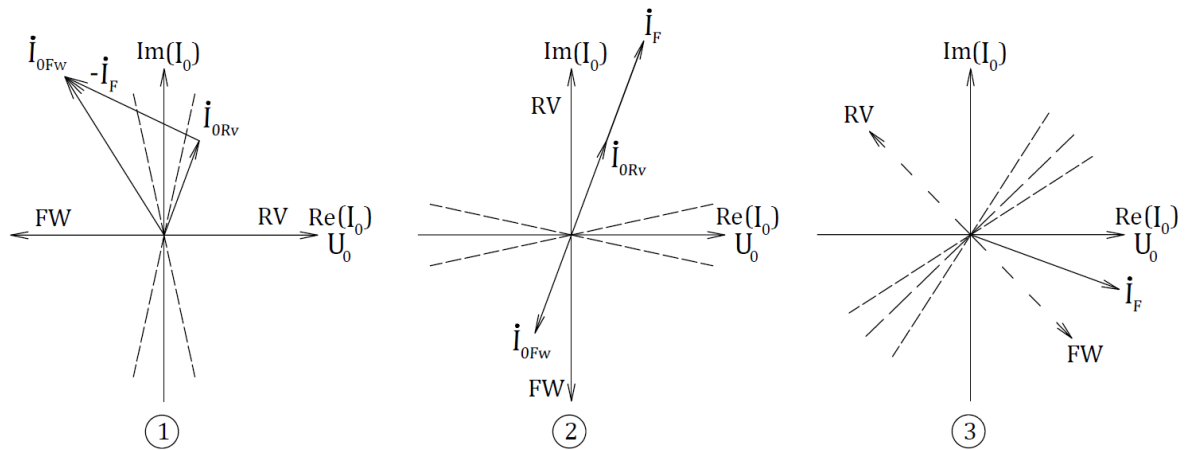


Joonis 2.3 Voolulise maaühenduskaitsese tsoonid resonantsmaandatud võrgus

Suunatud kaitses tuvastavad rikke suuna nii fiidril oleva kui taustvõrgu lühise korral, mistõttu kaitsel on kaks tsooni. Fiidril olevat lühist tuvastava tsooni suunafaasor on tähistatud FW – *forward* ja taustvõrgu lühist tuvastava tsooni faasor RV – *reverse*. Resonantsmaandatud võrgu maaühenduskaitsetes ühtib FW faasori suund nulljärgnevuspinge negatiivse ja RV faasori suund nulljärgnevuspinge positiivse suunaga. Tsoonide piirid on tähistatud kriipsjoontega.

Tsoonide laius on väiksem kui 180 kraadi, et kompenseerida mõõtmata jäänud I_{0RV} komponendist tulenevat viga. Tsooni laiuse piiramine aitab vähendada ka mõõtetrafode ebatäpsusest ja siirdeprotsessidest tingitud väärtalitluse ohtu. Kaitsetsooni laiust vähendatakse 180 kraadilt kas sümmeetriliselt nurga α või asümmeetriliselt nurkade α_1 ja α_2 võrra nagu joonisel 2.3 [14], [15].

Kuna kaitsetsoon määratakse eeldatava rikkevoolu suunda, võib suunafaasori FW nurga $-U_0$ suhtes valida võrdseks rikkeahela nulljärgnevusjuhtivuse Y_0 nurgaga. Joonisel 2.4 kirjeldatakse erinevatel maandusviisidel esinevaid summavoolu faasoreid ja neile kohaldatavate kaitsetsoonide suundasid.

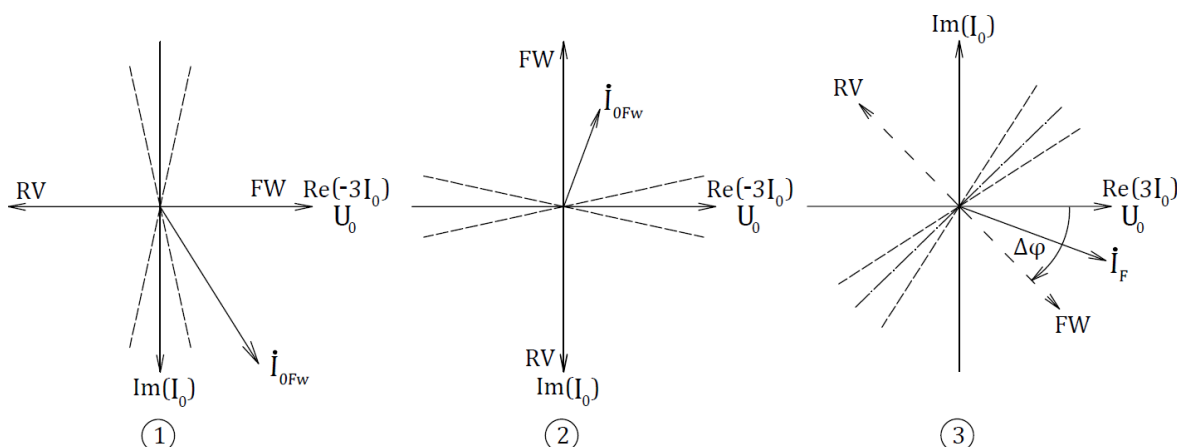


Joonis 2.4 Suunatud maaühenduskaitse tsoonid erinevatel maandusviisidel

Diagrammil 1 on resonantsmaandatud võrgu faasordiagramm. Diagrammil 2 on kujutatud isoleeritud võrgu tsoone. Isoleeritud võrgus on fiidriole jääva ja taustvõrgu rikke summavoolud vastassuunalised, kuna rikkevool sulgub tervetest faasidest rikkeliselt, ilma et sellele lisanduks kompenseeriv voolukomponent. Kuna rikkevool on valdavalt mahtuvuslik, valitakse FW faasor $-U_0$ teljest 90° positiivses suunas. Diagrammil 3 on aktiivmaandatud võrgu faasordiagramm. Rikkevool I_F sulgub maandatud neutraali kaudu, mistõttu terved fiidrid rikkeahelas ei osale ja terminali mõõdetud summavool on rikkevooluga võrdne. Rikkevool on liini induktiivsuse tõttu nulljärgnevuspinge suhtes induktiivse iseloomuga. FW faasor valitakse U_0 teljest teravnurga võrra negatiivses suunas.

Rikkevoolu hindamiseks kasutatakse maandamata ja resonantsmaandatud režiimidel summavoolu vastandväärtust. Võrreldakse U_0 ja $-3I_0$ faasori nurka. Seetõttu kirjeldatakse maaühenduskaitseid tavaliselt faasordiagrammidega, kus nulljärgnevusvoolu (või pinge) telge on pööratud 180° .

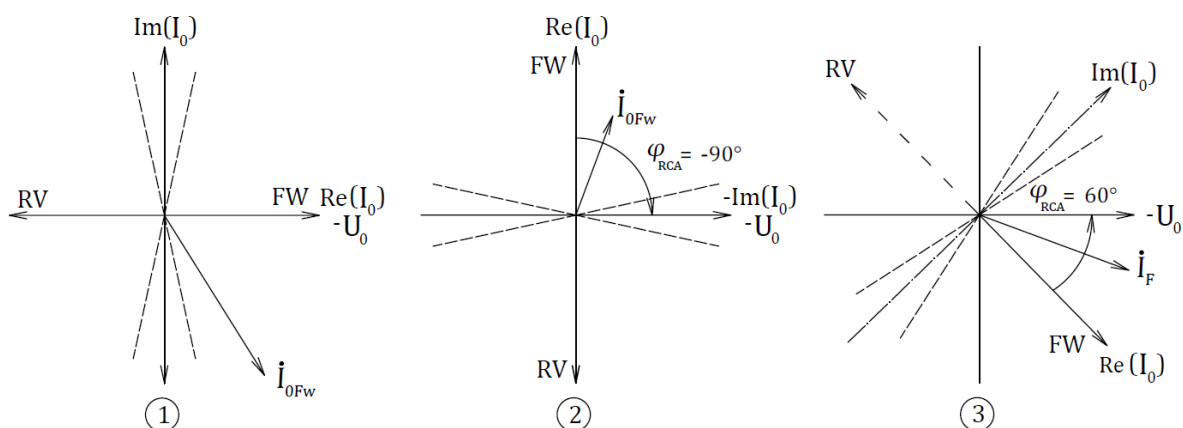
Siemensi faasordiagrammidel on x-telje positiivses suunas valitud Siemensi terminalide analoogsisenditel mõõdetavad suurused $(3)U_0$ ja $-3I_0$ (joonis 2.5) [14].



Joonis 2.5 Suunatud tundliku maaühenduskaitse tsoonid Siemensi terminalis

Siemensi terminalides on kaitsekarakteristiku FW suund resonantsmaandatud (1) ja maandamata (2) režiimidel fikseeritud väärtustele 0° ja $+90^\circ$ – säte $\cos(\varphi)$ või $\sin(\varphi)$. Siemens defineerib lisaks parandusnurga φ *correction*, mis on joonisel tähistatud $\Delta\varphi$. Sellega võib resonantsmaandatud või maandamata võrgu karakteristikut korrigeerida, pöörates seda vahemikus $-45^\circ - 45^\circ$. [14]

ABB summavoolu sisendil mõõdetakse summavoolu, selle polaarsust pööramata. Suunatud maaühenduskaitse funktsioon kasutab summavoolu kanali (või arvatatud summavoolu) vastandväärtust. Maaühenduskaitse faasordiagrammidel pöörab ABB aga polariseerivat suurust (U_0 või U_2). Joonise 2.4 diagrammide kaitsekarakteristikud pöörduvad 180° (joonis 2.6), analoogselt Siemensi karakteristikutele joonisel 2.5. [16]



Joonis 2.6 Suunatud maaühenduskaitse tsoonid ABB terminalis

ABB käsitleb erinevaid maandusviise $-U_0$ telje pööramisega I_0 suhtes rele karakteristiknurga $\varphi(RCA)$ võrra. Tsooni suuna määrab summavoolu I_0 telg. Joonise 2.6 diagrammidel on näidatud resonantsmaandatud (1), maandamata (2) ja aktiivmaandatud võrgu (3) kaitsekarakteristikud. [15]

2.1.1 Vooluline suunatud maaühenduskaitsed

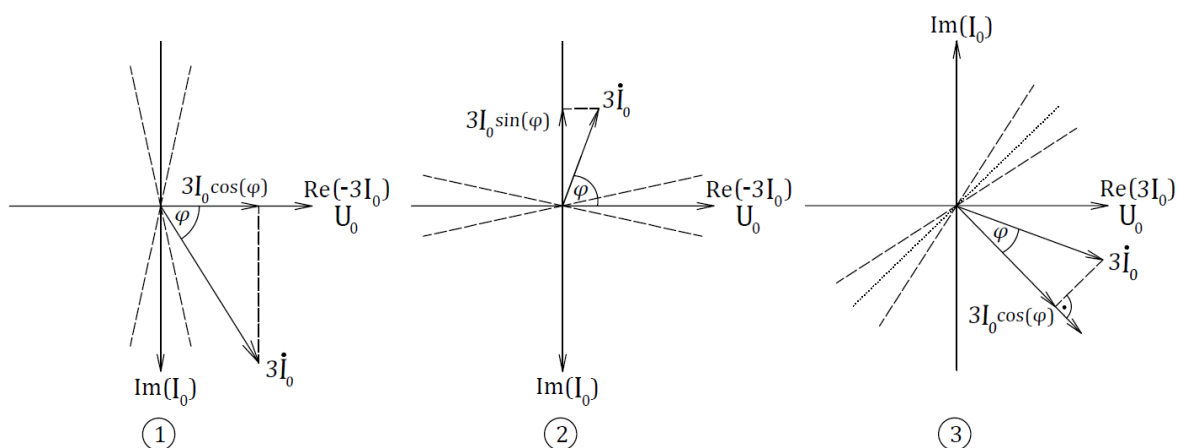
Voolulised maaühenduskaitsed laenavad nende eellase elektromehaanilise vattmeetrilise kaitse tööpõhimõttest. Vattmeetriline kaitse kasutab rakendussuurusena rikkeahela nulljärgnevusaktiiv- ja reaktiivvõimsusi.

$$P_0 = -3U_0 I_0 \cos \varphi \quad (2.6)$$

$$Q_0 = -3U_0 I_0 \sin \varphi \quad (2.7)$$

Elektromehaaniline vattmeetriline maaühenduskaitsed rakendub, kui rikkeahela aktiivvõimsuse (resonantsmaandatud võrgus) või reaktiivvõimsusega (isoleeritud võrgus) võrdeline jõumoment ületab sätteväärtuse. Vattmeetriline algoritm on olemas ka digitaalsetes terminalides, kuid enam leiab kasutust selle vooluline analoog – tundlik suunatud maaühenduskaitsed. Tundliku suunatud maaühenduskaitsed rakendussuuruseks on summavoolu vastandväärtuse aktiiv- või reaktiivkomponent. Kuna puutepinge kriteeriumi tagamiseks piiratakse maaühendusvoolu väärtust, on nulljärgnevuspinge mõju elimineerimine soovitatav.

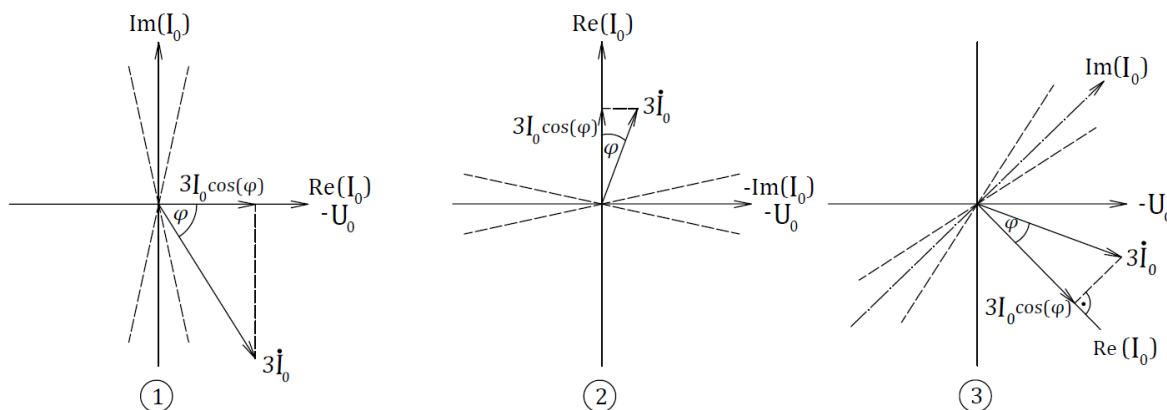
Kaitset nimetatakse tundlikuks, kuna see on mõeldud töötama kõrge rikkekontuuri takistusega võrgus ja reageerima madalatele rikkevoolu väärtustele. Joonisel 2.7 on illustreeritud Siemensi tundliku maaühenduskaitsed algoritmi rakendussuuruse arvutust [14].



Joonis 2.7 Tundliku maaühenduskaitsed rakendussuuruse arvutus Siemensi terminalis

Siemensi terminalis valitakse nurgafunktsioon ja parandusnurk φ *correction*. Resonantsmaandatud (1) ja isoleeritud (2) võrgus kasutatakse rikkevoolu aktiiv- või reaktiivkomponenti, valides rakendussuuruse arvutussätteks vastavalt $\cos(\varphi)$ või $\sin(\varphi)$. Aktiivmaandatud võrgus (3) tuleb resonantsmaandatud või isoleeritud võrgu karakteristikut pöörata parandusnurga võrra. Rakendussuuruse arvutamisel lahutatakse parandusnurk tuvastatud rikkevoolu nurgast. [14]

ABB ülekandevõrkudele suunatud Relion 650-670 seeria terminalides on eraldiseisev tundliku suunatud maaühenduskaitse funktsioon. Maandusviisiga arvestamiseks fikseeritakse $-U_0$ nurk summavoolu reaaltelje suhtes relee karakteristiknurgaga $\varphi(RCA)$. Joonisel 2.8 on illustreeritud ABB tundliku maaühenduskaitse algoritmi rakendussuuruse arvutust. [15]



Joonis 2.8 Tundliku maaühenduskaitse rakendussuuruse arvutus ABB terminalis

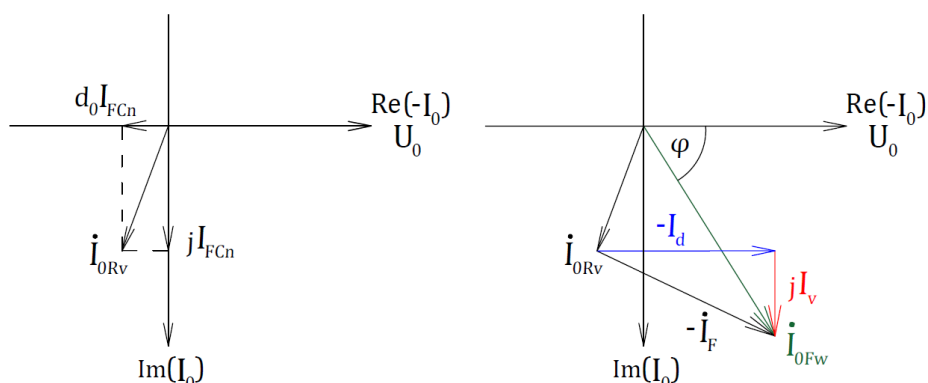
Resonantsmaandatud võrgu korral võib kasutada karakteristiknurka 0° (1), isoleeritud võrgus karakteristiknurka -90° (2). Aktiivmaandatud võrgu (3) karakteristiknurk on positiivne, kuid sõltub neutraali juhtivuse väärtusest. Rakendussuurus leitakse projektsioonina summavoolu reaalteljel, kasutades koosinusfunktsiooni. [15]

ABB keskpinge võrkudele suunatud Relion 605-640 seeria terminalides on tundlik ja mittetundlik suunatud maaühenduskaitse integreeritud ühte funktsiooni. Valides töörežiimiks $IOCos$ või $IOSin$, fikseeritakse karakteristiknurk väärtusele 0° või -90° ja rakendussuurus leitakse analoogselt joonise 2.8 diagrammidele 1 ja 2. Maaühenduskaitse töötab tundlikus režiimis. Valides töörežiimiks sektori nurga (*Phase Angle*), võib karakteristiknurga väärtust vabalt valida, kuid funktsioon töötab mittetundliku suunatud maaühenduskaitse. Suunatud maaühenduskaitse kasutab rakendussuurusena rikkevoolu hinnangut $-3I_0$. Tundlik suunatud maaühenduskaitse püüab rikkevoolust tuvastada maandusviisile iseloomulikule rikkekontuuri sümmeetrilisele juhtivusele vastava komponendi.

Aktiivmaandatud võrkudes sulgub rikkevool trafo neutraali kaudu, mistõttu terved fiidrid rikkeahelas ei osale ja rikkalise fiidri eristamine tervetest on lihtne. Lisaks on seal rikkevoolude väärtused kõrgemad, mistõttu summavool tuvastatakse täpsemalt. Seetõttu on aktiivmaandatud võrkudes otstarbekam kasutada suunatud maaühenduskaitset, mille sätet on võimalik koordineerida ohutut puutepinget tagava rikkevoolu piirmääraga. Isoleeritud ja kompenseeritud võrkudes on maaühenduskaitse ülesanne keerukam, mistõttu seal kasutatakse tundlikku maaühenduskaitset.

2.1.2 Staatiliste maaühenduskaitsete selektiivsus

Maaühenduskaitsed peavad eristama kaitstava fiidri ja taustvõrgu lühist. Isoleeritud võrgus on kaitstava fiidri ja taustvõrgu summavoolu faasorid vastassuunalised (joonis 2.4), mistõttu ühefaasilise lühise suuna eristamine on võrdlemisi lihtne. Resonantsmaandatud võrgu rikke suuna tuvastamine on keerukam. Joonisel 2.9 on illustreeritud resonantsmaandatud võrgu terminali rikkevoolu hinnang taustvõrku jääva ja kaitstaval fiidril esineva ühefaasilise lühise korral I_{0Fw} .



Joonis 2.9 Resonantsmaandatud võrgu terminali rikkevoolu hinnang taustvõrku jääva ja kaitstava fiidri ühefaasilise lühise korral

Lühise suuna eristusvõimet uuritakse rikkevoolu nurga φ abil.

$$\varphi = a \tan\left(\frac{I_{FCn} + I_v}{I_d - d_0 \cdot I_{FCn}}\right) \quad (2.8)$$

Rikkeline fiidri genereeritud voolukomponent I_{0Rv} , mis tuvastatakse taustvõrgu lühisel, on mahtuvusliku iseloomuga. Seetõttu on suunatud maaühenduskaitsel fiidril olevat ja taustvõrgu riket keeruline eristada kõrge nurga φ väärtuse korral. See võib juhtuda järgnevatel tingimustel:

1. Kõrge ülekompensatsioon – suureneb lahkäälestusvoolu I_v väärtus;
2. Madal taustvõrgu aktiivjuhtivus – väheneb sumbumisvoolu I_d väärtus;
3. Kaitstava fiidri kõrge mahtuvus – suureneb fiidri panus I_{0Rv} rikkevoolu I_F .

Sumbumisvoolu suurendamiseks lisatakse kaarekustutuspoolile paralleelne summutustakisti, mis tõstab rikkeahela aktiivjuhtivust ja seeläbi sumbumisvoolu I_d väärtust. Takistit juhitakse valitud ACF (*Active Current Forcing*) skeemi järgi.

Võimalikud ACF skeemid on järgnevad:

- 1) Takisti on võrgu rikketa talitluse ajal pidevalt võrku ühendatud. Rikke tekkel tuvastatakse rikke suund ja seejärel lülitatakse takisti kaare kustumiseni skeemist välja.
- 2) Takisti ühendatakse võrku vaid rikke suuna määramise ajaks.
- 3) Takisti on pidevalt võrku ühendatud. [17]

Summutustakistiga rikkeahelasse lisanduv aktiivjuhtivus pärsib kaare kustumist. Takisti võrgus hoidmise eeliseks on nulljärgnevuspinge vähenemine. Kõrge nulljärgnevuspinge võib olla probleemiks asümmeetriliste õhuliinidega võrgus. Kaablivõrkudes, kus asümmeetria on madal, võiks eelistada takisti võrgus hoidmist vaid rikke suuna määramise ajal.

Summutustakisti kasutuselevõtt lahendab tundliku suunatud maaühenduskaitses jaoks terve ja rikkeline fiidri eristamise probleemi. Summutustakisti valitakse sellise nimivooluga, et ühefaasilisel lühisel rikkelist fiidrit läbiv aktiivvool oleks oluliselt kõrgem terveid fiidreid läbivatest aktiivvooludest. Kaitsesüsteemi valitakse summutustakisti nimivoolust k korda madalam, kuid nii et see ületab kaitsitava fiidri genereeritud aktiivvoolu komponenti – Siemens soovib varuteguri väärtust $k = 2$ [14].

Summutustakisti kasutamine parandab ka mittetundliku suunatud maaühenduskaitses selektiivsust. Summutustakisti vähendab rikkevoolu nurka, garanteerides et rikkevool jääb kaitsesektorisse. See ei välista aga mittetundliku algoritmi liigtööd. Maaühenduskaitses võib rakendada taustvõrgu lühisel, kui summavoolu mõõtmisel esineb piisav nurgaviga ja kaitsitava fiidri rikkevoolu panus ületab rakendusvoolu sätet. Nurgaviga ohu likvideerimiseks tuleks kaitsesüsteemi sätet hoida kõrgemal kui kaitsitava fiidri rikkevoolu panus. See muudab aga kaitsesüsteemi vähem tundlikuks.

Maaühenduskaitses nurgaviga on suurim siis, kui rikkevoolu hindamisel kasutatakse faasivoolutrafoodega mõõdetud faasivoolude summeerimist. Isoleeritud ja resonantsmaandatud režiimidel on faasivooludes kõrge koormusvoolu osakaal. Väike voolutrafo nurgaviga võib kõrge koormusvoolu korral põhjustada suure vea rikkevoolu suuna hindamisel. Seetõttu tuleks summavoolu mõõtmisel eelistada faasivoolu ühisel magnetahelal liitvat summavoolutrafo [18].

Maaühenduskaitses käivitumine lubatakse vaid nulljärgnevuspinge U_0 sätteväärtuse ületamisel. Sätet tuleb valida nii, et see ületaks võrgu normaaltalitusliku pingete asümmeetria. Sätet määrab kaitsesüsteemi tundlikkuse kõrge takistusega lühistele (valem 1.49).

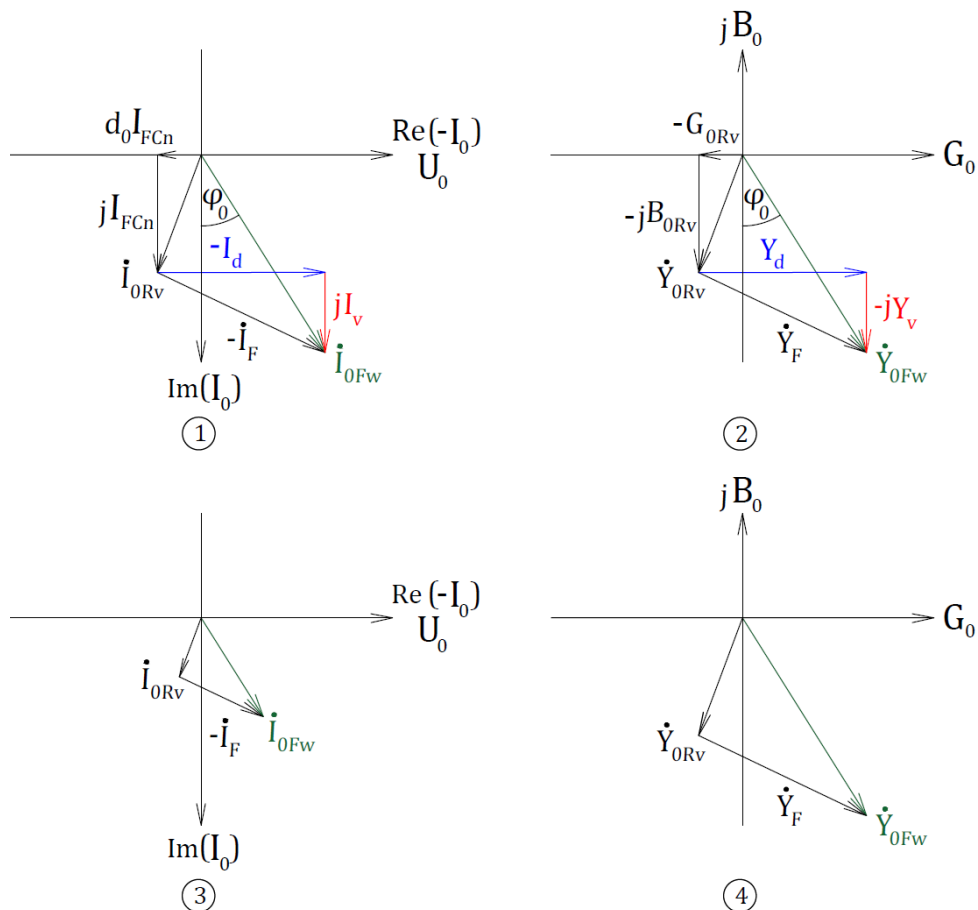
2.1.3 Juhtivuslik suunatud maaühenduskaitse

Rikkevool ja nulljärgnevuspinge sõltuvad lühistakistuse ΔR väärtusest, mistõttu nulljärgnevuspinge ja vooluliste kaitsete rakendussuuruse väärtus on dünaamilistel lühistel ajas muutuv. Rikkeahela sümmeetriline juhtivus lühistakistusest ei sõltu. Seetõttu on juhtivuslik suunatud maaühenduskaitse dünaamilistel riketel voolulistest kaitsetest töökindlam.

Juhtivusliku maaühenduskaitse rakendussuuruseks on neutraali juhtivus Y_N , mille väärtus on isoleeritud ja resonantsmaandatud võrkudes praktiliselt võrdne rikkeahela sümmeetrilise juhtivusega Y_S .

$$\dot{Y}_N = \dot{Y}_S = \frac{\dot{I}_F}{\dot{U}_0} = \frac{3\dot{I}_0}{-\dot{U}_0} \quad (2.9)$$

Terminalide tootjad kasutavad juhtivusliku maaühenduskaitse kirjeldamisel tihti eksitavaid summavoolu ja neutraali juhtivuse tähiseid: I_0 ja Y_0 [14], [16].



Joonis 2.10 Juhtivusliku ja voolul põhineva kaitse rakendussuuruste võrdlus

Joonisel 2.10 on illustreeritud seos voolulise ja juhtivusliku kaitse tuvastatava rakendussuuruse vahel.

Taustvõrgu Y_{ORv} ja fiidri rikkel Y_{OFw} tuvastatud neutraali juhtivused avalduvad mõõdetud summavoolude kaudu (valemid 2.4, 2.5) [19].

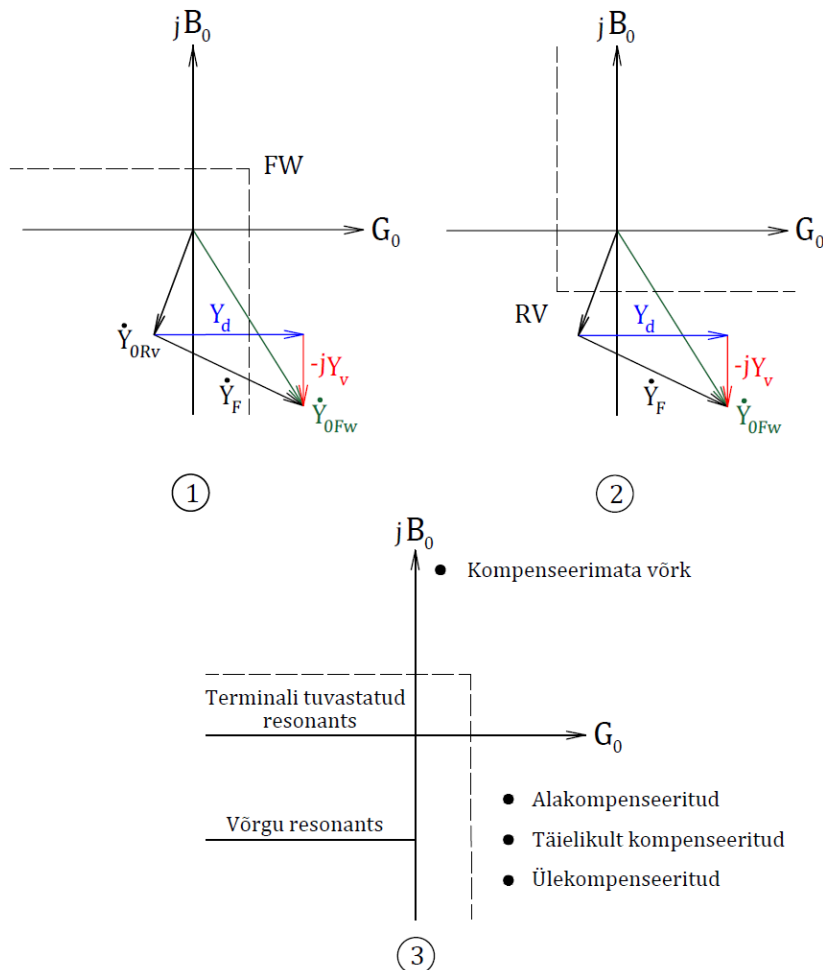
$$\dot{Y}_{ORv} = \frac{\dot{I}_{ORv}}{-\dot{U}_0} = -(G_{ORv} + jB_{ORv}) \quad (2.10)$$

$$\dot{Y}_{OFw} = \frac{\dot{I}_{ORv} - \dot{I}_F}{-\dot{U}_0} = \dot{Y}_F + \dot{Y}_{ORv} = Y_d - jY_v - (G_{ORv} + jB_{ORv}) \quad (2.11)$$

$$\dot{Y}_{OFw} = \dot{Y}_{OBg} + \dot{Y}_P = G_{OBg} + G_P + j(B_{OBg} - B_P)$$

Joonise 2.10 diagrammidel 1 ja 2 on voolulise ja juhtivusliku kaitse rakendussuurused fiidril oleva järgi lühisel. Diagrammidel 3 ja 4 on sama rike, kui lühistikust tõuseb ja võrgu nulljärgnevuspinge väärtus kahaneb poole võrra $-U_0$ [pu] = 0,5.

Kuna rikkeahela sümmeetriline juhtivus ei sõltu lühistikustusest, võib terminal staatilisel maalühisel ühe lahkäälestus- ja sumbumisteguri komplekti korral tuvastada vaid kahte juhtivuse väärtust, Y_{OFw} ja Y_{ORv} . Juhtivuslikus maaühenduskaitstes kasutatakse väga erinevaid kaitsekarakteristikuid, millest üks on joonisel 2.11. [20]



Joonis 2.11 Juhtivusliku maaühenduskaitse resonantsmaandatud režiimile sobiv karakteristik

Kaitsekarakteristik defineeritakse aktiiv- G_0 ja ja reaktiivjuhtivuse B_0 sätetega. Aktiivjuhtivuse säte koordineeritakse summutustakisti G_p juhtivusega. Analoogselt volulise kaitsega, tuleb juhtivus läbi jagada varuteguriga k . Kuna neutraali juhtivus nulljärgnevuspingest ei sõltu, määrab varutegur k juhtivuse sätte tundlikkuse kõikidele staatilistele lühistele.

Juhul kui võrgus on tsentraalne kompensatsioon ja fiider on ülekompanseeritud, võib reaktiivjuhtivuse sätte valida võrdseks nulliga. Juhul kui tegemist on hajutatud kompensatsiooniga või fiider on alakompenseeritud, võib rikkeahela reaktiivjuhtivuse B_0 väärtus olla positiivne, mistõttu sätet tuleb koordineerida alakompensatsiooni määra või fiidri ja fiidril oleva kaarepooli summaarse reaktiivjuhtivusega.

Kuna neutraali juhtivus lühistakistusest ei sõltu, võib fiidri staatilise lühise juhtivuse kaitsekarakteristikul määratleda punktina. Joonise 2.11 diagrammil 3 on illustreeritud erinevatele maandusviisidele vastavad juhtivused. Kuna terminal ei mõõda enda genereeritud rikkevoolu komponenti, tuvastab terminal resonantsi madalamal kompenseerimisvoolu väärtusel kui esineb võrgu resonants. [19]

Normaaltalituslik asümmeetria põhjustab ebatäpsust neutraali juhtivuse määramisel. [21] Normaaltalitusliku asümmeetria mõju võib elimineerida, kasutades rakendussuurusena neutraali juhtivuse muutust ΔY_N [22].

$$\Delta \dot{Y}_N = \frac{\Delta 3 \dot{I}_0}{-\Delta \dot{U}_0} = \frac{3 \left[\dot{I}_0(t_2) - \dot{I}_0(t_1) \right]}{- \left[\dot{U}_0(t_2) - \dot{U}_0(t_1) \right]} \quad (2.12)$$

Neutraali juhtivuse muutus ΔY_N leitakse rikkelt mõõdetud (t_2) ja rikke-eelselt mõõdetud (t_1) summavoolu ja nulljärgnevuspinge abil [19]. ABB juhtivuslikus kaitstes võib arvutusmeetodi aktiveerida, valides sätte „Delta“ [16].

Juhtivusliku kaitse käivitumine lubatakse vaid nulljärgnevuspinge ja summavoolu sätteväärtuste ületamisel. Kaitse rakendub kui arvutatud neutraali juhtivuse väärtus ületab juhtivuse sätteväärtuse valitud suunal sätestatud aja jooksul.

2.2 Ühefaasilise lühise siirdeprotsess

Rikkevool ja nulljärgnevuspinge on ühefaasilisel lühisel tihti kõrge harmooniliste sisaldusega. Harmooniliste allikaks võivad olla mittelineaarsed koormused, küllastunud magneetimisahelad või lühise transientprotsessid. Harmoonilised võivad põhjustada põhisagedusliku kaitse liig- või alarakendumist.

Suurima väljakutse esitavad maaühenduskaitsetele lühise transientprotsessid. Põhisageduslikud voolulised kaitsed ei suuda transientprotsessina kulgeva ühefaasilise lühise suunda töökindlalt määrata [23]. Tundliku suunatud maaühenduskaitsete tuvastatud suund sõltub kompenseeritud võrgus otsuse tegemise hetkest [2].

Isolatsiooni nõrgenedes või sellele avalduva pinge kasvades võib tekkida läbilöökk, millega kaasneb elektrikaar ja transientprotsess. Elektrikaar võib jääda püsivalt põlema või kustuda, kui rikkevoolu siinus läbib nullpunkti. Kaare kustumisel algab rikkelse faasi pinge taastumine. Kui läbilöödud isolatsiooni taastumise kiirus ei ületa rikkelse faasi ja maa vahelise pinge taastumise kiirust, süttib kaar uuesti ja lühis kulgeb vilkuva elektrikaarega lühisena (lühis õhuliinil). Lühis kulgeb vilkuva elektrikaarega lühisena ka siis, kui läbilöödud isolatsioon ei taastu täielikult (lühis kaabliliinil).

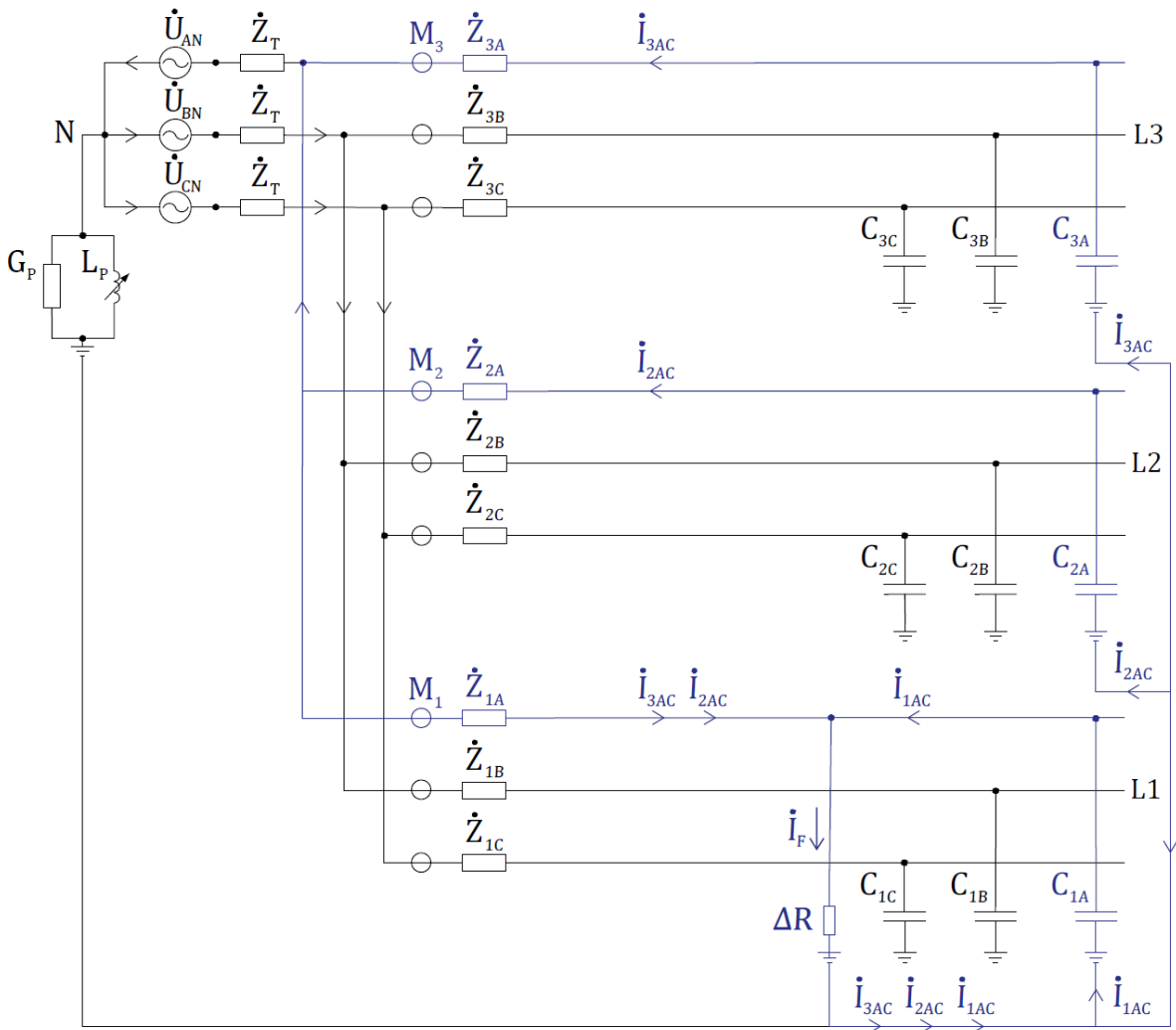
Kuna isoleeritud- ja resonantsmaandatud võrkude maaühendusvoolud on madalad, kustub suur osa lühistest rikkevoolu nulli läbimise hetkel. Kuna kaabli isolatsioon ei taastu, kulgevad need rikked kaablivõrgus vilkuva elektrikaarega lühisena. Seetõttu tuleb maandamata ja resonantsmaandatud kaablivõrkudes erilist tähelepanu pöörata kaare süttimisel tekkivate transientprotsesside tuvastamisele.

Ühefaasilise lühise siirdeprotsessi võib lahutada kaheks osaks – rikkelse faasi mahalaadumine ja tervete faaside laadumine. Kompenseeritud võrgus esineb lisaks kaarepooli transientprotsess. Rikkelse faasi mahalaadumine kulgeb tervete faaside laadumisest kiiremini ja domineerib rikke alguses. Võrgu faasidel on maa suhtes mahtuvuslik laeng q_0 , mis on määratud faasi ja maa vahelise pinge U_{FE} ja nulljärgnevusmahtuvusega C_0 .

$$q_0 = U_{FE} \cdot C_0 \quad (2.13)$$

Rike saab suurima tõenäosusega alguse hetkel, kui faasipinge U_{FE} on amplituudis. Rikke-eelse laengu määrab seega faasi ja maa vahelisele mahtuvusele C_0 avalduva faasipinge amplituudväärtus. Rikke püsiseisundini jõudmisel on pinge U_{FE} rikkelses faasis vähenenud ja tervetes faasides tõusnud.

Joonisel 2.12 on mahalaadumisprotsessi illustreeritud kolme fiidriga resonantsmaandatud võrgu näitel [24].



Joonis 2.12. Rikkelse faasi mahalaadumine resonantsmaandatud võrgu ühefaasilisel lühisel

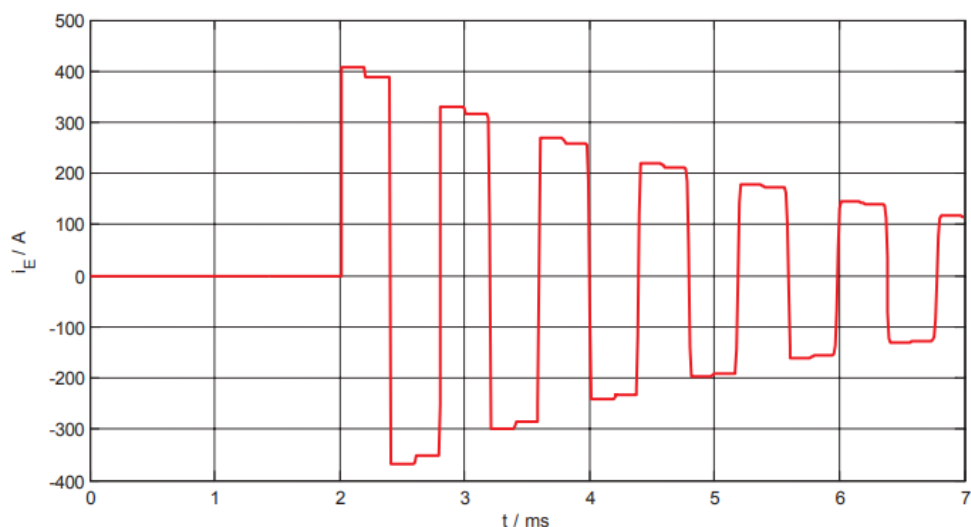
Mahalaadumisahel on joonisel tähistatud sinise värviga. Lühisel sulgub vooluring kõikide võrgu fiidrite jaoks ja rikkelse faasi mahtuvusel salvestatud energia hakkab rikkeahela aktiivtakistusel vabanema. Mahalaadumistransient on kõrge sagedusega ja ei sulgu suure induktiivsusega võrgu elementide kaudu.

Mahalaadumisprotsessi modelleeritakse kadudeta liini peegelduvate lainete teooria abil. Kadudeta liinil piirab voolutransiendi amplituudi karakteristiktakistus Z_c , mis on määratud liini ühikulise pikiinduktiivsuse ja põikimahtuvusega L' ja C' .

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (2.14)$$

Joonisel 2.13 on näidatud standardse 20 kV 150 mm² kaabli hajutatud parameetritega mudelil tehtud ühefaasilise lühise simulatsioon. [25]

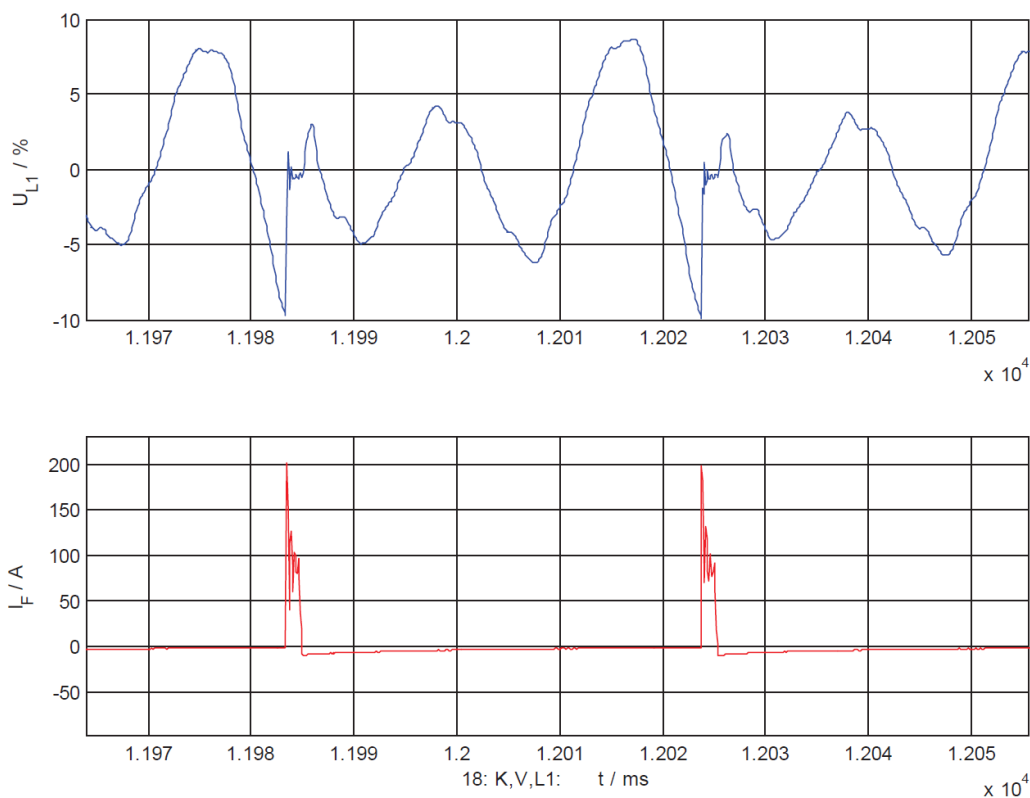
Kaabli karakteristiktakistus Z_c piiras volutransiendi amplituudi väärtusele 400 A.



Joonis 2.13 Mahalaadumistransient 20 kV 150 mm² ristlõikega kaablis [25]

Mahalaadumistransient saab alguse rikkekohast ja peegeldub igas punktis, kus toimub karakteristiktakistuse muutus – võrgu sõlm- ja otspunktides. Kuna võrgus on mitu fiidrit ja rohkelt peegelduspunkte, on mahalaadumistransient mitmesageduslik ja seda kirjeldatakse kõrgeimat voolu amplituudi omava domineeriva võnkesageduse abil. Volutransiendi amplituudi piirab kogu võrgu karakteristiktakistus, mis sõltub fiidrite piki- ja põikijuhtivustest, lühiskoha kaugusest ja lühistakistusest. [26], [27]

Joonisel 2.14 on illustreeritud vilkuva kaarega lühise faas-maa pinget ja rikkevoolu. [25]

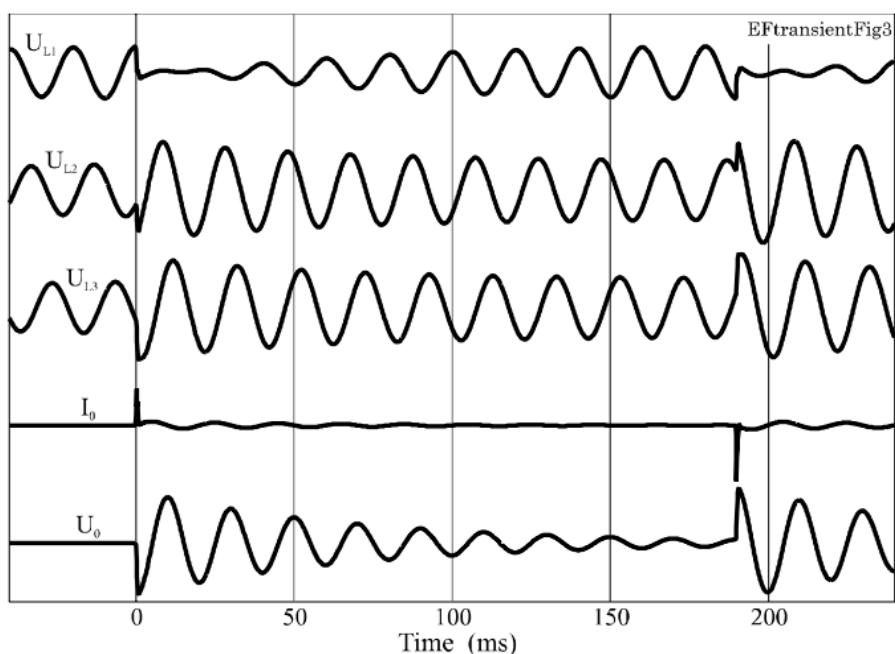


Joonis 2.14 Vilkuva elektrikaarega lühise laineujud kompenseeritud võrgus [25]

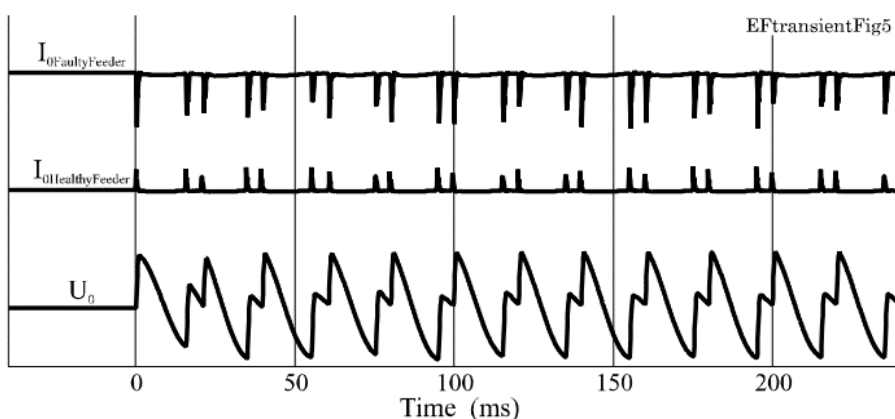
Joonise 2.14 graafikudel olevad lainekujud on salvestatud resonantsmaandatud kaablivõrgus tehtud lühiskatsetel täielikult kompenseeritud režiimil. [25]

Vilkuva elektrikaarega lühisel kustub kaar hetkel, kui rikkevoolu transiendi väärtus läbib nullpunkti. Voolupiigiga kaasneb rikkelse faasi pinge kiire mahalaadumine. See tekitab faasipinge transiendi, mis sumbub veel mõnda aega peale kaare kustumist. Rikkevoolu kustumisel algab rikkelse faasi laadumine, mille käigus faas-maa pinge tõuseb, kuni toimub uus läbilöök. Läbilöök toimub 20 kV võrgu kaablis üldiselt 1-6 kV pingeni laadumisel [25]. Vilkuva elektrikaarega lühis koosneb seega korduvatest rikkevoolu piikidest. Kaablivõrgus domineerib rikkevoolu piikides mahalaadumistransient.

Jooniste 2.15 ja 2.16 graafikudel on võrreldud rikkevoolu transiente täielikult ja alakompenseeritud režiimidel. Rikkevool on tähistatud I_0 . [23]



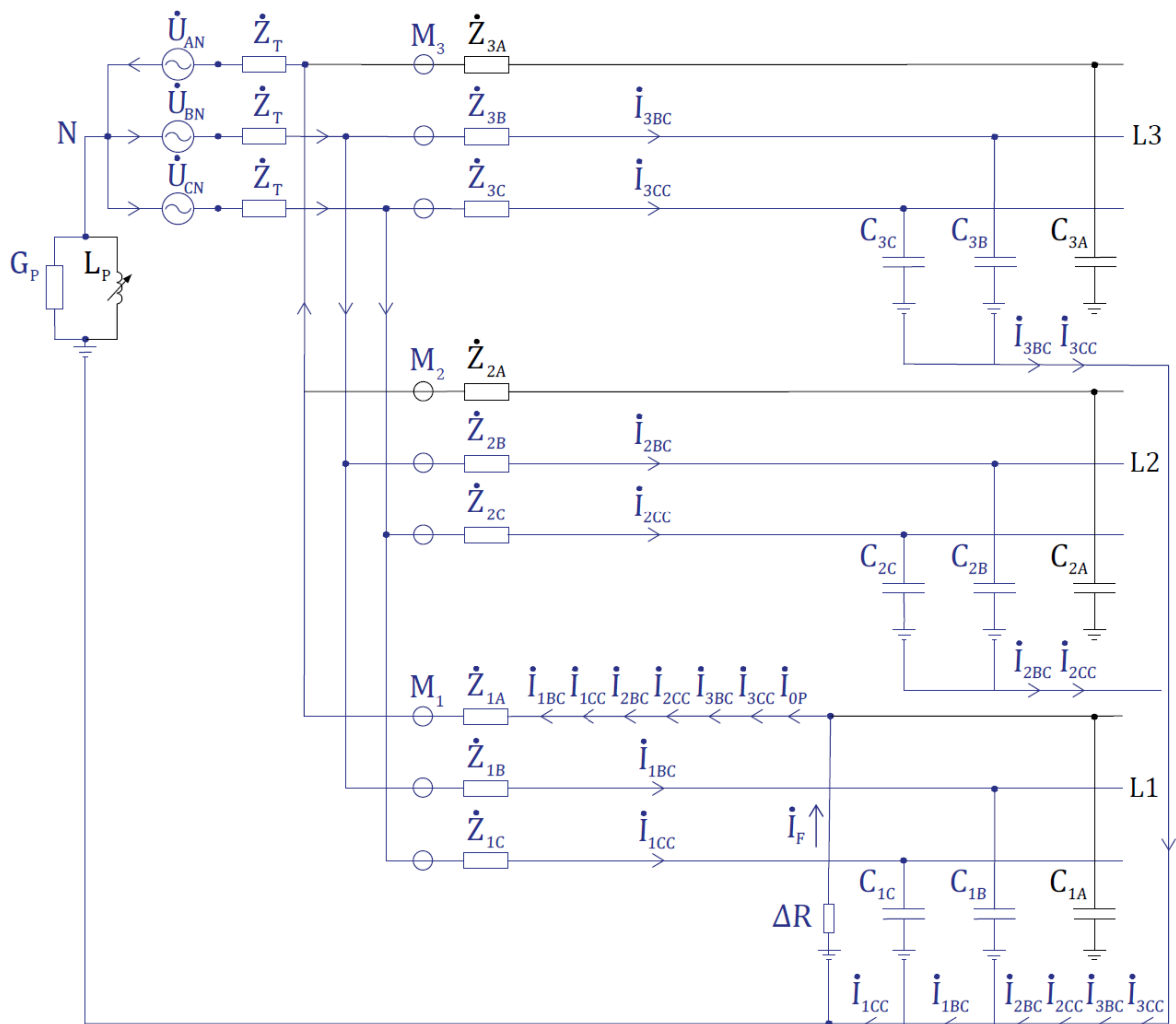
Joonis 2.15 Vilkuva elektrikaarega lühis täielikult kompenseeritud režiimil [23]



Joonis 2.16 Vilkuva elektrikaarega lühis alakompenseeritud režiimil [23]

Joonise 2.15 graafikutelt on näha, et rikkelse faasi pinge U_{L1} transient põhjustab nulljärgnevuspinge U_0 transiendi. Joonise 2.16 ülemisel graafikul on rikkelse ja keskmisel terve fiidri rikkevool. Kaarepool ei osale rikkelse faasi mahalaadumise ahelas, mistõttu kompenseerimine ei oma mõju vilkuva kaare voolutransiendile. Küll aga põhjustab resonantsmaandamine aeglasemat rikkepinge taastumist [28], eriti täieliku kompensatsiooni korral ja madalatel lühistakistuste väärtustel [29]. Lühises faasi pinge U_{L1} aeglasem taastumine kompenseeritud režiimil tingib pikemad ajaintervallid rikkevoolu piikide vahel.

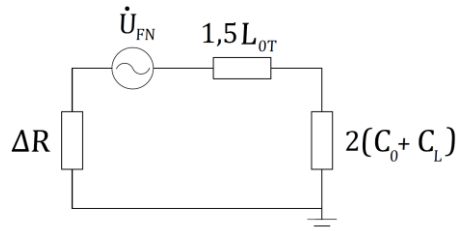
Rikke tekkel saab lisaks mahalaadumistransiendile alguse ka laadumistransient. Tervete faaside ja maa vahelised pinged hakkavad kasvama püsiseisundile vastavate väärtusteni. See toimub siirdeprotsessina, millest osa võtavad elemendid on joonisel 2.17 tähistatud sinise värviga. [24]



Joonis 2.17 Tervete faaside laadumine resonantsmaandatud võrgu ühefaasilisel lühisel

Laadumistransient on mahalaadumistransiendist madalama võnkesagedusega. Võnkeahelasse on kaasatud kõik võrgu elemendid, peale kõrge induktiivsusega

Peterseni pooli. Liinide induktiivsused on trafo omast madalamad, mistõttu nendega võib rikkeahela analüüsil mitte arvestada. Võnkeringi induktiivsuse võib lugeda võrdseks pooleteisekordse trafo lekkeinduktiivsusega L_{OT} . Võnkeringi mahtuvus on võrdne kahekordse nulljärgnevusmahtuvuse C_0 ja faaside vahelise mahtuvuse C_L summaga. Joonisel 2.18 on tervete faaside laadumisprotsessi lihtsustatud ahel. [30]



Joonis 2.18 Tervete faaside laadumisprotsessi lihtsustatud ahel

Erinevalt mahalaadumistransiendist, mille energiaallikaks on rikkelse faasi mahtuvusel olev laeng, toimub laadumisprotsess süsteemi toitel.

Võnkeprotsesside iseloomustamiseks kasutatakse vabavõnkumise nurkkiirust ω_0 ja sumbuvusust δ [31].

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.15)$$

Alasummutatud võnkeprotsessi nurkkiirus avaldub vabavõnkumise nurkkiiruse ja sumbuvuse kaudu.

$$\omega = \sqrt{(\omega_0^2 - \delta^2)} \quad (2.16)$$

Summutamata laadumisprotsessi nurkkiiruse võib avaldada joonise 2.19 RLC jadaahela parameetrite kaudu. [24]

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{1}{3L_{OT}(C_0 + C_L)}} \quad (2.17)$$

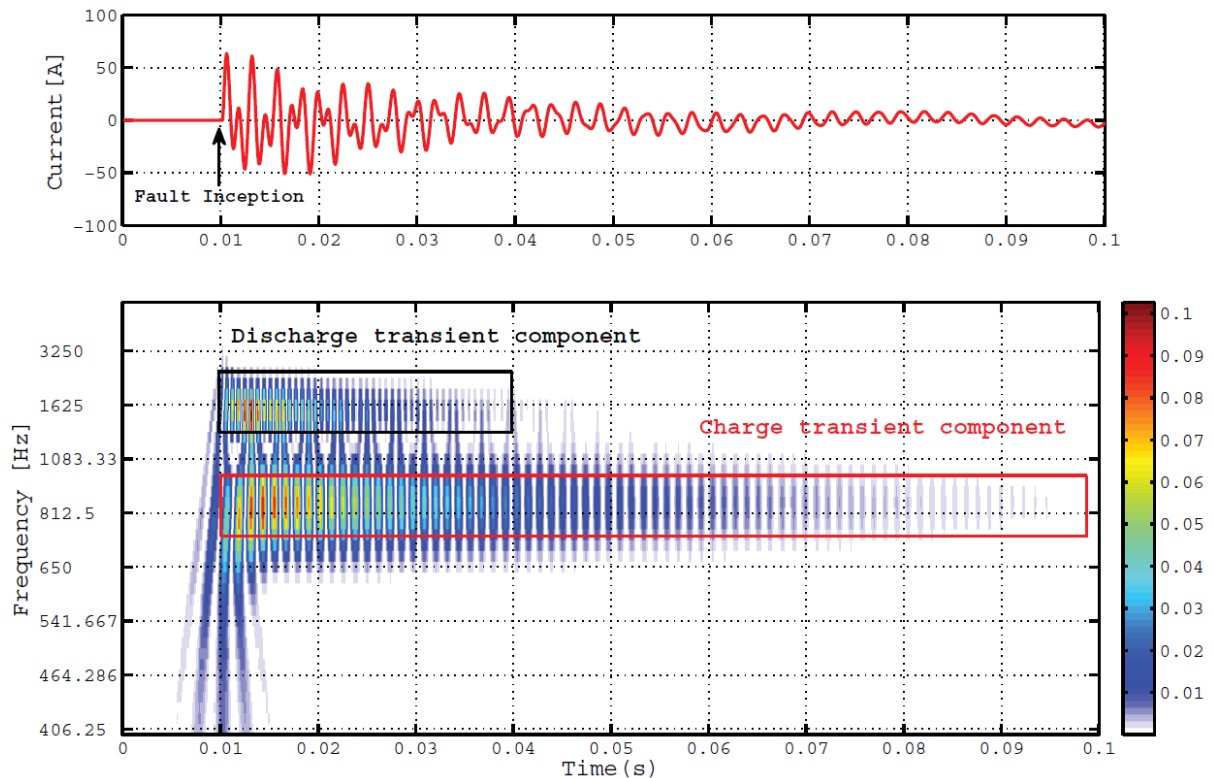
RLC jadaahela sumbuvus kasvab võrgu aktiivtakistuse kasvades, mistõttu lühistakistuse tõustes langevad nii laadumistransiendi nurkkiirus kui amplituud. [30]

$$\delta = \frac{R}{2L} \quad (2.18)$$

Lisaks mahalaadumis- ja laadumistransiendile esineb resonantsmaandatud võrgus kaarepooli transient. Transient võngub RLC paralleelahelal, mille sumbuvus avaldub rikkeahela parameetrite kaudu. [30]

$$\delta = \frac{1}{2RC} \quad (2.19)$$

Joonise 2.19 graafikudel on näidatud tarkvaras EMT/ATP simuleeritud isoleeritud keskpinge võrgu püsiva lühise rikkevoolu transiendi spektraalanalüüs. [28]



Joonis 2.19 Ühefaasilise püsiva lühise rikkevoolu transiendi spektraalanalüüs [28]

Ülemisel graafikul on rikkevool ja alumisel sellest tuvastatud transientsagedused sõltuvalt ajast. Alumisel graafikult on selge, et ühefaasilise lühise siirdeprotsess on mitmesageduslik. Siirdeprotsessis võib eristada kõrgema domineeriva sagedusega mahalaadumistransienti (ümbristatud musta kastiga) ja madalama domineeriva sagedusega laadumistransienti (ümbristatud punase kastiga), mis sumbub mahalaadumistransiidist aeglasemalt. Doktoritöös [28] uuriti õhuliinidega võrku. Kaablivõrgu transientide domineerivad sagedused on joonisel 2.19 näidatud sagedustest oluliselt kõrgemad.

Transientide domineerivale sagedusele antakse erinevaid hinnanguid. Mahalaadumistransienti võnkesagedus ületab 10 kHz [24] või jääb 300-5000 Hz vahemikku [28]. Laadumistransienti võnkesagedusele antakse hinnanguid vahemikus 80 Hz kuni mõni kHz [24], [32]. Kaablivõrgus võib oodata kõrgematele hinnangutele vastavaid sagedusi.

2.3 Dünaamilised suunatud maaühenduskaitsed

Võnkeahela skeemidelt joonistel 2.12 ja 2.17 näeb, et rikkevoolu laadumis- ja mahalaadumistransient on vastassuunalised. Mahalaadumistransiendil on summavool nulljärgnevuspingega samasuunaline. Laadumistransiendil, nagu rikke püsiseisundil, on summavool ja nulljärgnevuspinge vastassuunalised. Seetõttu peab dünaamilise maaühenduskaitses algoritmi koostamisel otsustama, kas see tuvastab laadumis- või mahalaadumistransienti.

Vilkuva elektriikaarega lühisel kustub kaar peale rikkevoolu nullpunkti läbimist, mistõttu madala takistusega kaablivõrgu lühisel domineerib rikkeimpulsi vältel mahalaadumistransient. Vilkuva kaarega lühise tuvastamiseks kasutatakse seetõttu mahalaadumistransienti. Mahalaadumistransiendi amplituud sõltub aga rikkelisel faasil olnud laengu suurusel, mis sõltub lühise tekkehetkest. Seetõttu ei pruugi kaitse mahalaadumistransienti alati tuvastada. Laadumistransienti toidetakse süsteemist, mistõttu transiendi summaarne energia on mahalaadumistransiendi omast suurem. Laadumistransient sumbub mahalaadumistransiendist aeglasemalt. Lisaks on mahalaadumistransiendi võnkesagedus madalam, mistõttu seda on lihtsam diskreetida. Seetõttu tuvastatakse püsivaid lühiseid laadumistransiendi järgi.

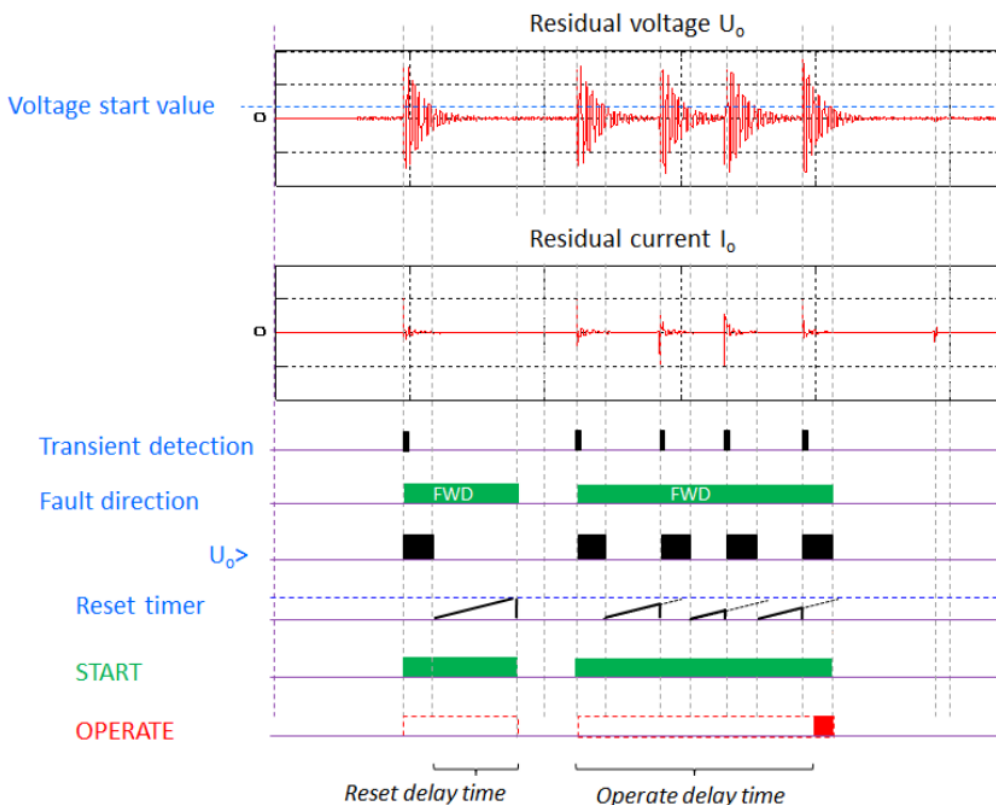
Lühise tuvastamiseks laadumistransiendi järgi on arendatud erinevaid kaitsealgoritme, mis põhinevad samal ideel. Terved fiidrid eristatakse rikkelisest nendesse laadumisel salvestuva energia või laengu järgi. Kuna salvestuvat energiat vaadeldakse pikema ajavahemiku jooksul, kui kulub mahalaadumistransiendi sumbumiseks, läheneb mahalaadumistransiendi mõju laadumistransiendi suhtes nullile. Laadumistransiendil põhinevad kaitsed võimaldavad rikke suunda tuvastada ka madala täpsusega mõõtetrafode ja kõrge võnkeahela takistusega rikete korral [32]. Elektrilevi võrgus on Eberle seadmetes laadumistransienti tuvastav qu_2 algoritm [33].

Kuna lõputöö fookuses olevates ABB ja Siemensi kaitseterminalides ainult laadumistransienti tuvastavaid kaitsesid pole, piirduakse mahalaadumistransiendile töötavate dünaamiliste kaitsete kirjeldamisega.

2.3.1 Transient-maaühenduskaitses

Transient-maaühenduskaitses tuvastab rikkevoolu mahalaadumistransiendi piigi. Kaitse võrdleb summavoolu suunda vooluimpulsi põhjustatud nulljärgnevuspinge muutuse suunaga. Kui nulljärgnevuspinge muutub summavooluga samas suunas, on tegemist fiidril oleva lühisega. [16]

Transient-maaühenduskaitsese on tavaliselt korduva maalühiskaitsega ühises funktsiooniplokis, kusjuures funktsioon toimib transient-maaühenduskaitsese režiimil signaalile ja korduva maalühiskaitse režiimil väljalülitusele [14]. See välistab kaitsese töötamise iseeneslikult kustuvatele lühistele. ABB seadmetes võib aga vilkuva kaare tuvastada ka transient-maaühenduskaitsese režiimil. Kaitsese rakendub, kui voolupiigiga kaasnev nulljärgnevuspinge transient ei lange sätestatud ajaintervalli jooksul piisavalt pikalt allapoole sätestatud nulljärgnevuspinge väärtust. ABB transientkaitsese tööpõhimõtte on kirjeldatud joonisel 2.20 [34].



Joonis 2.20 Transient-maaühenduskaitsese tööpõhimõtte ABB näitel [34]

Transient-maaühenduskaitsesele tuleb määrata nulljärgnevuspinge säteväärus, mis on kõrgem kui võrgu normaaltalituslik nulljärgnevuspinge. Transientkaitsese võib tuvastada vaid madala lühistakistusega rikked. Tuvastamiseks vajalik rikkevoolu impulsi amplituud pole terminalis seadistatav. Ilmselt kaasneks madala säteväärusega oht, et kaitsese töötab taustvõrgu laadumistransiendile või mõnele muule siirdeprotsessile.

2.3.2 Korduva maalühise kaitsese

Korduva maalühise kaitsese loeb transient-maaühenduskaitsese poolt tuvastatud voolupiikide arvu. Voolupiikide loendamine toimub nii kaua kui piikide vaheline intervall jääb alla ajasätte. Kui transientide vaheline paus on pikem, siis loendur nullitakse. Kaitsese rakendub kui loenduri väärtus jõuab sätestatud rikkevoolu piikide arvuni. [16]

Siprotec 5 terminalides võib rakendussuurusena kasutada ka voolupiikide integraali üle aja. Voolupiikide integreerimine võimaldab kaitse rakendumist paremini koordineerida isolatsioonile avalduva termilise koormusega. [14]

Vahel kasutatakse reservkaitsena pika viitega nulljärgnevuspinge kaitset. Kuna vilkuvale elektrikaarega kaasneb nulljärgnevuspinge transient, mis ei pruugi voolutransientide vahel sumbuda, võib nulljärgnevuspinge kaitse rakenduda vilkuvale kaarele. Seetõttu tuleks transientkaitse sätestada nulljärgnevuspinge kaitsest tundlikumaks või nulljärgnevuspinge kaitse transientkaitse käivitusest blokeerida. [23]

2.4 Mitmesageduslik juhtivuskaitse

Erineva iseloomuga ühefaasiliste lühiste kaitseks kasutatakse paralleelselt staatilisi ja dünaamilisi maaühenduskaitsmeid. Elektrilevi võrgus kasutatakse tundlikku suunatud maaühenduskaitsmeid koos korduva maalühise kaitsega. Mõlemal algoritmil on aga iseloomulikud puudused, mida ei suudeta ka kaitsete koostööl korvata.

Staatiliste maaühenduskaitsmete käsitluses näidati, et erinevalt voolulistest kaitsetest ei sõltu juhtivusliku maaühenduskaitsme tundlikkus lühistikistusest, mis on hea omadus transientide tuvastamiseks. ABB mitmesageduslik juhtivuskaitse (MFA - *Multifrequency Admittance-Based Earth Fault Protection*) on juhtivusliku maaühenduskaitsme edasiarendus, mis võimaldab tuvastada kõik staatilised ja dünaamilised rikked sama tundlikkusega, millega staatiline juhtivuslik maaühenduskaitsme tuvastab püsivaid rikkeid.

MFA arvestab rikke suuna tuvastamisel lisaks põhisageduslikule juhtivusele ka siirdeprotsessis osalevate kõrgemate harmooniliste komponentide juhtivustega. Põhisagedusest n korda kõrgema sagedusega harmoonilise jaoks on võrgu mahtuvuslik juhtivus n korda kõrgem ja induktiivne juhtivus n korda madalam. Nii võib harmoonilise komponendi juhtivuse fiidri Y_{0Fw}^n ja taustvõrgu lühisel Y_{0Rv}^n avaldada võrgu põhisageduslike parameetrite kaudu.

$$\dot{Y}_{0Rv}^n = -(G_{0Ln} + jnB_{0Ln}) \quad (2.20)$$

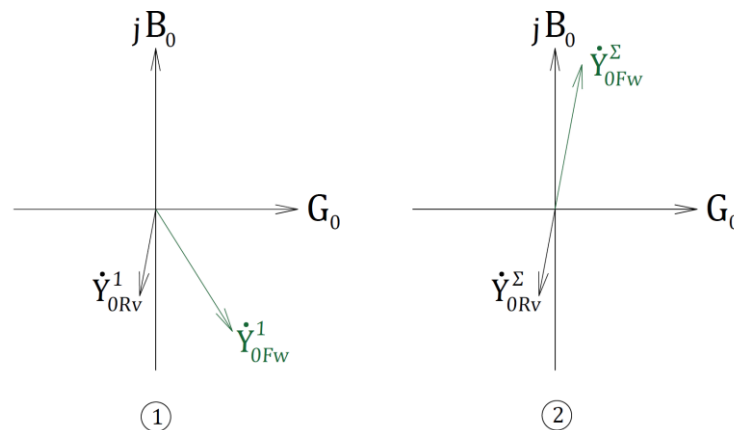
$$\dot{Y}_{0Fw}^n = \dot{Y}_{0Bg} + \dot{Y}_P = G_{0Bg} + G_P + j(B_{Bg} \cdot n - \frac{B_P}{n}) \quad (2.21)$$

Siirdeprotsessi sageduse kasvades taustvõrgu juhtivus suureneb ja kompenseerimise mõju väheneb. Leitakse mitmesageduslik neutraali juhtivus Y_N^2 , liites põhisageduslikule juhtivusele Y_N^1 kõrgemate harmooniliste reaktiivjuhtivused.

$$\dot{Y}_N^\Sigma = \text{Re} \left[\dot{Y}_N^1 \right] + j \text{Im} \left[\dot{Y}_N^1 + \sum_{n=2}^m \dot{Y}_N^n \right] \quad (2.22)$$

MFA algoritm arvutab põhisageduslike nulljärgnevuspinge- ja voolu väärtuste järgi põhisagedusliku neutraali juhtivuse Y_N^1 . MFA tuvastab harmoonilised, mille nulljärgnevuspinge- ja voolu väärtused ületavad 0,5% nimiväärtustest. Tuvastatud harmooniliste reaktiivjuhtivused summeeritakse põhisagedusliku juhtivusega. Harmooniliste komponentide puudumisel teeb algoritm otsuse vaid põhisagedusliku juhtivuse järgi. Kõrgemate harmooniliste arvestamine muudab rikke suuna eristamise resonantsmaandatud võrgus lihtsamaks, kuna laadumistransiendi rikkeahel on sama, mis kompenseerimata režiimil. [35]

Joonise 2.21 diagrammil 1 on näidatud dünaamilise rikke põhisageduslikud neutraali juhtivuse faasorid terves ja rikkelis esidris. Diagrammil 2 on näidatud sama rikke mitmesageduslikud juhtivusfaasorid siirdeprotsessi ajal. Mitmesageduslikud juhtivusfaasorid on vastassuunalised, mis välistab nurgaveast tuleneva väärtalitluse.



Joonis 2.21 Resonantsmaandatud võrgu lühise juhtivuskomponendid transientprotsessil

Siirdeprotsessi arenedes väheneb kõrge sagedusega transientide osakaal. Aina suurem osa rikkevoolust sulgub võrgu induktiivsete elementide kaudu. Neutraali juhtivusfaasori pikkus väheneb ja selle suund liigub komplekstasapinnal allapoole. Vilkuva elektriikaarega lühisel saadakse juhtivusfaasori arvutamisel sporaadiline tulemus [35]. Rikke suuna stabiilsemaks määramiseks dünaamilistel lühistel kasutatakse MFA algoritmis kumulatiivset faasorsummeerimist.

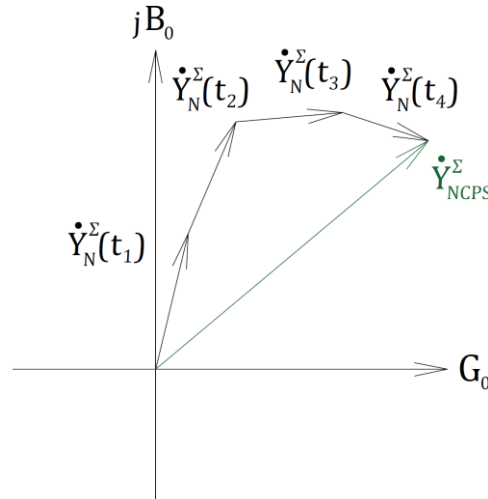
Kumulatiivne faasorsummeerimine CBS (*Cumulative Phasor Summing*) tähendab faasori E väärtuste $E(i)$ liitmist diskreetses aegruumis ajavahemikul t_{start} kuni t_{end} . [35]

$$\dot{E}_{CPS} = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \dot{E}(i) = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \text{Re}[\dot{E}(i)] + j \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \text{Im}[\dot{E}(i)] \quad (2.23)$$

Mitmesageduslike neutraali juhtivuste Y_N^Σ summeerimisel saadakse faasorsummeeritud mitmesageduslik neutraali juhtivus Y_{NCPS}^Σ .

$$\dot{Y}_{NCPS}^\Sigma = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \dot{Y}_N^\Sigma(i) = \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \text{Re}[\dot{Y}_N^\Sigma(i)] + j \sum_{i=t_{start}}^{t_{end}} \text{Im}[\dot{Y}_N^\Sigma(i)] \quad (2.24)$$

Juhtivuse kumulatiivne faasorsummeerimine on illustreeritud joonisel 2.22.



Joonis 2.22 Neutraali juhtivuse kumulatiivne faasorsummeerimine

Mahalaadumisprotsessi mõju, mis põhjustab ebastabiilsust faasori suuna määramisel, väheneb summeeritud faasorite arvu kasvades. Faasorsummeeritud mitmesagedusliku juhtivuse suund koondub püsitalitlusliku rikke neutraali juhtivuse suunda.

Faasorsummeeritud juhtivust kasutatakse vaid rikke suuna määramisel. MFA rakendussuurus on stabiliseeritud põhisageduslik rikkevool I_{FStab}^1 , mis leitakse stabiliseeritud põhisagedusliku neutraali juhtivuse Y_{NStab}^1 kaudu. Rikkeahela stabiliseeritud põhisageduslik juhtivus on summavoolu ja nulljärgnevuspinge vastandväärtuse kumulatiivsete põhisageduslike faasorsummade $3I_{0CPS}^1$ ja $-U_{0CPS}^1$ suhe. [35]

$$\dot{Y}_{NStab}^1 = \frac{3\dot{I}_{0CPS}^1}{-\dot{U}_{0CPS}^1} \quad (2.25)$$

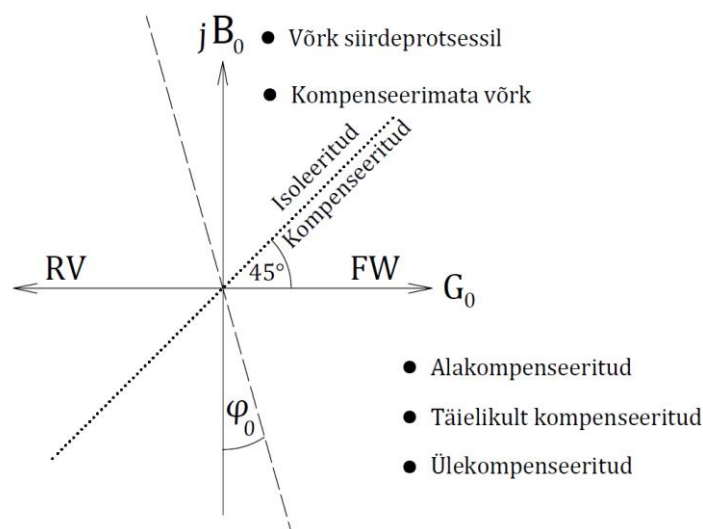
Stabiliseeritud juhtivuse väärtus läheneb ajas rikke püsiseisundi juhtivusele. Selle kasutamine võimaldab elimineerida transientide mõju rakendussuurusele. Stabiliseeritud neutraali juhtivusele leitakse vastav stabiliseeritud põhisageduslik rikkevool I_{FStab}^1 .

$$I_{FStab}^1 = Y_{NStab}^1 \cdot U_{FN} = I_{FCosStab}^1 + j I_{FSinStab}^1 \quad (2.26)$$

Stabiliseeritud rikkevool on MFA hinnang jäiga põhisagedusliku maalühise voolule. Stabiliseeritud rikkevoolu komponendid $I_{FCosStab}^1$ ja $I_{FSinStab}^1$ on MFA hinnangud võrgu lahkäälestus- I_V ja sumbumisvoolule I_d .

MFA kasutab kompenseeritud võrgus rakendussuurusena stabiliseeritud rikkevoolu aktiivkomponenti $I_{FCosStab}^1$. Sätte tuleb koordineerida summutustakisti nimivooluga, jagades see varuteguriga k . Varutegur kirjeldab kaitse voolusätte tundlikkust, sõltumatult lühistakistusest või lühise tüübist [36]. Isoleeritud võrgus kasutab MFA rakendussuurusena stabiliseeritud rikkevoolu I_{FStab}^1 . Sätte võib koordineerida taustvõrgu jäiga lühise rikkevooluga I_{OBg} . [16]

MFA võimaldab adaptiivset maandusviisi tuvastust. Isoleeritud režiim tuvastatakse kui mitmesagedusliku neutraali juhtivuse Y_{NCPS}^Σ nurk ületab 45° , kompenseeritud režiim kui nurga väärtus jääb alla 45° . Tuvastatud maandusrežiimi järgi valitakse automaatselt rakendussuurus. [16]



Joonis 2.23 MFA kaitse karakteristik

Joonisel 2.23 tähistati rakendussuuruse valikut määrav piir punktiirjoonega. Kaitsekarakteristik on tähistatud kriipsjoonega. Karakteristik defineeritakse vaid FW ja RV tsoone eraldava kaldenurgaga y-telje suhtes φ_0 .

MFA algoritm ei suuda elimineerida viga, mille põhjustab rikkevoolu hindamine summavoolu kaudu – I_{ORV} , ega viga mõõtetrafode ebatäpsusest. Need vead võivad tuvastatud aktiivjuhtivuse viia valesse suunda, mis tingib kaldenurgaga karakteristiku vajaduse.

Summutustakisti garanteerib, et rikkevoolu nurk on maksimaalselt φ (valem 2.8). Karakteristiku sättenurga φ_0 väärtus tuleb koordineerida summutustakistiga tagatud rikkevoolu nurgaga φ .

$$\varphi_0 \leq 90^\circ - \varphi = 90^\circ - a \tan\left(\frac{I_{FCn} + I_v}{I_d}\right) \quad (2.27)$$

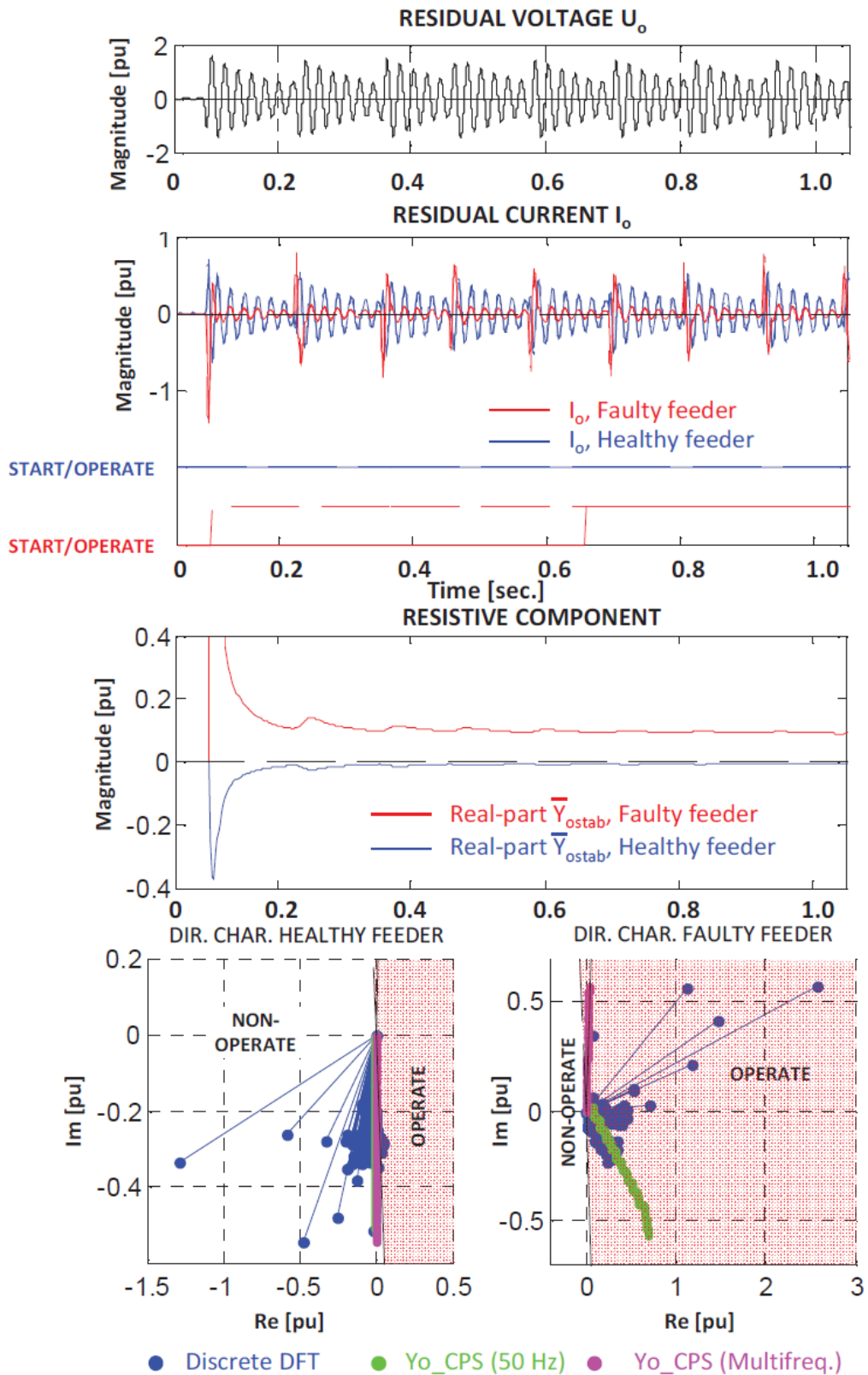
Rikkeahela sumbumisvool loeti võrdseks summutustakisti nimivooluga. Üldjuhul sobib sätteks vaikeväärtus 5° . Sättele tuleb tähelepanu pöörata siis, kui summutustakisti nimivool I_d on väga madal või fiidri panus rikkevoolu I_{FCn} väga kõrge.

MFA tööd on uuritud erinevatel tingimustel tehtud lühiskatsetega. MFA eelised teiste algoritmide ees ilmnevad dünaamilistel lühistel. Joonisel 2.24 on resonantsmaandatud võrgus läbi viidud vilkuva kaarega lühiskatse tulemused [35]. Ülemistel graafikutel on kujutatud nulljärgnevuspinget U_0 , summavoolu (tähistatud I_0) ja nende kaudu leitud põhisageduslikku stabiliseeritud neutraali juhtivuse reaalosa väärtust (tähistatud Y_{0stab}) rikkelses (tähistatud punasega) ja terves fiidris (tähistatud sinisega).

Rikke alguses on nulljärgnevuspinges ja summavoolus suur harmooniliste osakaal. Kuna terminal ei suuda siirdeprotsessist põhisageduslikku nulljärgnevuspinget ja -voolu täpselt välja filtreerida, on tuvastatud põhisageduslik stabiliseeritud neutraali juhtivus esialgu kõrge väärtusega. Nulljärgnevuspinge ja summavoolu faasorsummeerimise tulemusel koondub stabiliseeritud neutraali juhtivus põhisagedusliku neutraali juhtivuse väärtuseni. Järgnevad siirdeprotsessid avaldavad stabiliseeritud juhtivuse väärtusele aina väiksemat mõju.

Alumistel graafikutel on näidatud rikke suuna tuvastamist terves (vasakul) ja rikkelses fiidris (paremal). Võrdluseks toodud põhisagedusliku kaitse neutraali juhtivuse mõõtepunktid (tähistatud sinisega) paiknevad sporaadiliselt, kuna mahalaadumistransient põhjustab tulemuse võnkumist ning ahela juhtivus muutub ajas järjest madalamaks ja induktiivsemaks. Terve fiidri graafikul on näha, et osad tuvastatud punktid satuvad ka reaaltelje positiivsele poolele.

Faasorsummeeritud põhisageduslik neutraali juhtivus (tähistatud rohelisega) osutab rikkelses fiidris rikkeahela juhtivuse suunda ja terves fiidris fiidri juhtivusega vastassuunda. Suundade erinevuse tagab summutustakisti aktiivjuhtivus. Faasorsummeeritud mitmesageduslik neutraali juhtivus (tähistatud lillaga) on rikkelses fiidris mahtuvusliku ja terves fiidris induktiivse iseloomuga. Tulemus illustreerib, kuidas mitmesagedusliku juhtivuse kasutamine võimaldab rikke suuna lihtsamat eristamist.



Joonis 2.24 MFA kaitsealgoritmi toimimine vilkuva elektrikaarega lühisel [35]

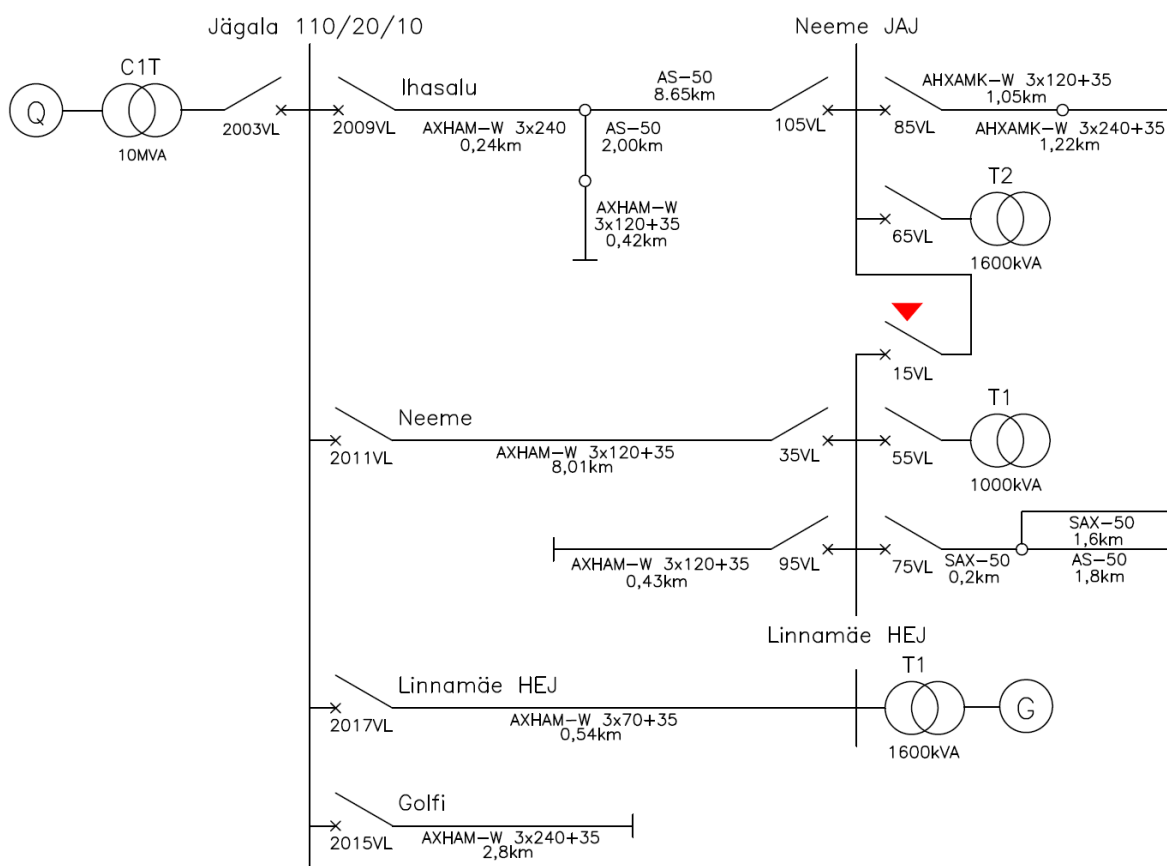
Vilkuva kaarega tehtud lühiskatse kinnitab, et MFA suudab tuvastada keeruliste siirdeprotsessidena kulgevaid lühiseid.

3. REALAJASIMULAATORI MUDELI KOOSTAMINE

Maaühenduskaitsete uurimiseks koostati Elektrilevi 20 kV võrgu mudel, millel algoritme reaalarajasimulatsioonidega testida. Modelleerimiseks valiti sobiv Elektrilevi võrgu osa. Valiku tegemisel lähtuti järgnevatest eelistustest:

- 1) Andmete kättesaadavus – võrgu modelleerimiseks võiks olla kättesaadav võimalikult täpne informatsioon;
- 2) Mudeli verifitseeritavus – võrgu sündmuste kohta võiksid olla olemas häiresalvestused, millega kinnitada mudeli täpsust;
- 3) Tulemuste kohaldatavus – võrgus võiksid olla digitaalsed kaitsed, mille maaühenduskaitse funktsioon töötab väljalülitamisele.

Modelleerimiseks valiti täielikult digitaalne Jägala piirkonnaalajaama 20 kV võrk joonisel 3.1.



Joonis 3.1 Jägala piirkonnaalajaama 20 kV võrgu skeem

Mudeli koostamiseks vajalikud liinide ja trafode parameetrid saadi Elektrilevi võrguinfosüsteemist Trimble NIS.

3.1 Võrgu modelleerimine

Võrgu mudel koostati reaajasimulatsiooni tarkvaras RSCAD. Kaablid modelleeriti n-elementidena, mille parameetrid arvutati kaablikataloogi andmete alusel [37]. Õhuliinidele koostati Bergeroni mudelid, kasutades võrgus valdavalt esineva õhuliinimasti BTR dimensioone ja maapinna eritakistust, mille väärtuseks valiti $300 \Omega \cdot m$ [38]. Võimsuslülitite, trafode ja toitva võrgu modelleerimiseks kasutati RSCAD-i kolmefaasilisi elemente.

Kuna reaajasimulaatori sõlmpunktide arv riistvaramooduli kohta on piiratud, tehti võrgu modelleerimisel lihtsustusi. Mudelis jäeti arvestamata võrgu kahe hargneva fiidri lühema haruga ja võimsuslülitite elemente kasutati vaid selektiivsuse uurimiseks vajalikes alajaama lahtrites. Kompenseeritud võrgu simuleerimiseks ühendati Jägala alajaama lattidele võimsuslülitiga eraldatav YD lülitusgrupiga trafo. Trafo Y mähise ja maa vahele lisati induktiivelement ja aktiivtakisti, millega simuleeriti Peterseni pooli ja summutustakistit.

Katsete läbiviimiseks oli kasutada kaks ABB REF620 kaitseterminali, mis nimetati F1 ja F2. Kaitsealgoritmide uurimiseks tuli terminalid siduda mudeli võimsuslülitite ja mõõtepunktidega. Reaajasimulaatori mudelisse ehitati kaitseterminali sidumise valikuloogika, mis võimaldas terminale simuleerimiskeskkonnas alajaama lahtritega siduda. Sidumisel anti terminali valitud lahtri mõõtepunkti analoogmõõtmised ja terminali väljalülitussignaal mõjus valitud lahtri võimsuslülitile. Analoogmõõtmiste saatmiseks kasutati Omicron CMS356 võimendeid. Kaitse rakendumise signaal saadeti terminalidest reaajasimulaatorisse IEC61850 Goose signaaliga.

Mudelis ehitati üles võimsuslülitite juhtimise ning jälgitavate parameetrite arvutamise loogika. Simuleerimiskeskonda joonestati võrgu ühejooneskeem. Loodi kontrollimisliides, mis võimaldas juhtida võimsuslülititeid ja valida lühise parameetreid. Koostati monitoorimiselemendid, mis võimaldasid jälgitavate parameetrite väärtuseid graafiliselt vaadelda.

3.2 Võrgu mudeli verifitseerimine

Mudeli verifitseerimiseks uuriti Jägala ja Neeme alajaama terminalide häiresalvestusi. Leiti kaks jäika ühefaasilist lühist ($U_0 \approx 0.96$ p.u.), üks Jägala alajaama Ihasalu ja teine Neeme fiidril, mille olid tuvastanud kõik Jägala alajaama fiidriterminalid. Mudelil simuleeriti analoogsed lühised ja tulemusi võrreldi häiresalvestuste andmetega (Tabelid 3.1 ja 3.2).

Tabel 3.1 Simuleeritud ja mõõdetud rikkevoolude võrdlus – Lühis Jägala alajaama Ihasalu fiidril

Fiider	I_F (A)		Viga (%)
	Häiresalvesti	Simulatsioon	
Ihasalu	52	51	1,9
Neeme	33	34	3,0
Golfi	13	14	7,7

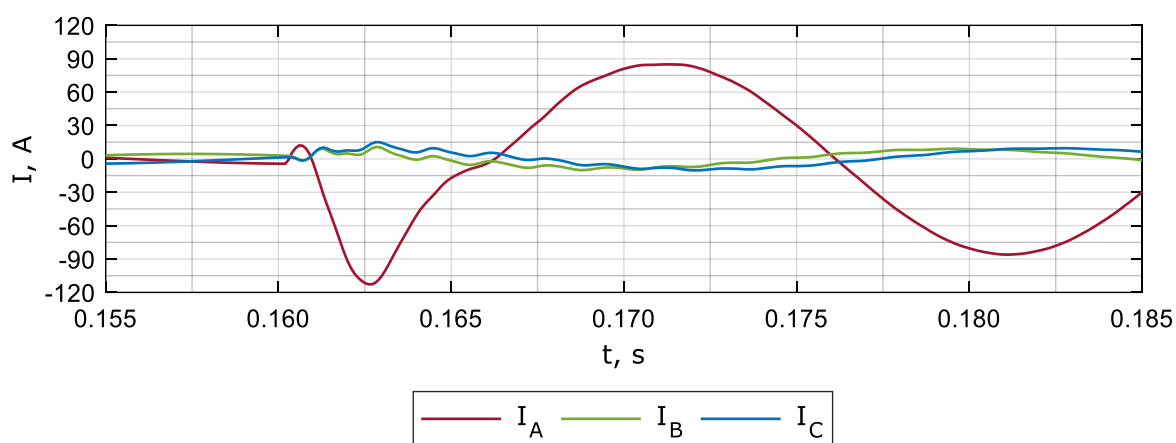
Tabel 3.2 Simuleeritud ja mõõdetud rikkevoolude võrdlus – Lühis Jägala alajaama Neeme fiidril

Fiider	I_F (A)		Viga (%)
	Häiresalvesti	Simulatsioon	
Ihasalu	12	13	8,3
Neeme	32	29	9,4
Golfi	13	13	0,0

Leiti, et mudeli täpsus on piisav Jägala võrgu ühefaasiliste lühiste simuleerimiseks.

3.3 Lühiste modelleerimine

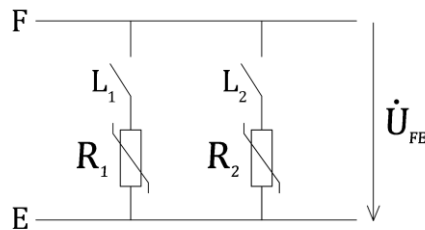
Püsiva lühise simuleerimisel kasutati reaajasimulaatori olemasolevat faas-maa lühise mudelit. Koostati loogika, mis võimaldas valida lühises olevat faasi ja reguleerida lühistakistuse väärtust. Joonise 3.2 graafikul on Jägala AJ Ihasalu fiidril simuleeritud 20Ω takistusega püsiva ühefaasilise lühise faasivoolud Ihasalu fiidri mõõtepunktis.



Joonis 3.2 Püsiva ühefaasilise lühise siirdeprotsessi faasivoolud kompenseerimata režiimil, $R = 20 \Omega$

Graafikul võib eristada rikkevoolu mahalaadumistransienti, mis domineerib rikkelses A faasis, tõstes esimesel poolperioodil rikkevoolu väärtust ja moonutades lainekuju ning laadumistransienti, mille võnkumine B ja C faasides on nähtav ka peale mahalaadumistransienti sumbumist. [39]

Vilkuva elektriikarega lühise simuleerimiseks tuli koostada lühise mudel. Mudelis kasutati kahte paralleelset ühefaasilise lühise elementi. Esimesele elemendile R_1 valiti madal takistuse väärtus ja sellega modelleeriti vilkuva kaare takistust. Teisele elemendile R_2 valiti kõrge takistuse väärtus ja sellega modelleeriti kaabli isolatsiooni takistust.

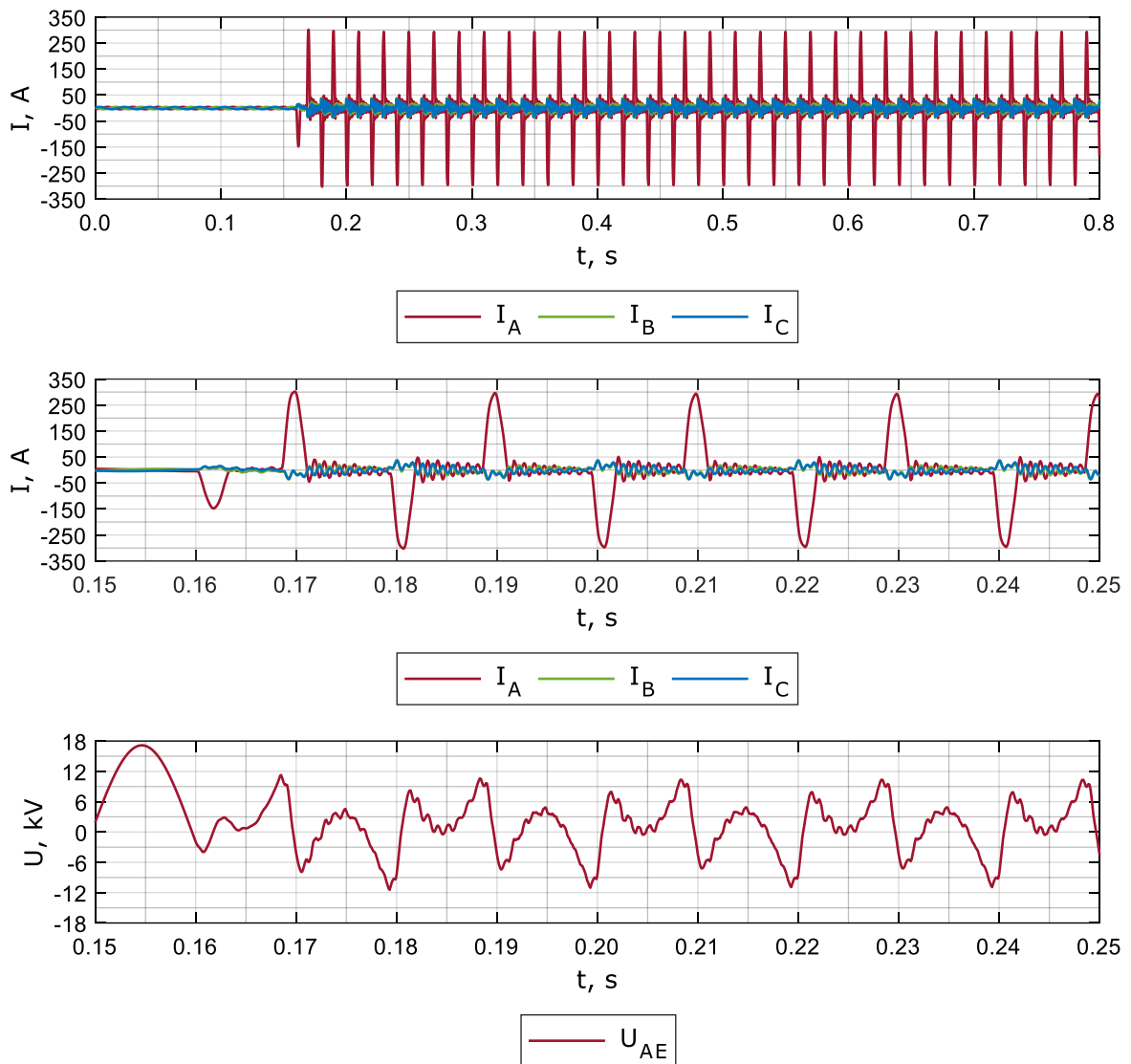


Joonis 3.3 Vilkuva elektriikare aseskeem

Joonisel 3.3 näidatud vilkuva kaare mudeli juhtimiseks koostati kontrollalgoritm, mis lülitab lülitite L_1 ja L_2 abil ühefaasilise lühise elemente. Rikke käivitamisel lülitatakse korruga sisse mõlemad elemendid – kaar süttib. Kuna R_1 takistus on R_2 omast oluliselt madalam, siis R_2 kaare põlemisel olulist mõju ei avalda. Rikkevoolu väärtuse lähenemisel nullile peab elektriikar kustuma, mistõttu element R_1 lülitatakse rikkevoolu väärtuse järgi välja. Rikkevoolule jääb sulgumisteedekond läbi riknenud isolatsiooni takistuse R_2 . Kaare kustumisel hakkab rikkeline faasi pinge isolatsiooni takistusel taastuma. Kaar lülitatakse taas sisse, kui rikkeline faasi pinge takistusel R_2 tõuseb üle valitud isolatsiooni tugevuse väärtuse.

Vilkuva elektriikarega lühis võib kulgeda erinevate lainekujudena. Rikkevoolu mahalaadumistransiendi esimene võnge võib rikkevoolu väärtuse viia nullini, nii et lühis kustub juba esimese mahalaadumistransiendi võnkega (joonis 2.15). Kõrgema rikkeahela takistuse korral on mahalaadumistransiendi osakaal rikkevoolus madalam ja mahalaadumistransient jõuab sumbuvalt võnkuda, enne kui rikkevoolu väärtus nullini jõuab (joonis 2.14). Mahalaadumistransiendi amplituudi on mudelis võimalik reguleerida vilkuva kaare takistuse R_1 muutmisega.

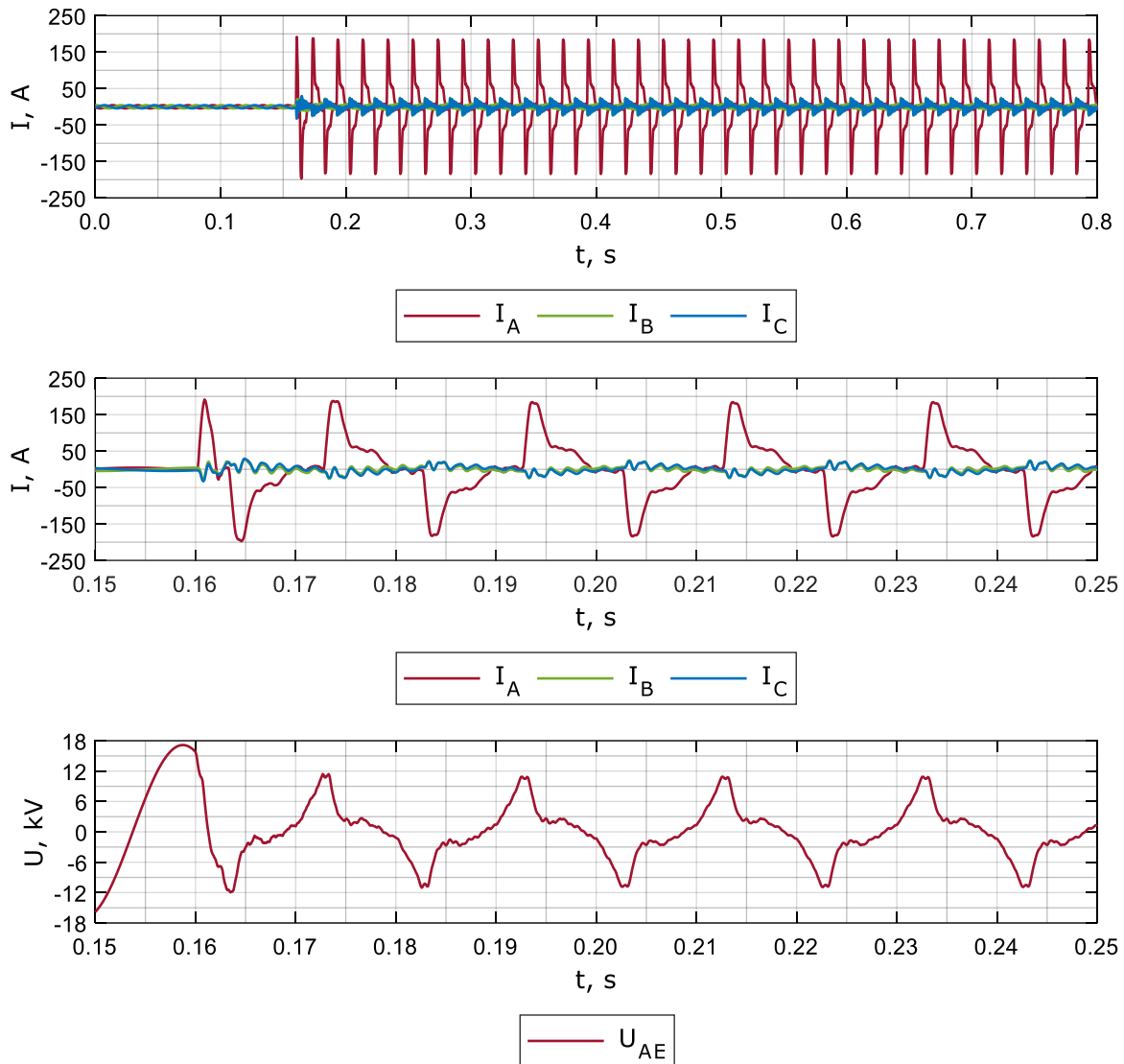
Vilkuva elektrikaarena kulgeva lühise mudelit testiti, simuleerides Jägala AJ Ihasalu fiidri lühist. Joonise 3.4 graafikutel on simulatsiooni tulemus kompenseerimata režiimil kaare takistusel $R_I = 1 \Omega$.



Joonis 3.4 Vilkuva elektrikaarega Jägala AJ Ihasalu fiidri lühis kompenseerimata režiimil kaare takistusel $R_I = 1 \Omega$

Ülemisel graafikul on näha rikkelse faasi voolupiike. Keskmisel graafikul on faasivoole näidatud lühema ajaintervalli jooksul, et joonistuks välja rikkevoolu lainekuju. Alumisel graafikul on rikkelse faasi pinge – faasi mahalaadumine ja laadumine on seotud rikkevoolu graafikult tuvastatava kaare süttimisega ja kustumisega.

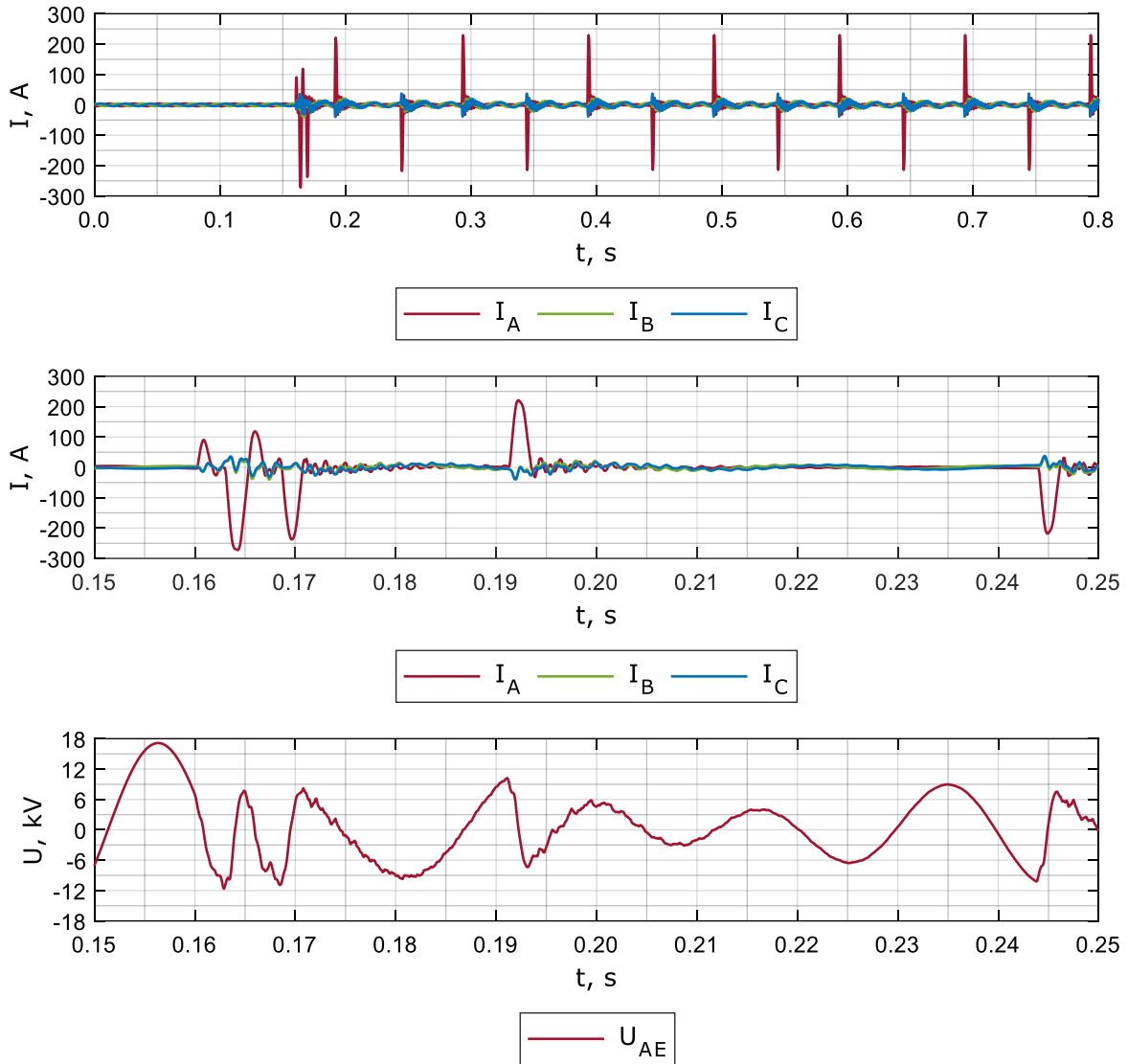
Joonise 3.5 graafikutel on simulatsiooni tulemus kompenseerimata režiimil kaare takistusel $R_1 = 35 \Omega$.



Joonis 3.5 Vilkuva elektrikaarega Jägala AJ Ihasalu fiidri lühis kompenseerimata režiimil kaare takistusel $R_1 = 35 \Omega$

Graafikutelt on selge, et kaare takistuse tõstmine muutis rikkevoolu lainekuju. Kuna mahalaadumistransiendi amplituud pole piisav, et rikkevoolu väärtust esimese mahalaadumistransiendi võnke jooksul nulli viia, muutub rikkevoolu piik laiemaks. Seetõttu muutub ka rikkelse faasi pinge lainekuju.

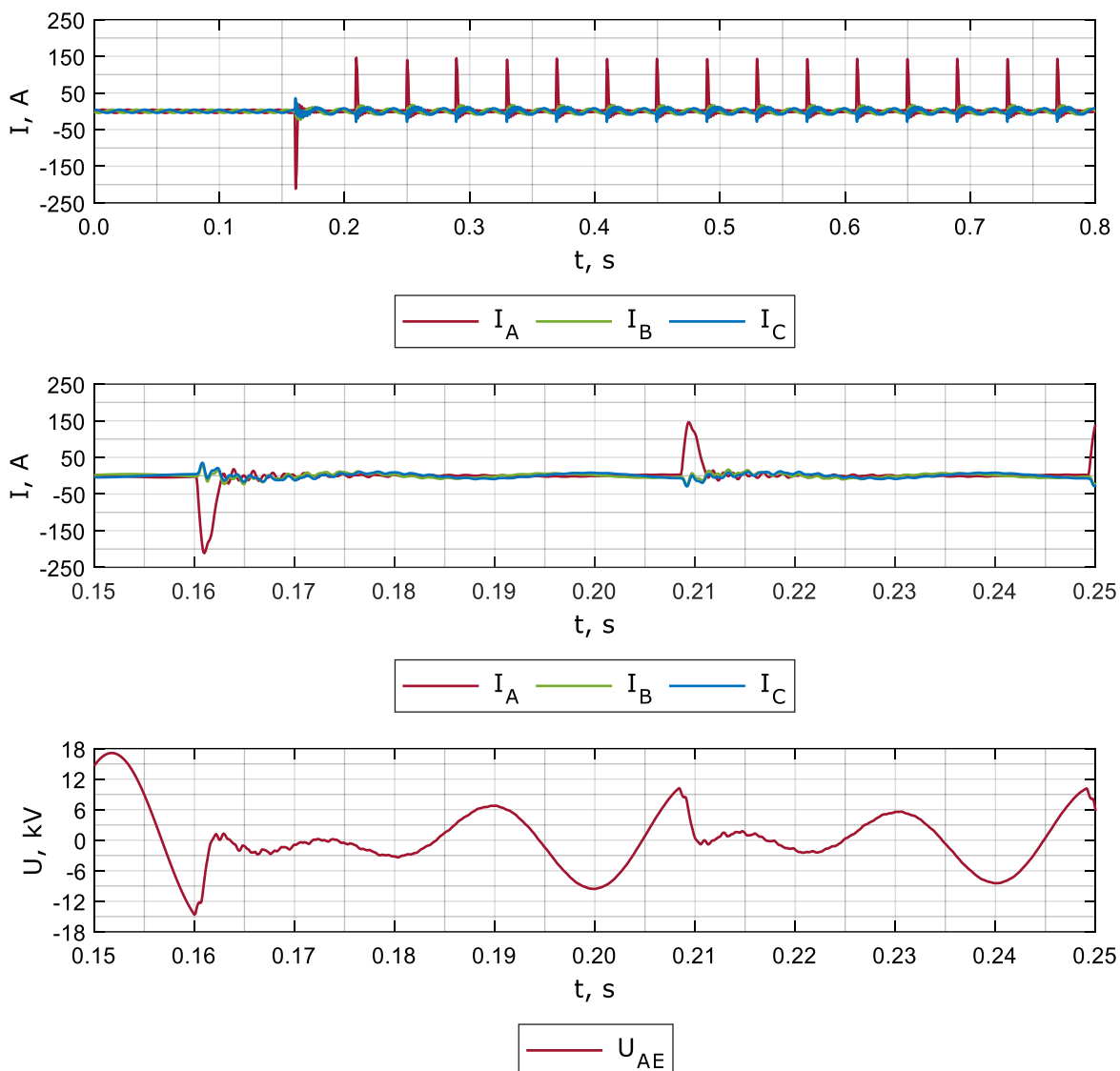
Vilkuva elektrikaare mudelit testiti ka kompenseeritud võrgurežiimil Joonisel 3.6 on Jägala AJ Ihasalu fiidri lühis kaare takistusel $R_I = 1 \Omega$.



Joonis 3.6 Vilkuva elektrikaarega Jägala AJ Ihasalu fiidri lühis kompenseeritud režiimil kaare takistusel $R_I = 1 \Omega$

Pinge graafikult on näha, et rikkelse faasi pinge taastumiskiirus peale rikkevoolu piike on kompenseeritud režiimile iseloomulikult aeglasem kui kompenseerimata võrgu katsetel [29]. Seetõttu on rikkevoolu piikide tihedus madalam.

Joonise 3.7 graafikutel on simulatsiooni tulemus kompenseeritud režiimil kaare takistusel $R_I = 35 \Omega$.



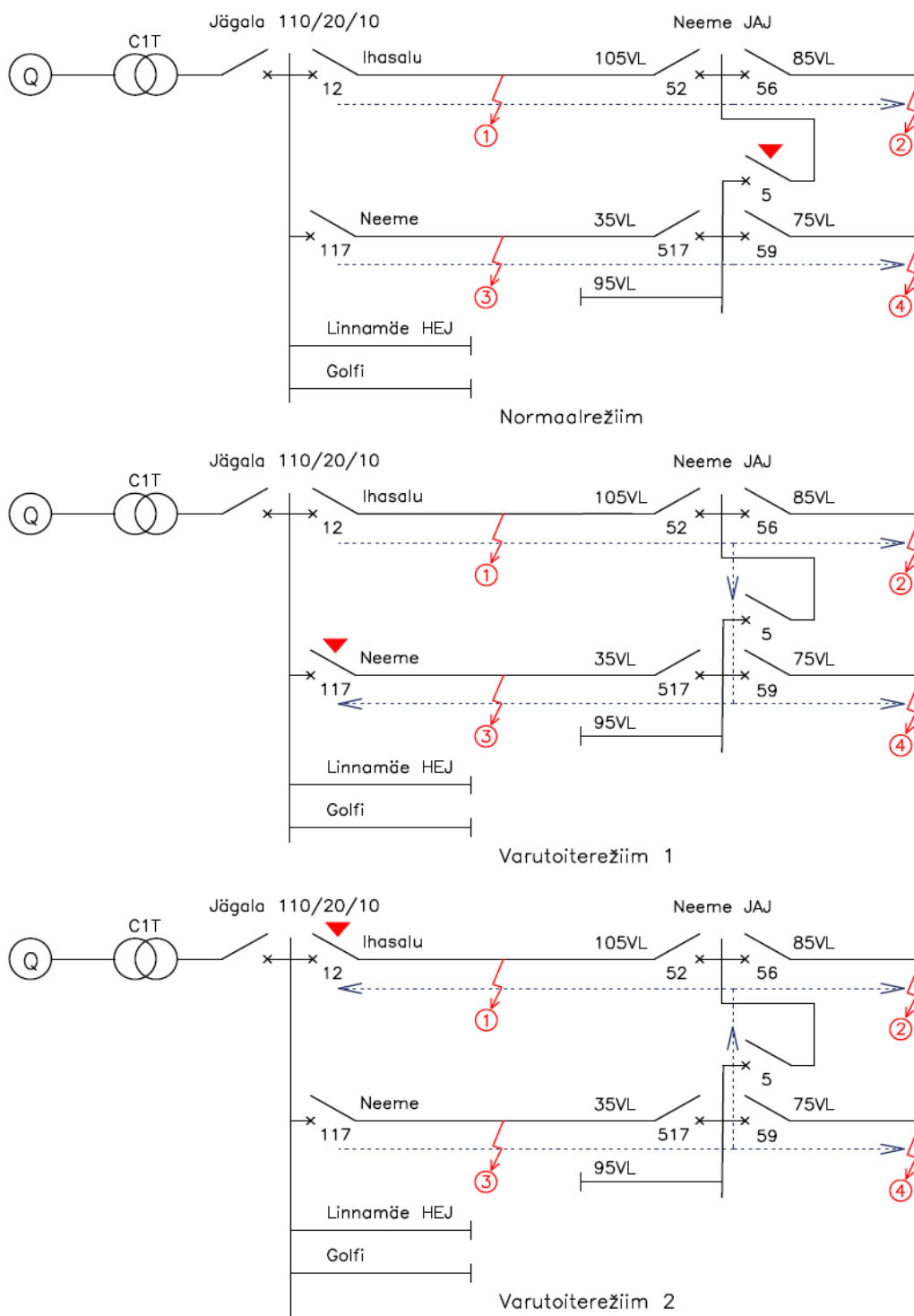
Joonis 3.7 Vilkuva elektrikaarega Jägala AJ Ihasalu fiidri lühis kompenseeritud režiimil kaare takistusel $R_I = 35 \Omega$

Rikkevoolu piigid on valdavalt ühesuunalised. Ühesuunalised piigid võivad esineda resonantsilähedasel kompensatsioonil teatud kompenseerimisteguri vahemikus [25]. Vilkuva kaare mudeliga simuleeritud lühiste lainekujud langesid kokku kirjanduses kirjeldatud maalühiskatsete tulemustega [25]; [40]. Otsustati, et vilkuva kaarega lühise mudel on maaühenduskaitsete testimiseks sobiv.

4. KATSED

4.1 Rikkestsenaariumite koostamine

Selektiivsuse uurimiseks tuli koostada rikkestsenaariumid. Lühiste simulatsioonid otsustati läbi viia Jägala võrgu normaalrežiimil ning varutoiterežiimidel 1 ja 2 (joonis 4.1).



Joonis 4.1 Jägala võrgu mudel – toiterežiimid ja valitud lühispunktid

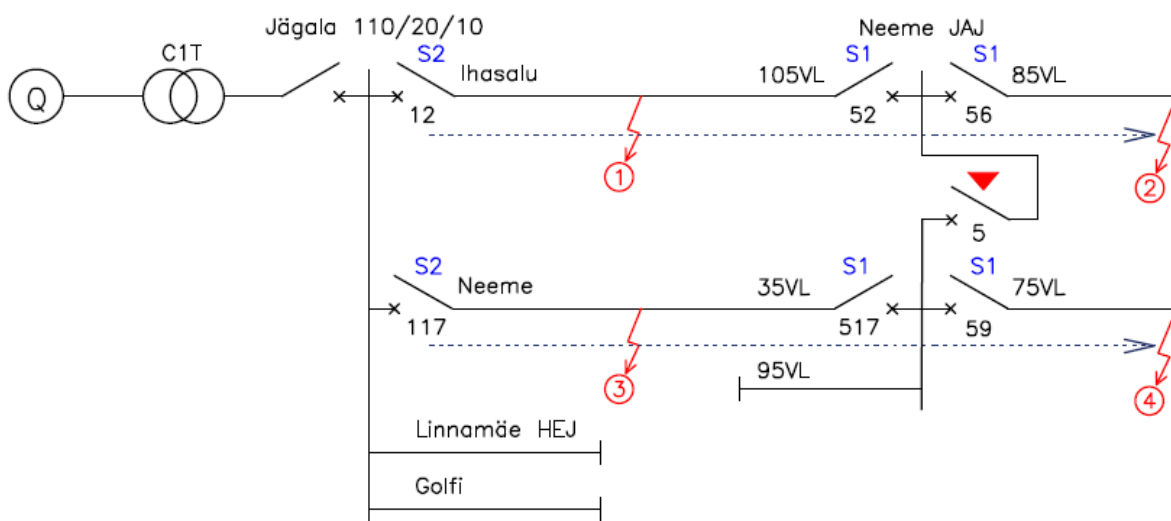
Joonisel 4.1 on sinise punktiirjoonega tähistatud toiterežiimile vastav energia voolamise suund. Punaste noolte ja numbritega on tähistatud valitud lühispunktide asukohad. Kuna reaajasimulaatori sõlmpunktide arv oli piiratud, lihtsustati võrku (joonisel 3.1) nii, et mudelisse jääksid vaid kaitsete selektiivsuse uurimiseks vajalikud võimsuslülitid. Lülititele anti numbrilised tähistused.

4.2 Simulatsioonide sätete valik

Elektrilevi võrgu maaühenduskaitsete sätted peavad tagama ohutu puutepinge alajaama territooriumil. Elektrilevi nõuded kõrgepinge/madalpinge alajaamade maanduspaigaldistele garanteerivad ohutu puutepinge kuni 50 A maaühendusvoolu korral 0,5 s vältel. Maaühendusvoolu väärtustel kuni 10 A on ohutu puutepinge tagatud pidevalt [41]. Jaotusalajaamas on ohutu puutepinge tagatud kuni 100 A maaühendusvoolu korral 1 s vältel.

Maanduspaigaldiste nõuetest lähtuvalt sobiksid releekaitse sätted, mille korral kõrgepinge/madalpinge alajaama lühist isoleeriv kaitse rakendub hiljemalt 0,5 s jooksul ning jaotusalajaama lühist isoleeriv kaitse hiljemalt 1,0 s jooksul, kui tuvastatakse vähemalt 10 A rikkevoolu väärtusega ühefaasiline lühis. Kuna täisautomatiseeritud 20 kV võrgus on eesmärk lühis võimalikult kiiresti välja lülitada, tuleks maanduspaigaldistest lähtuvaid sätteid vaadelda piirnõuetena ja tegelikud sätted valida võimalikult tundlikud, vastavalt releekaitse võimekusele.

Testimiseks defineeriti kaitseastmed ja valiti nende sätted. Kaitseastmed on sätete komplektid, mis võib määrata jadamisi olevatele kaitsetele, nii et nende töö on selektiivne. Testimisel kasutati Neeme jaotusalajaama fiidritel kaitseastet 1 ja Jägala piirkonnaalajaama fiidritel kaitseastet 2 (joonis 4.2).



Joonis 4.2 Kaitseastmete määramine Jägala võrgus

Kaitseastmed, tähistatud SN, tuleb terminalidele valida nii, et indeksi N väärtus kasvab toiteallika suunas. Testiti kahte jadamisi kaitset, kuid testide tulemusi võib laiendada rohkemate jadamisi kaitsete töö koordineerimiseks.

Kaitseastme sätete määramisel lähtuti põhimõttest, et kaitsete selektiivsus tagatakse ajasättega. Kõikides mõõtepunktides tuvastatakse sama nulljärgnevuspinge väärtus. Tuvastatav summavoolu väärtus sõltub kompensatsiooni- ja toiterežiimist, mistõttu sellega on selektiivsust keerukas tagada. Tabelis 4.1 on toodud MFA testimiseks valitud sätted.

Tabel 4.1 MFA kaitseastmed lühistestidel

Kaitseaste	S1	S2	Ühik
<i>Direction</i>	FW	FW	
U_0	2	2	% Un
t	0,2	0,4	s
<i>Operating quantity</i>	<i>Adaptive</i>	<i>Adaptive</i>	
<i>Min. operate current</i>	3	3	A (% In)
<i>Tilt angle</i>	5	5	°
<i>Operation mode</i>	<i>General EF</i>	<i>General EF</i>	
<i>Peak counter limit</i>	2	2	
<i>Start delay time</i>	30	30	ms
<i>Reset delay time</i>	500	500	ms

Minimaalseks rakendusvooluks (*Min. operate current*) valiti 3 A. Säte tagab kaitse tundlikkuse võrgus, kus kasutatakse vähemalt 5 A nimivooluga summutustakistit [35]. MFA U_0 säte valiti 2 %. Säte on protsentides võrgu nimipingest, mistõttu selle suhtühikuline väärtus faasipinge suhtes on $U_0 = 0,035$ p.u. Pinge säte valiti nii, et see oleks kõrgem kui võrgu maksimaalne võimalik mahtuvuslik asümmeetria $U_0 = 0,02$ p.u [8].

Esimese kaitseastme rakendusajaks valiti 0,2 s. Aeg on piisav MFA arvutatud stabiliseeritud mitmesagedusliku neutraali juhtivuse tulemuse koondumiseks vilkuva kaarega lühisel (joonis 2.24). Kaitseastmete vaheliseks viiteks valiti 0,2 s. Ülejäänud sätted jäeti vaikeväärtustele.

Suunatud maaühenduskaitse ja transientkaitse sätted valiti MFA sätetega analoogsed (tabelid 4.2, 4.3). Transientkaitse töörežiim valiti *Intermittent EF* – korduva maalühise kaitse.

Tabel 4.2 Suunatud maaühenduskaitsese kaitseastmed

Kaitseaste	S1	S2	Ühik
<i>Direction</i>	FW	FW	
U_0	2	2	% U_n
t	0,2	0,4	s
<i>Min. operate current</i>	3	3	A (% I_n)

Tabel 4.3 Transientkaitsese kaitseastmed

Kaitseaste	S1	S2	Ühik
<i>Direction</i>	FW	FW	
U_0	2	2	% U_n
t	0,2	0,4	s
<i>Operation mode</i>	<i>Intermittent EF</i>	<i>Intermittent EF</i>	

Sätted, mida ei kirjeldatud, jäeti vaikeväärtustele.

4.3 Simulatsioonide tulemused

Kaitsealgoritmide uurimiseks viidi läbi katseseeriad erineva takistusega püsivatel ja vilkuva kaarega lühistel, nii maandamata kui kompenseeritud võrgurežiimil. Katseseeriates simuleeriti lühiseid neljas lühispunktis ja kolmel toiterežiimil (joonis 4.1). Igal katsel seoti terminalid selektiivsuse kontrollimiseks kahe lahtriga. Katsete tulemused on kokku võetud tabelitesse lisades 1-3.

Tabeleid lugedes tuleb arvestada, et rikkevoolu nurgad tuvastati hetkel, kui MFA arvutustulemus oli stabiliseerunud. Kompenseeritud režiimil, eriti vilkuva kaare korral, tegi algoritm otsuse enne nurga stabiliseerumist. Seetõttu võis MFA nendel režiimidel rakendada tabelis kirjeldatud nurkadest erinevatel väärtustel.

Kõigepealt testiti kaitseid püsival lühisel kompenseerimata maandusrežiimil. Suunatud maaühenduskaitsese testiti tundlikul ($I_0 \sin$) ja mittetundlikul töörežiimil (*Phase angle*). Mittetundlikul režiimil seadistati kaitsekarakteristiku nurgad väärtustele 85° , mis andis MFA kaitsele võimalikult sarnase karakteristiku.

Leiti, et nii MFA kui suunatud maaühenduskaitsese töötavad jäiga lühise korral selektiivselt. MFA oli tundlik ja selektiivne 4000Ω lühistakistusega katseseerial (L1.1). MFA tundlikkuse piiri otsiti takistust tõstes. Leiti et kaitse oli tundlik kuni nulljärgnevuspinge langes alla sätteväärtuse lühistakistusel 6300Ω .

Suunatud maaühenduskaitsese oli mõlemal töörežiimil tundlik, kuni tuvastatav rikkevool langes alla sätteväärtuse. Algoritm oli tundlik ja selektiivne 1000Ω lühistakistusega katseseerial, kuid 2000Ω seerial tundetu LP3 lühisele (L2.1). Tuvastatud rikkevoolu

väärtuste järgi võib hinnata, et suunatud maaühenduskaitsel põhineva kaitseskeemi tundlikkus 3 A sättel on vaid marginaalselt üle 1000 Ω .

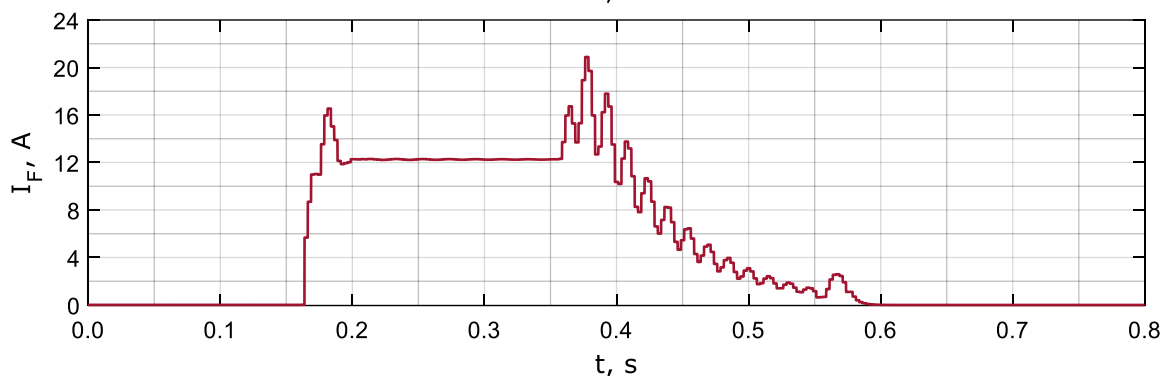
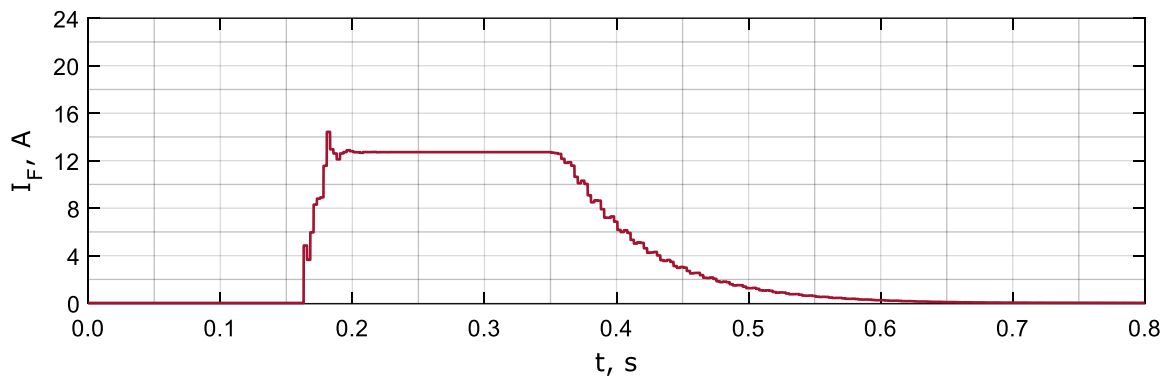
Kaitsealgoritmide tundlikkuse erinevus on tingitud nende parameetri rakendusvool (*Min. operate current*) erinevast arvutusloogikast. MFA algoritmi rakendusvool on stabiliseeritud rikkevool, ehk hinnang püsiva jääga lühise rikkevoolule, samas voolulise maaühenduskaitses rakendusvool on hinnang tuvastatud lühise rikkevoolule. Seetõttu ei sõltu MFA tundlikkus rikkevoolu väärtusest, kuid suunatud maaühenduskaitses tundlikkus sõltub.

MFA-d ja suunatud maaühenduskaitses testiti püsival lühisel kompenseeritud võrgurežiimil (L1.2, L2.2). Kompenseerimisvool valiti 110% Ihasalu fiidri rikkevoolu väärtusest ($I_L = 50 \text{ A}$; $L = 0,74 \text{ H}$) – sellega saavutati Ihasalu ja Neeme fiidrite ülekompensatsioon. Kompenseerimisel kasutati 2000 Ω summutustakistit, mis tootis jäigal lühisel 6 A aktiivvoolu. Suunatud maaühenduskaitses testiti tundlikul ($I_0\cos$) ja mittetundlikul töörežiimil (*Phase angle*).

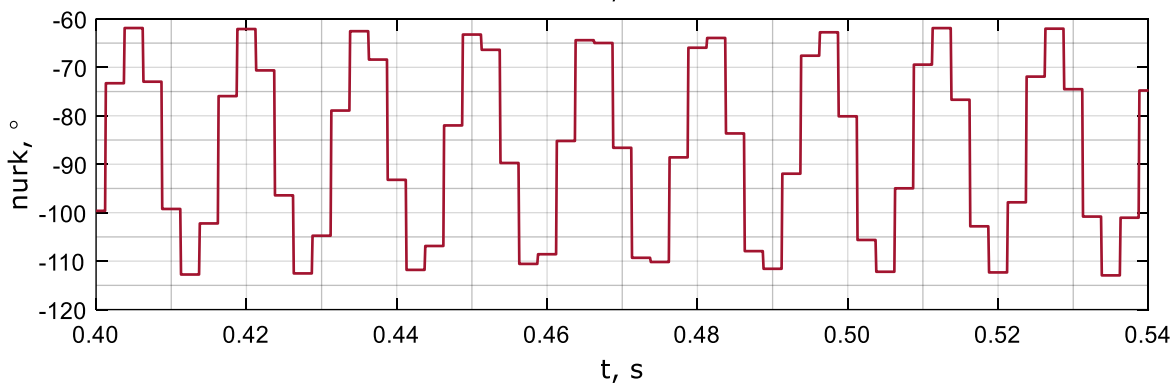
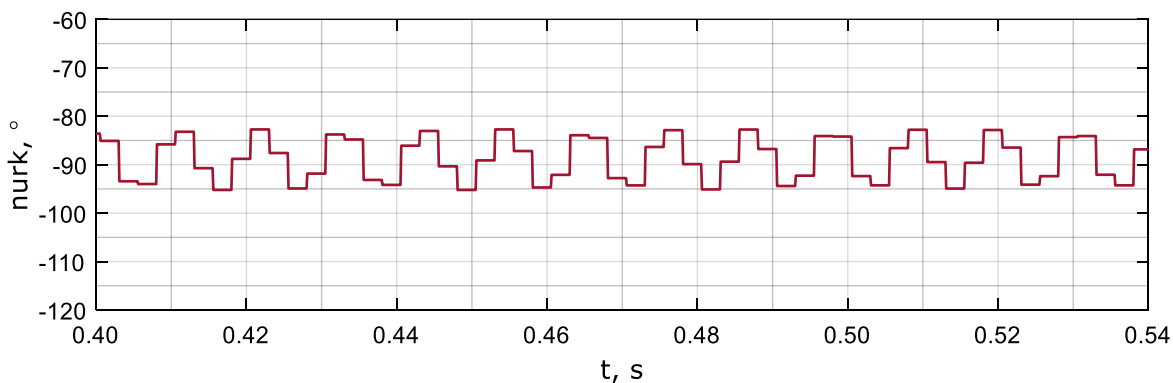
Leiti, et MFA töötas selektiivselt ja oli tundlik nii jäigal lühisel kui 4000 Ω lühistakistusega katseerial. Suunatud maaühenduskaitses töötas jääga lühise korral tundlikult ja selektiivselt. Takistuse tõstmisel väärtusele 1000 Ω oli maaühenduskaitses tundlik töörežiimil *Phase angle*, kuid mitte režiimil $I_0\cos$. Summutustakisti vool skaleerub võrgu nulljärgnevuspingega, mistõttu rikkevoolu aktiivkomponent langes takistuse tõustes ja nulljärgnevuspinge vähenedes alla sätteväärtuse. Kuna rikkevoolu väärtus oli endiselt sättest kõrgem ja nurk jäi kaitsesektori piiridesse, siis mittetundlik kaitserežiim suutis rikkele reageerida. Tuvastatud rikkevoolu aktiivkomponendi väärtuste järgi võib öelda, et režiimi $I_0\cos$ tundlikkus jäi suurusjärku 750 Ω .

Kuna fiidrid on varutoiterežiimidel 50 A juures tugevalt ülekompenseeritud, testiti kaitsesid varutoiterežiimidel ka madalamal kompensatsioonil $I_L = 25 \text{ A}$; $L = 1,48 \text{ H}$; $R = 0 \text{ }\Omega$ (L1.2, L2.2). Suunatud maaühenduskaitses töötas jäigal lühisel korrektselt. Leiti, et kaarepooli kompenseerimisvoolu vähendamine põhjustas osades katsepunktides MFA liigrakendumist. Teise kaitsesastmega terminali MFA algoritmi rakendus peale seda, kui esimese kaitsesastmega terminal oli lühise välja lülitanud.

Teise kaitseastmega terminali tuvastatavat rikkevoolu uuriti peale esimese kaitseastmega terminali tööd hetkel $t = 0,36$ s (joonised 4.3, 4.4).

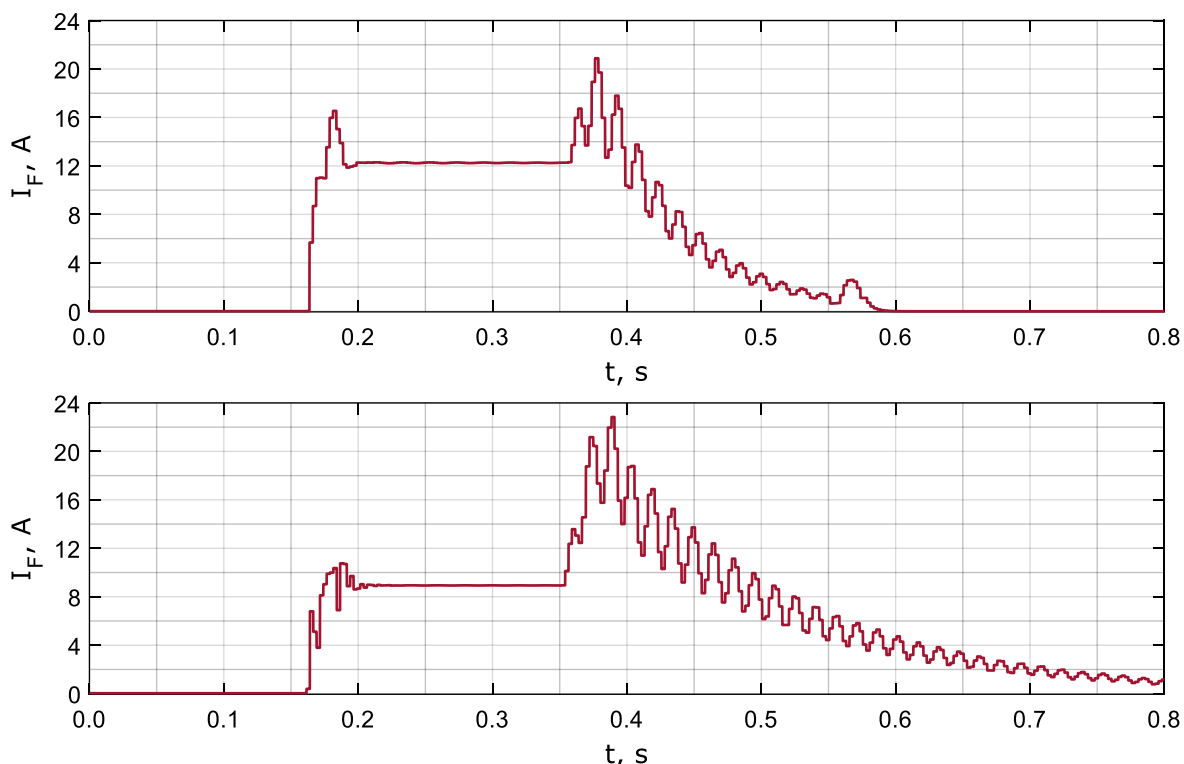


Joonis 4.3 Lühise väljalülitustransiendi rikkevool kompenseeritud režiimil – ülemisel graafikul $R = 0 \Omega$; $L = 0,74$ H, alumisel graafikul $R = 0 \Omega$; $L = 1,48$ H



Joonis 4.4 Lühise väljalülitustransiendi rikkevoolu nurk kompenseeritud režiimil – ülemisel graafikul $R = 0 \Omega$; $L = 0,74$ H, alumisel graafikul $R = 0 \Omega$; $L = 1,48$ H

Leiti, et kaarepooli induktiivsuse tõustes suurenes väljalülitustransiendi perioodiline komponent. Uuriti ka summutustakisti mõju väljalülitustransiendile (joonis 4.5).



Joonis 4.5 Lühise väljalülitustransiendi rikkevool kompenseeritud režiimil $R = 0 \Omega$; $L = 1,48 \text{ H}$ – ülémisel graafikul summutustakisti takistus $R = 2000 \Omega$, alumisel graafikul $R = 5000 \Omega$

Leiti, et väljalülitustransient sumbub summutustakisti kõrgematel juhtivuse väärtustel kiiremini. Tulemus on iseloomulik kaarepooli transiendi võnkeahelale (valem 2.19). Kaitseterminali häiresalvestist leiti, et liigrakendumisega katse rikkevool ei ületanud madalamal induktiivsusel tehtud katse voolu. Sellest järeldati, et liigrakendumiseni ei viinud mitte kõrgem rikkevoolu väärtus vaid rikkevoolu nurga võnkeamplituudi tõus (joonis 4.4).

Kaarepoolist ja võrgust moodustuva võnkeahela transient on madalatel lühistakistuste väärtustel aperioidilise iseloomuga. Induktiivsuse kasvades tõuseb aperioidilisele transiendile lisanduva perioidilise komponendi amplituud. [30]

Väljalülitustransiendi sumbumist saab kiirendada summutustakisti juhtivuse tõstmisega. Võnkumise amplituudi saab langetada kaarepooli induktiivsuse vähendamisega. Kuna lõputöö eesmärgiks on valida võimalikult universaalsed kaitsetsätted, tuleks liigtöö probleem lahendada hoopis kaitse sätete valikuga.

Liigtöoga katsepunkte testiti erinevatel MFA karakteristiku nurga ja rakendusaja sätetel. Leiti, et liigrakendumise vältimiseks tuleb sättegruppide ajavahe tõsta 250 ms peale või karakteristiku nurk väärtusele 15° . Kuna karakteristiku nurga tõstmine seab kõrgemad nõudmised summutustakisti nimivoolule, tuleks eelistada sättegruppide ajavahe

suurendamist. Rakendusaegade vahelise intervalli pikendamine võimaldab rikkevoolu väärtusel langeda allapoole sätteväärtust, enne kui ületatakse kaitse rakendumisviide.

MFA ning suunatud maaühenduskaitsese selektiivsust ja tundlikkust testiti vilkuva elektriikaarega lühiste (L1.3, L2.3). Leiti, et mõlemad algoritmid töötasid kompenseerimata režiimil selektiivselt ja tundlikult nii 1Ω kui 35Ω kaare takistusega lühiste korral.

Kompenseeritud režiimil esines MFA kaitsel LP1 lühistel teise kaitseastmega terminali liigrakendumine (L1.4). Analoogselt püsiva lühisega, saavutati kaitsete selektiivne töö, kui kaitseastmete vaheline viide tõsteti 250 ms peale. Katseseerial kaare takistusega 35Ω jäi MFA tuvastatud nurga väärtus osadel katsetel aeglaselt võnkuma (L1.4 katsepunktid, mille nurk on tähistatud X). MFA töötas siiski korrektselt, kuna rakendusaja vältel arvutatud mitmesagedusliku faasorsummeeritud juhtivuse suund oli lähedane isoleeritud võrgu rikkeahela neutraali juhtivuse suunaga.

Vooluline maaühenduskaitsese polnud kompenseeritud võrgus tundlik peaaegu ühelgi katsel, sõltumata töörežiimist (L2.4). Katsetel, kus rike tuvastati, sõltus kaitse rakendumine lühisele lülitamise hetkest.

Transientkaitsese rakendumist vilkuva elektriikaarega lühiste testiti erinevatel elektriikaare takistustel (L3). Leiti, et Jägala alajaama terminalide transientkaitsesid on põhitoiterežiimil ja esimesel varutoiterežiimil tundlikud kõikidele väga madala takistusega lühiste ($R_l = 0,01 \Omega$). Teisel varutoiterežiimil polnud kaitse tundlik LP1 lühisele. Lühistakistuse tõustes langes transientkaitsese tundlikkus väga kiiresti. Juba kaare takistusel $R_l = 1 \Omega$ polnud kaitsesid tundlikud kõikidele põhirežiimi lühiste ja kaare takistusel $R_l = 35 \Omega$ tuvastati rike vaid ühes lühispunktis.

5. MAAÜHENDUSKAITSETE KOORDINEERIMINE

Jägala võrgu mudelil tehtud katsetel leiti, et MFA algoritm töötas tundlikult ja selektiivselt kõikidele ühefaasilistele lühistele. See tähendab, et MFA alusel võib koostada kõikidele ühefaasilistele lühistele kompenseerimisrežiimist sõltumatult kõrge tundlikkusega ja selektiivselt rakenduva kaitseskeemi. Tabelis 5.1 pakutakse välja kaitseastmed, mis võimaldavad nelja jadamisi maaühenduskaitsese koordineerimist.

Tabel 5.1 Kaitseastmed maaühenduskaitsese koordineerimiseks MFA algoritmiga

Kaitseaste	S1	S2	S3	S4	Ühik
<i>Direction</i>	FW	FW	FW	FW	
U_0	2	2	2	2	% U_n
t	0,2	0,5	0,75	1,0	s
<i>Operating quantity</i>	<i>Adaptive</i>	<i>Adaptive</i>	<i>Adaptive</i>	<i>Adaptive</i>	
<i>Min. operate current</i>	3	3	3	3	A (% In)
<i>Tilt angle</i>	5	5	5	5	°
<i>Operation mode</i>	<i>General EF</i>	<i>General EF</i>	<i>General EF</i>	<i>General EF</i>	
<i>Peak counter limit</i>	2	2	2	2	
<i>Start delay time</i>	30	30	30	30	ms
<i>Reset delay time</i>	500	500	500	500	ms

Valitud sätted tagavad Elektrilevi võrgus ohutu puutepinge ja nende selektiivsust on kontrollitud Jägala võrgu mudelil läbi viidud simulatsioonidega. Kogu kaitseskeemi tundlikkus kõikidele lühistüüpidele sõltub vaid U_0 sättest. Testimisel kasutatud kaitseastmete vahelisi viiteid pikendati lähtuvalt katsetulemustest. Kaitseastmete ajalist koordineerimist võib täpsustada, leides vajaliku viiteaja pikkuse, sõltuvalt võrgus kasutatavate kaarepoolide induktiivsuse ja summutustakistite takistuste väärtustest.

Jägala võrgu mudelil läbi viidud katsetel leiti, et transientkaitsed tuvastavad vaid väga madala lühistakistusega rikkeid ja et piirkonnaalajaama transientkaitsese pruugib rakenduda jaotusalajaama fiidriale jäävale rikkele, olles samas tundetu kaitstava fiidri rikkele (L1.1). Seetõttu on transientkaitsese käsitletav lisakaitsena, mis ei taga vilkuva kaare väljalülitamist ja võib põhjustada terminalide ebaselektiivset tööd.

Lisaks leiti, et suunatud maaühenduskaitsese ei suuda kompenseeritud režiimil vilkuva kaarega lühist töökindlalt tuvastada. Kaitsese rakendumine sõltub lühisele lülituse hetkest, mis võib põhjustada terminalide ebaselektiivset tööd.

Kompenseerimata võrgus töötas suunatud maaühenduskaitsese selektiivselt nii püsivatele kui transientlühistele. Kompenseerimata võrgu koordineeritud kaitsmine suunatud maaühenduskaitsese ja transientkaitsese kombinatsiooniga võib olla teostatav, kuid

saavutab MFA algoritmiga võrreldes oluliselt madalama tundlikkuse. Transientkaitsete ebaselektiivse töö võimalus tingib ka kaitseskeemi madalama töökindluse.

Väljalülitusele töötavate kaitsetega võrgus on puutepinge kriteerium vaja täita vaid väljalülitusaja vältel, mistõttu lubatud kompenseerimata rikkevoolu piirväärtus on signaalile töötava võrguga võrreldes kõrgem. Kuigi võrk võib jääda alakompenseerituks, pruugib kõikide fiidrite tugevalt alakompenseeritud režiimis hoidmine olla võimatu. Seetõttu tuleb ka madalal kompensatsioonil kasutada kompenseeritud võrgu kaitsemeetodeid.

Elektrilevi võrgu mudelil läbi viidud katsete tulemusena leiti, et resonantsmaandatud võrgu koordineeritud kaitsmine on kasutusel oleva algoritmide kombinatsiooniga võimatu. Samas näidati, et ülesanne on võimekama kaitsealgoritmi kasutamisel lihtsasti teostatav. Kuna klientidele kõrge varustuskindluse tagamine on Elektrilevi üks põhilisi eesmärke, võiks uute võrgu osade ehitamisel nõuda selliste kaitsete kasutamist, mis on piisavalt tundlikud ja töökindlad, et võimaldada selektiivse kaitseskeemi koostamist.

Elektrilevi võib võrgu selektiivse kaitse tagamiseks koostada standardsed reaajasimulaatori testid, mille edukas läbimine oleks maaühenduskaitset teostavale terminalile heakskiidu andmise tingimuseks. Teaduspõhiste nõuete esitamine tagaks releekaitse kõrgema kvaliteedi, lihtsustades samas maaühenduskaitsete seadistamist ja sätete valikut.

KOKKUVÕTE

Lõputöös uuriti suunatud maaühenduskaitset teostavate terminalide omavahel selektiivse töö saavutamise võimalusi ühefaasilisel lühisel. Võrreldi praegu Elektrilevi võrgus kasutusel olevaid tundlikku suunatud maaühenduskaitset ja transientkaitset ning võrgus testimata mitmesageduslikku juhtivuskaitset. Algoritme testiti Elektrilevi Jägala 20 kV võrgu RTDS mudelil.

Magistritöös anti põhjalik ülevaade maaühenduse staatilisest seisundist. Näidati, kuidas käsitleda võrgu asümmeetriat, et luua eeldused võrgu analüüsiks sümmeetriliste komponentide meetodil. Kolmefaasilise süsteemi ja sümmeetriliste süsteemide vahelisi seoseid võrgu ühefaasilisel asümmeerial selgitati uudsel intuiitivsemal viisil.

Teoreetiline analüüs võeti aluseks suunatud maaühenduskaitse algoritmide kirjeldamisel. Lihtsamatest algoritmidest alustades selgitati kaitsete tööpõhimõtteid ja analüüsiti neile iseloomulikke nõrkuseid. Näidati, millised täiendused on uuematel kaitsetel aidanud oma eellaste puudused kõrvaldada.

Uuriti dünaamilisi rikkeid. Kirjeldati lühisel tekkivate transientide vonkeahelaid. Näidati kuidas dünaamilise lühise transientkomponente identifitseerida ja kuidas need võrgu parameetritest sõltuvad. Selgitati, kuidas dünaamilised maaühenduskaitset lühise transientkomponente kasutavad, et riket ja selle suunda tuvastada. Kirjeldati enamkasutatud dünaamiliste kaitsete tööpõhimõtteid.

Uuriti ABB väidet, et mitmesageduslik juhtivuskaitse suudab tuvastada kõiki ühefaasilisi lühiseid, sõltumata rikke iseloomust või maandusrežiimist. Leiti, et mitmesageduslik juhtivuskaitse on lühisparameetrite harmooniliste komponentide analüüsi ja faasorsummeerimise kasutuselevõtuga eemaldanud varasematele suunatud maaühenduskaitse algoritmidele ette heidetud puudused.

Maaühenduskaitse töö uurimiseks Elektrilevi võrgu tingimustes koostati Elektrilevi Jägala piirkonnaalajaama 20 kV võrgu mudel reaajasimulaatoris RTDS. Mudel verifitseeriti Jägala võrgu lühise häiresalvestuste alusel. Koostati vilkuvat elektrikaart imiteeriv loogika. Simuleeritud vilkuva kaarega lühise lainekujud verifitseeriti allikates kirjeldatud võrgu lühiskatsete siirdeprotsesside alusel.

Jägala võrgu mudelit rakendati suunatud maaühenduskaitse algoritmide uurimiseks. Kaks ABB REF620 kaitseterminali ühendati reaajasimulaatoris erinevate võrgu alajaamade lahtritega, simuleerides lühiseid kolmel toiterežiimil erinevates lühispunktides. Testiti praegu võrgus kasutusel olevaid tundlikku suunatud

maaühenduskaitsset ja transientkaitsset. Võrdluseks testiti ABB mitmesageduslikku juhtivuskaitset. Algoritmide tundlikkust, töökindlust ja selektiivsust uuriti erineva takistuse ja iseloomuga lühistel.

Leiti, et praegu põhikaitsena kasutatav tundlik suunatud maaühenduskaitsese ei suuda resonantsmaandatud võrgus vilkuva kaarega lühist töökindlalt tuvastada ja et selle tundlikkus kõrge takistusega lühistele on madal. Leiti, et reservkaitsena kasutatav mitmesageduslik maaühenduskaitsese on tundlik vaid väga madala takistusega lühistele ja et sellega pole kaitsete omavahelist selektiivsust võimalik tagada. Järeldati, et praegune kaitsete kombinatsioon ei võimalda resonantsmaandatud võrgu koordineeritud kaitsset.

ABB mitmesageduslik juhtivuskaitse suutis rikke kõrge tundlikkusega tuvastada nii püsiva kui transientlühise korral maandusrežiimist sõltumata. Ilmnes, et MFA algoritmiga terminalide omavahelise selektiivsuse tagamiseks peab jadamisi kaitsete vaheline ajaline viide olema piisav, et kaarepooli voolutransient jõuaks sumbuda. Piisava viite korral töötasid kaitsesid selektiivselt nii püsivate kui transientlühiste korral. Järeldati, et mitmesageduslik juhtivuskaitse sobib resonantsmaandatud võrgu koordineeritud kaitses. Pakuti välja mitmesageduslikul juhtivuskaitsele põhinev maaühenduskaitsese koordineerimise skeem.

Lõputöös näidati, et Elektrilevi võrgu maaühenduskaitsset on võimalik koordineerida nii, et kaitsesid töötavad tundlikult ja omavahel selektiivselt. Kuna väljalülitusele töötavas võrgus tingib mittetundlik ja ebaselektiivne töö ohu inimelule ja vähendab varustuskindlust, soovitatakse Elektrilevil uutes resonantsmaandatud võrgu paigaldistes kasutada vaid maaühenduskaitsese koordineerimist võimaldavaid terminale. Terminali hindamiseks võib koostada reaajasimulaatori testid, mille edukas läbimine seatakse maaühenduskaitsset teostava terminali sobivuse tingimuseks.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] R. Rikken, „Isoleeritud neutraaliga ja resonantsmaandatud võrkude maalühiskaitse,” Tallinn, 2000.
- [2] G. Druml, O. Seiart ja M. Marketz, „Directional Detection of Restriking Earthfaults in Compensated Networks,” *21st International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 2011.
- [3] Eesti Standardikeskus, „50522:2010, EVS-EN: Üle 1kV nimivahelduvpingega tugevvoolupaigaldiste maandamine,” Tallinn, 2010.
- [4] C. L. Fortescue, „Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks,” *Annual Convention of the American Institute of Electrical Engineers*, Atlantic City, 1918.
- [5] P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, Iowa, 1975.
- [6] J. L. Blackburn, *Symmetrical Components for Power Systems Engineering*, New York, 1993.
- [7] J. Kilter, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja M. Meldorf, *Jaotusvõrgud*, Tallinn, 2007.
- [8] V. Gabitov, „Keskpinge võrkude maalühiskaitse,” Tallinn, 2009.
- [9] A. Aparaschivei, M. Steglich, G. Chiriac ja D. D. Lucache, „Root-Cause Analysis of Cascaded Ground Faults on an Ungrounded Distributed Network,” *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering*, Romania, 2016.
- [10] J. Makarov, „Kaarekustutuspoolide kasutamine jaotusvõrgus,” Tallinn, 2012.
- [11] S. Hänninen ja M. Lehtonen, „Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks With High Impedance Earthing,” *14th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Espoo, 1997.
- [12] Elektrilevi, „J346 Maaühendusvoolud piirkonnaalajaamade toitepiirkonnas, ver.12,” Tallinn, 2019.
- [13] J. Meng, X. Tang, W. Wen ja X. Xu, „Zero-Sequence Voltage Trajectory Analysis for Unbalanced Distribution Networks on Single-Line-to-Ground Fault Condition,” *Electric Power Systems Research*, kd. 161, pp. 17-25, 2018.
- [14] Siemens AG, „Siprotec 5 7SA82/84/86, 7SD82/84/86, 7SL82/86, 7SJ86 LineProt 3pol - Manual,” Nuremberg, 2020.
- [15] ABB Power Grids Sweden AB, „Transformer protection RET670 Version 2.2 IEC Technical Manual,” Västerås, 2017.
- [16] ABB Oy, „REX640 Technical Manual,” Vaasa, 2019.

- [17] A. Wahlroos, „Performance of Novel Neutral Admittance Criterion in MV-Feeder Earth Fault Protection,” *20th International Conference on Electricity Distribution*, Prague, 2009.
- [18] Siemens AG, „Siprotec 5 Application Directional ground-fault protection APN-052, Edition 4,” Nuremberg, 2019.
- [19] A. Wahlroos ja J. Altonen, „Compensated Networks and Admittance Based Earth-Fault Protection,” *Methods and Techniques For Earth Fault Detection, Indication and Location*, Aalto, 2011.
- [20] ABB Oy, „630 Series Technical Manual,” Vaasa, 2011.
- [21] B. Liu, H. Ma, H. Xu ja P. Ju, „Single-phase-to-ground Fault Detection with Distributed Parameters Analysis in Non-direct Grounded Systems,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2019.
- [22] A. Wahlroos, J. Altonen ja M. Pirskanen, „Advancements in Earth-Fault Location in Compensated MV-Networks,” *22nd International Conference on Electricity Distribution*, Frankfurt, 2011.
- [23] Schneider Electric Industries SAS, „Intermittent Transient Earth Fault Protection,” Paris, 2018.
- [24] G. Druml, A. Kugi ja O. Seifert, „A New Directional Transient Relay for High Ohmic Earth Faults,” *17th International Conference on Electricity Distribution*, Barcelona, 2003.
- [25] G. Druml, „Comparison of Restriking Cable-Earthfaults in Isolated and Compensated Networks,” *Electric Power Quality and Supply Reliability Conference*, Rakvere, 2014.
- [26] X.-h. Zhang, S.-x. Fan, H. Duan ja B.-y. Xu, „Analysis of Transient Dominant Frequency Signal for Single-Phase Earthed Fault Based on Prony Algorithm,” *China International Conference on Electricity Distribution*, Jinan, 2008.
- [27] P. Imriš, Transient Based Earth Fault Location in 110 kV Subtransmission Networks, Espoo, 2006.
- [28] M. R. Adzman, Earth Fault Distance Computation Methods Based on Transients in Power Distribution Systems, Aalto, 2014.
- [29] M. F. Abdel-Fattah ja M. Lehtonen, „The Effect of Fault Resistance on the Earth Fault Characteristics in Unearthed and Compensated Neutral Medium Voltage Networks,” *Electric Power Quality and Supply Reliability*, Tartu, 2012.
- [30] M. Lehtonen ja T. Hakola, Neutral Earthing and Power System Protection, Vaasa, 1996.

- [31] Y. Xue, X. Chen, H. Song ja B. Xu, „Resonance Analysis and Faulty Feeder Identification of High-Impedance Faults in a Resonant Grounding System,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017.
- [32] G. Kaufmann ja R. Vaitkevičius, „Sensitive ground fault detection in compensated systems (ASC),” *14th International Conference on Developments in Power System Protection*, Ramunas, 2018.
- [33] G. Druml, „Qu2 - Algorithm for Detecting Earth Faults,” Nuremberg, 2009.
- [34] ABB Oy, „620 Series Technical Manual,” Vaasa, 2019.
- [35] A. Wahlroos, J. Altonen, U. Ugglä ja D. Wall, „Application of Novel Cumulative Phasor Summing Measurement for Earth-Fault Protection in Compensated MV-Networks,” *22nd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Stockholm, 2013.
- [36] A. Wahlroos ja J. Altonen, „Application of Novel Multi-frequency Neutral Admittance Method into Earth-Fault Protection in Compensated MV-networks,” *12th IET International Conference on Developments in Power System Protection*, Copenhagen, 2014.
- [37] Draka, „Tootekataloog - Jõukaablid,” 2018.
- [38] R. Kivistik, „330/110 kV õhuliini maanduse projekteerimine,” Tallinn, 2019.
- [39] J. Altonen, O. Mäkinen, K. Kauhaniemi ja K. Persson, „Intermittent Earth Faults - Need to Improve the Existing Feeder Earth Fault Protection Schemes,” *17th International Conference on Electricity Distribution*, Barcelona, 2003.
- [40] S. Hänninen, *Single Phase Earth Faults in High Impedance Grounded Networks*, Espoo, 2001.
- [41] Elektrilevi OÜ, „Võrgustandard keskpinge võrgu mahtvuslike maaühendusvoolude suurustest ja ühefaasiliste maaühenduste kestuse piiragaadest,” Tallinn, 2018.

LISAD

Lisa 1.1 MFA algoritmi katsetulemused: püsiv lühis kompenseerimata režiimil

Tabel L1.1.1 MFA test kompenseerimata režiimil, püsiv lühis $R = 0 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		I_F (F1)		
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	$\angle F1$	$Re(I_F)$	$Im(I_F)$
Normaal										
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	49,5	10,8	88	1,7	49,5
LP2	12	56	-	0,2	0,2	51,5	54,0	88	1,8	51,5
LP3	117	517	0,4	-	0,4	28,8	2,2	87	1,5	28,8
LP4	117	59	-	0,2	0,2	29,4	61,8	87	1,4	29,4
Varu 1										
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	16,2	44,0	88	0,5	16,2
LP2	12	56	-	0,2	0,2	16,7	52,0	88	0,5	16,7
LP3	12	517	-	0,2	0,2	16,7	32,4	88	0,5	16,7
LP4	12	59	-	0,2	0,2	16,9	64,0	88	0,5	16,9
Varu 2										
LP1	117	52	-	0,2	0,2	16,1	61,0	87	1,0	16,1
LP2	117	56	-	0,2	0,2	15,9	50,0	86	1,1	15,9
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	15,9	15,0	86	1,1	15,9
LP4	117	59	-	0,2	0,2	15,8	61,6	86	1,0	15,8

Tabel L1.1.2 MFA test kompenseerimata režiimil, püsiv lühis $R = 4000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2
Normaal							
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	2,4	0,5
LP2	12	56	-	0,2	0,2	2,4	2,5
LP3	117	517	0,4	-	0,4	1,4	0,1
LP4	117	59	-	0,2	0,2	1,5	3,0
Varu 1							
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	0,8	2,1
LP2	12	56	-	0,2	0,2	0,8	2,5
LP3	12	517	-	0,2	0,2	0,8	1,6
LP4	12	59	-	0,2	0,2	0,8	3,0
Varu 2							
LP1	117	52	-	0,2	0,2	0,8	2,9
LP2	117	56	-	0,2	0,2	0,8	2,5
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	0,8	0,8
LP4	117	59	-	0,2	0,2	0,8	3,0

Lisa 1.2 MFA algoritmi katsetulemused: püsiv lühis kompenseeritud režiimil

Tabel L1.2.1 MFA test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis $R = 0 \Omega$; $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		$\angle I_F$ (°)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2
Normaal									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	7,8	10,7	-39	87
LP2	12	56	-	0,2	0,2	7,8	6,7	-40	-26
LP3	117	517	0,4	-	0,4	24,3	2,1	-79	-
LP4	117	59	-	0,2	0,2	24,3	10,1	-79	50
Varu 1									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	36,5	43,3	-82	86
LP2	12	56	-	0,2	0,2	36,1	6,4	-82	-18
LP3	12	517	-	0,2	0,2	36,0	21,4	-84	-77
LP4	12	59	-	0,2	0,2	36,1	11,0	-84	52
Varu 2									
LP1	117	52	-	0,2	0,2	36,8	8,7	-84	42
LP2	117	56	-	0,2	0,2	36,7	6,7	-84	-26
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	36,8	14,9	-84	86
LP4	117	59	-	0,2	0,2	36,8	10,2	-84	48

Tabel L1.2.2 MFA test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis $R = 0 \Omega$; normaalrežiimil $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$, varutoite režiimidel $L = 1,48 \text{ H}$; $I_L = 25 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		$\angle I_F$ (°)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2
Normaal									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	7,8	10,7	-39	87
LP2	12	56	-	0,2	0,2	7,8	6,7	-40	-26
LP3	117	517	0,4	-	0,4	24,3	2,1	-79	-
LP4	117	59	-	0,2	0,2	24,3	10,1	-79	50
Varu 1									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	12,1	43,7	-63	86
LP2	12	56	-	0,2	0,2	12,1	24,9	-63	72
LP3	12	517	-	0,2	0,2	12,1	7,8	-63	34
LP4	12	59	0,4	0,2	0,2	12,2	35,6	-63	76
Varu 2									
LP1	117	52	0,4	0,2	0,2	12,4	33,3	-63	76
LP2	117	56	-	0,2	0,2	12,0	24,2	-63	71
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	12,0	15,0	-63	87
LP4	117	59	0,4	0,2	0,2	12,1	34,8	-63	76

Tabel L1.2.3 MFA test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis $R = 4000 \Omega$; $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		$\angle I_F$ (°)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2
Normaal									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	1,9	2,6	-41	87
LP2	12	56	-	0,2	0,2	1,9	1,7	-41	-27
LP3	117	517	0,4	-	0,4	6,0	0,5	-79	88
LP4	117	59	-	0,2	0,2	6,0	2,5	-79	49
Varu 1									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	8,2	9,8	-84	86
LP2	12	56	-	0,2	0,2	8,4	1,5	-84	-18
LP3	12	517	-	0,2	0,2	8,4	6,0	-84	-76
LP4	12	59	-	0,2	0,2	8,4	2,5	-84	53
Varu 2									
LP1	117	52	-	0,2	0,2	8,9	2,1	-84	41
LP2	117	56	-	0,2	0,2	8,9	1,7	-84	-26
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	8,9	3,6	-84	86
LP4	117	59	-	0,2	0,2	8,9	2,5	-84	49

Tabel L1.2.4 MFA test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis $R = 4000 \Omega$; normaalrežiimil $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$, varutoite režiimidel $L = 1,48 \text{ H}$; $I_L = 25 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		$\angle I_F$ (°)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2
Normaal									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	1,9	2,6	-41	87
LP2	12	56	-	0,2	0,2	1,9	1,7	-41	-27
LP3	117	517	0,4	-	0,4	6,0	0,5	-79	88
LP4	117	59	-	0,2	0,2	6,0	2,5	-79	49
Varu 1									
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	1,0	3,6	-63	87
LP2	12	56	-	0,2	0,2	1,0	2,1	-61	72
LP3	12	517	-	0,2	0,2	1,0	0,7	-61	33
LP4	12	59	-	0,2	0,2	1,0	3,0	-61	77
Varu 2									
LP1	117	52	-	0,2	0,2	1,0	2,8	-62	76
LP2	117	56	-	0,2	0,2	1,0	2,1	-62	72
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	1,1	1,3	-62	85
LP4	117	59	-	0,2	0,2	1,1	2,9	-63	77

Lisa 1.3 MFA algoritmi katsetulemused: vilkuv kaar kompenseerimata režiimil

Tabel L1.3.1 MFA test kompenseerimata režiimil, vilkuv kaar $R_1 = 1 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)		
	F1	F2	F1	F2	Kaar
Normaal					
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2
LP3	117	517	0,4	-	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2
Varu 1					
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2
LP3	12	517	-	0,2	0,2
LP4	12	59	-	0,2	0,2
Varu 2					
LP1	117	52	-	0,2	0,2
LP2	117	56	-	0,2	0,2
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2

Tabel L1.3.2 MFA test kompenseerimata režiimil, vilkuv kaar $R_1 = 35 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)		
	F1	F2	F1	F2	Kaar
Normaal					
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2
LP3	117	517	0,4	-	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2
Varu 1					
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2
LP3	12	517	-	0,2	0,2
LP4	12	59	-	0,2	0,2
Varu 2					
LP1	117	52	-	0,2	0,2
LP2	117	56	-	0,2	0,2
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2

Lisa 1.4 MFA algoritmi katsetulemused: vilkuv kaar kompenseeritud režiimil

Tabel L1.4.1 MFA test kompenseeritud režiimil, vilkuv kaar $R_1 = 1 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$; $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			$\angle I_F$ (°)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2
Normaal							
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	90	90
LP2	12	56	-	0,2	0,2	89	-30
LP3	117	517	0,4	-	0,4	90	90
LP4	117	59	0,4	0,2	0,2	89	89
Varu 1							
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	-85	90
LP2	12	56	-	0,2	0,2	86	89
LP3	12	517	-	0,2	0,2	-84	-76
LP4	12	59	0,4	0,2	0,2	85	89
Varu 2							
LP1	117	52	-	0,2	0,2	-51	43
LP2	117	56	-	0,2	0,2	87	89
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	89	90
LP4	117	59	0,4	0,2	0,2	87	89

Tabel L1.4.2 MFA test kompenseeritud režiimil, vilkuv kaar $R_1 = 35 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$; $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			$\angle I_F$ (°)	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2
Normaal							
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	89	90
LP2	12	56	-	0,2	0,2	89	87
LP3	117	517	0,4	-	0,4	88	89
LP4	117	59	0,4	0,2	0,2	88	89
Varu 1							
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	-85	90
LP2	12	56	-	0,2	0,2	X	89
LP3	12	517	-	0,2	0,2	-84	-77
LP4	12	59	0,4	0,2	0,2	X	89
Varu 2							
LP1	117	52	-	0,2	0,2	-84	43
LP2	117	56	-	0,2	0,2	85	89
LP3	117	517	0,4	0,2	0,4	X	90
LP4	117	59	0,4	0,2	0,2	X	89

**Lisa 2.1 Suunatud maaühenduskaitsese katsetulemused: püsiv lühis
kompenseerimata režiimil**

Tabel L2.1.1 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseerimata režiimil, püsiv lühis
 $R = 1000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)						I_F (A)	
			sin(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$				
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar	F1	F2
LP1	12	52	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4	9,3	2,0
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	9,3	9,8
LP3	117	517	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4	5,6	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	5,6	11,8
Varu 1										
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	3,0	8,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	3,1	9,8
LP3	12	517	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	3,1	6,1
LP4	12	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	3,1	11,8
Varu 2										
LP1	117	52	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	3,1	11,4
LP2	117	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	3,1	9,8
LP3	117	517	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4	3,1	3,0
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	3,1	11,8

Tabel L2.1.2 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseerimata režiimil, püsiv lühis
 $R = 2000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)						I_F (A)	
			sin(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$				
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar	F1	F2
LP1	12	52	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4	4,7	1,0
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	4,7	5,0
LP3	117	517	-	-	-	-	-	-	2,8	0,2
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	2,8	6,0
Varu 1										
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	0,4	0,2	0,4	1,5	4,2
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1,5	5,0
LP3	12	517	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1,6	3,1
LP4	12	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1,5	6,0
Varu 2										
LP1	117	52	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1,5	5,7
LP2	117	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1,5	4,9
LP3	117	517	-	-	-	-	-	-	1,5	1,5
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	1,5	6,0

**Lisa 2.2 Suunatud maaühenduskaitsese katsetulemused: püsiv lühis
kompenseeritud režiimil**

Tabel L2.2.1 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis
 $R = 0 \Omega$; $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		$\angle I_F$ (°)		$Re(I_F)$	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Normaal											
LP1	12	52	0,4	-	0,4	7,8	10,7	40	-86	6,0	0,7
LP2	12	56	-	0,2	0,2	7,8	6,8	41	27	5,9	6,0
LP3	117	517	0,4	-	0,4	24,3	2,2	79	-86	4,7	0,2
LP4	117	59	-	0,2	0,2	24,4	10,1	79	-49	4,7	6,5
Varu 1											
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	36,5	43,3	84	-86	3,7	3,0
LP2	12	56	-	0,2	0,2	36,0	6,4	84	17	3,7	6,1
LP3	12	517	-	0,2	0,2	36,0	21,5	84	77	3,6	4,8
LP4	12	59	-	0,2	0,2	36,1	10,9	84	-52	3,6	6,7
Varu 2											
LP1	117	52	-	0,2	0,2	36,8	8,7	84	-41	3,7	6,5
LP2	117	56	-	0,2	0,2	36,7	6,8	84	25	3,7	6,2
LP3	117	517	0,4	-	0,4	36,8	14,9	84	-86	3,7	0,9
LP4	117	59	-	0,2	0,2	36,8	10,1	84	-49	3,7	6,7

Tabel L2.2.2 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis
 $R = 0 \Omega$; normaalrežiimil $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$, varutoite režiimidel $L = 1,48 \text{ H}$; $I_L = 25 \text{ A}$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)			I_F (A)		$\angle I_F$ (°)		$Re(I_F)$	
	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Normaal											
LP1	12	52	0,4	-	0,4	7,8	10,7	40	-86	6,0	0,7
LP2	12	56	-	0,2	0,2	7,8	6,8	41	27	5,9	6,0
LP3	117	517	0,4	-	0,4	24,3	2,2	79	-86	4,7	0,2
LP4	117	59	-	0,2	0,2	24,4	10,0	79	-49	4,7	6,5
Varu 1											
LP1	12	52	0,4	-	0,4	12,1	43,7	63	-87	5,5	2,3
LP2	12	56	-	0,2	0,2	12,1	24,8	63	-72	5,5	7,7
LP3	12	517	-	0,2	0,2	12,2	7,8	63	-34	5,5	6,5
LP4	12	59	-	0,2	0,2	12,2	35,6	63	-76	5,5	8,6
Varu 2											
LP1	117	52	-	0,2	0,2	12,2	33,3	63	-76	5,5	8,1
LP2	117	56	-	0,2	0,2	12,0	24,2	63	-72	5,4	7,5
LP3	117	517	0,4	-	0,4	12,0	14,9	63	-87	5,4	0,8
LP4	117	59	-	0,2	0,2	12,1	34,7	63	-77	5,5	7,8

Tabel L2.2.3 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseeritud režiimil, püsiv lühis
 $R = 1000 \Omega$; $L = 0,74 \text{ H}$; $I_L = 50 \text{ A}$

LP	Sidumised		Rakendusajad (s)						I_F (A)		$\angle I_F$ (°)		$Re(I_F)$	
			cos(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$								
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar	F1	F2	F1	F2	F1	F2
LP1	12	52	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4	4,7	6,5	40	-87	3,6	0,3
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	4,7	4,1	40	27	3,6	3,7
LP3	117	517	-	-	-	0,4	-	0,4	14,7	1,3	79	-86	2,8	0,1
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	14,7	6,1	79	-49	2,8	4,0
Varu 1														
LP1	12	52	-	-	-	0,4	0,2	0,4	21,3	25,2	84	-86	2,2	1,8
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	21,3	3,8	84	18	2,2	3,6
LP3	12	517	-	-	-	-	0,2	0,2	21,3	12,7	84	77	2,2	2,9
LP4	12	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	21,3	6,4	84	-52	2,2	3,9
Varu 2														
LP1	117	52	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	22,1	5,2	84	-41	2,3	3,9
LP2	117	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	22,1	4,1	84	25	2,3	3,7
LP3	117	517	-	-	-	0,4	-	0,4	22,1	8,9	84	-86	2,3	0,6
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2	22,1	6,1	84	-49	2,3	4,0

Lisa 2.3 Suunatud maaühenduskaitsese katsetulemused: vilkuv kaar kompenseerimata režiimil

Tabel L2.3.1 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseerimata režiimil, vilkuv kaar
 $R_1 = 1 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)					
			sin(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$		
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	0,4	-	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	117	517	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
Varu 1								
LP1	12	52	-	0,2	-	0,4	0,2	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	12	517	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP4	12	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
Varu 2								
LP1	117	52	-	0,2	0,2			
LP2	117	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	117	517	-	-	-	-	0,2	0,2
LP4	117	59	-	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4

Tabel L2.3.2 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseerimata režiimil, vilkuv kaar
 $R_1 = 35 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)					
			sin(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$		
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar
LP1	12	52	0,4	0,2	0,4	0,4	-	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	117	517	0,4	-	0,4	0,4	-	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
Varu 1								
LP1	12	52	-	0,2	-	0,4	0,2	0,4
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	12	517	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP4	12	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
Varu 2								
LP1	117	52	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP2	117	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	117	517	-	-	-	0,4	0,2	0,4
LP4	117	59	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2

Lisa 2.4 Suunatud maaühenduskaitsese katsetulemused: vilkuv kaar kompenseeritud režiimil

Tabel L2.4.1 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseeritud režiimil, vilkuv kaar
 $R_1 = 1 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)					
			cos(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$		
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar
LP1	12	52	-	-	-	-	-	-
LP2	12	56	-	0,2	0,2	-	0,2	0,2
LP3	117	517	-	-	-	-	-	-
LP4	117	59	-	-	-	-	-	-

Tabel L2.4.2 Suunatud tundliku maaühenduskaitsese test kompenseeritud režiimil, vilkuv kaar
 $R_1 = 35 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Lühispunkt	Sidumised		Rakendusajad (s)					
			cos(φ)			Sektor $\angle 85^\circ$		
Normaal	F1	F2	F1	F2	Kaar	F1	F2	Kaar
LP1	12	52	-	-	-	-	-	-
LP2	12	56	-	-	-	-	-	-
LP3	117	517	-	-	-	-	-	-
LP4	117	59	-	-	-	-	-	-

Lisa 3 Transientkaitse katsetulemused: vilkuv kaar kompenseerimata režiimil

Tabel L3.1 Transientkaitse tundlikkuse test kompenseerimata režiimil, vilkuv kaar $R_1 = 1 \Omega$; $R_2 = 5000 \Omega$

Normaal	F1	Rakendumine		
		R = 0,01 Ω	R = 1 Ω	R = 35 Ω
LP1	12	+	-	-
LP2	12	+	+	-
LP3	117	+	+	-
LP4	117	+	+	+
Varu 1		R = 0,01 Ω	R = 1 Ω	R = 35 Ω
LP1	12	-	-	-
LP2	12	+	-	-
LP3	12	-	-	-
LP4	12	-	-	-
Varu 2		R = 0,01 Ω	R = 1 Ω	R = 35 Ω
LP1	117	-	-	-
LP2	117	+	+	-
LP3	117	+	+	-
LP4	117	+	+	-