



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
INSENERITEADUSKOND

---

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# RELEEKAITSE KAUG- JA LÄHIRESERVEERIMISE VÕIMALUSED JAOTUSVÕRKUDES

BACK-UP PROTECTION POSSIBILITIES IN DISTRIBUTION NETWORKS

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Mark Kurzin

Üliõpilaskood: 144377AAVM

Juhendaja: Emeriitprofessor Heiki Tammoja

Tallinn, 2017.a.

## AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

“25” mai 2017

Autor: .....  
/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

“.....” ..... 201.....

Juhendaja: .....  
/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

“.....” .....201... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....  
/ nimi ja allkiri /

# Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Mark Kurzin	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> RELEEKAITSE KAUG- JA LÄHIRESERVEERIMISE VÕIMALUSED JAOTUSVÕRKUDES	
<i>Kuupäev:</i> 25.05.2017	78 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendaja:</i> Emeriitprofessor Heiki Tammoja	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli uurida ja analüüsida, koos lahenduste leidmisega, erinevaid releekaitse lähi- ja kaugreserveerimise võimalusi jaotusvõrkudes.</p> <p>Eesmärkide saavutamiseks kasutati antud lõputöös nii teoreetilisi kui ka praktilisi meetodeid konkreetsete näitete põhjal. Vaadeldava diplomitöö ülesannete skeemid, arvutused, vektordiagrammid on esitatud arusaadavas vormis.</p> <p>Tulemuse saavutamise käigus hõlmati põhjalikult olulisi aspekte, mis käsitlevad releekaitse nii projekteerimise kui ka kommunikatsiooni valdkonda. Kogu lõputöö on jagatud neljaks osaks, kus iga osa annab püstitatud probleemidele konkreetse lahenduse ja seletab reserveerimise omapära jaotusvõrgus.</p> <p>Kõiki esitatud järeldusi on võimalik edukalt kasutada releekaitse reserveerimise projekteerimise ja hoolduse käigus elektrisüsteemi töökindluse tõstmiseks.</p>	
<i>Märksõnad:</i> releekaitse, reserveerimine, võimsuslüüti, säte, valvekoer, fiidriterminal	

# Summary of the Diploma Work

*Author:* Mark Kurzin

*Type of the work:* Magister Thesis

*Title:* BACK-UP PROTECTION POSSIBILITIES IN DISTRIBUTION NETWORKS

*Date:* 25.05.2017

*78 pages*

*University:* Tallinn University of Technology

School of Engineering

*Department:* Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

*Tutor of the work:* Professor Heiki Tammoja

*Abstract:*

The aim of diploma work was to investigate and analyse, with the solutions, different back-up protection options in distribution networks.

To achieve the aim of diploma work was used theoretical and practical methods on specific examples. Diploma work exercises schemes, calculations, vector diagrams are presented in an understandable way.

Important aspects were covered which describe communication and protection solutions in back-up relays.

The whole diploma work was divided into four parts, where each part gave a particular solution for different problems. Also it was clearly explained the back-up protection individuality.

All viewed conclusions can be successfully used in the design and maintenance of the back-up relay protection for the increase of power system efficiency.

*Keywords:* protection relay, back-up, circuit breaker, watchdog, relay terminal

# Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	7
Teema põhjendus:.....	8
Töö eesmärk:.....	8
Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu: .....	8
Lähteandmed: .....	8
Eessõna .....	9
Lühendite ja sümbolite loetelu .....	10
Sissejuhatus.....	11
1. Releekaitse reserveerimine jaotusvõrkudes .....	13
1.1 Releekaitse reserveerimis analüüs jaotusvõrkudes .....	20
1.1.1 Kõrgepinge mootorikaitse fiider .....	21
1.1.2 Sektsioonidevahelise lüliti (SVL) vale rakendumise ennetamine .....	24
1.1.3 Maalühiskaitse reserveerimine .....	25
1.1.4 Trafo kaitse .....	26
1.1.5 Sisenev 35kV põhi-svl-põhi (main-tie-main) releekaitse.....	28
1.1.6 Nulljärgnevusvoolu piiramine.....	29
1.1.7 Väljalülitamiseaja vähendamine elektrikaarekaare toimimise tagajärjel..	32
2. Võimsuslüliti tõrkekaitse.....	35
2.1 Võimsuslüliti tõrkekaitse skeemid .....	37
2.2 Võimsuslüliti tõrkekaitse loogika erinevate rikkete korral .....	41
2.3 Võimsuslüliti elektrikaare ülelöögi kaitse .....	42
2.4 Liigvooluanduri ehk funktsiooni 50/50N kiire tühistamine.....	43
2.5 Võimsuslüliti tõrkekaitse konfiguratsioonid ja võltsitud signaalid .....	44
2.5.1 Võimsuslüliti tõrkekaitse konfiguratsioonid.....	44
2.5.2 Võimsuslüliti tõrkekaitse võltssignaalid.....	45
3. 0,4 kV kaugreserveerimise võimalused .....	47
3.1 Traditsiooniline meetodika sätete valimisel.....	47
3.1.1 Mootori kaitselüliti QF2 sätete valimine.....	47
3.1.2 Sätete määramine kaitselüliti QF4 ja QF5 jaoks.....	48
3.1.3 Sätete määramine kaitselüliti QF3 jaoks .....	49
3.1.4 Sätete määramine kaitselüliti QF1 jaoks .....	49
3.2 Sätete analüüs ja lühisvoolude arvutamine .....	51

3.3	Kaugreserveerimise algorütm .....	55
3.4	Vooluvektori juurdekasvu rakendumistsooni leidmine .....	61
4.	Integreeritud releekaitse reserveerimine tarkvõrgus .....	63
4.1	Reservkaitse vale rakendumine süsteemi võnkumise ajal .....	64
4.2	Reservkaitse vale rakendumine süsteemi ülekoormuse ajal.....	67
4.3	Integreeritud releekaitse reserveerimis skeemid .....	68
4.3.1	Integreeritud releekaitse reserveerimise eeliste näited ülekoormuse ja võnkumise ajal.....	70
4.4	Integreeritud releekaitse reserveerimise võimalused tarkvara abil .....	74
	Lõputöö kokkuvõte .....	78
	Kasutatud kirjandus .....	81

# Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	<b>Releekaitse kaug- ja lähireserveerimise võimalused jaotusvõrkudes</b>
Üliõpilane:	<b>Mark Kurzin, 144377AAVM</b>
Eriala:	<b>Elektroenergeetika</b>
Lõputöö liik:	Magistritöö
Lõputöö juhendaja:	Emeriitprofessor Heiki Tammoja
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	
Lõputöö esitamise tähtaeg:	<b>25.05.2017</b>

---

Üliõpilane (allkiri)

---

Juhendaja (allkiri)

---

Instituudi direktor (allkiri)

**Teema põhjendus:**

Tänapäevane mikroprotsessori releekaitse on muutunud põhiliseks releekaitse liigiks elektrivõrkudes. Suurt tähelepanu pööratakse elektrivarustuse töökindlusele ja ohutusele. Kõiki neid nõudmisi täidavad releekaitse erinevad liigid ning nende reserveerimise võimalused. Kaug- ja lähireserveerimisel on oluline osa kogu releekaitse valdkonnas, nende täiustamine ja uuendamine suurendab elektrisüsteemi töövõimet. See teema on oluline nii elektrienergia tootjatele kui ka tarbijatele. Minu töös pakutakse mitmete näidete abil konkreetseid tulemusi, mis annavad variante, kuidas on releekaitse valdkonnas võimalik lahendada erinevaid olukordi paremate tulemuste saamiseks.

**Töö eesmärk:**

Töö eesmärgiks on mikroprotsessor releekaitsega nii kaug- kui ka lähireserveerimisel seotud probleemide uurimine.

**Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:**

1. Releekaitse reserveerimise võimalused mikroprotsessori releekaitse abil (toon erinevad näited erinevate releekaitsete jaoks ning võimalused selle parandamiseks)
2. Võimsuslüliti tõrkekaitse. Ehk räägin milleks ja kuidas on parem seda kaitset teostada.
3. Kaugreserveerimise probleemid 0,4 kV jaotusvõrkudes (kus lahendan ülesandeid sätete arvutamisega ning kaitsetsooni leidmisega konkreetsetes olukordades ning esitan algoritmi, mille abil on võimalik kaugreserveerimist parandada).
4. Integreeritud releekaitse reserveerimine tarkvõrgus. On toodud uus lahendus releekaitse reserveerimise tõhususe suurendamiseks.

**Lähteandmed:**

Plaanin kasutada admeid erinevatest allikatest, nii raamatutest kui ka internetist.



# Eessõna

Käesoleva lõputöö teema valisin oma isiklikul initsiatiivil ja selle koostamise käigus abistasid mind Tavrida Electric Expordi töötajad Elina Sakkus (sekundaarahelate projekteerija) ja Vladimir Mitjanin (jaotusseadme kontrollspetsialist) oma seletustega ja eluliste näidetega tutvustamisega releekaitse valdkonnast. Eraldi soovin tänada oma juhendajat Heiki Tammoja, kelle juhtimise all on kirjutatud see lõputöö. Heiki Tammoja, omades suurt kogemust releekaitse valdkonnas, andis minu tööle professionaalse hinnangu ja juhtis tähelepanu olulistele kohtadele.

Minu praegune elukoht on Liikuri 8a, Tallinn ning praegune töökoht on AS Tavrida Electric Export, Visase 14.

# Lühendite ja sümbolite loetelu

26 – aparaadi termokaitse

46 – vooluasümmeetriakaitse, ka  $I_2$  või  $I_n$

49 – masina ja trafo termokaitse

50 – hetkliigvoolukaitse (voolulõige), ka  $I_{>>}$

50N – vastavad maalühiskaitset, ka  $I_{0>>}$

51 – viitliigvoolukaitse (viitvoolulõige, maksimaalvoolukaitse), ka  $I_{>}$

51N – vastavad maalühiskaitset, ka  $I_{0>}$  (nulljärgnevus voolu arvutamine või mõõtmine kolme mõõtevoolutrafoodega)

51G – vastavad maalühiskaitset, ka  $I_{0>}$  (nulljärgnevus voolu arvutamine või mõõtmine ühe mõõtevoolutrafoga)

51LR – rootori käivitamisekaitse

63 – liigrõhukaitse, ka  $p_{>}$

67 – suundliigvoolukaitse, ka  $I_{>>}$ ,  $I_{>}$

67N – vastavad maalühiskaitset, ka  $I_{0>>}$

86 – keeld, toimimisblokeering

87T – trafo diferentsiaalkaitse

87B – lattide diferentsiaalkaitse

87REF – piiratud maalühiskaitse

# Sissejuhatus

Releekaitse töökindluse suurendamiseks alajaamas kasutatakse releekaitse reserveerimise võimalusi, mis on üks nõuetest releekaitse jaoks. Releekaitse reserveerimine suurendab elektrisüsteemi püsivõimet, säilitab tarbijate kindlust ja on üks efektiivsematest vahenditest rikete vähendamiseks lühise korral.

Antud lõputöö eesmärgiks oli uurida erinevaid kaug- ja lähireserveerimise releekaitse võimalusi jaotusvõrkudes, kasutades erinevaid sätete muutmise võimalusi, loogikaelementide kombinatsioone, vektorsuuruste arvutamist ning nende realiseerimine vastava tarkvara abil. Käesoleva lõputöö teema pakkus huvi oma spetsiifika ja kitsa suunatuse poolest, mida ülikoolis süvendatult ei käsitletud. Kogu lõputöö on jagatud neljaks osaks, kus iga osa annab püstitatud probleemidele konkreetse lahenduse ja seletab reserveerimise omapära jaotusvõrgus.

Esimeses peatükis kirjeldatakse erinevaid situatsioone õlitööstuses või tuuakse elektrijaama omatarbe näiteid. Antud näidete omapära on aktuaalne Eesti energiasüsteemi jaoks, sest nende lühiajalised elektrikatkestused võivad viia suurte kahjustusteni ja põhjustada väga suuri kulutusi nii ettevõttele kui ka tarbijatele. Seepärast on nende elementide releekaitse reserveerimine ülimalt oluline osa nii projekteerimise kui ka rakendamise käigus. Erinevaid reserveerimisvõimalusi käsitletakse selles peatükis erinevate elementide jaoks eraldi, mis kokkuvõtlikult annab laiemat pildi sellest, kui keeruline on tegelikult releekaitse projekteerimine, sätete arvutamine, valimine ja jälgimine.

Teises peatükis uuritakse süvendatult konkreetseid lahendusi releekaitse reserveerimises võimsuslüliti tõrkekaitse loogikate näitel. Võimsuslüliti tõrkekaitse peab olema nii kiire kui võimalik sest võimsuslüliti pikk väljalülitamise aeg võib viia elektrisüsteemi stabiilsuse kadumiseni, mida käsitletakse käesolevas lõputöös. Samuti on lõputöös toodud erinevad skeemid ja konkreetset loogikat, mida on võimalik kasutada erinevate rikete korral (mitmefaasilised lühised või ühefaasilised lühised). Eraldi on toodud elektrikaare ülelöögi kaitse, mis oleks suurepärase lahendus kahe erineva sageduspiirkonna vahel asuvatele võimsuslülititele. Paralleelselt võimsuslüliti tõrkekaitse kirjeldamisega on toodud antud kaitseliigi rakendusnäited erinevate konfiguratsioonide abil ning erinevad võimalused võltssignaali elimineerimiseks.

Kolmandas peatükis käsitletakse kaugreserveerimise probleeme ja nende lahendamist 0,4 kV elektrivõrkudes. Selles peatükis on konkreetse skeemi põhjal tehtud erinevad arvutused (sätte

arvutamine, lühise voolu arvutamine) ning koostatud algorütm, mis reserveerib edukalt erinevates vahemaades toitelattidest väljundfiidrid. Lisaks on toodud ristkujuline kaugreserveerimise releekaitse rakendumistsoon, mis arvestab voolujuurdekasvu vektoreid vastavalt koormuse liikidele.

Viimases peatükis arutletakse ja tuuakse konkreetne näide, kuidas on võimalik edukalt kasutada integreeritud releekaitse reserveerimise loogikat tarkvõrkudes, mis arvestaksid kõiki eelpool uuritud meetmeid. Kasutades vastavat tarkvara, on võimalik oluliselt suurendada releekaitse reserveerimise tõhusust ja saada hakkama põhjustega, mis põhjustavad releekaitse valerakendumist. Veelgi enam on arvatud integreeritud releekaitse kättesaadavust ja majanduslikku otstarbekust.

# 1. Releekaitse reserveerimine jaotusvõrkudes

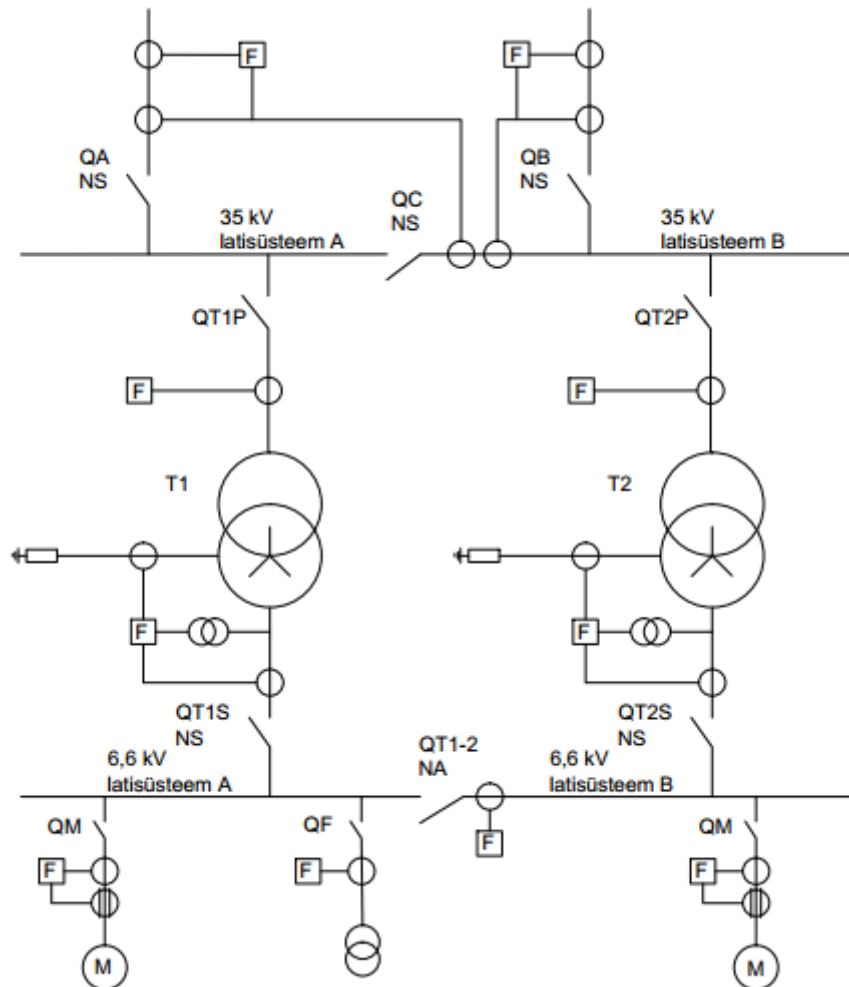
Multifunktsionaalne mikroprotsessoripõhine releekaitse populaarsus on väga kiiresti kasvanud tänu nende kommunikatsiooni, mõõtmiste, lihtsustatud juhtmestiku ja vähendatud ruumide kasutamisele. Kuna paljud kaitse funktsioonid asuvad ühes seadmes on oluline pakkuda piisav kaitse isegi releekaitse tõrke ajal. Usaldusväärne kaitsekeem on väga oluline seadmete ja personaalide toimimiseks, mida saavutatakse tänu selektiivsetele rikete eemaldamisele. Antud lõputöös uuritakse erinevaid võimalusi rahuldava taseme saavutamiseks releekaitse reserveerimisvaldkonnas.

Releekaitse on üks keeruliste elektrivõrkude süsteemi osadest, kus iga osa on jaotatud erinevateks tüüpideks. Tavaliselt alajaamades koosneb kaitseahel võimsuslülititest, avanemis- ja sulgemismähistest, mõõtetrafodest, abitoiteallikast ja kontrolljuhtmetest. Lisaks pakutud kaitsevõimalustele omab tüüpiline mikroprotsessorikaitse ka enesekontrolli funktsiooni, mis on võimeline tuvastama ebanormaalseid tingimusi oma kaitseahelas ning suurendama kaitseahela reserveerimise võimalust. Samuti on käsitletud mikroprotsessor releekaitseid mis omavad erinevaid kaitse sätteid (nt. maksimaalse maalühisvoolu kaitset) jne.

Releekaitse eesmärk on tuvastada rike ja anda käsk kõige lähemal sündmuskohale asuvale seadmele välja lülitamiseks. Kõrgepingeline mootorikaitse fiideri rike viib üldjuhul mootori mittekättesaadavusele mis on väga ohtlik olukord naftakeemia- või mingis muus suures tehases. Selle kriitilise olukorra vältimiseks peab olema reservvaru, mis võimaldab tootmist jätkata. Joonisel 1. on toodud naftakeemiatehase elektrijaotusvõrk, kus on kasutusel ühe sektsioneeritud kogumislatisüsteemiga skeem. See tähendab, et kui üks trafodest mingi põhjuse korral ei tööta, siis teine trafo võib võtta esimese trafo koormuse enda peale. Tootmisprotsessi seisukohast on reservtrafo ja -mootor vajalikud järjepideva tootmise tagamiseks. Kaitseahelate õige toimimine koos reserveerimisvõimalustega võib suurendada elektrivõrgu töökindlust, kuid aga ei saa välistada tootmise kadu. Teiste sõnadega, hea kaug- ja lähireserveerimine ei paranda halba disaini.

Üldiselt, naftakeemiatehase reserveerimise projekteerimine baseerub kas trafo või ühe seadme väljalülitamisel. Reserveerimise filosoofia või varukaitse ehk *back-up* astub üks samm ette, ehk see arvestab kahe juhtumiga korraga, näiteks elektrivigade ja kaitseahelate tõrgetega. Tüüpiline näide on võimsuslülitite tõrkekaitse (*breaker-failure protection*), mis lülitab välja kõik

ümbritsevad võimsuslülitiid lüliti tõrke puhul. Teine näide - kui võimsuslüliti ei avane käsu korral.



**Joonis 1.1 Ühejooneline primaarskeem**

Kaitse eesmärgil on elektrisüsteem tavaliselt jaotatud tsoonideks, nii et ükski osa ei jääks kaitseta. Selektiivne releekaitse tagab olukorra, kui lähim võimsuslüliti võib välja lülitada ahela, põhjustades võimalikult vähe kahjustusi ja säilitades teiste seadmete töökindluse. Tavaliselt on kasutusel kaks põhilist meetodit, süsteemi elementide kaitse ja viitkaitse. Reserveerimise kaitse kontseptsioon on väga erinev iga meetodi jaoks.

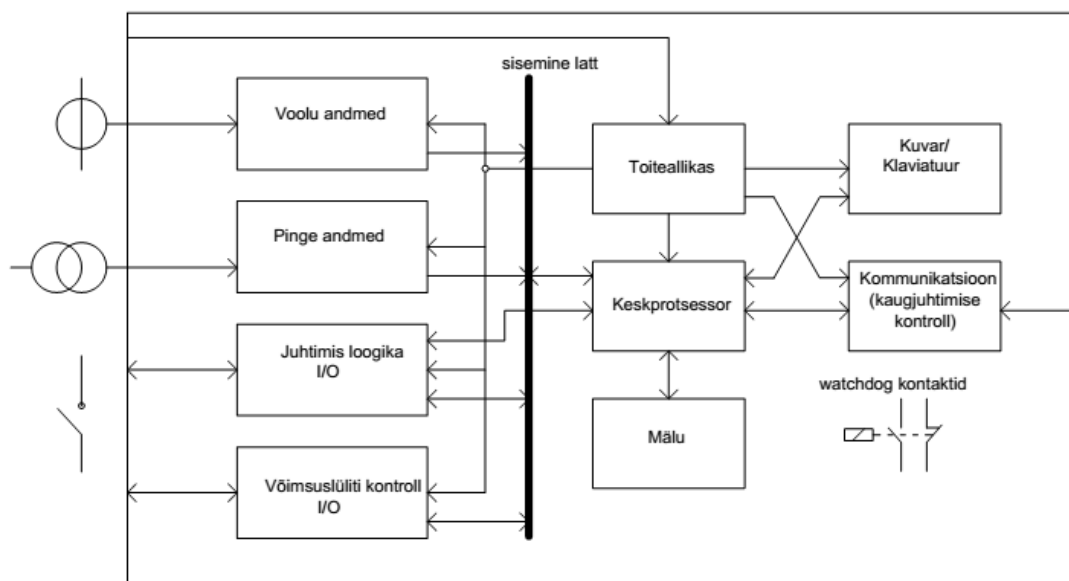
Süsteemi elementide kaitstes võrreldakse voolud tsooni piirides. Tüüpiline näide on lattide diferentsiaalne kaitse. Elemendi kaitse on väga kiire, tänu sellele võib ta välja lülitada rikkekoha, kui see asub kaitstavas tsoonis, nii kiiresti kui võimalik. Kui mingi rike toimub väljaspool tsooni, siis difkaitse ei rakendu, ehk see ei oma sisemist reserveerimise kaitset. Reservkaitse mingi tsooni jaoks peab siis omama veel ühte seadet (terminali) või tuleb kaasata suuremat ala.

Viitkaitse baseerub lühisvoolu voolamisel läbi kõrvalolevate tsoonide ja seda voolu võivad avastada mitu kaitsereleed. Kui kaitsereleed on õieti sätestatud, siis rikkekohale lähim võimsuslülitit peab välja lülitama enne eespool tsooni seisvat võimsuslülitit. Antud kaitsemeetodi jaoks on reservkaitse sisemine kaitse. Kahjuks ei suuda reservkaitse riket piisavalt kiiresti välja lülitada, mis võib põhjustada seadmete riket või süsteemi stabiilsuse kadumist. Käesolevas lõputöös on toodud erinevad väljalülitamise aja vähendamise võimalused.

Joonisel 1.1 on näha, et 35 kV lattide jaoks on toodud osaline diferentsiaalne kaitse [4].

Õige lattide difkaitse võrdleb jaotusseadme sisenevaid ja väljuvaid voole. Lattide difkaitse on väga kiire kaitse, kuid see ei paku reservkaitset fiidri liigvoolu eest. Töökindluse tõstmiseks tuleb kasutada lisa liigvoolukaitse terminali nii põhi- kui ka sektsioonivahelisele võimsuslülitile. Samuti on lattide difkaitse kiirrakendusaeg väga kallis ja paljud jaotusseadmete omanikud ei näe selles majanduslikku vajadust. Kallimaks difkaitset teeb see et difkaitse on võimeline ülikiire tuvastada diferentsiaalvoolu väärtuse – enne voolutrafo südamiküüllastumist ning samuti difkaitse on kõige täiuslikum kaitse [1].

Osaline diferentsiaalne releekaitse on voolukaitse vorm, mis on väga tihti kasutusel lattide liigvoolu tuvastamiseks ehk lattide kaitsmiseks ja toimib nagu varukaitse fiidri liigvoolu eest. Osalist diferentsiaalset releekaitset ei ole võimalik kasutada radiaalelektrivõrkudes. Nii nagu difkaitse siis ka osaline lattide difkaitse liidab sisenevad ja väljuvad voolud mis läbivad põhi- ja sektsioonivahelised võimsuslülitid. Kui toimub lühis kaitstavas tsoonis, siis sisenevad ja väljuvad voolud liidetakse ja releekaitse rakendub ning lühisekoht jääb eraldatuks. Vastasel juhul, sisenevad ja väljuvad voolud lahutatakse ja releekaitse ei rakendu. Antud releekaitse liik elimineerib ühe sätestamise sammu, kuna see vastutab põhi- ja sektsioonivaheliste võimsuslülitite eest korraga. See omakorda vähendab ajanihet peavõimsuslülitit jaoks ja parandab võimaluse korraliku koordineerimisega eespool seisvate releekaitsega, mis on põhiline osalise difkaitse eelis [6].



**Joonis 1.2 Tüüpiline mikroprotsessoripõhine multifunktsionaalne releekaitse**

Joonisel 1.2 on toodud tüüpilise mikroprotsessoripõhise multifunktsionaalse releekaitse plokk skeem [4]. Tänapäevastel releekaitseterminalidel on pidev enesekontroll, mida nimetatakse valvekoeraks ehk *watchdog* kontaktideks. Sisemiste rikete korral muudavad valvekoera kontaktid oma asendit ja teavitavad personali talitlushäiretest ja fiidriterminal pannakse ooterežiimi. Samuti peavad valvekoera kontaktid olema kasutusel reservkaitse jaoks, et säilitada esmane ohutus isegi fiidriterminali ooterežiimi ajal. Kaitserellee on kasutatud kui ta ei arvesta globaalse kaitse kavat mis arvestab fiidriterminalis sisenemis rikketega.

Iga fiidriterminali eesmärk on pakkuda ohutus ja töökindlus igale elektrivõrkude elemendile. Kaitse skeemi on võimalik oluliselt parandada, kasutades valvekoera kontakte. See lihtne komponent on väga oluline osa kogu kaitse valdkonnades, mis pakub kõrgemat releekaitse taset. Samuti aitab enesekontroll vältida ootamatuid sisse- ja väljalülitamisi. Sõltuvalt rikest, võib releekaitse terminal kas jätkata oma kaitsefunktsiooni või mitte.

**Tabel 1.1 Valvekoera kontaktide kirjeldus**

Releekaitse asend	Valvekoer	Olukord
Ooterežiimil	Aktiveeritud (kinni)	Ilmunud sisemine viga või rele ei ole pingestatud
Töörežiimil	Mitte aktiveeritud (lahti)	Relee on pingestatud ja ei ole ilmunud sisemist viga



Kui tekib fiidritermini sisemine viga, siis esipaneelil pannakse automaatselt põlema spetsiaalne tuli. Kõige parem lahendus oleks, kui valvekoera kontaktide asendi informatsioon oleks kättesaadav teistele operaatoritele, vastasel juhul on vea tuvastamiseks vaja teostada pidevat kontrolli, mis võtab palju aega [8].

**Tabel 1.2 Valvekoera kontaktide hoiatusüsteem**

Valvekoera kontaktide ühendus	Sisemist viga ei ole ilmunud	Sisemine viga on ilmunud
Ühendatud juhtimissüsteemiga	Kaitsefunktsioonid on töörežiimis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaitse funktsioon on rikkis</li> <li>• Terminal ooterežiimis</li> <li>• Vilgub häire valgus esipaneelil</li> <li>• <b>Valvekoera kontaktid on aktiveeritud ja võrguhaldur on teavitatud, et on vaja teostada hooldustööd</b></li> </ul>
Ei ole ühendatud juhtimissüsteemiga	Kaitsefunktsioonid on töörežiimis	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kaitse funktsioon on rikkis</li> <li>• Terminal ooterežiimis</li> <li>• Vilgub häire valgus esipaneelil</li> <li>• <b>Hooldustööde vajadust avastatakse alles siis, kui operator kontrollib terminali esipaneeli</b></li> </ul>

Kuigi enesekontrolli süsteem võib leida palju erinevaid vigu, mõned jäävad ikkagi leidmata. Need juhtumid on tavaliselt seotud erinevate moodulitega, mis vastutavad erinevate parameetrite eest. Näiteks lahti ühendatud maaihendusvoolu trafo, rike sisend/väljund moodulites või vigane analoogväljundite moodul. Need ebaõnnestumised ei puuduta releekaitse terminali, kuid võib avaldada olulist mõju kaitse funktsioonile. Näiteks kui maaihendusvoolu trafo on ühendatud valesti, see olukord võib mõjutada kõike suunakaitseid. Selle vältimiseks on soovitatav perioodiliselt testida ja kontrollida (umbes iga 5 aasta tagant) kõik olulisi ühendusi. Tabelis 1.3 on toodud erinevate plokkide enesekontrolli tüübid, täitmise perioodid ja elastsuse olemasolu ehk kui tekib viga, kas mingi terminaali funktsioon säilitab oma funktsionaalsuse või mitte. Samuti käsitletakse alljärgnevalt selles diplomitöös reserveerimise võimalusi, kasutades valvekoera kontakte.

**Tabel 1.3 Terminali enesekontroll**

Funktsioon	Enesekontrolli tüüp	Täitmise periood	Elastsus
Toiteallikas	Toiteallikate kontroll tolerantsivahemikkus	Käivitamise ajal/Pidevalt	Jah
Pinge ja Vool	Analoog kanali küllastumise avastamine	Pidevalt	Jah
	Singaaltöötuse andmete filtreerimine	Pidevalt	Jah
	Ühenduste kontroll	Käivitamise ajal/Pidevalt	Jah
Töötlemise üksus	Mälu test	Käivitamise ajal	Jah
	Valvekoera tarkvara	Pidevalt	Jah
Inimese-masina liides	Mälu test	Käivitamise ajal	Ei
	Valvekoera tarkvara	Pidevalt	Ei
Loogika I/O	Moodulite kontroll	Käivitamise ajal/Pidevalt	Jah
Temperatuuri anduri sisendid	Mälu test	Käivitamise ajal	Ei
	Valvekoera tarkvara	Pidevalt	Ei
	Analoog muunduri kontroll	Pidevalt	Ei
Analoog väljundid	Mälu test	Käivitamise ajal	Ei
	Valvekoera tarkvara	Pidevalt	Ei

Lõputöö eesmärgiks on tuua erinevad võimalused ja rakendused elektrivõrkude releekaitse reserveerimiseks, selleks peavad olema täidetud järgmised kriteeriumid:

1. Ei ole projekteerimisvigu
2. Kaitsesätted on õiged
3. Tööle panemine ja käivitamine oli tehtud õigesti

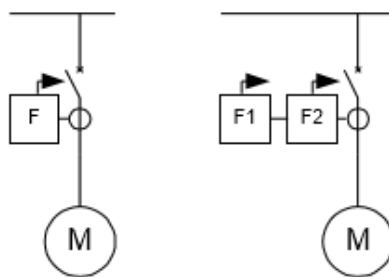
Releekaitse valdkonna kogumestest on võimalik väita, et väga sageli põhjustavad ulatuslikke kahjustusi mitte terminali vead, vaid nende rakendamine. Reserveerimiskaitse on mõttetu, kui seade on valesti ühendatud ja valesti seadistatud. Enne kui otsustada lisada täiendavaid seadmeid, on soovitatav hoolikalt kontrollida seda, mis on juba paigaldatud, et tagada head töökindlust. Lisaseadmete paigaldamine teeb ahela nii hoolduse poolest kui ka kasutamise poolest keerulisemaks ja raskemaks.

#### Releekaitse terminali dubleerimise mõju kättesaadavusele [4]

Nii nagu on eespool seletatud, sisaldab mikroprotsessoripõhine releekaitse endas erinevad kaitseliike ühes seadmes (terminalis). Sageli releekaitse terminali dubleerimine on antud lahendus ülemate poolt töökindluse suurendamiseks, mis ei ole kahjuks 100% õige lahendus. Kuna kaitserelee on üks osa kogu kaitseahelast, siis on toodud näide kahe erineva kõrgepinge

mootorikaitse fiideri abil. Üks kõrgepinge mootorikaitse fiider kasutab ühe mikroprotsessor relee ja teine kaks indentsed mikroprotsessor releed, kus igal terminalil on oma toide ja oma väljalülitamise mähised, nagu on toodud joonisel 1.3. Mõlemate olukordade puhul on kasutusel üks mõõtevoolutrafo ja üks võimsuslülititi. Kätesaadavuse võrdlemiseks käsitletakse järgmisi ebasoovitavaid juhtumeid mõlema skeemi jaoks:

1. Lattid on pingestamata
2. Mootor on pingestamata



**Joonis 1.3 Kõrgepinge mootorikaitse fiider üksikterminaliga ja dubleerimis terminalidega**

Esimene juhtum võib aset leida võimsuslülitis isolatsiooni ülelöögi puhul või elektrilise vea (nt. lühise) tekkimisel mootorikaitse fiidris ja kaitsehela mitterakendumisel. Viga elimineeritakse, kasutades eespool seisvat võimsuslülitit, mis avatakse ja kogu latisüsteem jääb pingestamata. Teine juhtum võib aset leida elektrilise vea (nt. mähistevahelise lühise) tekkimisel mootorikaitse fiidris või ebasoovitusliku väljalülitamise puhul releekaitse poolt. Tõrje kiirused ja keskmised ajad olukordade parandamiseks on toodud erinevatest allikatest võimsuslülitit, voolu trafode, kaablite jne jaoks. Samuti vaadati tootjate andmeid erinevate mikroprotsessoripõhiste releekaitsete jaoks. Tulemused iga juhtumi jaoks on toodud allpool.

Esimene juhtum: Peamine põhjus, miks lattid võivad jääda pingestamata, on ikkagi võimsuslülitit isolatsiooni ülelööki. Releekaitse tõrge ei avalda tegelikult olulist mõju, kuna ei juhtu mingit riket, mis sunniks eespool seisvat lülitit lahutada oma kontakti. See juhtum on väga ebatõenäoline, sest suure osa erinevaid sisenemisrikkeid võib mikroprotsessori releekaitse terminal tuvastada, kasutades enesekontrolli, mis oluliselt vähendab aega, mil eespool seisev võimsuslülitit on sunnitud mootorikaitse fiidrit kaitsma.

Teine juhtum: Lisades teist sama releekaitse terminali võib kahekordistada võimsuslülitit ebasoovitavaid kontaktide lahutamise riske. Kuna elektrilised rikked mootorikaitse fiidris

omavad rohkem mõju töökindlusele, kui lisatud teine mikroprotsessor, siis terminalide dubleerimine ei avalda olulist muutust mootorikaitse fiidri tõhususele.

Need kaks juhtumid näitavad, et mikroprotsessori releekaitse dubleerimine ei oma piisavat efekti jaotusvõrkudele, kui relee on õigesti sätestatud ja korrektselt töötab releekaitse enesekontroll. On vaja tunnistada, et on olemas palju erinevaid võimalusi elektrivõrkude talistus- ja töökindluse suurendamiseks ja releekaitse dubleerimine ei ole ikkagi kohe esimene lahendus.

### Tüüpiline õlitööstuse või elektrijaama omatarbe ehk samamoodi naftakeemiatehase ja maavaarade tootmise jaotusvõrk.

Tüüpiline õlitööstuse või elektrijaama omatarbe ehk samamoodi naftakeemiatehase ja maavaarade tootmise jaotusvõrk on toodud joonisel 1.1. Kaks sektsioonidevahelist võimsuslülitit, kus üks on tavaliselt normaalselt suletud (NS) ja teine on normaalselt avatud (NA), on väga tihti kasutusel. Joonisel 1.1 on kõik võimsuslülitid NS ja ainult sektsioonidevaheline võimsuslülitit 6,6 kV on NA. Kõik riskülikus esitatud releekaitse funktsioonid vastutavad oma seadme ja tsooni eest. Kui mikroprotsessori relees tekib sisemine viga, siis nende olukordade puhul on arvestatud, et ükski kaitsefunktsioonidest ei toimi. Võimsuslülitit tõrgekaitset (50BF), mis aitab oluliselt suurendada elektrisüsteemi töökindlust, ei käsitleta selles peatükis, et oleks ettekujutus ka teistest kaitsevõimalustest.

Iga allpool esitatud kaitsekõvera jaoks on kujutatud ka nende reservkaitse funktsioonid. Lugemise lihtsustamiseks on toodud ajaviide 300ms ja rakendumisaeg 100ms hetkkaitse jaoks. Ajaintervall iga konkreetse rakenduse jaoks sõltub võimsuslülitit rakendumisajast, releekaitse tüübist ja valitud kõverate karakteristikust [4].

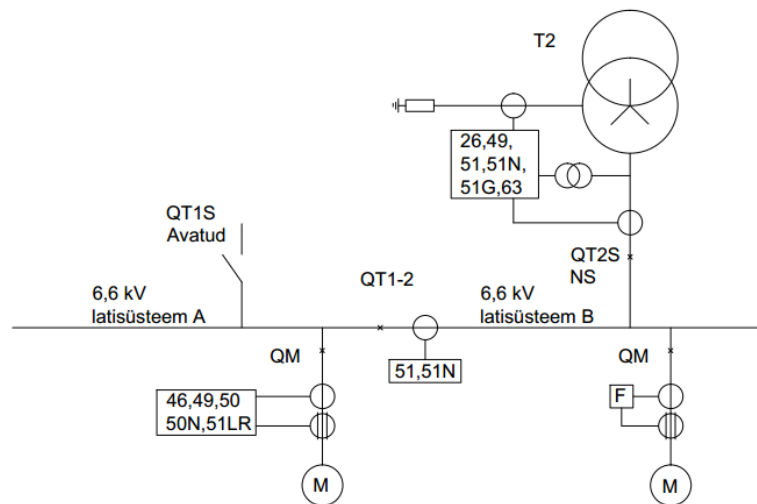
## **1.1 Releekaitse reserveerimis analüüs jaotusvõrkudes**

Reservreleekaitse funktsioonide rakendumine on ühejoonelisel diagrammil toodud elektrisüsteemi erinevate osade jaoks. Iga olukorra jaoks on toodud meetodid, kuidas reservreleekaitse saab parandada kaitsevõimet tihti lisamata täiendavaid seadmeid või funktsioone. Analüüsi käigus käsitleti nii enesekontrolli poolt avastatud rikkeid kui ka teisi rikkeid, näiteks võimsuslülitit tõrget. Kõik analüüsid, välja arvatud trafo puhul, baseeruvad faasidevahelisel ja maalühise raketel. Samuti antud lõputöös kasutatakse releekaitse tärgühiseid mida võieti kasutusele USAs (ANSI) ja on juba levinud üle kogu maailma (IEC 60617, IEEE

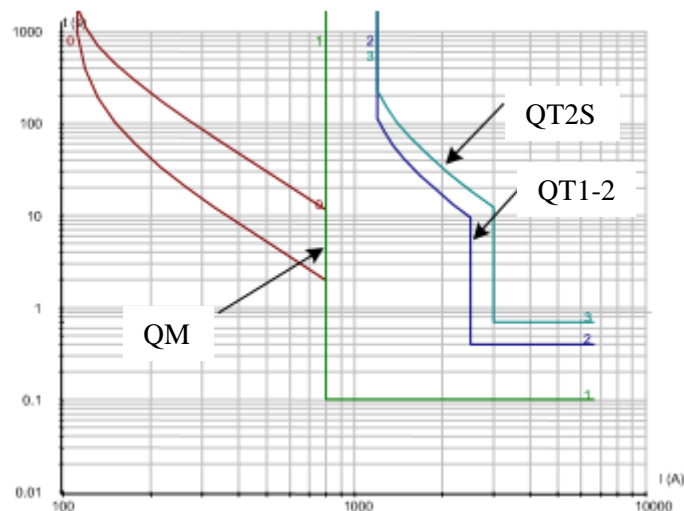
C37-2). ANSI tähtsuste eeliseks on kindel numbriline arv, mis näitab vastava releekaitse funktsiooni, millega on lihtsam opereerida [1].

### 1.1.1 Kõrgepinge mootorikaitse fiider

Joonisel 1.3 on näha, et kõrgepinge mootorikaitse fiider 6,6kV A-latil toidetakse läbi sektsioonivahelise võimsuslüliti B-lati kaudu. Joonisel 1.4 on näha kõik väljalülitamise ajad iga võimsuslüliti ja releekaitse jaoks. Kuna joonisel 1.4 on toodud releekaitse aja karakteristikud siis reservreleekaitse on omane kogu skeemi jaoks. Selle skeemi puuduseks on pikk väljalülitamise aeg B-lati lühise korral (700ms), isegi siis kui kõrgepinge mootorikaitse fiider toidetakse läbi A-lati. Mikroprotsessoripõhine releekaitse omab erinevaid kaitse kõveraid, mis annavad võimaluse seda omadust edukalt kasutada [4].

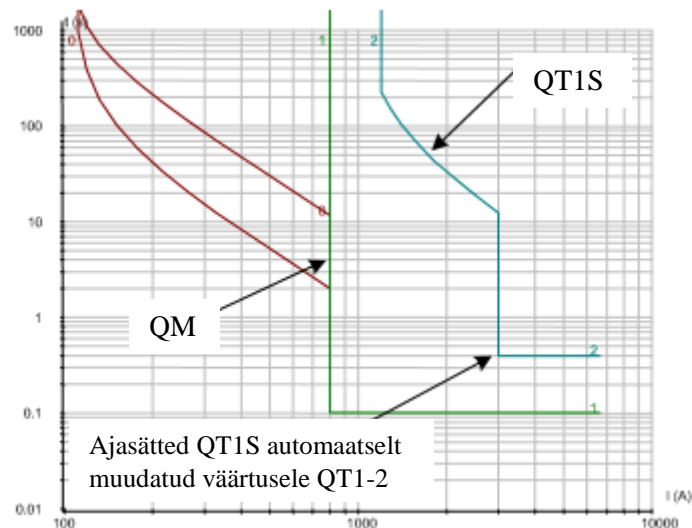


*Joonis 1.3 Mootorikaitse fiider ühe sisendiga*



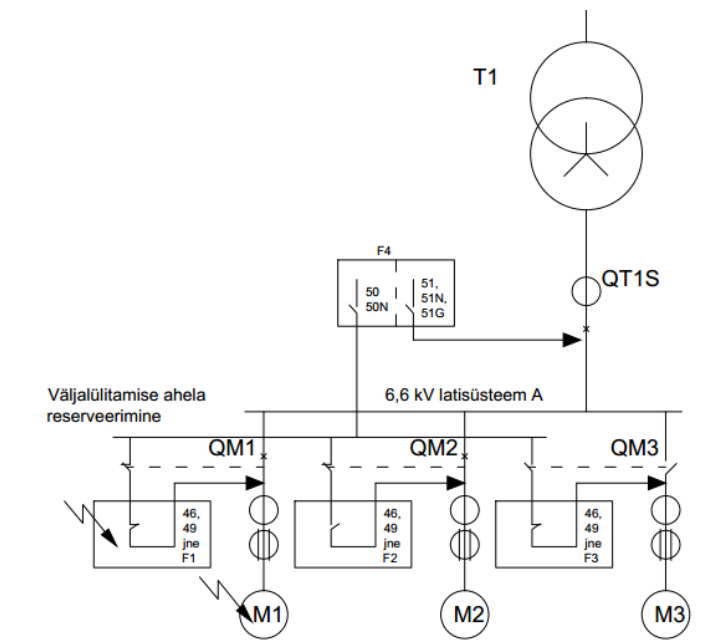
*Joonis 1.4 Mootorikaitse fiideri reservkaitse*

Normaalses olukorras on sektsioonidevaheline lüliti tavaliselt avatud ja ei mõju väljalülitamise lühise korral. Kuna sektsioonidevaheliste lülitite abikontaktid on kasutatu, siis on võimalik neid kontakte kasutada sisendiks eespool seisvate võimsuslülitite jaoks. Siis säilitatakse siin selektiivsus ja vähendatakse edukalt väljalülitamise aega, näidis on toodud joonisel 1.5.



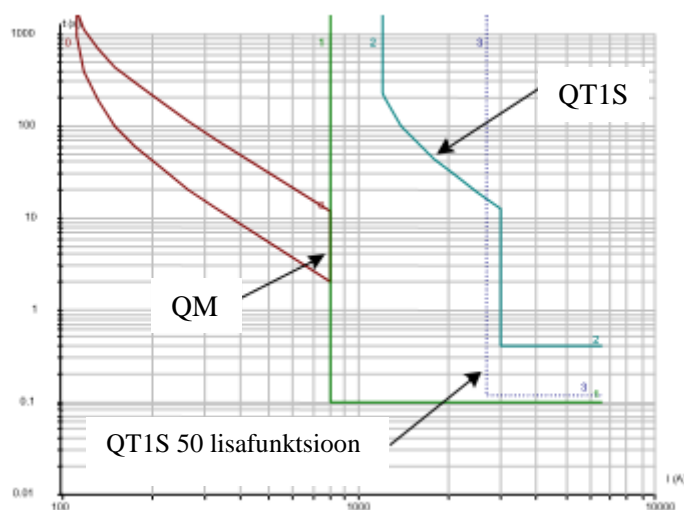
**Joonis 1.5 Mootorikaitse fiidri reserv parandatud releekaitse kasutades automaatse sätestamise**

Järgmine releekaitse reserveerimise võimalus on kasutada eespool mainitud valvekoera kontakte. Valvekoera kontaktid on toodud joonisel 1.6 iga fiidri jaoks. Need kontaktid on normaalselt avatud, kui rele on pingestatud ja sisenemist viga ei esine, näiteks fiidri F2 jaoks. Relee terminalil F1 on sisenemise viga ja valvekoera kontaktid on suletud. Iga valvekoera kontakt on otseselt jadamisi seotud võimsuslülitite väljalülitamise mähisega, mis teeb valerakendumise olukorra tühiseks ja ei mõju releekaitse töökindlusele (nt F3).



**Joonis 1.6 Reservkaitse kasutamine sisemise rele puhul**

Joonisel 1.6 on näha, et võimsuslülitite F4 omab nii viit- kui ka hetkkaitset. Need kaks liiki on mõeldud erinevate otstarvete jaoks. Funktsioonid 51,51N ja 51G on mõeldud pigem ülekoormuse kaitseks ja töötavad viitkaitsena, mis on loomulik sisend võimsuslülitite jaoks. Hetkkaitsega 50 ja 50N tehakse allpool seisvate võimsuslülitite releekaitse reserveerimist läbi valvekoera kontaktide, mis rakendub veidi kiiremini, kui viitkaitsese funktsioon, mida on näha joonisel 1.7. See on väga efektiivne süsteem erinevate jaotuspunktide jaoks [4].



**Joonis 1.7 Sisend võimsuslülitite releekaitse reserveerimise võimalus**

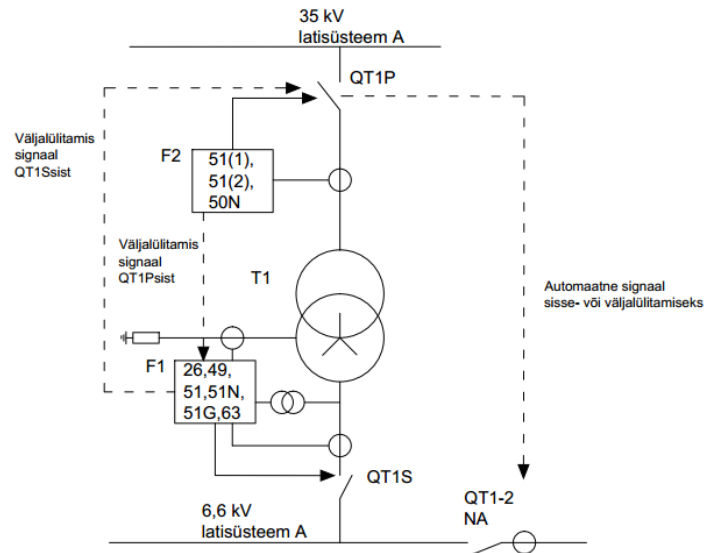
Mõlemad kõrgepinge mootorikaitse fiiderid nii põhi- kui ka moderniseeritud reservkaitsed töötavad edukalt maa ja faasidevahelise lühiste korral, kuid ei paku mingit reserveerimist

ülekoormuse korral. Kui releekaitse terminalil tekib sisemine viga, siis operaator peab kohe sisse lülitama reservmootori ja võimalikult kiiresti asendama terminali uue vastu. Kui reservmootor puudub, siis on oht, et terminali asendamise ajal võib tekkida mootori ülekoormus, mis põhjustab olulisi kahjustusi. Selle vältimiseks on projekteerijate ülesanne mõelda ka selle peale, et oleks vaja lisada ka tavaline ülekoormusrelee, mis võib oluliselt tõsta kõrgepinge mootorikaitse fiidri töökindlust [4].

### **1.1.2 Sektsioonidevahelise lüliti (SVL) vale rakendumise ennetamine**

Joonisel 1.8 on toodud näide, kuidas sõltuva väljalülitamisega (*intertrip*) signaalid on seotud sektsioonidevahelise lülitiga. Kogu loogika elektrienergia ülekandmise jaoks on toodud multifunktsionaalses kaitsereles F1, mis asub toodud skeemis alajaama sisendi võimsuslüliti kaitsmiseks. Sisemise rikke korral, mis on tuvastatud või tuvastamata enesekontrollimisega, terminal F1 ei saa põhjustada sektsioonidevahelise lüliti vale rakendumist, kuni üleandmise loogika töötab korrektselt. Vastasel juhul on vaja kaitsta SVL vale rakendumist meetodiga, mis toodud joonisel 1.8. Normaalses olukorras blokeerib terminal F1 SVL-i, kui tekib lühis või mingi muu rike allpool seisvates võimsuslülitites. Kui aga tekib lühis 6,6 kV A-latil ja terminalil F1 tekib sisemine viga, siis eespool seisev relee F2 tunneb selle ära ning lülitab välja oma võimsuslüliti QT1P. Kasutades väljalülitamise signaali lülitatakse välja ka võimsuslüliti QT1S ja antakse käsk SVL sisselülitamiseks. Kuna terminaali F1 on ooterežiimis ja ei osale kaitseahelas, siis blokeeringu signaali ei ole võimalik SVL-ile edastada. Antud olukord võib viia väga suurele avariile. Selleks, et vältida antud olukorda, on vaja et kõik signaalid QT1S väljalülitamiseks läbiksid F1, nagu on toodud joonisel 1.8. Samuti tuleb tähele panna, et SVL-i on võimalik sisse lülitada ainult siis, kui võimsuslüliti QT1S on sees. QT1S vale väljalülitamise ennetamiseks, isegi siis, kui terminal F1 on vigane, on vaja kasutada väljalülitamise signaale SVL-st, mis võivad efektiivselt blokeerida vale rakendumist. Väljalülitamise signaalid eespool seisvate võimsuslülitite jaoks peavad olema otsesed, nt  $QT1S \rightarrow QT1P$ , mis teevad kaitseahelat lihtsamaks ja tõhusamaks [4].

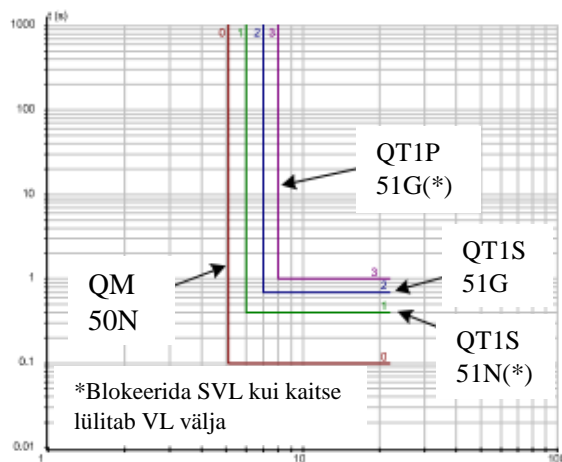




**Joonis 1.8** Sektsioonide vahelise lüliti (SVL) vale rakendumise ennetamise skeem

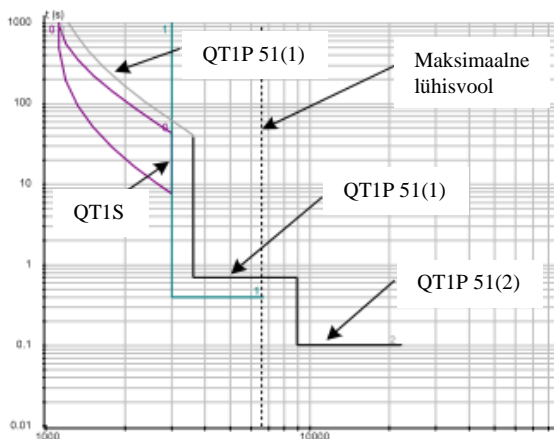
### 1.1.3 Maalühiskaitse reserveerimine

Joonisel 1.8 on näha, et võimsuslüliti QT1S jaoks puudub maalühiskaitse reserveerimise võimalus, kuna mõlemad 51N (nulljärgnevusvoolu mõõtmine või arvutamine kolme mõõtevoolu trafoga) ja 51G (nulljärgnevusvoolu otsene mõõtmine kas mõõtevoolutrafoga või torruga) asuvad ainult F1 terminalil. Parim variant oleks, kui eespool seisev terminal F2 omaks ka 51G kaitsefunktsiooni. Antud olukorras saavad siis kõik alajaama 6,6 kV osad reservkaitse. Maalühiskaitse kõverad on toodud joonisel 1.9. Samuti tuleb meeles pidada, et on vaja blokeerida SVL sisselülitamist lühise korral. Järgmises osas arutatakse olukorda, et kui tekib maalühis, mis tuvastatakse enesekontrollimisega, siis maalühise aega on võimalik tunduvalt vähendada, kasutades kiiret väljalülitamise meetodit [4].

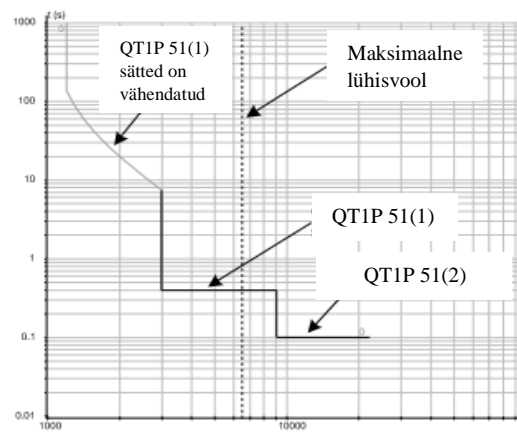


**Joonis 1.9** Reserv maalühiskaitse kõverad

### 1.1.4 Trafo kaitse



*Joonis 1.10 Standardised trafo kaitse sätteid*



*Joonis 1.11 Automaatselt vähendatud trafo kaitse sätteid*

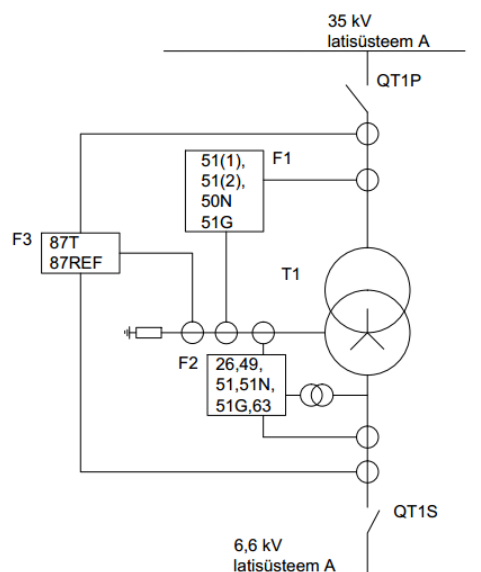
Enne kui rääkida trafo kaitsest, on vaja analüüsida, kuidas on võimalik parandada reservkaitset, kasutades standardseid trafo kaitse sätteid (joonis 1.10). Kuna siin kasutatakse astmelisi kaitse tunnusjooned, siis releekaitse reserveerimine on loomulik. Esimene, mida on võimalik hästi teostada, on muuta automaatselt terminali F2 sätteid (joonis 1.11), kui terminal F1 osutub vigaseks. Samuti saab terminal F2 reserveerida ka ülekoormuse kaitset, kuid see ei osutu väga efektiivseteks võrreldes termostaadi releega. F2 rikete korral teostab reservkaitset eespool 35 kV võimsuslülitid, mis annab võimaluse vähendada edukalt lühise aega 6,6 kV nimipingel [4].

Suurimate trafode puhul on väga populaarne kasutada trafo difkaitset 87T kui primaarkaitset, sest see töötab ilma viiteta ja väga kiiresti lülitab välja võimsuslülitid mõlemates pooltes. Antud kaitseliigi omadusi käsitleti eespool osalise lattide difkaitse analüüsis. Kuid antud kaitseliigil on ka oma puudusi seoses releekaitse reserveerimisega. Esiteks ei saa 87T kaitsta trafot ülekoormuse eest ning terminal F2 peab pakkuma reservkaitset kogu elu jooksul. Teiseks võib 87T selektiivsus osutada ebapiisavaks selleks, et ära tunda näiteks ühefaasiline maalühis, mis võib viia soovimatute olukordadeni [9].

Selle olukorra parandamiseks on kasutusel 87REF kaitseliik. 87REF - restricted earth fault relay ehk piiratud maalühiskaitse on väga tundlik kaitseliik maalühise eest kahe punkti vahel. Kui tekib lühis väljaspool kaitsvat tsooni, siis sekundaarvoolud, mis indutseeritakse mõõtevoolutrafode faasides ja neutraalis, kustutavad üksteise ja relee ei rakendu. Antud põhimõte töötab edukalt kuni üks või enam mõõtevoolutrafodest küllastuvad.

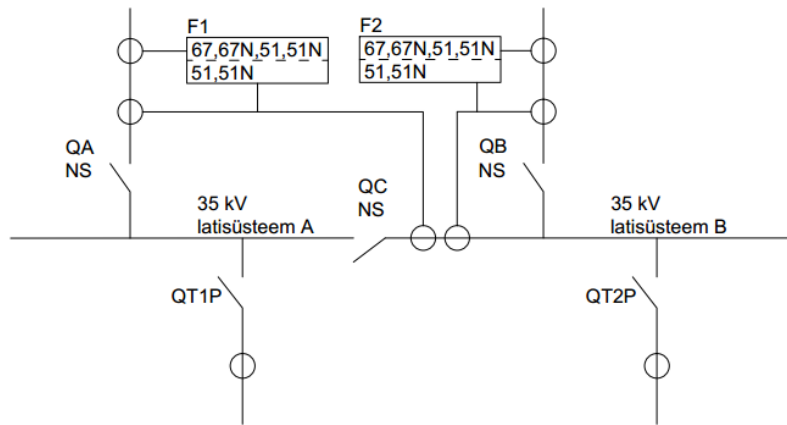
Küllastunud mõõtevoolutrafo võib põhjustada releekaitse valerakendumist ja väga tõsiselt mõjutada kogu kaitseahelat. Normaalses olukorras ehk lineaarses rakendumistsoonis on magnetimisvool  $I_M$  väga väike ja siis on voolude vahe  $I_P - I_M$  umbes võrdne primaarvooluga  $I_P$ . Sekundaarvool  $I_S$  saab siis olema vähendatud koopia  $I_P$  voolust koefitsendiga  $N$ . Kui mõõtevoolutrafo on küllastunud, siis magnetimisvool suureneb ning tulemusena saab ainult teatud osa primaarvoolust olla teisendatud sekundaarpoolele. Väljaspool kaitsvat tsooni on küllastatud mõõtevoolutrafo impedants nulli lähedane ning siis, selleks et vältida valerakendumist, on kasutusel stabiliseeritav takisti  $R_S$ , mis piirab neutraali voolu läbimist releekaitsest [2,22].

Kui lühis tekib kaitsvas tsoonis siis mõlemad sekundaarvoolud liituvad ja põhjustavad releekaitse rakendumist. Kuna antud kaitseliik on kõrge impedantsiga, siis siin on kasutusel varistor – takisti, mis kaitseb voolutrafode mähised kõrgepingete eest. Tugeva sees olevate lühise korral säilitab varistor oma pinget teatud väärtuse juures ja annab voolule läbipääsu, et mitte põhjustada terminalide ülepingestamist.



**Joonis 1.12 Dif ja REF maalihiskaitse trafo jaoks**

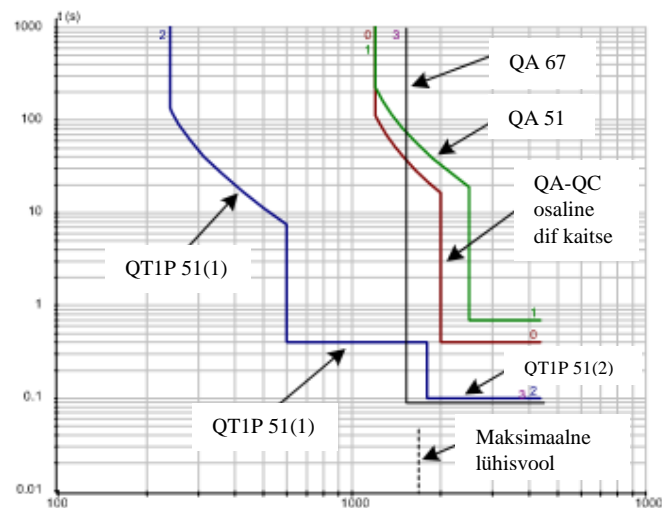
### 1.1.5 Sisenev 35kV põhi-svl-põhi (main-tie-main) releekaitse



*Joonis 1.13 35kV jaotusseadme kaitse*

Joonisel 1.13 on toodud kaitse funktsioon jaotusseadme jaoks koos normaalselt suletud SVL-iga. Relee terminalidel F1 ja F2 on kaks erinevat kaitseliiki sätteid. Esimene liik on iseloomulik sisendahelate kaitsmise jaoks (67,67N) ehk suunakaitsed, ja teine liik on osaline difkaitse, mis jälgib nii sisend- kui ka svl võimsuslülitid. Kaitse tunnusjooned on toodud joonisel 1.14.

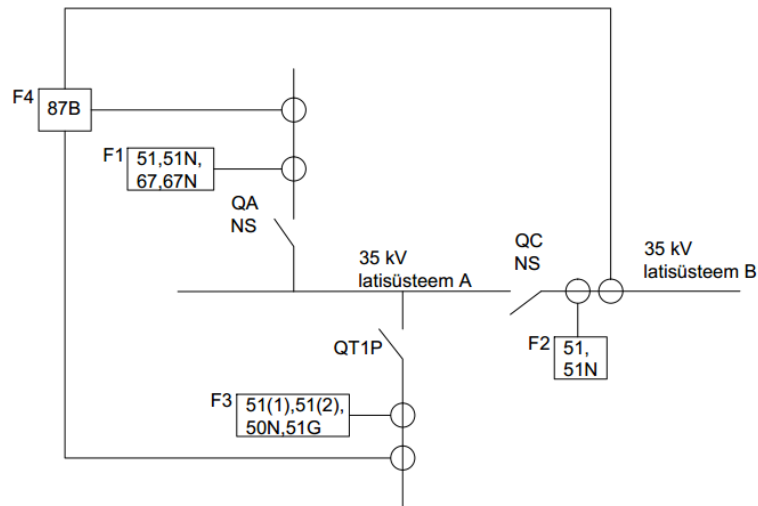
Kuna osaline difkaitse on selektiivne ainult väljuvate fiidriga, siis lühis lattide peal on samuti kiiresti elimineeritav. On vaja hoolitseda selle üle, et õieti valida ja määratleda releekaitse maatriksit. Suunakaits 67, 67N peab välja lülitama ainult sisend-võimsuslülitid, kuid teised kaitseliigid peavad välja lülitama nii sisend- kui ka svl võimsuslülitid.



*Joonis 1.14 Kaitse tunnusjooned 35kV jaotusseadme jaoks*

Antud skeemi puhul ei ole omane reservkaitset, kui ei ole vaadatud releekaitset eespool F1 ja F2. Kuna eespool seisvad releekaitse terminalid tarnitakse eraldi lepinguga, ei ole kindel, et on võimalik saavutada rahuldav reservkaitse.

Selleks, et tagada reservkaitse, mis vähendaks väljalülitamise aega lattide lühise korral, on vaja vahetada terminalide F1 ja F2 kaitsefunktsioonid. Joonisel 1.15 on näha, et parem on kasutada lattide difkaitset 87B primaarkaitseliigina ja liigvoolukaitset reservkaitseliigina. Releeterminal F2, mis jälgib nüüd ainult lattide olukorda, on võimalik kasutada reservkaitsena sisendvõimsuslüliti jaoks, mis on primaarselt kaitstud F1 terminaliga 67, 67N funktsioonidega.



**Joonis 1.15 35kV jaotusseadme dif ja reservkaitsed**

SVL väljalülitamise rike võib põhjustada kogu võimsuse kaotamise, kuna see on ühine mõlema latisektsiooni jaoks. Kui SVL terminalil tekib sisemine viga, mis tuvastatakse enesekontrolliga, siis valvekoera kontaktid annavad kohe käsu välja lülitada võimsuslüliti SVL, et isoleerida üks latisektsioon teisest. Antud tegevus aitab piirata rikete mõju ainult ühe latisektsiooniga [4].

### 1.1.6 Nulljärgnevusvoolu piiramine

Selleks, et vältida kahju pöörivatele seadmetele nulljärgnevusvoolu ulatus ja kestus on vaja hoida vastuvõetavas piirides, mis on määratletud tabelis 1.4 mida kasutavad erinevad tootjat. Tabelis 1.4 on toodud tüüpilised andmed mis on loomulikud keskpinge mootorite jaoks ja näitavad kolm tsooni kus on toodud: tühised, kerged ja rasked kahjustused. Tulemused näitavad, et nulljärgnevusvoolu on vaja piirata 50A juures ja kõrgepingete mootorikaitse fiiderite releekaitse peavad rakenduma minimaalse viivitusega. Selleks, et kindlustada piisavat kaitset mähiste jaoks, nulljärgnevusvoolu kaitsesätted peavad olema umbes 10% maksimaalsest nulljärgnevusvoolust ehk 5A. Mõnedel juhtudel kasutatakse kõrgeomiline takisti nulljärgnevusvoolu piiramiseks, mis säilitab mootorite tööprotsessi ning annab alarmide abil personalile teada oma rikketest [21]. Usaldusväärsed mõõtmised on võimalik saavutada

kasutades kõiki kolme faasijuhet aheldava ühe ühise mõõtetrafo abil, mida nimetatakse *core balance current transformer (CBCT)*.

On olemas aga muud tehnilised põhjused, mis vajavad nulljärgnevusvoolu kõrgema väärtuse kasutamist. Esimene põhjus on, et CBCT-d ei ole võimalik kasutada paljudes olukordades, näiteks SVL-il. Sellisel juhul nulljärgnevusvoolu kas mõõdetakse või arvutatakse vastavalt sellele, kas on vaja saada piisavalt täpseid tulemusi või mitte. Samuti on vaja arvestada kaablite laadimisvooluga, mille mahtuvus võib olla päris suur. Sellisel juhul nulljärgnevusvoolu sätted peavad olema kaks korda suuremad kui kaablite laadimisvool.

**Tabel 1.4 Kahjustuste tabel sõltuvalt nulljärgnevusvoolust**

Kahjustused	Aeg (Sek)	Vool (I)
Tühised	Lõpmatuseni kuni 0,1	0 kuni 100
Kerged	Lõpmatuseni kuni 0,1	20 kuni 200
Rasked	Lõpmatuseni kuni 0,2	50 kuni lõpmatuseni

Tabelis 1.5 on toodud neli erinevat võimalust nulljärgnevusvoolu väärtuste leidmiseks. Kõige täpsem võimalus on kasutada CBCT-d mis otseselt mõõdab nulljärgnevusvoolu ja on väga tundlik selle tuvastamiseks [18].

Teine võimalus on kasutada CBCT+CBCT-adapterid. Antud mõõteviisi nimetatakse diferentsiaalseks mõõteviisiks ja selle funktsionaalne skeem on toodud joonisel 1.16. Lähtesuurusel on pidevalt väärtus  $X_0$ , mõõdetava ja lähtesuuruste vahe ehk  $\varepsilon$  ei võrdu nulliga ja mõõdetakse mõõteseadmega. Mõõtetulemus leitakse kui  $Y=X_0+\varepsilon$ . Asjaolul, et mõõtmisseade mõõdab mitte tervet  $X$ , vaid ainult selle osa, annab  $\varepsilon$  võimaluse vähendada mõõteseadme ebatäpsuse mõju tervele mõõtetulemusele. Ning mõõteseadme tulemusviga on seda väiksem, mida väiksem on mõõdetava ja lähtesuuruse vahe ehk  $\varepsilon$ .

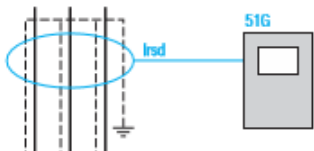
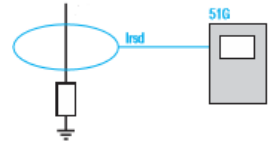
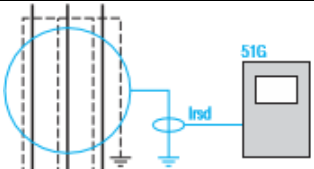
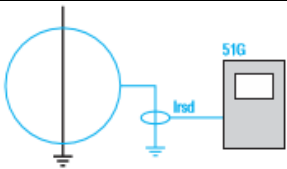
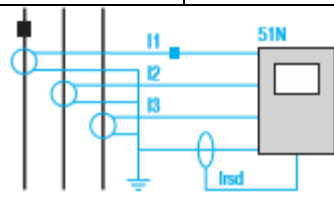
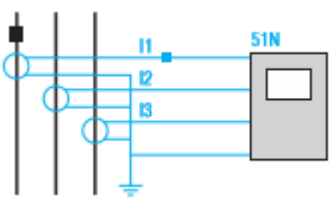


**Joonis 1.16 Diferentsiaalne mõõteviis**

Kolmas võimalus on peaaegu sama mis teine, kuid siin on kasutusel kolm voolutrafod+CBCT adaptor ning nende täpsuse võimalused võrreldes CBCT+CBCT-adaptoriga on samad.

Kõige ebatäpsem võimalus nulljärgnevusvoolu leidmiseks on selle arvutamine relee abil, kus on kasutusel kolm mõõtevooltrafot. Samas on antud viis kõige lihtsam paigalduse seisukohast ning ka odavam.

**Tabel 1.5 Nulljärgnevusvoolu leidmine**

Mõõteseadmed	Täpsus	Min. Sätte väärtus nulljärgnevusvoolu tuvastamiseks	Skeem
CBCT	+++	Mõned amprid	  <p>Nulljärgnevusvoolu otsene mõõtmine kasutades CBCT, CBCT hõlmab kõik faasid ja otseselt tekitab voolu neutraalis.</p> <p>CBCT on võimalik kasutada neutraali vabas kohas. Saavutakse väga kõrge täpsus</p>
CBCT+CBCT-adapter	++	10% nimivoolust (sõltumatu ajasätte DT) 5% nimivoolust (sõltuva ajasätte IDMT)	  <p>Differentsiaal mõõtmine tavalise CBCT-ga. CBCT-adapterit kasutatakse kaitserellee ühendamiseks</p> <p>CBCT võib olla ühendatud adaptari abil neutraalimaandamise mugavas kohas. Saavutakse hea täpsus ja lai volutrafode valik</p>
Kolm volutrafod+ CBCT-adapter	++	10% nimivoolust (sõltumatu ajasätte DT) 5% nimivoolust (sõltuva ajasätte IDMT)	 <p>Faasidevoolu mõõtmine mõõtevooltrafodega iga faasi jaoks. Nulljärgnevusvoolu mõõtmine CBCT-adapteriga.</p>
Kolm volutrafod ja nulljärgnevusvoolu arvutamine relee abil	+	Teise harmooniku mitte filtreerimine 30% nimivoolust (sõltumatu ajasätte DT)	

		10% nimivoolust (sõltuva ajasätte IDMT)  Teise harmooniku filtreerimine  10% nimivoolust (sõltumatu ajasätte DT)  5% nimivoolust (sõltuva ajasätte IDMT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nulljärgnevusvool arvutatakse releekaitse abil</li> <li>• Mõõtetulemused ei ole väga täpsed sest mõõtevead on tingitud voolutrafode täpsusest ja nende küllastumisest.</li> <li>• Palju lihtsam paigaldus võrreldes teiste variantidega</li> </ul>
--	--	---	---

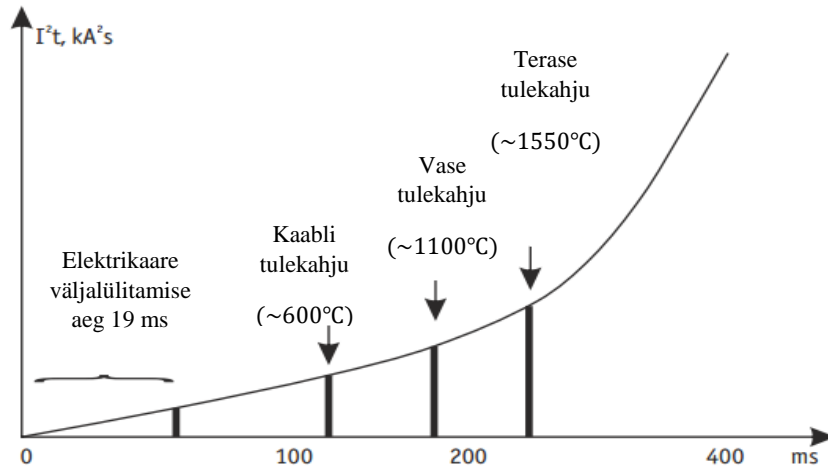
### 1.1.7 Väljalülitamiseaja vähendamine elektrikaarekaare toimimise tagajärjel

Tänapäeval soovivad paljud alajaama projektid, et jaotusseade vastaks AnnexA standardile ehk IEC 62271-200, mis nõuab, et elektrikaare kestuse aeg oleks kolm korda väiksem võrreldes maksimaalse lühisevoolu kestusega.

Sisemine elektrikaar jaotusseadmes on kõige ebatõenäolisem juhtum kogu releekaitse valdkonnas, kuid mõni protsent, et see võib juhtuda, on ikkagi olemas. See võib olla tingitud paljudest teguritest, näiteks: sisendkaablid on ühendatud valesti või nõrgalt, loomade sissetung alajaama, isolatsiooni vananemine, ilmastikumõjud või inimfaktor. Praegused jaotusseadmete projektid võivad paljudest teguritest jagu saada, kuid mitte kõik ei saa olla elimineeritud.

Sisemine elektrikaar tekitab väga palju energiat, mis transformeeritakse sellisteks nähtusteks nagu sisemise rõhu ja temperatuuri tõus, visuaalseteks ja heliefektideks, mis mõjuvad väga tugevasti jaotusseadme konstruktsioonidele. Samuti võib kaua kestev elektrikaar põhjustada metallide sulamist ja aurustamist, mida on näha joonisel 1.17. Joonisel 1.17 on samuti toodud, et õhkisolatsiooniga jaotusseadmel asuv vaakumvõimsuslüliti on võimeline elektrikaarekaitset kasutades välja lülitama lühisekohta 19ms jooksul, mis vastab nõudele, et elektrikaar peab olema elimineeritud 100ms jooksul [15].





**Joonis 1.17 Elektriikaare mõju jaotusseadme elementidele**

Elektrikaar on väga ohtlik personalile (šokk-lained, lendavad osad, avatud ukсед, kuuma gaasi emissioon, lahtine leek). Sellistest nähtustest jagu saamiseks kasutatakse peamiselt kahte meetodit. Esimene neist on rõhulangetustoru kanal ja teine on rõhuvabastusvõimalus tuppa. Esimene tüüp suunab kuumad gaasid selleks ettenähtud kohta rõhulangetustoru abil. Teine tüüp kasutab elektrikaare neelamisvõimalust ehk amortisaatorit. Nad koosnevad metallvaha kihist kogu kaitstava pinna ulatuses. Nende eeliseks on see, et nad neelavad hästi soojusenergiat ja takistavad voogude liikumist. Joonised 1.18 ja 1.19 illustreerivad neid kahte meetodit elektrikaare ajal. Näha on, et amortisaatori kasutamine on efektiivsem kuid rõhulangetustoru rakendumine on samuti aktsepteeritav [10].



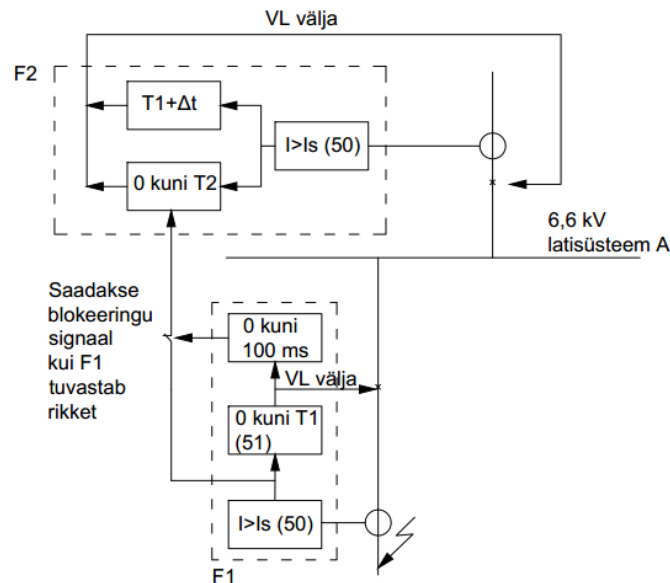
**Joonis 1.18 Rõhulangetustoru kanali kasutamine elektrikaare ajal**



**Joonis 1.19 Amortisaatori kasutamine elektrikaare ajal**

Kaitseliigid, mis kasutavad kaitsekarakteristiku kõverat, ei saa üheaegselt rikkekohta välja lülitada ja seda klassifitseerida. Rikkekohta väljalülitamiseks, mis vastaks standardile IEC 62271-200, kasutatakse lattide difkaitset, mida käsitleti eespool. Teiseks võimaluseks, mis ei vajaks releekaitse lisaterminali või mõõtevoolutrafat, on selektiivne loogika. Joonisel 1.20 on näha, et kui mikroprotsessoripõhine releekaitse F1 tuvastab rikke, siis kohe saadetakse signaal,

mis blokeeriks terminali F2 ja oodatakse 0,1 sek kuni relekaitse F1 rakendub. Vastasel juhul rakenduks F2 enne ja võiks viia alajaama pingestamata olukorda. Kui 0,1 sek jooksul F1 ei suuda VL-i välja lüüatada, siis relekaitse F2 lülitab välja eespool seisvad VL ja kogu latisüsteem A jääb pingestamata [4].



**Joonis 1.20 Selektiivne loogika väljalülitamise aja vähendamiseks**

Rekomendatsioonid relekaitsele:

1. Releeterminalid peavad olema kiiresti vahetatavad (ilma lahtiühenduseta kontrollahelatega).
2. Asendatud relee peab olema kiiresti seadistatav, kasutades sama konfiguratsiooni.
3. Enesekontroll peab suutma leida kõik sisemised vead ning ka jälgima võimsuslülitite väljalülitamise mähiseid.
4. Releeterminal peab edukalt läbima kõik katsesused et tagada nõuetekohane toimimine.

Projekteerimise nõuded :

1. Pidev töörežiim ei pea sõltuma ainult ühest kontuurist või ühest latisüsteemist. Projekteerimise ajal on vaja veenduda et hooldustöid on võimalik teostada ilma kogu alajaama pingestamata olekut.
2. On vaja hästi projekteerida releekaitse ahelad selleks, et reservkaitse rakendumisel oleks elektrisüsteemi töökindlus samal tasemel kui ka enne riket. Kui see on võimatu, siis jaotussüsteemi disain on projekteeritud valesti.

3. Erinevatelt tootjatelt mikroprotsessoripõhilistel releedel on erinevad omadused. Tuleb hoolikalt üle vaadata kõik releeterminiali funktsioonid enne nende paigaldamist elektrivõrku.
4. Reservkaitse funktsiooni parandamiseks on võimalik kasutada olemasolevate releetermiinalide omadusi. Täiendavate terminalide lisamine vähendab tihtipeale elektrisüsteemi töökindlust. See on tingitud sellest, et lisarelee raskendab nii projekteerimise õigsust kui ka teeb hooldustööd keerulisemaks.
5. Tuleb hoolikalt valida maksimaalseid nulljärgnevusvoolu sätteid, sest see mõjub nii maalühise korral kui ka seadmete kaitsele.
6. Projekteerides kaitseahelaid, kus on kasutusel intertrip signaalid, on vaja veenduda, et nad on ühendatud omavahel otse ja nende vahel ei ole teisi releetermiinale. On võimalik vaid üks erand, kui intertrip signaal vigasest terminalist blokeerib SVL-i sisselülitamist latisüsteemi lühise korral.

## **2. Võimsuslülitite tõeekaitse**

Elektrisüsteemi töökindluse säilitamine on üks peamistest eesmärkidest, mis saavutatakse põhi- ja reservkaitse abi. Lühise teke elektrivõrkudes on peamine juhtum, mis paneb releekaitset tõrkuma. Selle tagajärjel on lühis kõige ohtlikum olukord releekaitse seisukohast võrreldes mingi teise rike liigiga. Põhikaitse on esimene samm lühise olukorra elimineerimiseks. Ta peab toimima nii kiresti kui võimalik (parimal juhul hetkkaitsena), et vältida elektrisüsteemi stabiilsuse kadu ja seadmete kahjustamist. Elektrisüsteemi releekaitse töökindluse tõstmiseks on kohustuslik mõelda reservkaitsest, mis põhikaitse tõrke ajal peab edukalt toimima. Põhikaitse tõrget võivad põhjustada: voolu- ja pingemõõtetrafod, mikroprotsessorrelee terminalid, võimsuslülitid, kommunikatsiooni kanalid, toitesüsteem alajaamas, personaali hooldusvead, paigaldusvead, juhtimisvead. Projekteerimise ajal on vaja arvestada sellega, et põhikaitse tõrke põhjused ei mõjutaks reservkaitse toimimist. Reservkaitse on võimalik jagada kaheks osaks, esimene on lähikaitse ja teine on distantkaitse.

Distantkaitse eeliseks on madal hind. Põhjuseks on kaugreserveerimise võimalus (kasutades vastavaid ANSI/IEC koode) samas releekaitse terminalis, mis on mõeldud põhikaitseks. Sellisel juhul kaob vajadus täiendavates investeringutes. Kaugreserveerimine on laialt levinud jaotusvõrkudes, kuid sellel on ka puudusi, mida käsitletakse allpool.

Võrreldes kaugreserveerimisega on lähireserveerimisel parem tundlikkus, selektiivsus ja rakendumisreaktsioon. Antud kaitseliiki kasutatakse laialt tänapäevastes alajaamades, sest see

säilitab kaugreserveerimisest tunduvalt paremini elektrisüsteemi stabiilsust noormide piires. Lähireserveerimine lihtsustab tunduvalt situatsiooni analüüsimist ja koordineerimist seadmete vahel isegi siis, kui elektrivõrgu konfiguratsioon muutub. Näiteks kasutades mikroprotsessorreele terminali, on võimalik väljundsignaalide abil, väljundfiidri võimsuslüliti tõrke korral, anda signaal SVL-ile ja sisendfiidrite väljalülitamiseks. Vastupidine olukord on kaugreserveerimise puhul, mille tundlikkus võib olla häiritud, mistõttu vajab see uut täielikku koordinatsiooni uuringut. Teiste sõnadega, lähireserveerimist on võimalik projekteerida nii, et iga kaitseliik kaitseks oma konkreetset tsooni, mis minimiseerib vajadust analüüsida kattuvust külgnevate aladega ja pidevat sätete muudatust [3,11].

#### Võimsuslüliti tõrkekaitse väljalülitamise aja mõju elektrisüsteemi stabiilsusele

Võimsuslüliti tõrkekaitse väljalülitamise ajal on märkimisväärne mõju elektrisüsteemi stabiilsusele. Võimsuslüliti tõrkekaitse varane rakendumine võib põhjustada elektriliinide ülekoormust või veelgi süvendada rikete kestvust tarbijate jaoks. Paljude sätete arvutamise ajal valitakse kõige suurem rakendumisaja piir vastavalt kolmefaasilisele lühisele, mis on kõige ohtlikum situatsioon elektrivõrkudes ning viib nurkade muutmisele kõrvalolevates generaatorites. Kuid lühiseliikidel on erinev esinemissagedus. Ühefaasilise lühise sagedus on 60-70%, kahefaasilisi maalühiseid on 15-25%, kahefaasilisi lühiseid 5-10% ning kõige harvemini tekivad kolmefaasilised lühised 2-5% [2].

***Tabel 2.1 Lühise kestus kuni süsteemi stabiilsuse kadu erinevate lühiseliikide korral***

Lühiseliik	Lühise kestus kuni süsteemi stabiilsuse kadu (ms)
Kolmefaasiline lühis	380
Kahefaasiline lühis	820
Kahefaasiline maalühis	600
Ühefaasiline lühis	mitte kunagi

Tabelis 2.1 on toodud ühe reaalaaja simulaatori tulemused, mis näitavad lühise kestust kuni süsteemi stabiilsuse kaoni erinevate lühiseliikide korral. Tabelist on näha, et kolmefaasilise lühise korral on stabiilsuse kadu peaaegu 58% kiirem, kui kahefaasilise maalühise korral. Saadud tulemusi analüüsides on võimalik veenduda, et releekaitse loogika arenemise eesmärk on luua uued skeemid, mis saaksid ära tunda lühiseliigi ja valida vastavalt sellele võimsuslüliti tõrkekaitse viiteajad [11].

## 2.1 Võimsuslüliti tõrkekaitse skeemid

Selleks, et võimsuslüliti tõrkekaitse rakenduks, peavad olema täidetud kaks põhilist tingimust:

1. Põhikaitse peab saama väljalülitamise signaali
2. Läbi võimsuslüliti kontakte voolab lühisvool

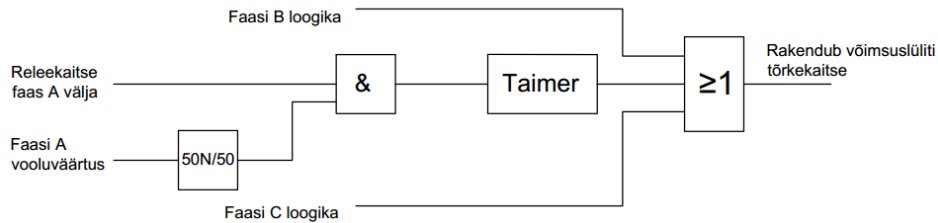
Läbi võimsuslülite kontakte lühisvoolude kindlaks tegemiseks kasutatakse liigvoolu hetkkaitset (50/50N). Liigvoolu hetkkaitse sätted peavad olema allpool minimaalset lühisvoolu, kuid samal ajal on vaja arvestada kõige suurema ülekoormusvooluga, mis võib tekkida tööajal.

Väga oluline on, et võimsuslüliti tõrkekaitse loogika oleks igal võimsuslülitel, mis asub ühes latisüsteemis, ühesugune. Sõltuvalt alajaama konfiguratsiooni iseloomust on paljudel juhtudel vaja välja lülitada sisendfiidrid ning vajaduse korral ka SVL. Samuti on vaja blokeerida kaugreserveerimise releekaitse võimsuslüliti taaslülitamisest. Võimsuslüliti tõrkekaitse loogika võib parimal juhul sisaldada endas ka võimsuslüliti taasväljalülitamist, mis võib anda kasu enne naabervõimsuslülite väljalülitamist. Antud meetod võib oluliselt parandada elektrivõrgu turvalisust. Näiteks kui voolusätted on seatud allpool suuremast ülekoormusvoolust, siis tekib vale signaal, taasväljalülitamise toimet lülitatakse välja ainult üks võimsuslüliti, mitte aga kõik võimsuslülidid reservkaitse rakendumise tagajärjel.

Mõnedel juhtudel võib seadme sees voolav vool osutada võimsuslüliti tõrke tekkimisel väga väikeseks ja teine tingimus jääb mittetäidetuks. Näiteks generaatori või trafo sisemiste rikete korral on võimalik kasutada võimsuslülite abikontakte 52a (normaalselt suletud, kui võimsuslüliti on sees) ja 52b (normaalselt avatud, kui võimsuslüliti on sees), mis näitavad võimsuslülite kontaktide positsiooni ja võivad käima panna võimsuslüliti tõrkekaitse taimerid [3,11].

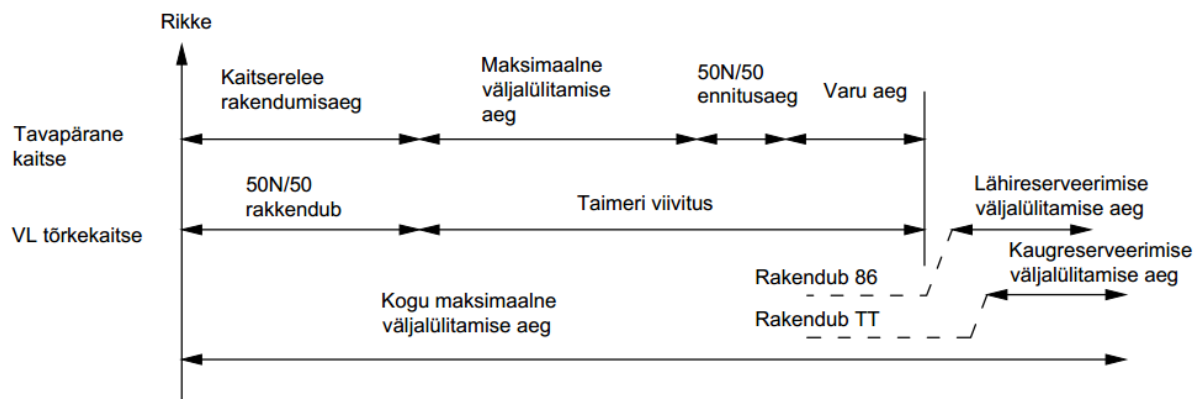
### Põhiskeem

Joonisel 2.1 on toodud võimsuslüliti tõrkekaitse põhiskeem. Rikke ajal on mõlemad tingimused täidetud (signaal releekaitse faas A välja ja suur vooluväärtus faasis A). Kui taimer ületab oma ajapiiri, siis rakendub võimsuslüliti tõrkekaitse ja lülitab välja kõrvalolevad võimsuslülidid.



**Joonis 2.1 Võimsuslüli tõeekaitse põhiskeem**

Joonisel 2.2 on toodud võimsuslüli tõeekaitse ajagraafik. Siin on näha kaks olukorda (tavapärasest ja tõeekaitset). Rikke ajal koosneb tavapärasest kaitse neljast osast: releekaitse rakendumisajast, väljalülitamise ajast, 50N/50 funktsiooni ennistusaeg ning ka varuajast. Tuleb tähele panna, et paralleelselt põhikaitsega rakendub kohe ka VL tõeekaitse skeem. Kui tavapärasest kaitse ei rakendu, siis hakkavad tööle reserveerimiskaitse liigid. Lähireserveerimise alghetkel peab mõnedel alajaamadel rakenduma 86 *Lockout relay*, see on relee, mis välistab ATL rikete korral [7]. See on mõeldud selleks, et isiklikult veenduda alajaama korrasolekus peale rikete kõrvaldamist, ning vajutades RESET nuppu on võimalik jaotusseadmeid jälle kasutada. Nagu võib näha joonisel 2.2 on lähireserveerimise ajaviivitus lühem kui kaugreserveerimise oma. See on ka loogiline, sest TT(Transfer Trip), mis on seatud teistele võimsuslülititele, peab rakenduma viimasena.



**Joonis 2.2 Võimsuslüli tõeekaitse ajagraafik**

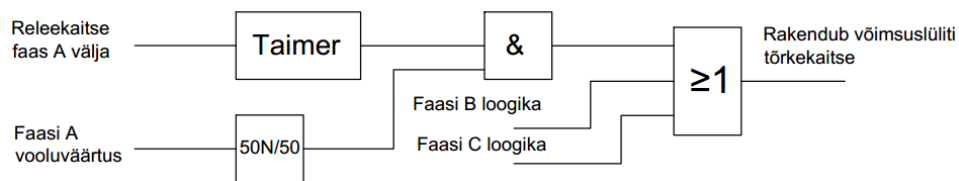
Põhiskeem on mõeldud ühe- ja kahelatisüsteemide, möödaviik-latisüsteemide ja kahe põhi- ja möödaviik-latisüsteemide jaoks sest need skeemid kasutavad ühte sisend võimsuslülitit. Teine olukord tekib, kui alajaamas on kaks võimsuslülitit, mis peavad rakenduma üheaegselt. Need skeemid on kakslülitiskeemid, poolteistlüli skeemid ja ringskeemid.

Rikete korral võib läbi kahe võimsuslüli kontakti volav lühisvool osutada erinevaks. Üks võimsuslüli võib lühisvoolu ära tunda, teine aga mitte. Selge see, et kui esimene võimsuslüli

rakendub, siis kogu lühisvool hakkab läbima teist võimsuslülitid ja teatud aja jooksul rakendub ka teine võimsuslülitid, kuid siin tekivad mõned probleemid.

Rikete ajal on lühisvool kõige suurem esimese perioodi jooksul ning 50/50N funktsioon saab seda lühisvoolu edukalt ära tunda. Põhiline probleem seisneb selles, et kuna teine võimsuslülitid ei tunne alguses ära lühisvoolu, mis paneks tema 50/50N funktsiooni rakenduma, siis tema mõõtevoolutrafos võivad väga kiiresti küllastuda ja neil läheb veel aega alguses lühisvoolu äratunmiseks ning pärast ka taimeri jälle käima panemiseks, isegi siis, kui esimene võimsuslülitid on juba avatud. Küllastunud mõõtevoolutrafos võivad tekkida selektiivsuse probleemid kaugreserveerimise kaitsega (teine tsoon), mis võib osutada väga ohtlikuks.

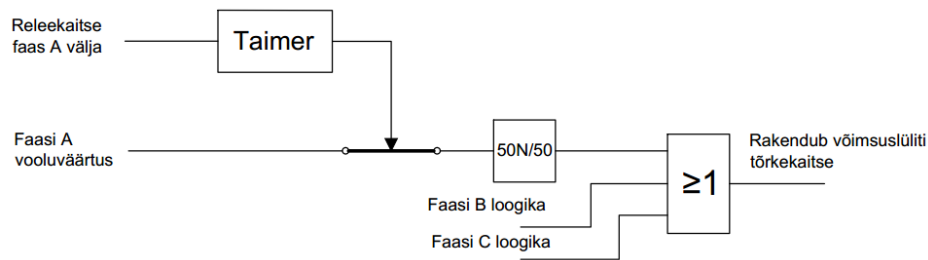
Eelpool kirjeldatud probleemide lahendamiseks on toodud joonis 2.3. Põhiline erinevus jooniste 2.2 ja 2.3 vahel on selles, et joonisel 2.3 käivitatakse taimer kohe pärast releekaitse faas A välja signaali saamist. Joonisel 2.3 toodud skeem on sõltumatu sellest, mis toimub 50/50N funktsioonil ning mõõtevoolutrafo ei jõua küllastuda nii kiiresti, et mõjutada releekaitse selektiivsust [11].



### ***Joonis 2.3 Releekaitse faas A välja signaali kasutamine taimeri käivitamiseks***

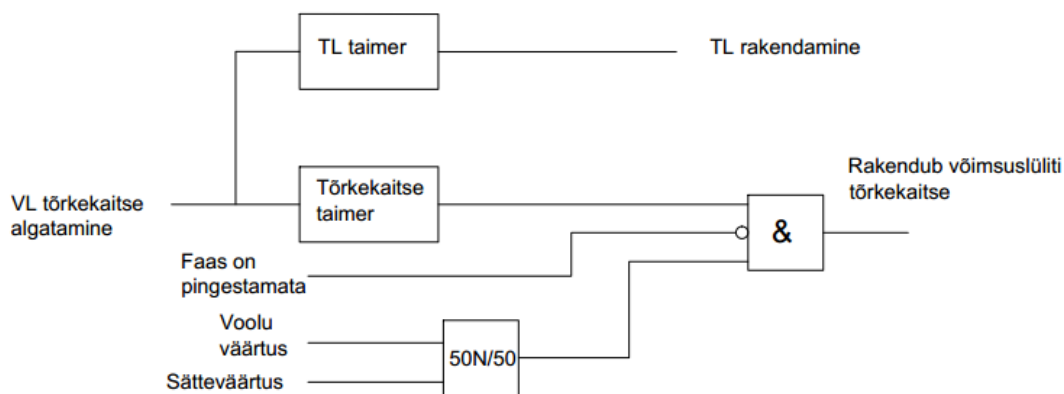
Veel ühe eelisena oleks võimalik tuua, et skeem joonisel 2.3 rakendub, arvestades ainult releekaitse rakendumisaega, maksimaalset väljalülitamisaega ning varuaega, mis on vajalik kahe võimsuslülitiga skeemide jaoks.

Kui veelgi mõelda sellest, kuidas on võimalik vähendada võimsuslülitid tõekekaitse rakendumisaega, siis joonisel 2.4 on toodud skeem, mis seletab ennistusaja elimineerimist kogu rakendumisajast. Joonisel 2.4 toodud skeem on leiutatud selleks, et kõrvaldada kõik võimalikud aeglase ennistumisega seotud probleemid, mis on elektromehaanilistes releedes tihti levinud. Releekaitse faas A välja signaali saamise ajal hakkab taimer aega loendama. Kui taimer on läbi, siis suletakse lülitid ja teatud aja jooksul faasi A vooluväärtus rakendab võimsuslülitid tõekekaitse [11].



**Joonis 2.4 Ennistusaja ilimineerimine kasutades taimeri ümberlülitit**

Kõik eespool toodud skeemid näitavad üldist võimsuslüli tõekestaitse skeemi, kuid tegelikult on võimsuslüli tõekestaitse loogika keerulisem ja peab arvestama erinevate tingimustega, mis võivad tekkida töö ajal. Tavaliselt ühendatakse võimsuslüli väljalülitamise kontakti signaal võimsuslüli tõekestaitse algatamise kontaktiga, mis on näidatud joonisel 2.5. Kui mõõdetud vooluväärtus on suurem, kui sätete väärtus, siis funktsioon 50/50N rakendub kohe. Antud loogika puhul on väga oluline et kui taasväljalülitamine toimub edukalt, siis võimsuslüli tõekestaitse signaal kaob kohe ja võimsuslüli tõekestaitse ei rakendu [11].



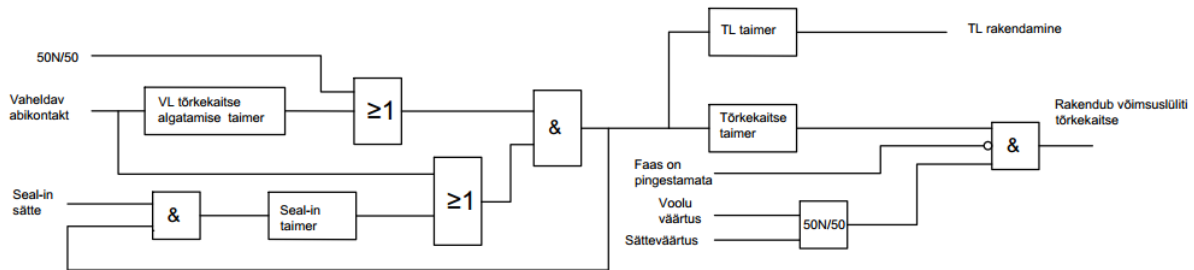
**Joonis 2.5 Võimsuslüli tõekestaitse loogika**

Võimsuslüli tõekestaitse skeemid kahe võimsuslülitiga vajavad mõnikord korraga nii voolu kui võimsuslüli tõekestaitse algatamise signaali. Selleks et seda vajadust teostada, on vaja kasutada vahelduvaid abikontakte ja *seal-in* sätte loogikat.

Eeldatakse, et tegemist on poolteistlüli skeemiga. Kui tekib rike, siis vahelduv abikontakt kohe annab käsu võimsuslüli tõekestaitse algatamiseks ning taasväljalülitus- ja tõekestaitse taimerid käivituvad. Kui esimene võimsuslüli lülitatakse välja, siis vool hakkab voolama läbi teise võimsuslüli. On vaja tähele panna, et esimese võimsuslüli tõekestaitse loogika oli käivitatud ilma 50/50N funktsioonideta. Jooniselt 2.6 on näha, et vahelduvat abikontakti, mis võib osutuda ebastabiilseks, dubleerivad nii teise võimsuslüli funktsioon 50/50N kui ka *seal-in*



säte. On väga oluline, et võimsuslülititõrkekaitse algatamise taimer aeg oleks suurem, kui esimese võimsuslülitit väljalülitamise aeg. Antud loogika aitab hakkama saada rikete kõrvaldamisega kahe võimsuslülitiga korraga ilma viiteaja suurendamiseta [11,12].

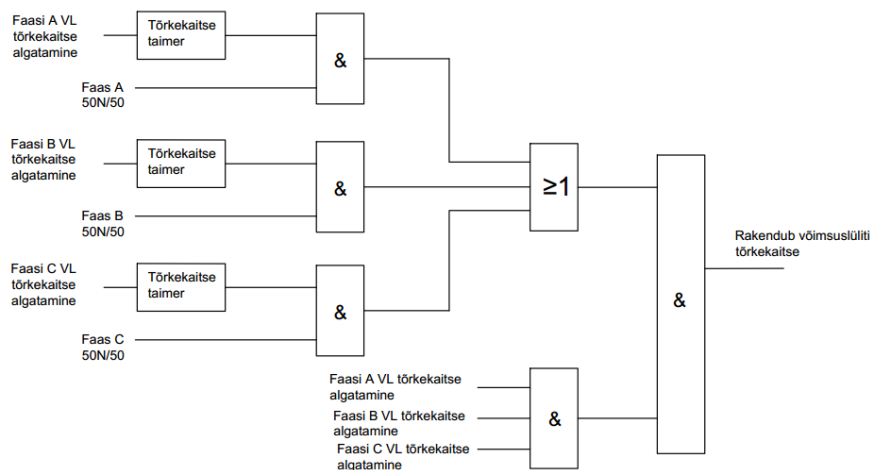


**Joonis 2.6** Võimsuslülititõrkekaitse loogika koos vahelduva abikotaktiga ja seal-in sättega

## 2.2 Võimsuslülititõrkekaitse loogika erinevate rikkete korral

Ülekandeliinide jaoks mõjuvad erinevad rikete nähtused elektrisüsteemi stabiilsusele erinevalt. Kolmefaasilise ja ühefaasilise lühise korral peab võimsuslülititõrkekaitse ajaviide olema erinev, mis arvestab elektrivõrkude töökindluse kvaliteediga.

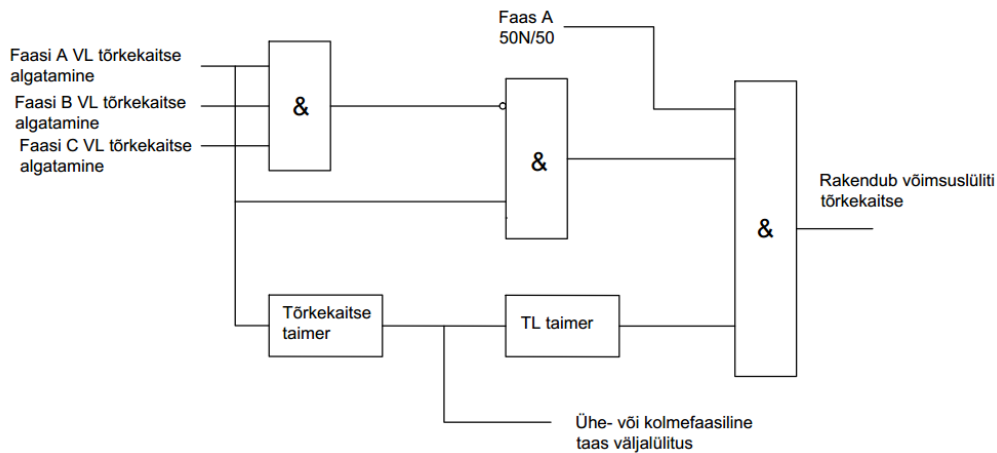
Joonisel 2.7 on toodud võimsuslülititõrkekaitse loogika kahefaasilise lühise, kahefaasilise maalühise ja kolmefaasilise lühise jaoks. Lühise korral paneb faasi A vooluhetkkaitse 50/50N funktsiooni tööle. Samuti annab põhikaitse võimsuslülititõrkekaitsele algatamise signaali ja taimer käivitub. Kui vähemalt kaks faasi on lühise olukorras ja kõik tingimused on täidetud, siis võimsuslülititõrkekaitse rakendub ja kõik kolm faasi lülitatakse välja.



**Joonis 2.7** Mitmefaasilise lühise võimsuslülititõrkekaitse

Kuna ühefaasilise lühise mõju on väga väike võrreldes mitmefaasilise lühistega, siis ka taimeri ajaviide peab olema tunduvalt suurem ning peab sisaldama taasväljalülitamise funktsiooni, mis

paljudel juhtudel osutub positiivseks. Sõltuvalt võimsuslüli tüübist on võimalik kas opereerida kolme faasiga korraga või iga faasiga eraldi, on võimalik kasutada taasväljalülitamist vastavalt võimsuslüli konfiguratsioonidele. Jooniselt 2.8 on näha, et faasi A ühefaasilise lühise korral käivitub võimsuslüli tõrkekaitse taimer ainult pärast taasväljalülitamise katset.



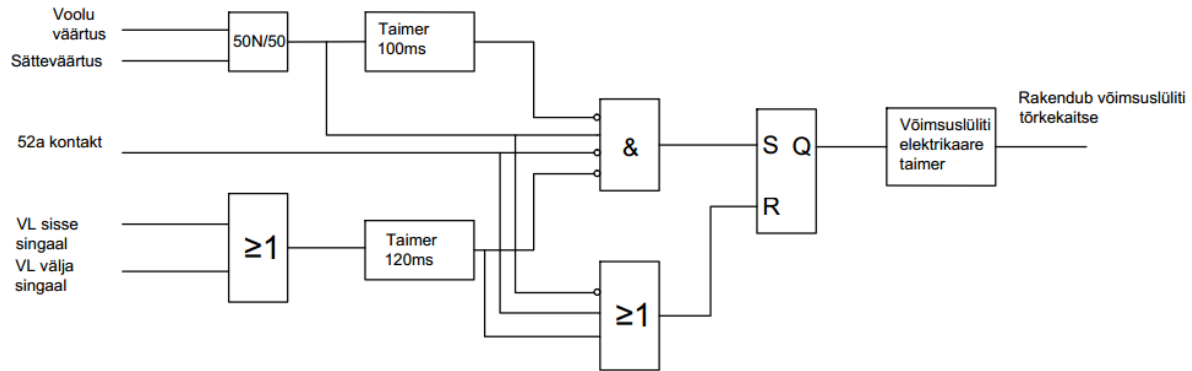
**Joonis 2.8 Ühefaasilise lühise võimsuslüli tõrkekaitse**

### 2.3 Võimsuslüli elektrikaare ülelöögi kaitse

Tänapäeval maailmas on suurenenud võimsuslülitite elektrikaare ülelöögid ehk *breaker flashover*. Kõige sagedamini tekib antud olukord SF6 võimsuslülitites, mis asuvad kahe erineva sagedusepiirkonna vahel või generaatori klemmidel. Elektrikaare ülelöögi põhjused on tavaliselt: võimsuslüli sisemine või väline saastumine, madal dielektriline rõhk või niiskus. Väga tihti tekib elektrikaare ülelööki ainult ühes faasis, kuid see võib viia väga suurele avariile või süsteemi võnkumisele. Tavalised releekaitse terminalid ei suuda tuvastada lühisvoolu, mis on väiksem kui maalühisvool.

Joonisel 2.9 on toodud võimsuslüli elektrikaare ülelöögi kaitse loogika, mis on kirjeldatud järgmiste tingimuste juures:

- Faasivool on suurem kui sättevool, mis peab olema null. Antud loogika kontrollib seda 100ms ehk viie tsükli jooksul enne võimsuslüli sisselülitamist.
- Vaadatakse võimsuslüli abikontaktide positsiooni ehk 52a abikontakt peab olema avatud, kui võimsuslüli kontaktid on avatud.
- Võimsuslüli sisselülitamissignal töötab 120ms viivitusega, et kontrollida võimsuslüli kontakte

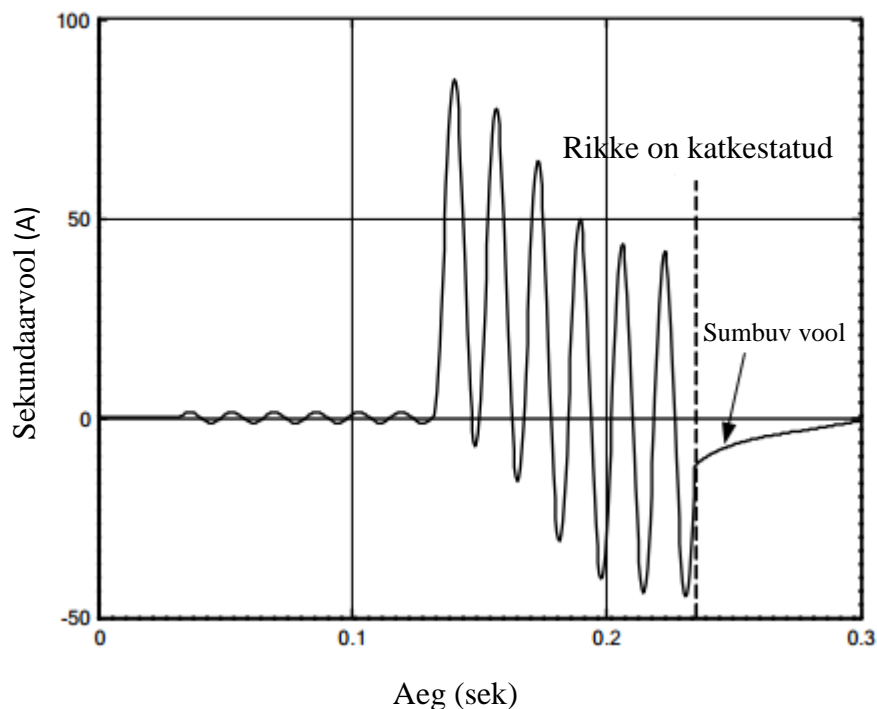


**Joonis 2.9** Võimsuslüli elektrikaare ülelöögi kaitse loogika

Antud loogika eeliseks on, et 52a kontaktide signaali kadu ei saa põhjustada võimsuslüli valerakendumist, kui voolu ja võimsuslüli kontaktide signaalid on rakendatud õigesti [11,12].

### 2.4 Liigvooluanduri ehk funktsiooni 50/50N kiire tühistamine

Üheks võimsuslüli tõrkekaitse mõjutajaks on sumbuv vool. Sumbuva voolu mõju releekaitsele on tõsine. Mõõtevoolurafode küllastus võib pikkeneda releekaitse funktsiooni 50/50N tühistamist, mis võib viia võimsuslüli tõrkekaitse rakendumisele.

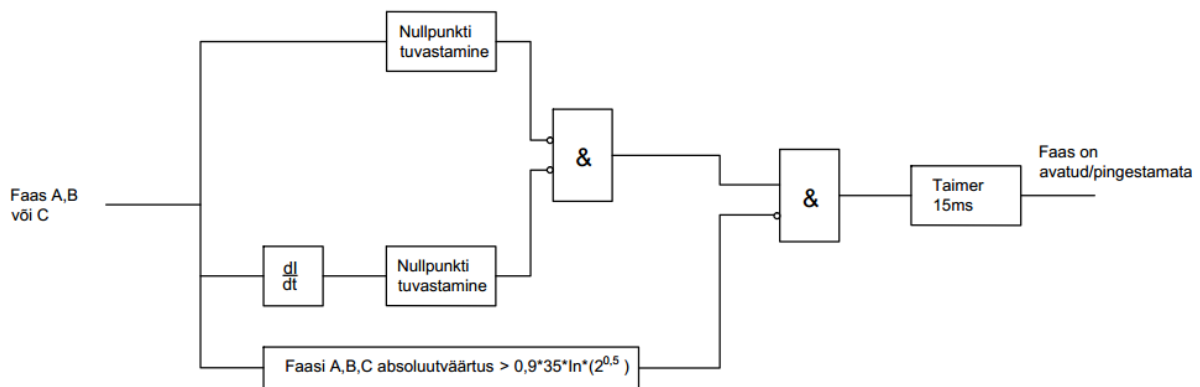


**Joonis 2.10** Sumbuva voolu mõju releekaitsele

Joonisel 2.10 on näidatud, et pärast rikete kõrvaldamist mõjutab sumbuv vool veel releekaitset ja ei anna tal ennistuda. Kuna võimsuslüli tõrkekaitse loogika jälgib avatud faasi signaali ehk

pingestamata faasi, mis on toodud loogikas joonisel 2.5, siis antud signaal peab olema edastatav vähem kui ühe tsükli jooksul.

Selleks, et tuvastada joonisel 2.11 näidatud avatud faasi loogikat, analüüsime voolukõverat. Vahelduvvoolu kõver muudab oma suunda ja läbib nullpunkti teatud sageduse jooksul, kuid sumbuv vool, mis on alaliskomponent, nullpunkti ei läbi. Vahelduvvool (ilma alaliskomponendita) läbib nullpunkti iga 10ms tagant, kuid selle mõõtmine ei anna võimalust tuvastada vähem kui ühe tsükli jooksul avatud faasi olemasolu. Nullpunkti tuvastamiseks lisatakse juurde voolukõvera tuletiste analüüs, mis jälgib maksimaalse ja minimaalse kõvera tõusukiirust, mis vähendab olulisele releekaitse ennustamist. Viimane loogiline ahel kaitseb releekaitset fiktiivsete nullide eest, mis võivad tekkida analoog-digitaal muunduri küllastumise ajal [11,12].



*Joonis 2.11 Lüigvooluanduri ehk funktsiooni 50/50N kiire tühistamise loogika*

## 2.5 Võimsuslülitite tõrkekaitse konfiguratsioonid ja võltsitud signaalid

### 2.5.1 Võimsuslülitite tõrkekaitse konfiguratsioonid

Esimesene võimsuslülitite tõrkekaitse projekteerimist mõjutada võiv tegur on alajaama lattide konfiguratsioon. Konfiguratsioonid jagatakse kolme liiki: ühe võimsuslülitiga tavaline skeem, ühe võimsuslülitiga keeruline skeem ja kahe võimsuslülitiga skeem.

Teiseks teguriks on releekaitse erinevad liigid. Kahe võimsuslülitiga skeemis, kus vool liidetakse enne lattide sisend jaotusseadmeid, ei ole võimalik jälgida igat võimsuslülitit eraldi. Samasugune olukord on suure impedantsiga releega, kus lattide difkaitse jälgib kogu toimuvat protsessi, mitte aga igat võimsuslülitit eraldi. Ehk teiste sõnadega on nende releekaitse liikidega võimsuslülitite tõrkekaitse kasutamine võimatu. Tabelis 2.2 on toodud võimsuslülitite tõrkekaitse erinevad konfiguratsioonid, mis annavad võimaluse edukaks väljalülitamiseks [11].

**Tabel 2.2 Võimsuslüli tõekekaitse konfiguratsioonid**

	<p>Igal kaitserleel 21A, 21B ja 87B on võimsuslüli tõekekaitse. Kui üks kolmest releekaitsest ei ole töökorras, siis võimsuslüli tõekekaitset hoitakse alal teiste releekaitsetega. Antud konfiguratsiooni eeliseks on, et siin ei ole võimalik valerakendumine välissignaali puhul.</p>
	<p>Võimsuslüli tõekekaitse on aktiveeritud ainult lattide difkaitses, kuid siin on kasutusel mõlema süsteemi distantkaitse signaalid. Antud konfiguratsioonis on rike lattidel releekaitse rakendamise poolest peaaegu sama kui võimsuslüli tõekekaitse rakendumine.</p>
	<p>Antud konfiguratsiooni võimsuslüli tõekekaitse põhireleeks on mõlemad süsteemi A ja B funktsioonid. Otsene väljalülitussignal lihtsustab oluliselt võimsuslüli tõekekaitset ja vähendab väljalülitamisaega. Antud konfiguratsioon on kõige turvalisem, sest isegi mõlema 21A ja 21B rikke korral on 87B kaitse põhikaitse ja lüüab edukalt sisendfiidri välja.</p>

### 2.5.2 Võimsuslüli tõekekaitse võltssignaalid

Võimsuslüli tõekekaitse signaal võib olla rakendatud elektromagneetiliste häiringute tõttu. Kõige tõenäolisem elektromagneetiliste häiringute mõju on DC akupatarei, mis toitab jaotusseadme sekundaarahelaid, maalühis. Üldine probleem on, et maalühis võib tekkida

akupatareis ükskõik mis kohas, mida põhjustavad tavaliselt mustus ja niiskus. Suurtes alajaamades ja elektrijaamades võib olla aku maalühist väga raske leida. Kõige tõenäolisem maalühise leidmiseks on lahti ühendada akukoormus ja jagada osadeks toiteahel akumulaatorilt rikkekoha lokaliseerimiseks. Kuid see tegevus häirib kogu tööprotsessi ja eriti mugav ei ole.

Maalühise koha leidmiseks on kasutusel erinevad meetmed. Esimene võimalus on kasutada 5Hz impulssignaali akuklemmidele, mis annavad võimaluse leida maalühise koht, kuid 5Hz signaal omab suurt viivitust, mis võib viia releekaitse valerakendumisele. Teine võimalus on kasutada 5kHz impulssignaali, mis ei vii releekaitse valerakendumisele, kuid antud sagedusel töötavad impulsspingete filtrid, mis testimise ajal võivad toimida fantoomsete maalühise kohtadena ja häirida testimise protsessi.

Lahenduseks on 20-30Hz impulssgeneraator ja andur, mis tunneb sagedused väljaspool impulssgeneraatori diapasooni. Ühendades üks ots maaga ja teine positiivse või negatiivse poolusega, on võimalik leida maalühise koht seal, kus mõõteseade mõõdetav takistus on väikseim.

Samuti tänu kaabli suurele mahtuvusele võib patarei maalühis mõjutada tõrkekaitse loogikat ja põhjustada valerakendumist. Eriti oluline on see mikroprotsessori releekaitse puhul, kus mahtuvus avaldab mõju suure takistusega releedele digitaalsisendite jaoks.

Antud probleemi lahendamiseks on vaja kasutada erinevaid meetmeid mahtuvuse vähendamiseks (peenemad juhtmed), õiget rakendumispinge sätete valimist ja paralleeltakistite kasutamist digitaalsisendites.

Veel üheks võimaluseks on kasutada positiivseid ja negatiivseid akuklemme distantskaitse terminalist eraldi. Antud võimalus teeb lihtsamaks akupatarei maalühise tuvastamise. Kasutades digitaalset *peer-to-peer* kommunikatsiooni, suurendab võimsuslüli tõrkekaitse signaali turvalisust. Nii nägu eespool öeldud on taasväljalülitamise funktsioon enne võimsuslüli tõrkekaitse rakendumist efektiivne võimalus vältida võimsuslüli tõrkekaitse valerakendumist. Näiteks kui tekib võltssignaali siis võimsuslüli ei ava oma kontakte, sest see rakendub ainult pärast taasväljalülitamissignaali.

Samuti võimsuslüli tõrkekaitse võltssignaali võib rakendada valel testterminalide (Test terminal block) kasutamise ajal, kui personal kasutab testterminale releekaitse testimiseks (mõõtmised, kalibreerimised, hooldus, arvesti). Antud tegevuse ajal on vaja kõiki tegevusi nõutekohaselt läbi viia, et vähendada inimfaktorite mõju releekaitsele [14].

## 3.0,4 kV kaugreserveerimise võimalused

0,4 kV elektrivõrgud on oluline osa elektrienergia jaotamise tsüklis. Nende töökindlus otseselt seotud sellega kuidas töötavad tööstus ja põllumajandus sektorid, elektrijaamad ja alajaamad. Veel mõned ajad tagasi kaugreserveerimise probleem 0,4 kV elektrivõrkudes ei ole saanud kvaliteetse lahenduse.

Kaugreserveerimise võimalused 0,4 kV elektrivõrkudes oli väga raske elluviia sama lahendusega mis oli teostatud kõrgepingeliinidel. Lühisvoolu väärtus väga kiiresti kahanes kui lühisekoht toiteallikast oli päris kaugel. Mikroprotsessoripõhine releekaitse ilmumine andis võimaluse lahendada eespool vaadatud probleemi kaugreserveerimise valdkonnas. Algoritm, mis on vaadatud allpool omab täiesti uut ideeid, mis ei ole maailma praktikas varem kasutatud [17].

### 3.1 Traditsiooniline metoodika sätete valimisel

On vaadatud kaugreserveerimise probleem sisendlülitite rakendamise seisukohast 10/0,4 kV alajaamas võimsusega 1000 kVa. Sätete valimine toimub vastavalt rekomendatsioonidele [17,23].

#### 3.1.1 Mootori kaitselüliti QF2 sätete valimine.

**Sõltuva viitega kaitse.** Mootori sõltuva viitega kaitse ( $I_{MSVK}$ ) sätete arvutamine kooskõlastatakse mootori käivitusvoolu väärtusega (3.1). Mootori käivitusvool koosneb perioodilisest ( mis on peaaegu konstantne kogu käivitamisaja jooksul) ja aperioidilisest (mis sumbub paar perioodi jooksul) komponendist.

$$I_{QF2} \geq 1,05 \cdot K_t \cdot I_k \quad (3.1)$$

Kus:  $K_t$  – 1,5 ehk töökindluse koefitsent

1,05 – koefitsent, mis arvestab et normaalses olukorras pinge võib olla 5% kõrgem mootori nominaalpingest

Arvestatud kõik tingimused ja piirangud on saadud et:

$$I_{QF2} \geq 1,05 \cdot 1,5 \cdot 2240$$

$I_{SVK} \geq 3528 A$  ja toimekiirus on minimaalne ehk 100ms.

**Ülekoormuse kaitse.** Rakendamisvool ülekoormuse puhul leitakse arvestades kaks tingimust, ennistus- ja välisteguri koefitsenti.

$$I_{\text{ÜKQF2}} = \frac{K_v}{K_e} \cdot I_n = \frac{1,2}{0,96} \cdot 320 = 400A \quad (3.2)$$

Kus:  $K_v$  – välistustegurid valitakse tavaliselt piirides (1,1...1,5)

$K_e$  – ennistustegur näitab ennistusvoolu suhet rakendusvoolu (0,6...0,98)

$I_n$  – mootori nimivool (A)

Ülekoormuse kaitse ajasättete määramine leitakse vastavalt avaldisele 3.3

$$t_{\text{ÜKQF2}} \geq (1,5 \div 2) + t_{\text{käivitamine}} \quad (3.3)$$

Kus:  $t_{\text{käivitamine}}$  – mootori käivitamise aeg ( 2,5...3 sek)

$t_{\text{ÜKQF2}}$  – kaitselüliti rakendamisaeg kui vool on võrdne käivitamisvooluga, sek.

Antud puhul ülekoormuse kaitse ajasätte on umbes 4,5 sekundit.

QF2 jaoks on kasutusel pooljuht või elektrooniline vabasti. Vabasti koosneb juhtimisplokkist, mõõtetrafodest ja elektrimagnetist. Juhtimisplokki abil on võimalik programmeerida vajalik tegevuse järjekord kontaktide lahutamise jaoks. Selle eeliseks on suur reguleerimis võimalus iga elektrivõrgu jaoks. Samuti on garanteeritud väga hea selektiivsus. Puuduseks on kõrge hind ja habrad elemendid.

### 3.1.2 Sättete määramine kaitselüliti QF4 ja QF5 jaoks

**Sõltuva viitega kaitse.** Tänu sellele, et antud koormused ei oma mootoreid, sättete valimini toimub vastavalt avaldisele 3.4

$$I_{\text{QF4 ja QF5}} \geq K_T \cdot I_{\text{max}} \quad (3.4)$$

Kus:  $K_T$  – 1,5 ehk töökindluse koefitsent

$I_{\text{max}}$  – maksimaalne lubatud vool ehk antud juhul nimivool

Avaldise 1.4 abil on leitav sõltuva viitega vooluvärtuse kaitse, mis lülitab kaitselüliteid 0,1 sek pärast. Kooskõlastust väljuvate liinidega ei ole teostatud tänu selle et nad on puuduvad.

$$I_{\text{QF4 ja QF5}} \geq 1,5 \cdot 72A = 108 A$$



**Ülekoormuse kaitse.** Antud ühenduses ülekoormuse kaitse ei ole teostatud, tänu sellele on paigutatud kaitselülitid QF4 ja QF5 mis omavad ainult elektromagneetilist vabastit. Elektromagnetiline vabasti koosneb solenoidist ja südamikust, mis aitavad lahutada kontaktid teatud voolusuuruste ületamise ajal. Lühise ajal voolu järsk kasvamine solenoidis põhjustab magnetvoo suurendamist. Suur magnetvoog paneb südamikku liikuma vastu vedrusurvele ning kontaktid lahutavad.

### 3.1.3 Sättete määramine kaitselüliti QF3 jaoks

**Sõltuva viitega kaitse.** Sõltuva viitega kaitse arvestab kaks tingimust, mille vahel valitakse maksimaalne väärtus.

Esimene tingimus: mitte rakendumine nimivoolu ajal ehk avaldise 3.4 abil on  $I_{SVK} \geq K_N \cdot I_{max} = 1,5 \cdot 160 = 216 A$

Teine tingimus: kooskõlstamine kaitselülititega QF4 ja QF5 avaldise 3.5 abil

$$I_{QF3} \geq K_{TK} \cdot I_{QF4 \text{ või } QF5 \text{ max}} \quad (3.5)$$

Kus:  $K_{TK} - 1,4$  ehk kooskõlstamise töökindluse koefitsent

$I_{QF4 \text{ või } QF5 \text{ max}} - 108 A$ , ehk suurim vool väljuvatel liinidel

Avaldise 3.5 põhjal  $I_{QF3} \geq 1,4 \cdot 108 = 151 A$ .

Kahe tingimuse vahel on valitud sõltuva viitega kaitse voolusätte  $I_{QF3} \geq 216 A$ .

Kaitse ajasätte määramine leitakse vastavalt avaldisele 3.6

$$t_{QF3} \geq t_{SVK \text{ } QF4 \text{ ja } QF5} + \Delta t \quad (3.6)$$

Kus:  $t_{SVK \text{ } QF4 \text{ ja } QF5}$  –väljuvate liinide QF4 ja QF5 rakendumise aeg, sek

$\Delta t - 0,15$  sek; selektiivsuse aste

QF3 kaitse ajasätte määramise väärtus on:  $t_{QF3} \geq 0,1 + 0,15 = 0,25 \text{ sek}$

**Ülekoormuse kaitse.** Antud ühenduses ülekoormuse kaitse puudub ning siin on kasutusel elektromagneetiline vabasti.

### 3.1.4 Sättete määramine kaitselüliti QF1 jaoks

**Sõltuva viitega kaitse.** Sättete määramise ajal kaitselüliti QF1 jaoks peame arvestama maksimaalse koormusega lattide peal ja mootori suurima käivitusvooluga.

$$I_{QF1} \geq K_T \cdot (\sum_i^{n-1} I_{max} + I_{käivitus}) \quad (3.7)$$

Kus:  $K_T = 1,5$ ; töökindluse koefitsent

$\sum_i^{n-1} I_{max}$  – koormuste maksimaalne voolude summa, A

$I_{käivitus}$  – mootori maksimaalne käivitusvool, A

Avaldise 3.7 abil on leitud:  $I_{QF1} \geq 1,5 \cdot (2240 + 72 + 72 + 520) = 4356 \text{ A}$

Kuna on vaja arvestada väljuvate liinide kooskõlastamisega, siis avaldise 3.5 abil on leitud:

$$I_{QF1} \geq 1,4 \cdot 4356 = 4939 \text{ A}$$

Mõlema avaldise vahel on valitud suurema väärtusega saadud tulemus ehk  $I_{QF1} \geq 4939 \text{ A}$

QF1 kaitse ajasätte määramise väärtus on letav avaldise 3.6 abil, kus selektiivsuse samm on sama ehk 0,15 sek.  $t_{QF1} \geq 0,25 + 0,15 = 0,4 \text{ sek}$

**Ülekoormuse kaitse.** Sättete määramine ülekoormuse kaitselüliti QF1 jaoks arvutatakse täpselt sama nagu on toodud avaldises 3.2, kuid nimivoolu asemel siin arvetatakse trafo 20% ülekoormus ehk tegelik nimivool on  $I_{max} = 1,2 \cdot I_n = 1,2 \cdot 1445 = 1734 \text{ A}$ .

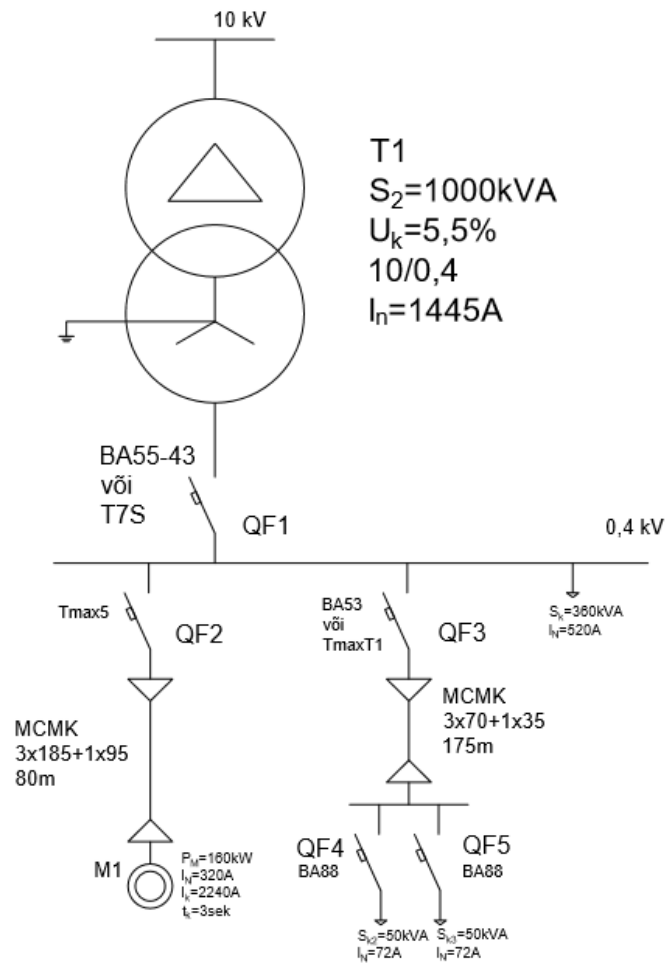
Avaldise 3.2 abil on leitav ülekoormuse kaitse voolusätte:  $I_{ÜKQF1} = 1,25 \cdot I_{max} = 2167,5 \text{ A}$ .

QF1 ülekoormuse ajasätte peab olema kaks korda suurem kui mootori käivitamisaeg ehk

$$t_{ÜKQF1} = 2 \cdot t_{käivitamine} = 6 \text{ sek.}$$

**Tabel 3.1 Kaitselülite parameetrid**

Kaitselüliti	Nimivool [A]	Tüüp	Lühisvool [kA]	Vabasti tüüp	Voolusäte [A]	Ülekoormus [A]
QF1	1600	BA55 või T7S	50-150	elektrooniline	4939	2167,5
QF2	400	Tmax5	36	elektrooniline	3528	400
QF3	160	BA53 või TmaxT1	16-25	elektrooniline või elektromagneetiline	216	-
QF4	80	BA88	25	elektromagneetiline	108	-
QF5	80	BA88	25	elektromagneetiline	108	-



Joonis 3.1 Lähteskeem

### 3.2 Sättete analüüs ja lühisvoolude arvutamine

Lühisvoolude arvutamise eesmärk on analüüsida, kas kaitseüliti QF1 on võimeline kaitsta QF3 kaabelliini releekaitse tõrge ajal. Selleks on vaja välja arvutada kõige väiksema lühisvoolu (kaare kahefaasiline lühisvool), mis mikroprotsessor releekaitse QF1 lülitil saaks tunda ning vajaduse korral ilimineerida.

Kõigepealt on vaja leida ekvivalentne toiteallikas ja vastavad takistused. Selleks on kasutusel järgmised valemid [2,23]:

$$E_{ekv} = c \frac{U_n}{\sqrt{3}} = 1,1 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{3}} = 0,25 \text{ kV} \quad (3.8)$$

Kus:

$c$  – pingetegur

$U_n$  – lühisekoha nimipinge, kV

Süsteemi takistuse arvutamiseks kasutatakse valemit:

$$Z_Q = 1,1 \frac{U_N^2}{S_k''} = 1,1 \frac{0,4^2}{100} = 1,76 \text{ m}\Omega \quad (3.9)$$

$$r_Q = x_Q 0,1 = 1,75 \cdot 0,1 = 0,17 \text{ m}\Omega \text{ ja } x_Q = z_Q 0,995 = 1,76 \cdot 0,995 = 1,75 \text{ m}\Omega \quad (3.10)$$

Trafo takistuse arvutamiseks on kasutatud valemid:

$$E_{ekv} = c \frac{U_{nF}}{\sqrt{3}} = 1,1 \cdot \frac{10}{\sqrt{3}} = 6,35 \text{ kV}$$

$$Z_T = \frac{u_{k\%} \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{5,5 \cdot 10^2}{100 \cdot 1} = 5,5 \Omega \quad (3.11)$$

$$r_T = \frac{u_{kR\%} \cdot U_{nT}^2}{100 \cdot S_{nT}} = \frac{\frac{\Delta P_{kT}}{S_{nT}} 100\% \cdot 110^2}{100 \cdot 1} = \frac{\frac{10,2}{1000} \cdot 100 \cdot 10^2}{100} = 1,02 \Omega \quad (3.12)$$

$$x_T = \sqrt{Z_T^2 - r_T^2} = 5,4j \quad (3.13)$$

Kus,  $Z_T$  – trafo takistus,  $\Omega$

$u_{k\%}$  – trafo lühispinge, %

$u_{kR\%}$  – trafo lühispinge aktiivkomponent, %

$\Delta P_{kT}$  – trafo lühiskadu, kW

$S_{nT}$  – trafo nimivõimsus

Nüüd on vaja viia see takistus 0,4kV poole peal:

$$\frac{r_t}{k^2} = \frac{r_t}{\left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}}\right)^2} = \frac{1,02}{\left(\frac{10}{0,4}\right)^2} = 1,63 \text{ m}\Omega$$

$$\frac{x_t}{k^2} = \frac{x_t}{\left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}}\right)^2} = \frac{5,4}{\left(\frac{10}{0,4}\right)^2} = j8,64 \text{ m}\Omega$$

Lühisvoolude arvutamisel on vaja arvestada veel lattide, poldide, mõõtetrafode, lülitite kontaktide ning kaare takistusega. Kõik nimetatud elemendid on toodud tabelis 3.2.

**Tabel 3.2 Elementide takistused**

Elemendid	Aktiivtakistus [mΩ]	Induktiivtakistus [mΩ]
Trafo	1,632	8,64
Süsteem	0,175	1,751
Lattid	0,3	0,15
Polidid	0,05	-
Mõõtetrafod	0,5	0,7
Lülitite kontaktid	1,34	0,68
Kaar	5	-

Kolmefaasiline lühisvool on letud valemiga:

$$I_k^{(3)} = \frac{E_{ekv}}{Z_{\Sigma(r+jx)}} = \frac{1,1 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{3}}}{\left(\sqrt{8,997^2 + 11,921^2}\right) \cdot 10^{-3}} = 17 \text{ kA}$$

Kahefaasiline metalllühis on leitud valemitega:

$$I_k^{(2)} = \frac{E_{ekv}}{Z_{\Sigma}^{(2)}} = 0,865 I_k^{(3)}$$

$$Z_{\Sigma}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{r^2 + x^2}\right) = \frac{2}{\sqrt{3}} \left(\sqrt{8,997^2 + 11,921^2}\right) = 17,24 \text{ m}\Omega$$

$$I_k^{(2)} = \frac{1,1 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{3}}}{17,24 \cdot 10^{-3}} = 0,865 \cdot 17 = 14,73 \text{ kA}$$

Kuna releekaitse sättestamine peab olema teostatud teades kaare kahefaasilist lühist, selleks et kaitsta väljuvate liinide tsooni, on arvestatud teguri  $K_c$  väärtus sõltuvalt ahela takistusest. Voolu määramisel kaare kahefaasilise lühise alghetkel ehk  $t_{lühis} < 0,05 \text{ sek}$   $K_c$  väärtus on valitud graafikust [23].

Teades kõik parameetrid on võimalik leida kaare kahefaasiline lühisvool liini MCMK 3X70+1X35 alguses:

$$I_{kaar}^{(2)} = 14,73 \cdot 0,68 = 10 \text{ kA}$$

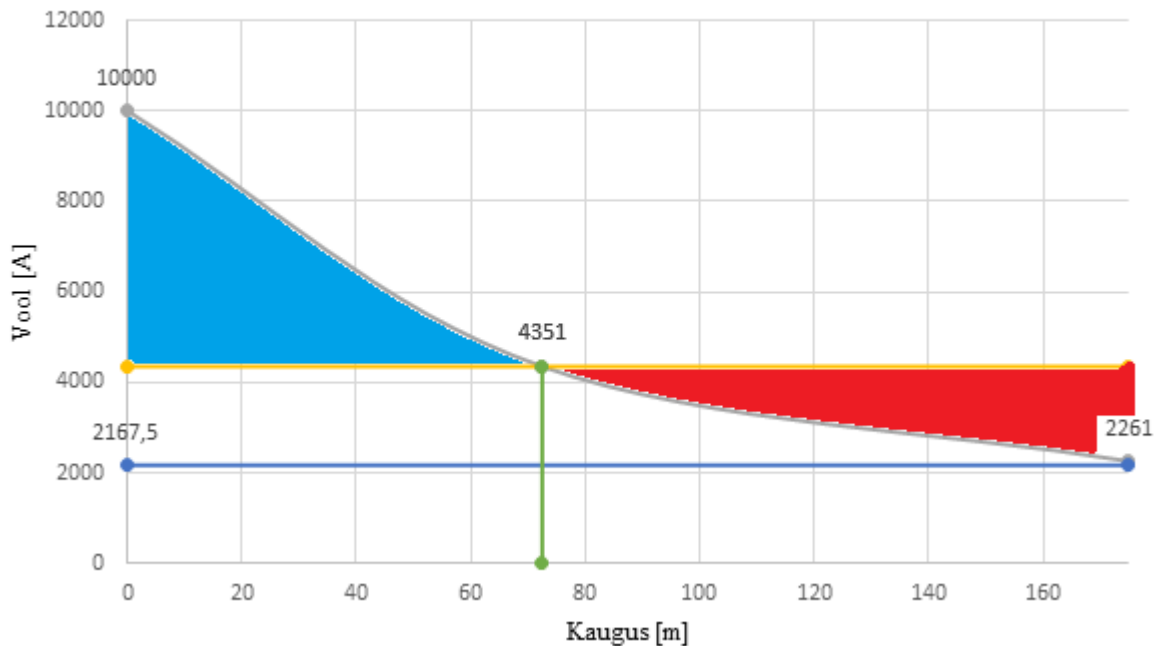
Kaare kahefaasiline lühisvool liini MCMK 3X70+1X35 lõppus:

$$Z_{\Sigma}^{(2)} = \frac{2}{\sqrt{3}} (\sqrt{r^2 + x^2}) = \frac{2}{\sqrt{3}} (\sqrt{(8,997 + 56)^2 + 11,921^2}) = 76,3 \text{ m}\Omega$$

$$I_k^{(2)} = \frac{1,1 \cdot \frac{0,4}{\sqrt{3}}}{76,3 \cdot 10^{-3}} = 3329 \text{ A}$$

$$I_{kaar}^{(2)} = 3329 \cdot 0,68 = 2261 \text{ A}$$

Kaugreserveerimise tsoonid kaitselülitiga QF1 liinile MCMK 3X70+1X35 (QF3)



**Joonis 3.2** Kaugreserveerimise tsoonid kaitselülitiga QF1 liinile MCMK 3X70+1X35 (QF3)

Joonisel 3.2 on esitatud eespool arvatud lühisvoolud ning tsoonid kus kaitselüliti QF1 on kas võimeline või mitte reserveerida väljuva liini MCMK 3X70+1X35. Joonisel 3.2 on ilusti näha, et kuni 72,5 m kaitselüliti QF1 on võimaline teostama kaugreserveerimist, pärast seda see on võimatu tänu kabelliini takistuse suurendamisele. Teiste sõnadega kaugreserveerimine on teostatud ainult 42% väljuva liini ulatuses, mis kaitselüliti QF3 tõrge korral võib põhjustada kaabli teermilist lagunemist aga halvimal juhul tulekahju kaablikambris. Antud näidises on esitatud koormus väiksema käivitusvoolu kordsustega. Keerulisemas elektrivõrkudes, kus on palju suurema nimivõimsusega mootorid kaugreserveerimise tsoon võib veelgi vähendada. Paljud automaatkaitselülitid ei ole võimelised seda probleemi lahendada, sest nende releekaitse põhimõtte on ühesugune: nad võrdlemad hetkväärtuse sätte parameetritega, mis peab olema kooskõlastatud käivitusvooludega. Põhiline faktor mis põhjustab tsoonide tekket võrreldes

keskpingevõrkudega on kiire lühisvoolu vähenemine eemaldades toiteallikast ning ka mootorite suured käivitusvoolud. Kaugreserveerimine peab olema sätestatud arvestades kõik need tingimused. Samuti ta peab täpselt määratlema lühise tekket, aga mitte olukorda millal lühisvoolu väärtus ületab sätteid. Tänu mikroprotsessori releekaitsele see sai teostatud [17].

### 3.3 Kaugreserveerimise algoritm

Juhtimisplokkis pidevalt analüüsitakse voolu aktiiv- ja induktiivkomponentide pärijärgnevus vektorid ja arvutatakse kriteeriumid, mis saavad kindlaks teha lühise tekket. Selle põhjal on välja töötatud kaugreserveerimise funktsioonid ja võimalused kaitselülite tõe tagajärjel. Antud algorütmil samuti blokeeritakse voolu hetkkaitse toimimist mootori käivitamisajal. Seega, võrreldes voolu hetkkaitse kus jälgitakse ka pingeväärtust, antud terminalis voolu hetkkaitse on realiseeritud koos voolu vektori juurdekasvu võimalustega [19].

Esimese gruppi kaugreserveerimise rakendumise tingimused on teostatud kui on täidetud järgmised kriteeriumid:

$$\Delta I_{1a} \geq k \cdot \Delta I_{1L} \text{ ja } \Delta I_{1a} > 0 \quad (1)$$

$$\Delta I_{1a} \geq I_p \text{ või } I_2 \geq I_{2.s.lub} \quad (2)$$

$$\Delta I \geq I_{k.sätte} \quad (3)$$

Kus,  $\Delta I_{1a}$  – voolu aktiivkomponendi pärijärgnevus vektori juurdekasv

$k$  – koefitsent

$\Delta I_{1L}$  – voolu induktiivkomponendi pärijärgnevus vektori juurdekasv

$I_p$  – voolu blokeeringu väärtus kui lülitakse sisse staatiline koormus

$I_2$  – vastujärgnevus vool

$I_{2.s.lub}$  – suurim lubatud ebabilanss vastujärgnevus voolus

$\Delta I$  – faasivoolude juurdekasv

$I_{k.sätte}$  – voolu kaugreserveerimise sätte

Tingimus (1) analüüsib suhet aktiivkomponendi  $\Delta I_{1a}$  ja induktiivkomponendi  $\Delta I_{1L}$  voolu pärijärgnevus vahel. Lühise ajal valitseb aktiivkomponent, mootori käivitamisajal aga induktiivkomponent. Normaalsel olukorral kui lattipinge on 0,4 kV või natuke madalam koefitsent  $k = 1$ , kui aga pärast pinget hüppelist kasvamist, see koefitsent automaatselt jääb  $k =$

2, 200 ms jooksul. See väldib kaugreserveerimise toimimist, sest see on väga oluline näiteks lühisvoolude lahutamise hetkel nii kõrgepingeliinidel kui ka madalpingeliinidel, kus pinge pärast kontaktide lahutamise hetket hüppelist kasvab ja mille tagajärjel aktiivkomponent võib ületada induktiivkomponenti. Samuti mootori käivitamisajal pinge lühiajaline kahanemine pärast toob pinge kasvamist.

Tingimus (2) väldib üleliigsed kaugreserveerimise käivitamist isegi siis kui tingimus (1) on täidetud, ehk kaugreserveerimine ei pea toimima. Esimene nendest režiimidest – staatilise koormuse sisselülitamine. Kaugreserveerimise käivitamise vältimiseks on toodud blokeeringu sätte staatilise koormuse sisselülitamis ajal  $I_p$ . Teine nendest režiimidest – lubatud asümmeetriline režiim. Kaugreserveerimise käivitamise vältimiseks on toodud blokeeringu sätte mis jälgib vastujärgnevus voolu eabilanssi väärtust. Samuti tingimus  $I_2 \geq I_{2.s.tub}$  võib käivitada kaugreserveerimist asümmeetrilise lühise korral, isegi siis kui tingimus  $\Delta I_{1a} \geq I_p$  seda ei suuda teha tänu selle, et aktiivkomponendi juurdekasv võib osutada liiga väikeseks.

Tingimus (3) on kaugreserveerimise kooskõlastamine tundlikkuse järgi teiste automaatkaitselülititega, mis on paigutatud soovitatud tsooni lõppus. Tingimus (3) väldib kaugreserveerimise käivitamist, lühise korral, väljaspool oma tsooni.

Teise gruppi kaugreserveerimise rakendumise tingimused on teostatud kui on täidetud järgmised kriteeriumid:

$$I_1 > 2 \cdot I_N \quad (1)$$

$$U_1 < 0,5U_N \quad (2)$$

$$\Delta I_{1a} \geq I_p \quad (3)$$

$$\Delta I \geq I_{k.s\grave{a}tte} \quad (4)$$

Kus,  $I_1$  – pärijärgnevus vool

$I_N$  –toiteallika (generaator, trafo) nimivool

$U_1$  – pärijärgnevus pinge

$U_N$  – lattide nimipinge



Kõik need tingimused on vajalikud selleks, et ära tunda lähilühist, mis esimese gruppi kriteeriumid ei saa teha, tänu selle et lähilühiste korral valitseb peamiselt induktiivkomponenti mõju.

Kolmanda gruppi kaugreserveerimise rakendumise tingimused on teostatud kui on täidetud järgmised kriteeriumid:

$$I_2 > \frac{I_1}{4} \quad (1)$$

$$I_2 \geq I_{2.s.lub} \quad (2)$$

$$\Delta I \geq I_{k.sätte} \quad (3)$$

$$\Delta I_{1a} \geq I_p \quad (4)$$

Kolmandas gruppis on oluline jälgida voolu päri- ja vastujärgnevuse väärtused. Ehk kui vastujärgnevus vool rohkem kui 25% pärijärgnevusvoolust, siis tegemist on asümeetrilise lühisega.

Reservkaitse voolust sõltuva viitega

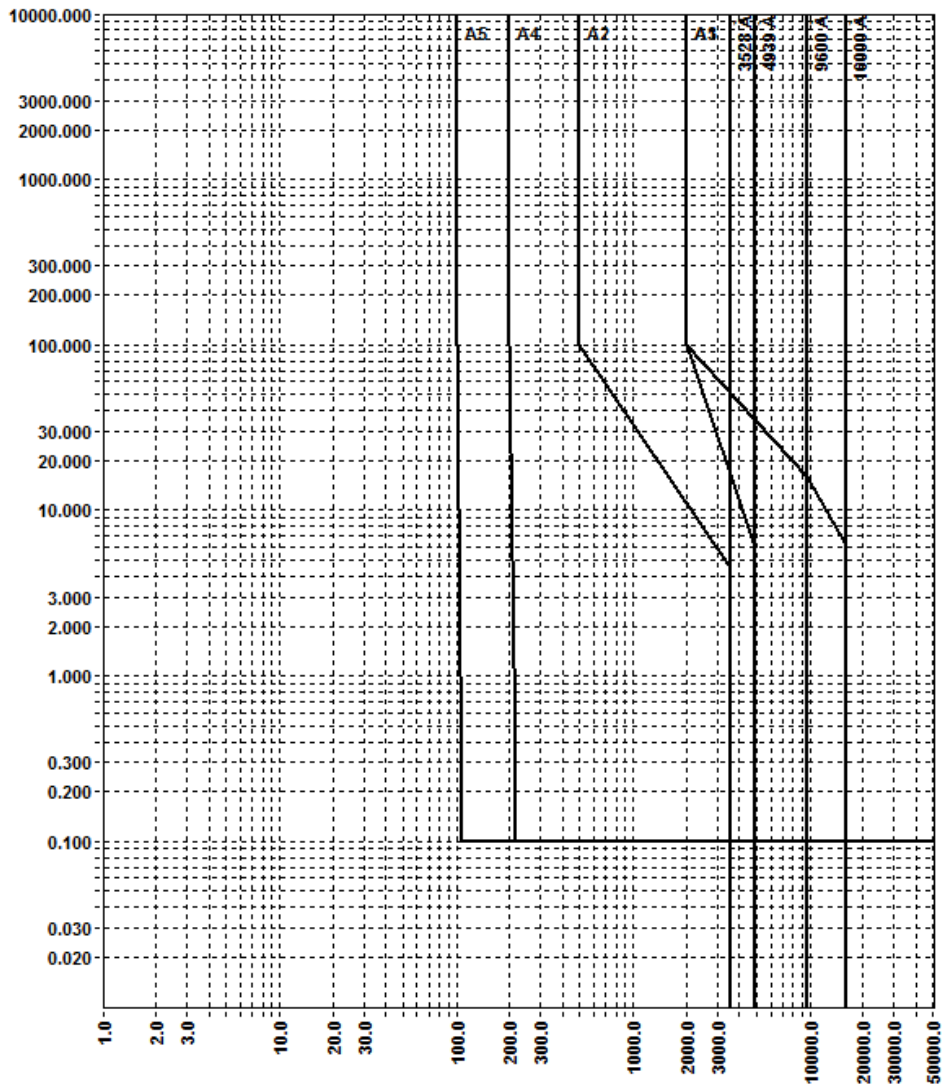
Kaugreserveerimise lisa aste on voolust sõltuva viitega kaitse. Tänu hea kooskõlastamisega teiste kaitselülitiga voolust sõltuva viitega kaitse omab suurema tundlikkuse võrreldes kaugreserveerimise teiste liikidega. See on väga oluline tänu selle, et antud reserveerimine võib katta tsooni kus kaugreserveerimise releekaitse seda ei saa teha. Voolust sõltuva kaugreserveerimise lisa releekaitse aste on leitav lähtudest lähteandmetest.

Antud: Kaitselülilil QF1 (BA55 või T7S) nimivool on  $I_N = 1600A$ . Antud kaitselüliti ülekoormuse sätte on 16 sek kui vool on  $6I_N$ .

Küsimus: On vaja leida reservkaitse voolust sõltuva viitega.

Lahendus: Voolu väärtus reservkaitse rakendus ajal on  $I_{k.r} \geq 1,3 \cdot I_{ÜKQF1} = 2817 A$ . Kooskõlastamis vool  $I_{kk} = 6 \cdot 1600 = 9600 A$ . Reservkaitse rakendumisaeg kooskõlastatud voolu hetkel on  $t_{kk} \geq 16 + 7 = 23 \text{ sek}$ . Nüüd on vaja leida aeg, millal reservkaitse rakendub kümnekordse nimivoolu ületamise ajal:

$$T_R = \frac{t_{kk} \cdot \left(\frac{I_{kk}}{I_{k.r}} - 1\right)}{9} = \frac{23 \cdot \left(\frac{9600}{2817} - 1\right)}{9} = 6,15 \text{ sek}$$



**Joonis 3.3 Selektiivsuse diagramm**

Suuna kontroll kaugreserveerimis releekaitisel

Kaugreserveerimise algorütm pannakse tööle, kui on täidetud järgmised tingimused:

$$I_{1a} \geq 0,2 A (1) \text{ või}$$

$$I_2 \geq I_{2.s.lub} \text{ ja } P_2 < 10 W (2)$$

Kus,  $P_2$  –vastujärgnevus võimsus

Mõlemad tingimused on suunatudlikud nii sümmeetrilise kui asümmeetrilise lühise korral. Näiteks metall kolmefaasilisel lähilühistel vaadatud tsoonis on  $I_{1a} \geq 0,2 A$  ja  $P_2 = 0$ . Kahefaasilisel lühisel „selja taga“ – mõlemad tingimused ei ole täidetud ja kaugreserveerimine viiakse töölt välja.

### Lisa tingimus kaugreserveerimis releekaitsele

$$U_1 \geq 10 V$$

See tingimus väldib kaugreserveerimist üleliigsed käivitamist pinge kadumise korral. Muidugi on vaja arvestada ka sellega, et kolmefaasilistel lähilühistel peab rakenduma voolu hetkkaitse.

### Voolu hetkkaitse blokeeringu algorütm

Mootori käivitamisajal blokeering keelab voolu hetkkaitsele rakendumist kui on täidetud tingimused:

$$k \cdot \Delta I_{1L} \geq \Delta I_{1a} \quad (1)$$

$$I_1 > 0,9 I_{\dot{U}K} \quad (2)$$

$$\Delta I_{1a} > 0,1 I_{\dot{U}K} \quad (3)$$

Kus,  $I_{\dot{U}K}$  – voolu ülekoormuse väärtus

Lähilühistel tingimus (1) võib rakenduda tänu suurele induktiivkomponentidele. Lisa tingimused (2) ja (3) saavad ka rakenduda ja voolu hetkkaitse ei suudaks toimida (blokeeritakse).

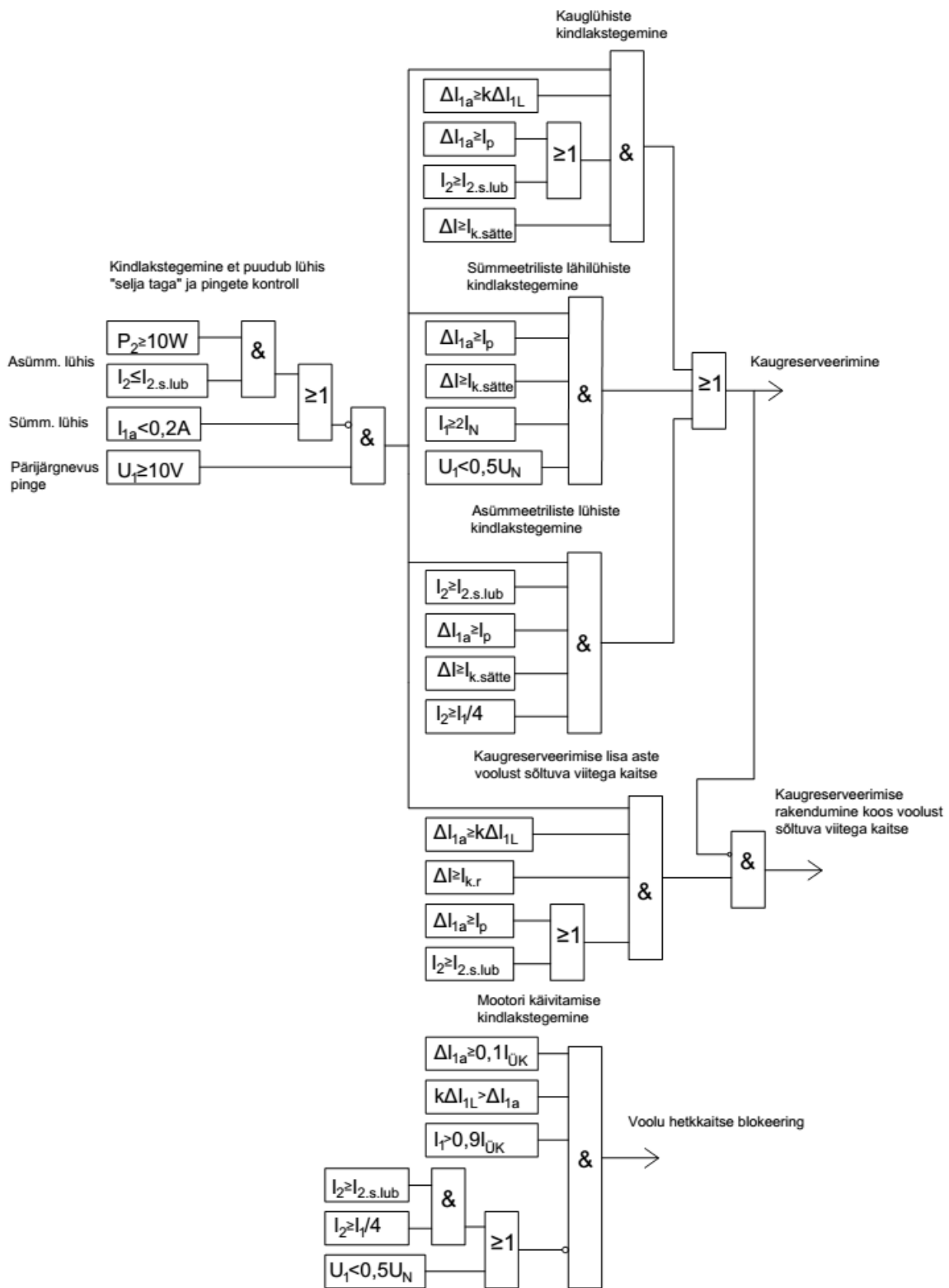
Selleks, et voolu hetkkaitse saaks õieti toimida on vaja täita veel kolm tingimust. Kolmefaasilise lähilühiste korral voolu hetkkaitse blokeering on keelatud kui:

$$U_1 < 0,5 U_N \quad (4)$$

Ja samuti asümeetrilise lähilühiste korral kui:

$$I_2 \geq I_{2.s.tub} \text{ ja } I_2 > \frac{I_1}{4}$$

Kõik eespool vaadatud algorütmid on toodud joonisel 3.4



Joonis 3.4 Kaugreserveerimise, kaugreserveerimise rakendumine koos voolust sõltuva viitega kaitse ja voolu hetkkaitse blokeeringu algorütmid

Kaugreserveerimise algorütm eripära on voolu tuletiste analüüs aga mitte nende absoluutset suurused. See oluliselt suureneb ja annab võimaluse täpsemalt määrata kaitsvad tsoonid sõltumata mõõtmise täpsusest. Eespool vaadatud lahendus on unikaalne ning saaks laiemalt olla kasutusel nii tootmise (primaarenergia tootmine) kui ka tarbimise valdkondades (suured tehased).

### 3.4 Vooluvektori juurdekasvu rakendumistsooni leidmine

Selleks, et kaugreserveerimise kaitse, mis on baseeritud analüüsides voolu vektori juurdekasvu, toimiks õieti ei piisa ainult algorütmist. On vaja leida tsooni, kus kaugreserveerimine toimiks ainult teatud piirides ja väldiks käivitamist väljaspoolt nendele programmeeritud tsooni. Antud tsooni leidmiseks on vaja arvestada kõike võimalikke eel lühiste olukordadega ja leida nende olukordade konkreetset väärtused [16].

1. Metall lühis trafo tühijooksul
2. Metall lühis koos kaare takistusega trafo tühijooksul
3. Metall lühis maksimaalsel aktiivkoormusel
4. Metall lühis koos kaare takistusega maksimaalsel aktiivkoormusel
5. Metall lühis maksimaalsel reaktiivkoormusel
6. Metall lühis koos kaare takistusega maksimaalsel reaktiivkoormusel

Eespool arvatud trafo takistused ülempinge poolel on:  $Z_T = 5,5 \Omega$ ;  $r_T = 1,02 \Omega$  ja  $r_T = 5,4 \Omega$ . Kaare takistus alampinge poolel on  $r_k = 5 m\Omega$ , mis on ülempinge poolel võrdub  $r_k \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}}\right)^2 = 3,125 \Omega$ .

Vooluvektor  $I_K$  lühise korral trafo taga on defineeritud parameetritega  $R_T$  ja  $X_T$ .

1.  $I_K$  väärtus metall lühise korral trafo tühijooksul on leitav järgmiste valemite abil:

$$I_{KA1} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_T}{Z_T^2} = \frac{10000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1,02}{30,25} = 195 A$$

$$I_{KR1} = \frac{U_{n1}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{X_T}{Z_T^2} = \frac{10000}{\sqrt{3}} \cdot \frac{5,4}{30,25} = 1030 A$$

2.  $I_K$  väärtus metall lühise korral koos kaare takistusega trafo tühijooksul on leitav järgmiste valemite abil:

$$I_{KA2} = \frac{U_{n1}(R_T + R_K)}{\sqrt{3}(X_T^2 + (R_T + R_K)^2)} = \frac{10000(1,02 + 3,125)}{\sqrt{3}(5,4^2 + (1,02 + 3,125)^2)} = 516 A$$

$$I_{KR2} = \frac{U_{n1} \cdot X_T}{\sqrt{3}(X_T^2 + (R_T + R_K)^2)} = \frac{10000 \cdot 5,4}{\sqrt{3}(5,4^2 + (1,02 + 3,125)^2)} = 672 \text{ A}$$

3.  $I_K$  väärtus metall lühise korral maksimaalsel aktiivkoormusel on leitav järgmiste valemite abil:

$$I_{KA3} = \frac{U_{n1} \cdot R_T}{\sqrt{3}Z_T^2} - \frac{S_T \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}U_{n1}} = \frac{10000 \cdot 1,02}{\sqrt{3} \cdot 5,5^2} - \frac{1000 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 10} = 139 \text{ A}$$

$$I_{KR3} = I_{KR1} = 1030 \text{ A}$$

4.  $I_K$  väärtus metall lühise korral koos kaare takistusega maksimaalsel aktiivkoormusel on leitav järgmiste valemite abil:

$$\begin{aligned} I_{KA4} &= \frac{U_{n1}(R_T + R_K)}{\sqrt{3}(X_T^2 + (R_T + R_K)^2)} - \frac{S_T \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}U_{n1}} \\ &= \frac{10000(1,02 + 3,125)}{\sqrt{3}(5,4^2 + (1,02 + 3,125)^2)} - \frac{1000 \cdot 1}{\sqrt{3} \cdot 10} = 458 \text{ A} \end{aligned}$$

$$I_{KR4} = I_{KR2} = 672 \text{ A}$$

5.  $I_K$  väärtus metall lühise korral maksimaalsel reaktiivkoormusel on leitav järgmiste valemite abil:

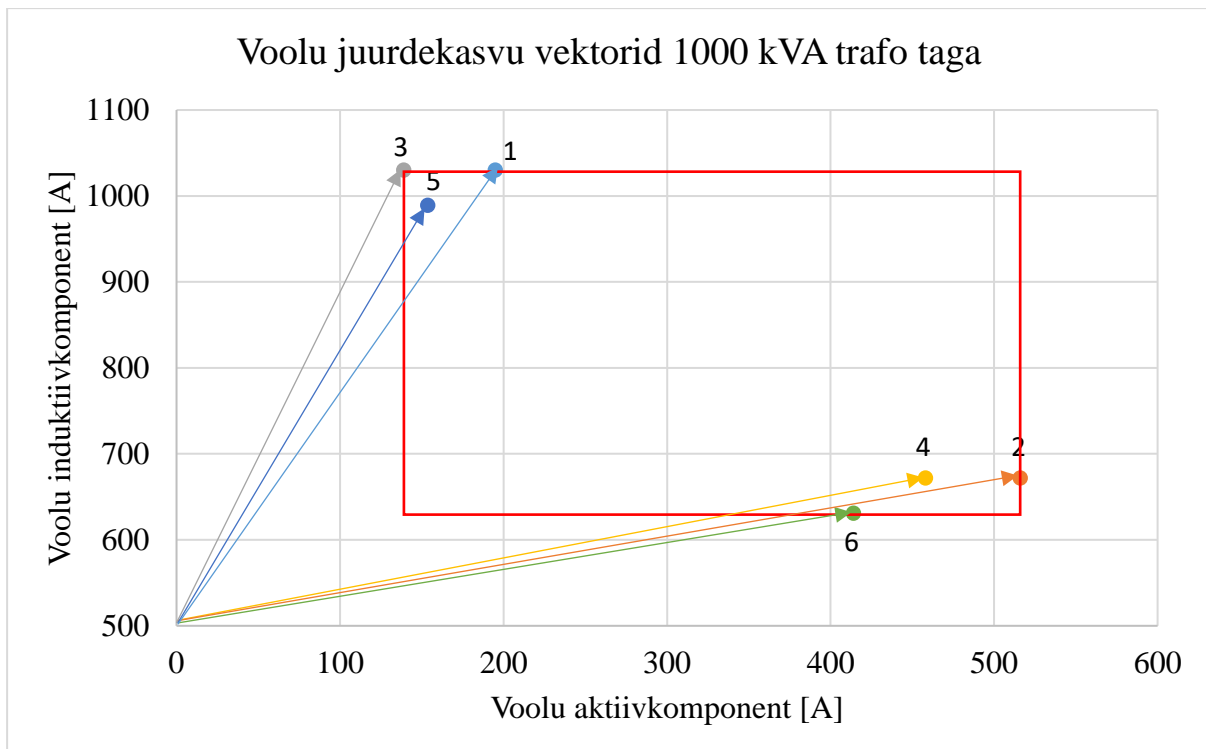
$$I_{KA5} = \frac{U_{n1} \cdot R_T}{\sqrt{3}Z_T^2} - \frac{S_T \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}U_{n1}} = \frac{10000 \cdot 1,02}{\sqrt{3} \cdot 5,5^2} - \frac{1000 \cdot 0,71}{\sqrt{3} \cdot 10} = 154 \text{ A}$$

$$I_{KR5} = \frac{U_{n1} \cdot X_T}{\sqrt{3}Z_T^2} - \frac{S_T \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}U_{n1}} = \frac{10000 \cdot 5,4}{\sqrt{3} \cdot 5,5^2} - \frac{1000 \cdot 0,71}{\sqrt{3} \cdot 10} = 989 \text{ A}$$

6.  $I_K$  väärtus metall lühise korral koos kaare takistusega maksimaalsel reaktiivkoormusel on leitav järgmiste valemite abil:

$$\begin{aligned} I_{KA6} &= \frac{U_{n1}(R_T + R_K)}{\sqrt{3}(X_T^2 + (R_T + R_K)^2)} - \frac{S_T \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}U_{n1}} \\ &= \frac{10000(1,02 + 3,125)}{\sqrt{3}(5,4^2 + (1,02 + 3,125)^2)} - \frac{1000 \cdot 0,71}{\sqrt{3} \cdot 10} = 414 \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_{KR6} &= \frac{U_{n1} \cdot X_T}{\sqrt{3}(X_T^2 + (R_T + R_K)^2)} - \frac{S_T \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}U_{n1}} \\ &= \frac{10000 \cdot 5,4}{\sqrt{3}(5,4^2 + (1,02 + 3,125)^2)} - \frac{1000 \cdot 0,71}{\sqrt{3} \cdot 10} = 631 \text{ A} \end{aligned}$$



**Joonis 3.5** Kaugreserveerimise rakendumis tsoon ja vooluvektorite juurdekasvud 1000 kVA trafo taga

Releekaitse, mis reageerib vooluvektori juurdekasvule on reservkaitse ja omab päris suurt viitet, mis annab võimaluse korrektselt käivitada võimsad mootorid (isegi siis kui reaktiivvektori juurdekasv on päris järsk). Samuti antud reservkaitse ei rakendu magneetimisvoolu järsel muutumisel, tänu suurele viitele.

## 4. Integreeritud releekaitse reserveerimine tarkvõrgus

Viimasel ajal olid väga suured elektrikatkestused ehk *blackoudid* põhjustatud ülekoormuse ja võnkumisega. Tüüpiline näide on, kui üks liinidest lülitatakse välja ja võimsusvoog suunatakse teistele liinidele, mis põhjustab süsteemi võnkumist ja reserv releekaitsete valerakendumist. Need juhtumid olid üle kogu maailma alatest Ameerikast ja lõpetades Indiaga.

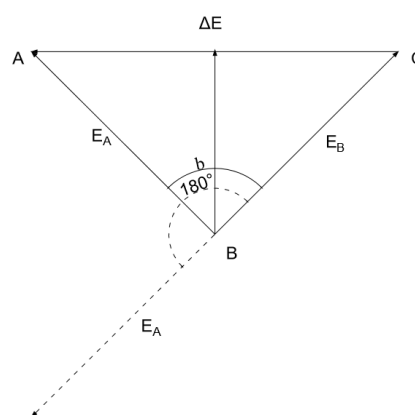
Järjest keerukamad kaitsetehnoloogiad elektrienergeetikas, kus on kõrgelt arenenud kommunikatsioon ja infotehnoloogia, annavad võimaluse antud probleemiga hakkama saada. Antud lõputöös käsitletakse olemasolevate reservkaitsete murekohti ja pakutakse integreeritud reserv releekaitse võimalusi arukates võrkudes ehk *smart gridis*.

Tänapäevaste reserv releekaitsete analüüs.

Tänapäevastel releterminalidel on põhi- ja reservkaitse ühes terminalis. Need mõlemad töötavad üheaegselt ja koordineerivad oma tööd läbi tundlikkuse ja toimeaja. Ülekandmisvõrgud, millel on reservkaitse, kasutavad tavaliselt II ja III tsoonis nii põhi kaugkaitset kui ka nulljärgnevusvoolu kaugkaitset. Mõnedel juhtudel on kasutusel isegi IV tsoon mõlemate kaugkaitseliikide jaoks. Kuid olemasolevate reservkaitsete karakteristikud ei ole rahuldavad ülekoormuse ja võnkumise ajal [5].

#### 4.1 Reservkaitse vale rakendumine süsteemi võnkumise ajal

Olukorras, mil elektrisüsteem võngub näiteks lühise korral ühes ülekandeliinis, võib reservkaitse hakkata valesti rakenduma. Lühise olukorras suure ülekandevõimsusega elektriliinides või suure koormuse sisse- ja väljalülitamise ajal võivad kahe süsteemi vahel tekkida võnkumise voolud. Näiteks lühise ajal lülitus välja elektriliin W2, kus süsteemist A süsteemi B voolas suur võimsus. Selle tagajärjel oli võimsuse bilanss elektrisüsteemis häiritud – süsteemis B tekkis võimsuse puudus ja süsteemis A - võimsuse ülejääk. Antud olukorras hakkavad süsteemis A asuvad generaatorid kiirenduma aga süsteemi B generaatorid hakkavad pidurduma. On loogiline, et siis süsteemi A generaatorite nurksagedus  $\omega_A$  suureneb ja süsteemi B nurksagedus  $\omega_B$  väheneb. Elektrimootorjõudude vektorid  $E_A$  ja  $E_B$  hakkavad pöörlema erineva sagedustega. Vektor  $E_A$  hakkab pöörlema  $E_B$  suhtes nurksagedus libistusega  $\omega_S = \omega_A - \omega_B$ , ehk ületab vektorit  $E_B$   $\delta$  nurga suhtes. Vektor  $\Delta E = E_A - E_B$  hakkab muutma oma suurust sõltuvalt nurgast  $\delta$ . Eeldades et  $|E_A| = |E_B| = |E|$  on leitav  $\Delta E$  kolmnurgast ABC joonisel 4.1 [25].



**Joonis 4.1 Vektordiagramm**

$$\Delta E = 2E \sin \frac{\delta}{2} \quad (4.1)$$

Kus,  $\delta$  – aja  $t$  ja libistuse  $\omega_S$  funktsioon, °



Avaldis 4.1 näitab et  $\Delta E$  hetkväärtus muutub siinus kõvera kaudu ja saab oma maksimumi  $\Delta E_{max} = 2E$  kui  $\delta = 180^\circ$  ning miinimumi kui  $\delta = 0^\circ$ . Seoses emj vahe  $\Delta E$  olemasolul võrgus mis ühendab omavahel generaatorid A ja B tekkib võnkumisvool.

$$I_{võnk} = \frac{\Delta E}{Z_{AB}} \quad (4.2)$$

Kus,  $Z_{AB}$  – ahelate takistus mille kaudu voolab  $I_{võnk}$ ,  $\Omega$

Takistus  $Z_{AB} = \sqrt{X_{AB}^2 + R_{AB}^2}$ . Kui ei võtta arvesse aktiivtakistust  $R_{AB}$  on võimalik väita et  $I_{võnk}$  jääb maha emj vahest  $\Delta E$   $90^\circ$  võrra. Kui panna avaldisse 4.2  $\Delta E$  väärtust avaldisest 4.1 saame:

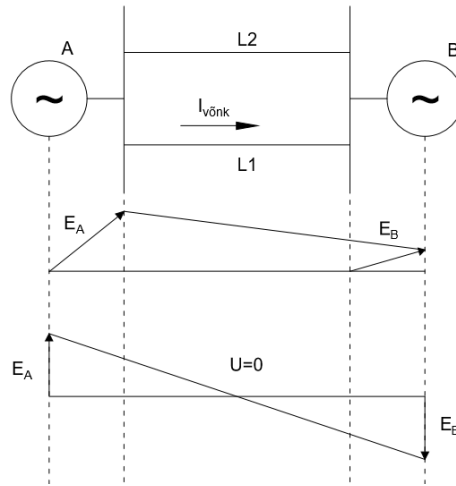
$$I_{võnk} = \frac{2E \sin \frac{\delta}{2}}{Z_{AB}} \quad (4.3)$$

$I_{võnk}$  saab maksimaalse väärtuse kui  $\delta = 180^\circ$  ehk kui generaatorid A ja B emj on vastas faasis ja  $\Delta E_{max}$  on maksimaalne.

$$I_{võnk.max} = \frac{2E}{Z_{AB}} \quad (4.4)$$

Kui  $\delta = 0^\circ$  siis generaatorite emj on samasfaasis ja  $I_{võnk}$  on nulli lähedane. Tegelikult kui  $\delta = 0^\circ$  siis  $I_{võnk}$  ei võrdu kunagi nulliga sest reaalsuse  $E_A \neq E_B$ .

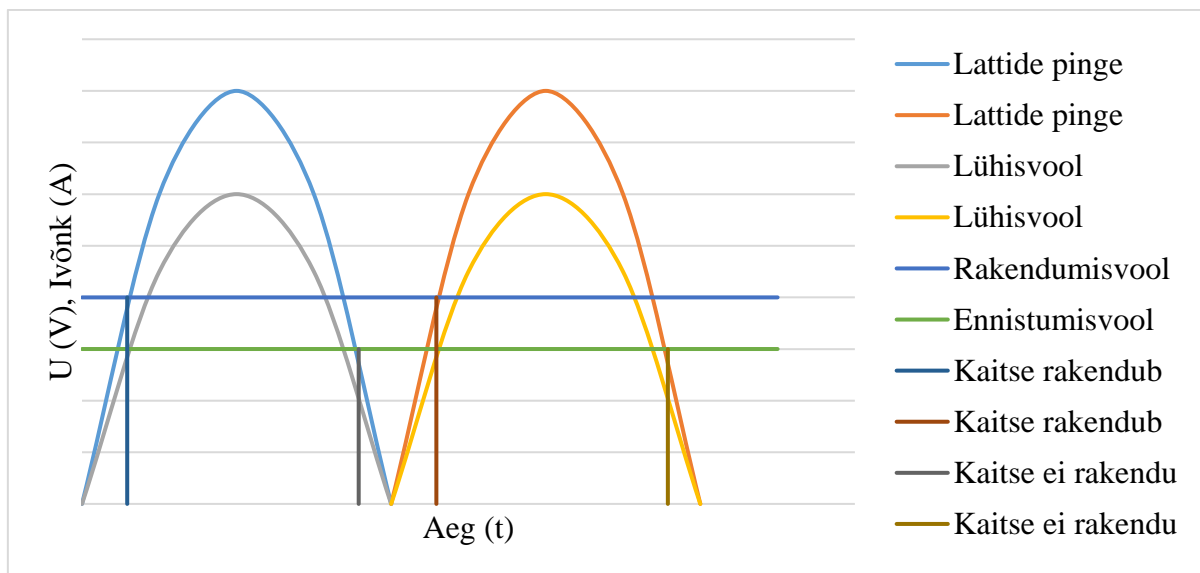
Rääkides  $U_{võnk}$  mis on väga oluline releekaitse seisukohast siis joonisel 4.2 on toodud pinge jägunemise skeem liinis L1. Joonisel 3.2 On võimalik näha, et pinge mis on kahe süsteemi keskel saab võrdseks nulliga. Antud punkti nimetatakse võnkumise keskpunktiks. Samuti seda punkti vektor on toodud joonisel 4.1 mis on risti vektoriga  $\Delta E$ .



**Joonis 4.2 Pingejagunemisskeem liinis L1**

Analüüses seda olukorda, on võimalik väita, et voolule, pingele ja takistusele reageerivad releekaitse liigid võivad võnkumise korral rakenduda. Pingele ja takistusele reageerivate releekaitsete jaoks võivad kõige ebasoovituslikumad olukorrad esineda võnkumise keskpunktis.

Võnkumise periood  $T_{võnk}$  sõltub sellest, kui suur pöörsageduse vahe on sünkroongeneraatori vahel. Mida suurem on vahe  $\omega_A$  ja  $\omega_B$  vahel seda väiksem on võnkumise periood  $T_{võnk}$ . Selle tagajärjel võivad voolureled rakenduda, kui  $I_{võnk} > I_{rakend}$  ja ennustavad, kui  $I_{võnk} < I_{ennust}$ .



**Joonis 4.3 Releekaitse rakendumis ja mitterakendumis tsoonid**

Võnkumise ajal on võimalik mitte ainult releekaitse valerakendumine, kuid ka mitterakendumine lühise korral. Kui kahe omavahel võnguvate süsteemi vahel asub nende keskel alajaam kus mingis fiidris on toimunud lühis, siis antud alajaama pinge hakkab

pulseerima sama sagedusega kui süsteemide vaheline võnkumise periood. Koos pingega hakkab pulseerima ka lühisvool. Kui võnkumisperiood saab olema väiksem kui releekaitse rakendumise ajasäte ning lühise miinimumvool saab olema väiksem kui ennustusvool, siis releekaitse ei suuda ahelat välja lülitada. Joonisel 4.3 on toodud näide, et kahe amplituudi vahel kaitse mitterakendumise ja rakendumise vahel ei saa releekaitse välja lülitada ahelat, kus on toimunud rike, mis võib omakorda viia suurele avariile [25].

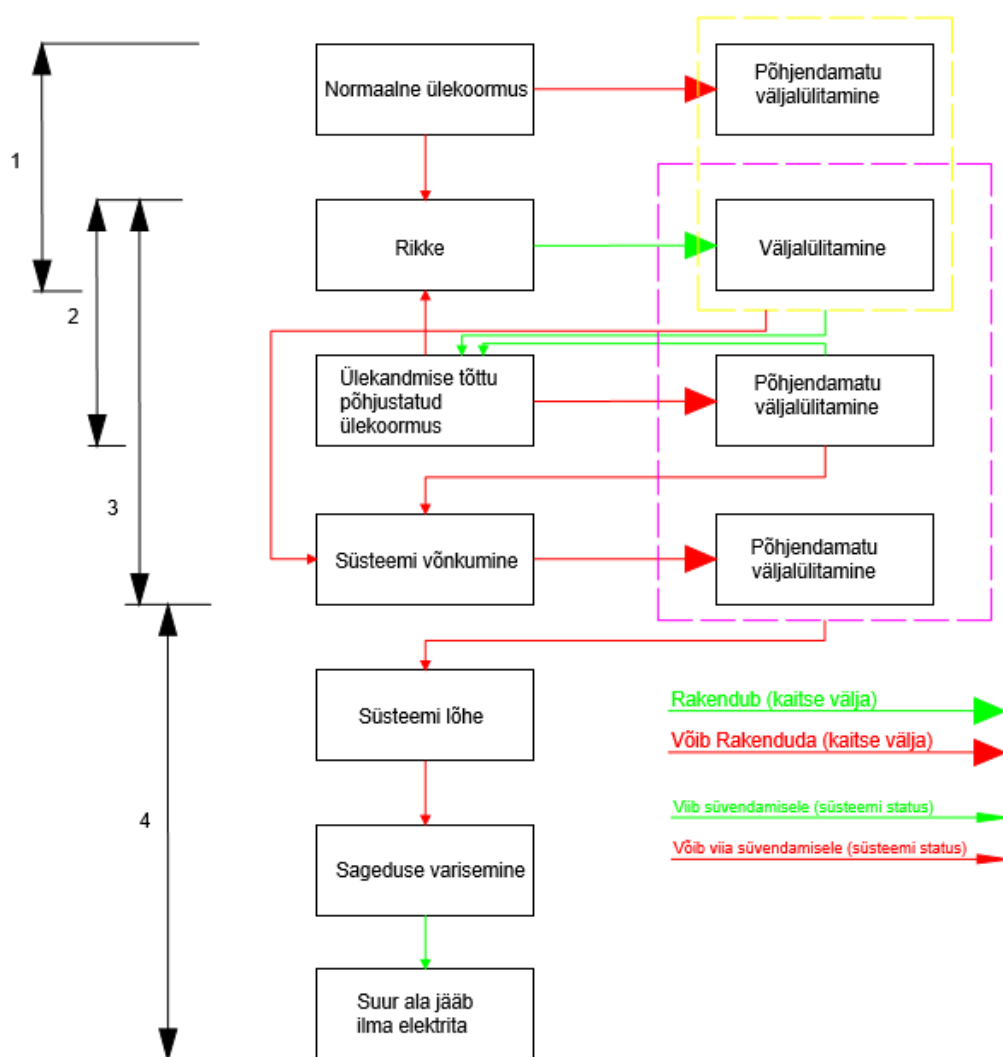
## **4.2 Reservkaitse vale rakendumine süsteemi ülekoormuse ajal**

Ülekoormus on ebanormaalne situatsioon, kuid see on väga loomulik elektrisüsteemide jaoks. Tavaliselt jagatakse ülekoormust kaheks osaks: esimene on tavaline ülekoormus ja teine on avari ülekoormus. Tavaline ülekoormus peab olema prognoositud projekteerimise käigus, mis analüüsib elektrisüsteemi töökindlust n-1 või n-2 korral. Kui süsteem on avari ülekoormuse režiimis, siis kõige tähtsam on säilitada süsteemi stabiilsust, kasutades erinevaid meetmeid. Nende meetmete seas võib olla koormuste väljalülitamine, olemasolevate reservide sisselülitamine, generaatorite ergutuste kiire muutmine, automaat taaslülituse kasutamine, liinide induktiivtakistuste vähendamine (paralleelliinid), pikikondensaatorite kasutamine, elektriliinide nimipingete suurendamine. Kuid kahjuks mitmetes elektrisüsteemi katkestustes oli süüdi ülekoormuse relee kiire rakendumine, mis lülitas välja elektriliinid varem kui erakorraline juhtimissüsteem tegi otsuse kuidas käituda. Kiire rakendumine mõjus väga halvasti võimsusvoogudele ja viis elektrisüsteemi stabiilsuse avari olukorrani. Joonisel 4.4 on toodud tüüpilised avari leviku ja kaitse toimimise diagrammid. Esimene etapp, millest võib avari alguse saada, on releekaitse vale- või kiirrakendumine. See viib süsteemi ülekoormusrežiimi, mis edaspidi võib viia süsteemi võnkumisele ehk kolmandasse etappi. Kui eespool toodud meetmed ei suuda säilitada elektrisüsteemi stabiilsust, siis hakkavad süsteemis toimuma kaskaadsed väljalülitused, mis võivad viia tulemuseni, kui suur arv elektritarbijaid jäävad ilma elektrita.

Selleks, et valerakendumist piirata, on vaja ülekoormuse kaitset ajaliselt nihutada. Siiski, kui elektriliin jääb ülekoormatuks, võib see viia elektriliinide kuumenemisele või vajumise suurenemisele mis võib põhjustada lühise teket. Seega, kui käsitletakse ülekoormuskaitse probleemi, peavad põhilisteks kaitseprintsipiideks olema:

- Kui elektriliinis tekib rike, siis kiire releekaitse peab õigeaegselt rakenduma
- Kui elektriliin on ülekoormatud, kuid ei ohusta seadmeid, siis releekaitse peab toimima õieti

- On vaja võtta meetmed et vähendada ülekoormust ja seega ka süsteemi ohtu



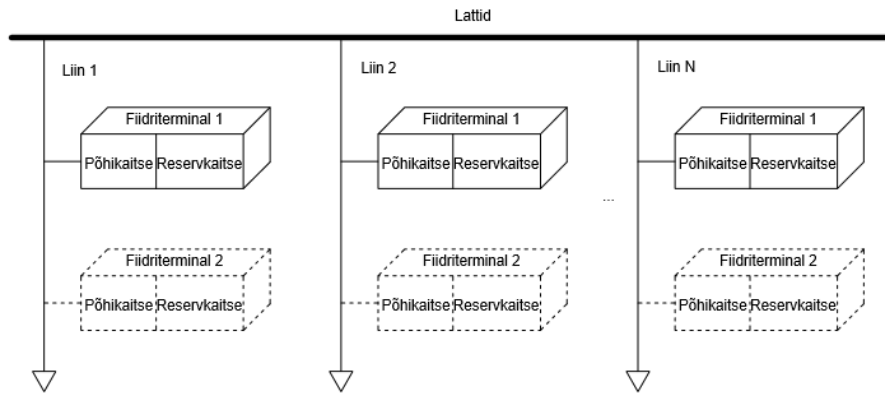
*Joonis 4.4 Avarii levik ja kaitse diagram*

### 4.3 Integreeritud relekaitse reserveerimis skeemid

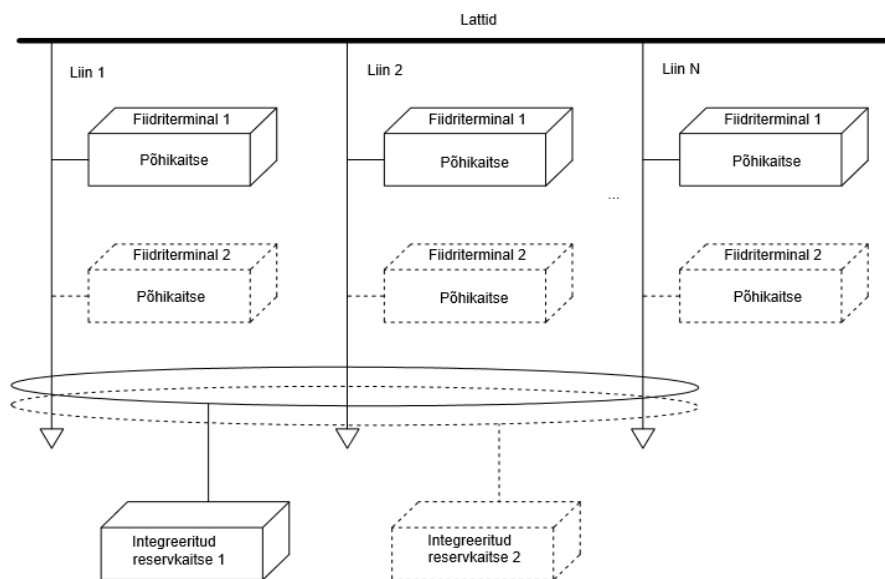
Selleks et lahendada tänapäeval reserveeritud eksisteerivad probleemid, peab olema rakendatud uus skeem, mille peamised omadused on [5]:

- Reserveeritud ehk backup peab olema eraldatud põhikaitsest iga fiidriterminali seisukohast
- Reserveeritud igast fiidriterminalist peab olema integreeritud ühte kaitseadmesse. Antud reserveeritud liiki nimetatakse integreeritud reserveeritud kaitseks. Teisisõnu üks reserveeritud kaitseaseme asub ühes alajaamas. Selleks, et tõsta reserveeritud kaitsete töökindlust, kasutatakse antud kaitsete dubleerimist

- Iga põhikaitse liik peab töötama iseseisvalt. Tal peab olema individuaalne mõõtmise ja väljalülitamise tööprintsip. Samal ajal võivad erinevad põhikaitse liigid asuda ühes alajaamas reelekaitse tõhususe suurendamiseks.



**Joonis 4.5 Tänapäevane reelekaitse süsteem**



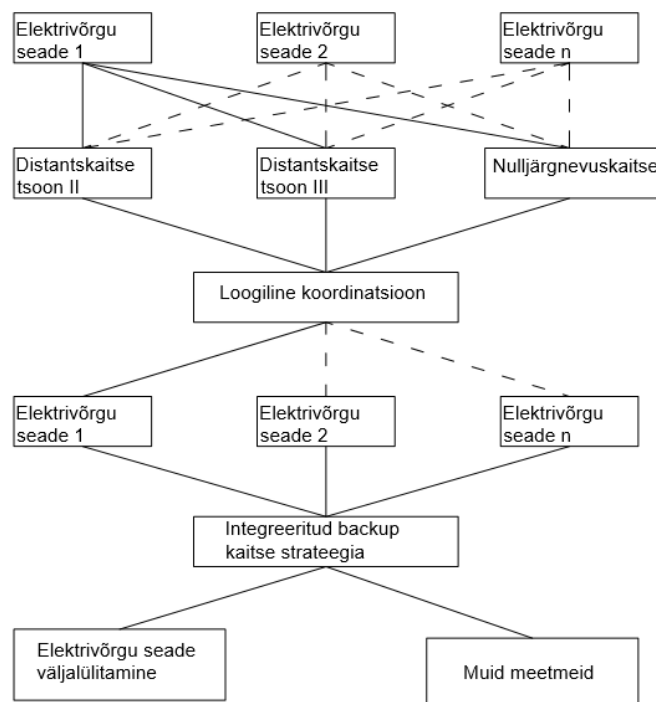
**Joonis 4.6 Integreeritud reserv reelekaitse süsteem**

Joonistel 4.5 ja 4.6 on näha erinevusi tänapäevase ja integreeritud reserv reelekaitse vahel.

Integreeritud reserv reelekaitstes peavad olema rakendatud kaugkaitse ja nulljärgnevusvoolu kaitse võimalused. Selleks, et integreeritud reservkaitse toimiks õieti ja jagaks informatsiooni fiidrite vahel, peab olema lisatud optimeeritud ülekoormuse algorütm kus peab olema lisatud võnkumise blokeeringu ja suure impedansi rikke avastamise võimalused. Suure impedansi rikke avastamiseks tavaliselt kasutatakse algorütm mis jälgib kõrgemate harmoonikute sisaldust elektrisüsteemi laine kuju. Samuti kontrollitakse saadud tulemused normaalse

lainekujuga ja tehakse otsused kas lainekuju moonutus on tingitud suure impedansi rikke tagajärjel või mitte.

Nagu on toodud joonisel 4.7 on reserv releekaitse esimeseks eeliseks koordinatsiooni loogika, mis sisaldab koordinatsiooni erinevate kaitseliikide vahel (kaugkaitse II tsoon, III tsoon, nulljärgnevusvoolu kaitse jne). Teiseks eeliseks on individuaalse informatsiooni olemasolu alajaamas asuvate jaotusseadmete kohta, mis annab võimaluse veelgi nutikama integreeritud reserv releekaitse toimimiseks. Kõik need eelised aitavad tõsta elektrisüsteemi stabiilsust, töökindlust ja väldivad ebanormaalseid rakendumisi releekaitse valdkonnas.



**Joonis 4.7 Integreeritud reserv releekaitse töörežiim**

### 4.3.1 Integreeritud releekaitse reserveerimise eeliste näited ülekoormuse ja võnkumise ajal

#### 4.3.1.1 Ülekoormusel põhjustatud rikke kindlaks tegemine integreeritud releekaitse reserveerimise abil

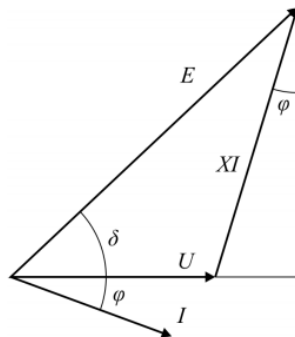
Antud näidisel on toodud 500 kV neli paralleel elektriliini ( $R_L = 0,03 \frac{\Omega}{km}$ ;  $R_0 = 0,19 \frac{\Omega}{km}$  ja  $X_L = 0,27 \frac{\Omega}{km}$ ;  $X_0 = 1,31 \frac{\Omega}{km}$ ) pikkusega 200 km koos kahe toiteallikatega ( $Z_1 = 10\Omega$  ja  $Z_2 = 50\Omega$ ). Eeldades et normaalsel olukorral elektromotoorjõu ja pinge vaheline nurk  $\delta = 60^\circ$  on toodud joonised 3.9 mis näitavad kuidas integreeritud reservkaitse käitub liini

ülekoormuse olukorras. Tabelis 4.1 on toodud juhtumine loetelu mis aitab ette kujutada nurkkarakteristikute käitumist erinevate olukordade ajal.

**Tabel 4.1 Juhtumite ajakava**

Aeg	Juhtum
T1	Liin L1 lülitakse välja ilma rikketa
T21	Liinis L2 faasi A rikke
T22	Liinis L2 faasi A väljalülitamine ja kahefaasilise (B ja C) töörežiimi säilitamine
T31	Liinis L3 faasi A rikke
T32	Liinis L3 faasi A väljalülitamine ja kahefaasilise (B ja C) töörežiimi säilitamine
T23	Liinis L2 faasi A automaatne taaslülitamine
T24	Liinis L2 faasi A ATL ebaõnnestumine ja kogu liini väljalülitamine
T33	Liinis L3 faasi A automaatne taaslülitamine
T34	Liinis L3 faasi A ATL ebaõnnestumine ja kogu liini väljalülitamine

Eeldades et tarbijate  $\cos\varphi = 0,95$  ning elektromotoorjõu ja pinge vaheline nurk  $\delta = 60^\circ$  on võimalik kasutada elektrisüsteemi vektordiagrammi joonisel 4.8 leida vastat vektorit faasi A jaoks ja võrrelda saadud tulemusi joonisel 4.9 saadud kõveratega.



**Joonis 4.8 Elektrisüsteemi vektordiagramm**

Normaalsel olukorral elektromotoorjõu vektor  $E$  leitakse lähtudes sellest et ta jääb  $90^\circ$  maha teda põhjustava magnetvoo vektorist. Leides nurka  $U$  ja  $XI$  vahel oli võimalik kasutada siinus teoreemi:

$$\frac{U}{\sin 12^\circ} = \frac{E}{\sin 108^\circ} = \frac{XI}{\sin 60^\circ} \quad (4.5)$$

$$E = \frac{500kV \cdot \sin 108^\circ}{\sin 12^\circ} = 2287kV$$

$$XI = \frac{500kV \cdot \sin 60^\circ}{\sin 12^\circ} = 2082kV \rightarrow I = \frac{2082kV}{10 + 13,5 + 50} = 28,3 A$$

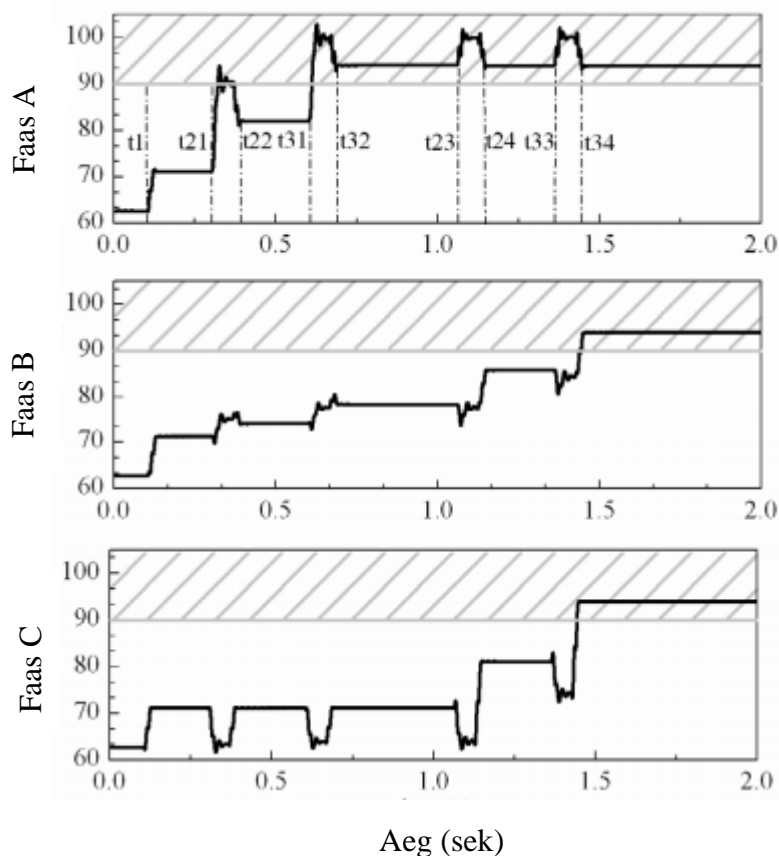
$$\text{Generaatori võimsus on siis: } P = \frac{EU}{X} \sin \delta = \frac{2287 \cdot 500}{73,5} \sin 60^\circ = 13,47MW$$

T1 ajal kui liin L1 lülitakse välja siis hüppeliselt muutub takistus  $X = 73,5\Omega \rightarrow 78\Omega$  ja kogu koormus jagatakse kolme liini vahel. See toob endaga kaasa elektromotoorjõudude vektori ja generaatori võimsuse muutumise. Samuti suurendavad emj ja pinge vaheline nurk  $\delta$  kõiges kolmes faasis  $\delta = 60^\circ \rightarrow \sim 70^\circ$ .

Lühise olukorral T21-T22 ajal faasi A dünaamiline stabiilsus jääb pärast generaatori võnkumist taastatuks ja ei ületa  $\delta < 90^\circ$  ehk jääb noormide piires. Vastavad arvutused on toodud allpool:

$$\frac{U}{\sin 12^\circ} = \frac{XI}{\sin X} \rightarrow \frac{500kV}{\sin 12^\circ} = \frac{84,15 \cdot 28,3}{\sin X} \rightarrow \arcsin 0,99 = 82^\circ$$

Vaadates joonist 4.9 on näha et pärast siirdeprotsessi lõpetamist faasi B koormus natuke suureneb. Faasi C nurkkarakteristik siirdeprotsessi ajal kukub tänu sellele et ühefaasilise lühise korral pingetervetes faasides suureneb  $\sqrt{3}$  korda kuid lõppus saavutab oma algväärtuse.



**Joonis 4.9** Faaside nurkkarakteristikud erinevate juhtumite korral



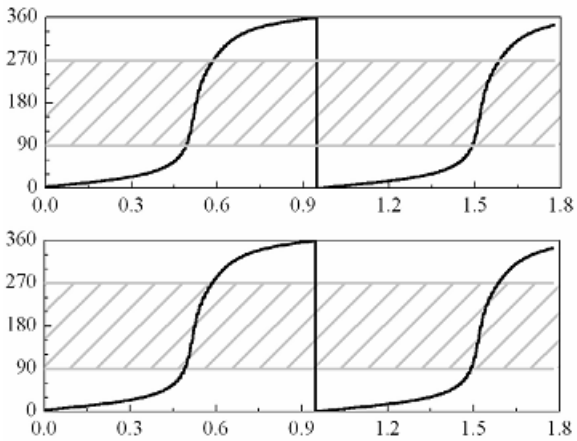
Analüüsidest kõik järgmised juhtumid on võimalik veenduda et ülekoormatud liin L4 mis jääb viimaseks sisselülitatuks peab vastu kuni L3 liini väljalülitamiseni. Releeterminal mis asub liini L4 alguses paneb MHO releed rakenduma kuna integreeritud reservkaitse enam ei suuda leida lahendusi ülekoormuse taluvusele.

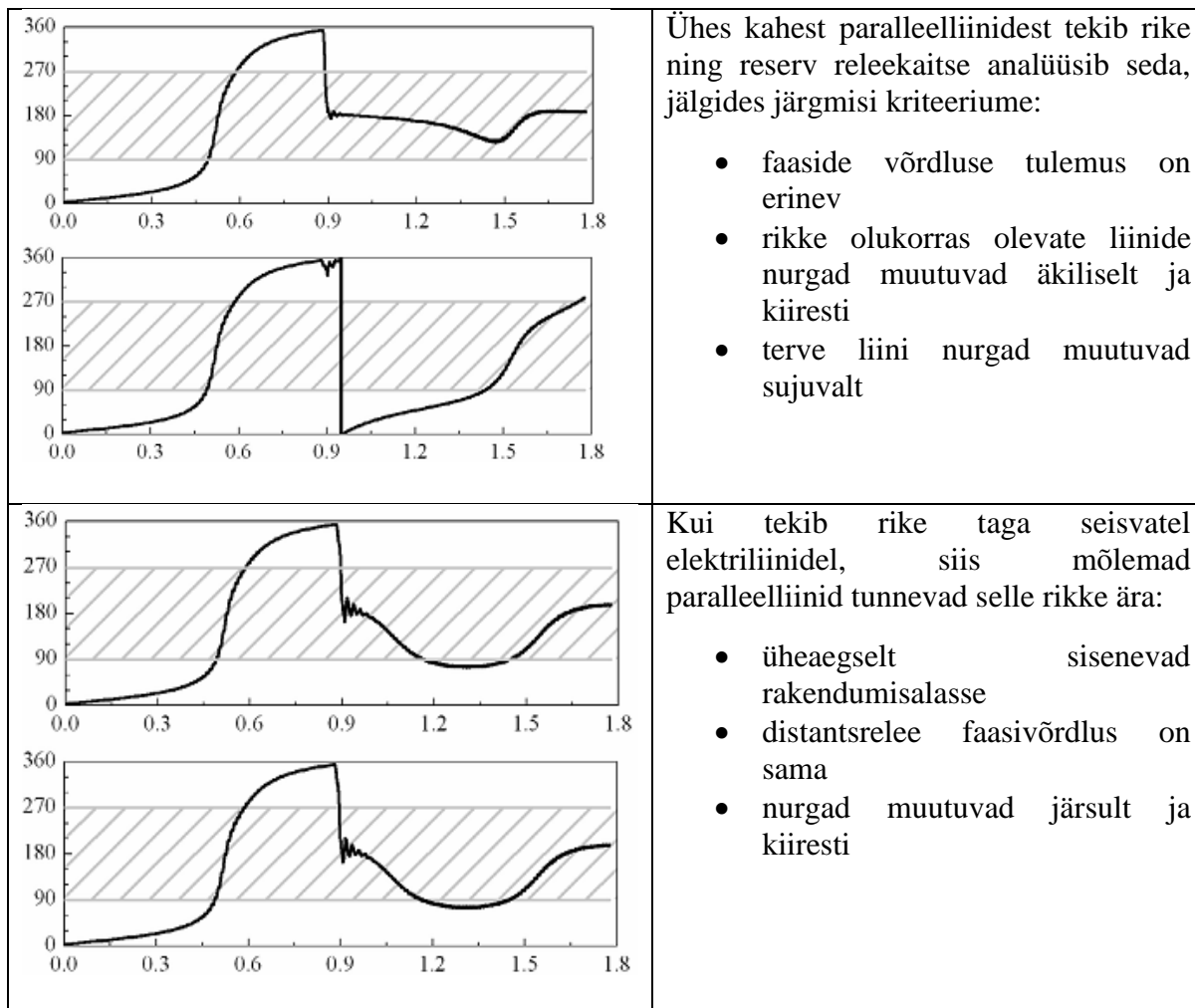
Tänapäeval teostatakse terminalide vaheline side GOOSE IEC61850 protokollide abil. Antud protokoll annab võimaluse integreeritud reserv releekaitsele tuvastada efektiivselt ülekoormuse režiimi ja teha vastavad otsused (kas blokeerida mõned kaitseliigid või välja lülitada koormused), et säilitada elektrisüsteemi stabiilsus normaalses seisundis [5].

#### 4.3.1.2 Võnkumisel põhjustatud rikke kindlaks tegemine integreeritud releekaitse reserveerimise abil

Kui ühes kahest paralleelliinidest tekib rike ja on võimalik mõõta nii voolu kui ka pinget, siis on võimalik kindlaks teha rike ja võnkumise iseloom. Tabelis 4.2 on toodud erinevad olukorrad, kuidas on võimalik kindlaks teha elektrisüsteemi võnkumine ja vastavalt sellele ka õieti reageerida.

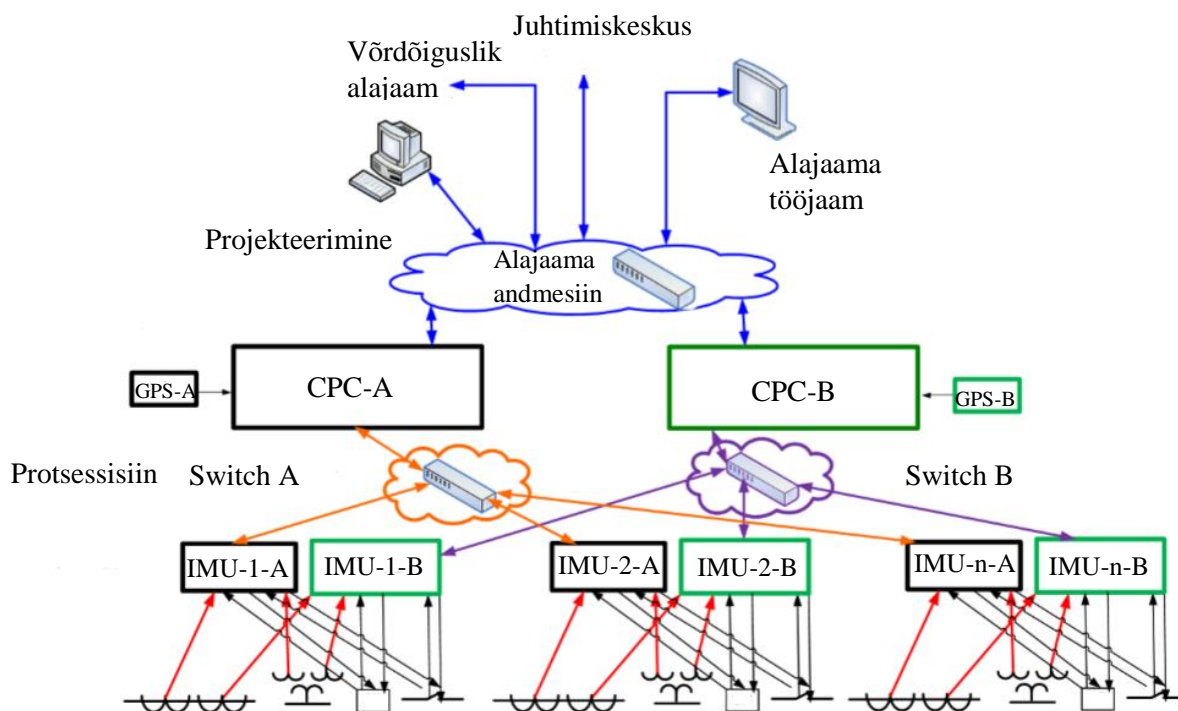
**Tabel 4.2 Süsteemi võnkumise kindlaks tegemine elektriliini kõverate analüüsi abil**

	<p>Kahe paraleelse elektriliini võrdlus süsteemi võnkumise ajal. Triibuline ala on rakendumisala. Ühe liini informatsiooniga võiks antud olukorra puhul distantsreleekaitse rakenduda ja liini välja lülitada. Selle vältimiseks on vaja jälgida mõlemat liini koos, seejuures peavad need vastama järgmisele kriteeriumitele:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• mõlema liini nurgad peavad sisenema rakendusala üheaegselt</li> <li>• distantsrele faaside võrdlus on sama</li> <li>• faaside kõverad aeglaselt muutuvad</li> </ul>
---	---



#### 4.4 Integreeritud releekaitse reserveerimise võimalused tarkvara abil

Informatsiooni jagamine IED vahel andis suurepärase võimaluse releekaitse tõhususe tõstmiseks. Üheks peamiseks eesmärgiks on kasutada tsentraliseeritud alajaama, kuhu oleks võimalik saata kõiki saadud mõõtmised. Tsentraliseeritud kaitse ja kontrollimise alajaam (CPC), mis täidab kaitsmise ja kontrolli funktsioone, pakub väga head tootlikust mõõtmise, kaitse, seire, kommunikatsiooni valdkondades. CPC rakendamiseks alajaamade jaoks õige arhitektuuri kasutamine toimus eksperimentaalselt, analüüsides kõiki negatiivseid ja positiivseid külgi [13].



**Joonis 4.10 CPC on ühendatud läbi reserv Ethernet LAN arhitektuuri**

Joonisel 4.10 on toodud struktuurskeem, mis täidab täielikult reserveerimisvõimaluse ülesannet jaotusvõrgus. Kõik mõõtmisahelad ning jaotusseadmete sisendid ja väljundid on ühendatud läbi teise süsteemi B. Antud skeemi puhul kasutatakse mõõtmistulemuste saamiseks voolu ja pinge optilisi andureid. Voolu optiline mõõteandur kasutab Faraday efekti, mille põhimõte seisneb selles, et polariseeritud valgus läbib magnetväljas asuvat kristalli ja muudab oma polariseeritud valguse vektorit. Pinge optiline andur kasutab Pockelsi efekti, kus valgus suunatakse alguses ringpolarisaatorile, see valgus läbib elektriväljas asuvat kristalli ja väljundisse jõuab ellipsikujuline valgus. Polariseerimise erinevus sõltub sellest, kui intensiivne on elektrilinevõlli Pockelsi kristalli asukohas.

Veel üheks voolude mõõtmise võimaluseks on Rogowski rõngade kasutamine. Rogowski rõngas tekkiv emf on proportsionaalne voolu muutmisele  $\frac{dI}{dt}$ . Sellisel juhul mõõdavad sekundaarseamed väljundi pinget mis on  $90^\circ$  nihkes seda põhjustava magnetvoo vektoriga. Pinge mõõtmise põhjuseks on õhksüdamikuga trafo kasutamine, kusjuures nende vastastikune induktiivsus on väga väike võrreldes tavaliste mõõtevoolutrafodega. Rogowski rõngade väljundpinge on väga väike (normaalses olukorras mV ning rikete korral mõned voltid). Tulemuseks on see, et Rogowski rõngade sisendsignaal mikroprotsessorrelees peab olema teostatav ainult suure impedansiga releedele. Suur eelis Rogowski rõngadel on nende lineaarne karakteristik, mida ei saa küllastada [24].

IMU ehk Intelligent Merging Unit, mis on toodud joonisel 4.10, koosneb kahest funktsioonist. Teiste sõnadega see on ühine seade, mis koosneb Merging Unit ja PIU/PID (process interface unit/device) kombinatsioonist. Tavaline Merging Unit on seade, mis kogub multikanalite kaudu analoogsignaale mõõtetrafodest, sünkroniseerib neid, filtreerib, digitaliseerib ja saadab IEC61850-9 protokollide kaudu eespool seisvate kaitse-, mõõte- ja kontrollimiseadmetele ehk antud puhul CPCsse. PIU/PID funktsiooni eesmärk on avaldada analoogväljundi mõõtmisi ja seadmete staatust, samuti see võib täita erinevaid käske seadmete rakendamiseks. Nende kahte funktsioonide kombinatsioon annabki võimaluse IMU toimimiseks.

Kõik IMU on ühendatud CPCga Process bus Ethernet LAN network (protsessisiin alajaama Ethernet kohtvõrgu) kaudu. IMU saadavad valikväärtusi GOOSEs CPCesse ning võtavad vastu käsklusi CPCst GOOSE kaudu. Alajaama andmesiin saadab omakorda Ethernet side kaudu toimuvast informatsiooni kõrvalalajaamadesse, juhtimiskeskusse, alajaama tööjaamadesse ja insenerikeskusse.

#### Joonise 4.10 töökindluse ja hinna analüüs.

Töökindluse esitamiseks kasutatakse *mean time to failure* (MTTF), mis on keskmine süsteemi tõrgetevaba tööaeg või keskmine taasteaeg. MTTF väärtused erinevate komponentide jaoks on toodud tabelis 4.2. Seadmete kättesaadavuse arvutamiseks on kasutatud keskmist taasteaega (MTTR), mis on 24 tundi ühe seadme jaoks.

**Tabel 4.2 MTTF ja Kättesaadavuse parameetrid**

SAS komponendid	MTTF(aastates)	Kättesaadavus
IED koos kommunikatsiooni liidesega	100	0,999972603
IMU koos kommunikatsiooni liidesega	100	0,999972603
Ethernet kohtvõrgu kommutaator	50	0,999945208
Valguskaabel	500	0,999994521
CPC koos kommunikatsiooni liidesega	100	0,999972603

Töökindluse arvutamise ajal on arvestatud järgmise tingimusega:

- võimsuslülitite ja mõõtrafode töökindlus ei ole arvestatud antud arvutamises
- kaitseeadmete arv mis on kasutusel koos CPCga on 16 seadet
- protsessisiin koosneb 4 Ethernet kohtvõrgu kommutaatorist mis on ühendatud Ring konfiguratsiooniga

Selleks et analüüsida joonise 3.10 töökindlust on vaja koostada töökindluse valemi:

*Töökindluse koefitsent*

$$\begin{aligned} &= \text{üks kahest kombinatsioonis töökorras (CPC + 1 Valguskaabel} \\ &+ 16 \text{ IMU + kolm neljast valguskaablist on rikkes} \\ &+ 4 \text{ Ethernet kohtvõrgu kommutaatorid} \\ &= \text{üks kahest kombinatsioonis töökorras} \left( \frac{1}{100} + \frac{1}{500} + \frac{16}{100} + \frac{1}{125} \right. \\ &\left. + \frac{4}{50} \right) = \frac{0,26 \cdot 0,26}{0,26 + 0,26} = 0,13 \end{aligned}$$

Antud puhul:

$$MTTF = \frac{1}{\text{töökindluse koefitsent}} = \frac{1}{0,13} = 7,69 \text{ aastat}$$

Ja kättesaadavus:

$$\text{Kättesaadavus} = \frac{7,69}{7,69 + \frac{1}{365}} = 0,99964$$

Saadud tulemus on kõige parem võrreldes erinevate arhitektuuridega mis on toodud [13].

Analüüsisides joonise 4.10 hinda on vaja kindlaks teha ligikaudsed komponentide hinnad. Üks IMU seade on umbes 2350€, pikk valguskaabel 940€, lühike valguskaabel 280€, Ethernet switch 6600€. CPC hinda siin ei ole arvestatud sest erinevate tootjate CPCd hinnad võivad erineda üksteist. Kuna antud skeem on täiesti reserveeritud ja omab kõige suurema töökindluse, siis loogiline et ta on siis kõige kallim. Vastavad tulemused on toodud allpool.

$$\begin{aligned} \text{Hind} &= 2 \cdot \text{CPC} + 32 \cdot \text{IMU} + 2 \cdot \text{Pikk valguskaabel} + 40 \cdot \text{Lühike valguskaabel} + 8 \\ &\cdot \text{Ethernet switch} = 2 \cdot \text{CPC} + 141080\text{€} \end{aligned}$$

Võrreldes teiste arhitektuuridega, antud arhitektuur on peaaegu kaks korda kallim.

Kui rääkida kokkuvõtlikult reserveerimise võimalustest tark-võrgus - on vaja veenduda. et reservkaitse töötab sama efektiivselt kui ka põhikaitse. Integreerides eespool vaadatud võimalusi reserveerimise parandamiseks, annavad need võimaluse elektrisüsteemi kindlaks opereerimiseks ja rakendamiseks, mis vähendab *blackouti* tekkimise võimalust. Samuti on vaja õigesti valida vastav IEC61850 protokollil baseeruv arhitektuur. On vaja kaaluda kõike riske, vaadata töökindluse koefitsenti ning majanduslikult täpsemalt analüüsida tulevasi kulusid.

# Lõputöö kokkuvõte

Tänapäeval on releekaitse ja automaatika üks kõige tähtsamatest ja olulisematest valdkondadest kogu elektroenergeetika tsükliks. Antud lõputöös käsitletud teema annab võimaluse teostada nii elektrienergia stabiilse tootmise kui ka tarbimise protsessi. Releekaitse reserveerimine on lahutamatu osa kogu elektrivõrkude elementide korralikus talitluses praegusel ajal ja ka tulevikus.

Analüüsidest põhjalikult püstitatud eesmärged, mis koosnevad kaug- ja lähireserveerimise näidistest, on võimalik järeltada, et antud valdkonnas tekkivaid probleeme on võimalik lahendada ainult uute loogiliste ja komplekssete lahenduste elluviimisega.

Antud lahendused peavad vastama tänapäeva kriteeriumidele ning kuigi mitte 100% ulatuses, aga saaksid ikkagi olulisel määral tõsta kogu seadmete ja funktsiooni tõrgeteta töö kindlust. Analüüsidest iga peatükki eraldi, on võimalik tõsta esile iga peatüki oma positiivsed ja negatiivsed tegurid, mis mõjuvad reserveerimisreleekaitse tootlikkusele.

Lõputöö esimeses osas on toodud erinevad näited kaug- ja lähireserveerimisest, mis kasutavad erinevaid meetmeid nende realiseerimiseks.

Kui rääkida lähireserveerimise positiivsetest külgedest, siis on vaja ära märkida järgnevad tegurid:

- Lülitab oma objekti edukalt välja ilma lisaoperatsioonideta
- Lülitab objekti välja ilma viivitusega (kaugreserveerimine – viivitusega)
- Omavad pidevalt piisavat tundlikkust, sest neil on põhikaitsega üks ja sama kaitsetsoon

Aga selleks, et neid tegureid saavutada, peab lähireserveerimine vastama järgmistele, käesolevas lõputöös kirjeldatud nõuetele:

- Ei pea olema paigaldatud alati erinevates mikroprotsessorkaitsetes
- Neil peavad olema võimsuslülitiga sõltumatud ühendused (kui võimsuslüliti lubab, siis kaks väljalülitamise mähist)
- Neil peavad olema sõltumatud ühendused voolutrafodest (erinevatest voolutrafodest või erinevatest sekundaarmähistest)
- Neil peavad olema erinevad kaitsepõhimõtted võrreldes põhikaitsega
- Neil peab olema eraldi toide alajaamas (kui see on võimalik)

- Peavad olema hästi projekteeritud ja läbimõeldud blokeeringu skeemid
- Terminalide pideva enesekontrolli teostamiseks valvekoera kasutamine
- Selektiivsuse kõverate omaduste kasutamine sätte automaatsel muutumisel

Muidugi on soov esile tõsta just lähireserveerimise olulisust võrreldes kaugreserveerimisega, kuna viimase puudusteks on mõju suurele tarbijate arvule, tunduvalt suurem viivitus oluliste rikete puhul või ebapiisav tundlikkus lühise ajal. Samal ajal on lähireserveerimine majanduslikust seisukohast palju kallim võrreldes kaugreserveerimisega, mis on programmeeritav juba igas kaasaegses mikroprotsessoripõhises terminalis.

Kuigi kaugreserveerimisel on lähireserveerimisega võrreldes kordades rohkem negatiivseid tegureid, on ikkagi olemas viisid ja võtted nende mõjude vähendamiseks elektrivõrkudes. Kolmandas peatükis on konkreetse standardse elektrivõrgu näitel põhjalikult kirjeldatud, kuidas, kasutades tänapäeva kaugreserveerimise arvutamise ja analüüsimise algorütme, on võimalik oluliselt täiendada releekaitse rakendamist ehk suurendada releekaitse rakendamise tsooni. Antud algorütmi rakendamise unikaalsus seisneb ka selles, et lühise korral väikeste nimipingete ajal voolu väärtused tunduvalt kahanevad, kui lühisekoht jääb lülititest päris kaugemale, mis teeb kaugreserveerimise veelgi keerulisemaks. Samas on vooluvektorite juurdekasvu põhimõtet kasutades võimalik täpselt määrata kaugreserveerimise rakendamise tsooni reaali- ja imaginaarteljel. Antud lahendus saab oluliselt suurendada kaugreserveerimise rakendamise täpsust ja elimineerib valerakendumised rikete korral.

Käesolevas lõputöös on toodud erinevad näidised ja lahendused võimsuslüli tõekekaitse korral. Varem kasutusel olnud ja tänapäeval kasutatavad loogilised skeemid ja põhimõtted erinevad omavahel olulisel määral. Uuemad lahendused annavad võimaluse võimsuslüli tõekekaitse rakendamisaja vähendamiseks, mis säilitab elektrisüsteemi stabiilsust töörežiimis. On vaja pöörata tähelepanu konkreetsetele lahendustele, mis annavad võimaluse liiga väikese voolu, aga ka aperioidilise voolu tuvastamiseks pärast rikete kõrvaldamist. Teostatud ja kirjeldatud loogilisi skeeme on võimalik kasutada nii releekaitse terminalide tootjatehases kui ka programmeerides neid juba jaotusseadme komplekslahenduses sõltuvalt alajaama tellijate soovidest.

Võttes arvesse releekaitse reserveerimise võimalusi oli vaja eraldi pühendada konkreetne tähelepanu kommunikatsiooni rakendamisele elementide vahel. Analüüsid tänapäevaste ja tuleviku alajaamade kommunikatsiooniskeeme, on vaja ära märkida tsentraliseeritud kaitse ja kontrollimise alajaama (CPC) olulisust, mis võib lähitulevikus asendada telemehaanikas kõik

teised projekteerimislahendused alajaamade jaoks. Antud uuendus saab vähendada reserveerimiskaitse valerakendumist (ülekoormuse või süsteemi võnkumise juhul) ja suurendada energiasüsteemi tõhusust.

Kokkuvõtlikult tuleb tunnistada, et releekaitse reserveerimine ei seisa paigal, vaid leitakse pidevalt uuemaid loogilisi ja tehnilisi lahendusi. Antud lõputöö põhiline eesmärk ja mõte andsid võimaluse leida konkreetsed kitsad kohad ja nende lahendused nii lähi- kui kaugreserveerimises. Kuid kõige olulisem kõikidest võimalikest järeldustest on see, et isegi kõige töökindlam ja kaasaegsem reserveerimiskaitse ei suuda samaväärselt asendada elektrisüsteemi elementide põhikaitset.



## Kasutatud kirjandus

- [1] Heiki Tammoja, "Automaatika ja releekaitse," loengukonspekt, Tallinn, 2013.
- [2] Heiki Tammoja, Ülo Treufeldt, Jako Kilter, Mati Meldorf, Jaotusvõrgud, Tallinn: AS Pakett, 2007.
- [3] Bogdan Kasztenny, Michael J. Thompson, "Breaker Failure Protection – Standalone or Integrated With Zone Protection Relays?," in *2nd Annual Protection, Automation and Control World Conference* , Dublin, 2011.
- [4] Terence G. Hazel, Jacques Tastet, Noel Quillion, Bruno Lusson, "Implementing back-up protection using microprocessor based multifunction relays," IEEE, France.
- [5] Xinzhou Dong, Runbin Cao, Liu Cui, Bin Wang, Shenxing Shi, Dominik Bak, "Integrated Backup Protection Scheme in Smart Grids," Beijing, 2013.
- [6] Powell, "Partial Differential Relaying," Houston, 1992.
- [7] K. & N. B. LINE, "" 86 " LOCKOUT RELAY".
- [8] Schneider Electric, "The watchdog : a main component in the protection scheme," Detsember 2005.
- [9] Schneider Electric, "Restricted earth fault protection using an I0 input of VAMP relay," 2013.
- [10] Mario Haim, Helmut Spitzer, Dr. Uwe Kaltenborn, Dr. Raimund Summer, Harethe El Oudhane, "Solutions for internal arc protection ACC.IED 62271-200 with pressure relief into the switchgear room for gas and air insulated medium voltage swithgears," in *21st International Conference on Electricity Distribution* , Frankfurt, 2011.
- [11] Héctor J. Altuve, Michael J. Thompson, Joe Mooney, "Advances in Breaker-Failure Protection," SEL, 2006.
- [12] Armando Guzmán, Casper Labuschagne, Bai-Lin Qin, "Reliable Busbar and Breaker Failure Protection With Advanced Zone Selection," in *31st Annual Western Protective Relay Conference* , Washington, 2004.
- [13] Mital Kanabar, Ratan Das, "Centralized substation protection and control," 2015.
- [14] Jeff Roberts, Tony J. Lee, "Measuring and Improving DC Control Circuits," in *Beijing Electric Power International Conference on Transmission and Distribution* , Beijing, 1999.
- [15] Tavrida Electric Export, *Medium-Voltage Switchgear*, Tallinn, Harjumaa, 2014.

- [16] К.И.Никитин, "Вычисление зоны срабатывания токовой защиты," *Омский научный вестник*, pp. 74-77, 2007.
- [17] Михаил Пирогов, Илья Иванов, Сергей Гондунов, "Проблема дальнего резервирования в сетях," *Новости ЭлектроТехники*, pp. 2-3, 2011.
- [18] В. Саженков, Защита электрических сетей, Schneider Electric, 2006.
- [19] Н. Механотроника, "БЛОК МИКРОПРОЦЕССОРНЫЙ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ".
- [20] АBB, "Tmax".
- [21] A. Varat, "Ground Fault Detection and Protection For Motors," *Electrical Line*, pp. 52-53, 2003.
- [22] Д. М. Рохита Джаясинхе, "Моделирование насыщения трансформаторов тока для изучения устройств релейной защиты," *НАУКА*, pp. 44-46, 2004.
- [23] М. СТАНДАРТ, Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ, Минск, 1995.
- [24] Студопедия, "Студопедия," 2013. [Online]. Available: [http://studopedia.su/9\\_29214\\_lektsiya--izmereniya-silnih-tokov-na-osnove-magnitnih-effektov-poyas-rogovskogo.html](http://studopedia.su/9_29214_lektsiya--izmereniya-silnih-tokov-na-osnove-magnitnih-effektov-poyas-rogovskogo.html).
- [25] Н.В.Чернобровов, Релейная защита энергетических систем, Москва: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ, 1998.