



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO

INSENERITEADUSKOND

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**EESTI ÜLEKANDEVÕRGU ALAJAAMADE SF₆
VÕIMSUSLÜLITITE SEISUNDI HINDAMISE
METODOLOGIA ARENDAMINE JA ANALÜÜS**

**DEVELOPMENT AND ANALYSIS OF CONDITION
ASSESSMENT METHODOLOGY FOR SF₆ CIRCUIT
BREAKERS IN ESTONIAN TRANSMISSION NETWORK**

MAGISTRITÖÖ

Üliõpilane: Tauri Kalmet

Üliõpilaskood: 192030AAVM

Juhendajad: Jako Kilter, professor
Henri Manninen

Tallinn 2021

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

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

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

Autor:

/ allkiri /

Töö vastab magistritööle esitatud nõuetele

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

Juhendaja:

/ allkiri /

Kaitsmisele lubatud

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

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina Tauri Kalmet,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose Eesti ülekandevõrgu alajaamade SF₆ võimsusülilitite seisundi hindamise metodoloogia arendamine ja analüüs

mille juhendajad on Jako Kilter ja Henri Manninen,

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

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

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

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

18.05.2021

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

<i>Autor:</i> Tauri Kalmet	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Eesti ülekandevõrgu alajaamade SF ₆ võimsuslülitite seisundi hindamise metodoloogia arendamine ja analüüs	
<i>Kuupäev:</i> 18.05.2021	81 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool	
<i>Teaduskond:</i> Inseneriteaduskond	
<i>Instituut:</i> Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut	
<i>Töö juhendajad:</i> Professor Jako Kilter, Henri Manninen	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli välja töötada kõrgepingevõrkude võimsuslülitite tegeliku seisundi ja hooldusvajaduse määratlemise meetoodika. Töös kirjeldatakse SF₆ võimsuslülitite seisundi hindamise meetoodikat, peamiselt esinevaid rikkeid ja väljakutseid nende seisundi hindamisel. Lisaks esitatakse ülevaade Eesti ülekandevõrgus kasutatavatest võimsuslülititest, nende vanuselisest jaotusest ja paiknemistest alajaamades.</p> <p>Seisundipõhise hindamise põhimõtete välja töötamise vajadust ilmestab asjaolu, et lähiaastatel tuleb, vastavalt kehtivatele hooldusplaanidele, korraka hooldada märkimisväärne arv võimsuslülititeid. Samas võimsuslülitite kulumine ja hooldusvajadus ei ole igal juhtumil sama vaid see sõltub ennekõike lülitiga teostatud operatsioonide arvust. Võimsuslülitiseisundipõhise hindamise meetoodika arendamisel uuriti varasemalt kogutud andmeid ja analüüsi nende kasutatavust. Olemasolevate andmete põhjal selgitati välja puuduv informatsioon, mida hetkel Eesti ülekandevõrgus ei koguta, kuid mis on vajalik võimsuslülitiseisundi efektiivseks määramiseks. Käesolevas töös on täiendavalt määratletud võimsuslülitid, millele n-1 olukord põhjustab võrgus katkestusi või piiranguid. Sellest tulenevalt on vajalik nende hooldamisele ja seisundi jälgimisele seada kõrgem prioriteet.</p> <p>Lõputöö tulemusena koostati SF₆ võimsuslülitiseisundipõhise hindamise meetoodika ja teostati võrdlev analüüs seisundi hindamiseks kasutatavatest erinevatest võimalikest lähenemisviisidest. Käesoleva töö tulemuste alusel on Eesti ülekandevõrgu operaatoril võimalik täiendada hetkel kasutusel olevat ajapõhist lähenemist seadme seisundi jälgimisega ja seeläbi vähendada ebavajalikke hoolduste mahtu ning sellega kaasnevaid kulusid.</p>	
<i>Märksõnad:</i> HI (Health Index), mõõteseadmed, rikked, seisundi hindamine, võimsuslülitiseisundi andmebaas, võimsuslülitid, võimsuslülitite n-1 olukord, ülekandevõrk.	

ABSTRACT

<i>Author:</i> Tauri Kalmet	<i>Type of the work:</i> Master Thesis
<i>Title:</i> Development and analysis of condition assessment methodology for SF ₆ circuit breakers in Estonian transmission network	
<i>Date:</i> 18.05.2021	81 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology	
<i>School:</i> School of Engineering	
<i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics	
<i>Supervisors of the thesis:</i> Professor Jako Kilter, Henri Manninen	
<i>Abstract:</i> <p>The objective of this thesis was to develop a methodology for determining the actual condition of high voltage networks SF₆ type circuit breakers and their maintenance requirements. Thesis includes general description of the developed methodology, discussion on possible malfunctions of SF₆ circuit breakers and covers the analysis of challenges related to assessing the circuit breaker condition in various conditions. In addition, an overview of the circuit breakers used in the Estonian transmission network, their age distribution and location in the substations is presented.</p> <p>The need for developing condition-based maintenance methodology is related to the need to service significant number of circuit breakers in the near future. This however means significant cost impact to the transmission system operator. It should also be considered that circuit breakers wear in varying degrees, depending on the number of switching operations performed and therefore their maintenance needs could be different and consequently appropriate maintenance strategy is needed. During the development of the methodology significant amount of data was processed and shortcomings together with need to obtain additional data, including measurements, were determined. This thesis also includes an assessment of importance of circuit breakers in the network considering network n-1 situation. Based on this there are circuit breakers which have higher priority for maintenance.</p> <p>The results of this thesis are directly applicable in the transmission network and it is possible for the Estonian transmission system operator to enhance its current maintenance policies and optimize its resources.</p>	
<i>Keywords:</i> HI (<i>Health Index</i>), <i>measuring equipment, failures, condition-based assessment, circuit breaker database, circuit breakers, circuit breaker n-1 situation, transmission network.</i>	

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Lõputöö teema:	Eesti ülekandevõrgu alajaamade SF₆ võimsuslülitite seisundi hindamise metodoloogia arendamine ja analüüs
Lõputöö teema inglise keeles:	Development and analysis of condition assessment methodology for SF₆ circuit breakers in Estonian transmission network
Üliõpilane:	Tauri Kalmet, 192030AAVM
Eriala:	Elektroenergeetika
Lõputöö liik:	magistritöö
Lõputöö juhendaja:	prof Jako Kilter
Lõputöö kaasjuhendaja: (ettevõtte, amet ja kontakt)	Henri Manninen henri.manninen@elering.ee
Lõputöö ülesande kehtivusaeg:	30.06.2021
Lõputöö esitamise tähtaeg:	18.05.2021

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppekava juht (allkiri)

Kaasjuhendaja (allkiri)

1. Teema põhjendus

Viimasel kümnel aastal on elektrienergia tarbimine ainult suurenenud ja tuleviku trendiks on samuti elektrienergia tarbimise tõus. Elektrit tarbivad täna väga paljud seadmed ning tuleviku perspektiivis on ette näha transpordisektori üleminekut elektrile. Tarbitavat elektrienergiat tuleb edastada energiatootmisüksustest lõpptarbijani, kelle elektriga varustamine on üks elutähtsast teenusest. Elektrisüsteemi oluliseks sõlmeks on alajaam. Alajaamas asuvad mitmesugused seadmed, mida on nende tõrgeteta talitlemise tagamiseks tarvis hooldada. Olulisteks kriteeriumiteks hoolduste planeerimisel ja läbiviimisel on nende reaalne vajalikkus ja maksumus. Ajalooliselt on seadmete hooldustele lähenetud lähtudes tootjatehase soovitudest, mis lähtuvad konkreetsetest hooldusvälpadest (sh lülituskordade arv, ajaline faktor, jm). Tänapäeval on see suund muutumas, kuna järjest enam muutub oluliseks majanduslik pool ja

sellega seonduvalt see, missugune on seadme reaalne seisukord ja tegelik hooldusvajadus. Magistritöö uurimissuunaks on kõrgepinge võimsuslülitite hooldamise põhimõtted ja võimalikud tulevikusuunad seadmete deterministliku ja tõenäosusliku hooldamise raamistikus. Kokkuvõtvalt on eesmärgiks uurida võimalusi, kuidas tagada varahalduse kulutõhuses ja seeläbi madalam võrgutasu elektrienergia lõpptarbijale.

2. Töö eesmärk

Töö eesmärk on uurida kõrgepingevõrkude võimsuslülititeid ning nende tegeliku seisundi ja hooldusvajaduse määratlemise võimalusi.

3. Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

- Kirjanduse ülevaate alusel teha kokkuvõtte teiste riikide süsteemioperaatorite praktikast võimsuslülitite vajaduspõhisel hooldusel.
- Analüüsida Elering AS-i poolt varasemalt kogutud andmeid võimsuslülitite talitlusest ja seisundist.
- Selgitada välja Elering AS-i alajaamad, kus võimsuslülitite rike põhjustab alajaamaga seonduvatel ühendustel toitekatkestuse.
- Selgitada välja Elering AS-i alajaamad, kus võimsuslülitite rike põhjustab riikide vahelise elektriülekanne piiranguid.
- Milliseid mõõteseadmeid on tehniliselt võimalik ja majanduslikult tasuv alajaama paigaldada, et kogutud andmete alusel saaks hinnata võimsuslülitite seisundit.
- Võrrelda erinevate tootjate seadmeid selgitamiseks välja optimaalsed lahendused kõrgepinge võimsuslülitite seisundi hindamiseks.
- Võimsuslülitite seisundi jälgimiseks vajaliku metoodika välja töötamine, kasutades selleks spetsiaalseid mõõtevahendeid.

4. Lähteandmed

Magistritöös kogutakse lähteandmeid järgnevatest allikatest:

- Erialane kirjandus
- Andmebaasid internetis (CIGRE, IEEEEXPLORE jt)
- Elering AS-i poolt kogutud andmed

5. Uurimismeetodid

Magistritöö eesmärgi tulemuseni jõudmiseks kasutatakse kirjanduse analüüsi ja küsitluse metoodikat. Lisaks Elering AS-i poolt varasemalt kogutud andmete analüüs,

mis ilmestavad elektrivõrgus toimuvate protsesside mõju võimsuslülitele. Võrreldakse erinevate võimsuslülite mõõteseadmete väljundeid hindamaks võimsuslüliti seisundit.

Andmete analüüsiks kasutatakse MatLabi, MS Excelit ja mõõteseadmete põhiseid spetsiifilisi programme.

6. Graafiline osa

Olulisemad joonised, tabelid ja skeemid on toodud töö põhiosas.

7. Töö struktuur

SISSEJUHATUS

1. TEOREETILINE OSA
2. SEISUNDI HINDAMISE METOODIKA
3. SEISUNDI HINDAMISE METOODIKA RAKENDAMINE
4. MAJANDUSLIK ANALÜÜS

KOKKUVÕTE

8. Kasutatud kirjanduse allikad

Kasutatud kirjandust leitakse peamiselt teadusartiklitest ja standarditest.

- [1] C. Antoun, "High Voltage Circuit Breaker and Power Transformer Failure Modes and Their Detection," IEEEEXPLORE, Moorebank, 2018.
- [2] R. Smeets, B. Baum, R. Nijman, D. Petropoulos and T. Ohtaka, "High-Voltage Circuit-Breaker Test Statistics 2011-2016 and Test Analysis Tools," CIGRE, Paris, 2018.
- [3] C. Rutledge, "Breaker Monitoring White Paper," 02 2020. [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://www.dynamicratings.com/wp-content/uploads/2020/02/200211-Circuit-Breaker-Monitoring-White-Paper.pdf>.
[Kasutatud 20. 10. 2020].
- [4] H. Wilson, G. Curcanu, H. Ito, T. Jung and T. Küng, "Failure survey on circuit-breaker controls systems," Cigre, 2007.

9. Lõputöö konsultandid

Vajadusel konsulteeritakse Elering AS töötajatega.

10. Töö etapid ja ajakava

- Kirjanduse läbitöötamine (01.02.2021)
- Lähteandmete kogumine (01.02.2021)
- Teoreetilise osa kirjutamine (01.03.2021)
- Andmete analüüsi teostamine (01.04.2021)
- Seadmete sobivuse võrdlemine (01.04.2021)
- Metoodika välja töötamine (01.04.2021)
- Järelduste kirjutamine (01.04.2021)
- Juhendajale läbilugemiseks saatmine (15.04.2021)
- Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine (01.05.2021)
- Töö lõplik versioon valmis (15.05.2021)

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
EESSÕNA	12
SISSEJUHATUS	13
1. VÕIMSUSLÜLITID ELEKTRISÜSTEEMIS	15
1.1 Elektriikaare füüsikalised omadused	15
1.2 Võimsuslülitite tüübid ja nende tööpõhimõte	17
1.2.1 Õlilülitid	18
1.2.2 Vaakumlülitid	20
1.2.3 SF ₆ tüüpi võimsuslülitid	22
1.3 Võimsuslülitite rikked	26
1.3.1 Võimsuslülitite ajami rikked	27
1.3.2 Võimsuslülitite kontaktid	28
1.3.3 Elektriikaare taassüütimine	30
1.3.4 Võimsuslülitite toite- ja juhtahelad	31
1.4 Võimsuslülitite seisundi hindamine	31
1.4.1 Ajamit mõjutavad tegurid	32
1.4.2 Kontaktide seisundit mõjutavad tegurid	33
1.4.3 SF ₆ gaasi omadusi mõjutavad tegurid	34
1.4.4 Võimsuslülitite töökindlus tulenevalt hooldusest	34
1.5 Võimsuslülitite hooldamise põhilised eesmärgid	36
1.6 Võimsuslülitite hooldamine teiste riikide näidetel	37
1.6.1 Soome ülekandevõrgu operaator Fingrid	37
1.6.2 Hollandi võrguoperaator TenneT	39
2. VÕIMSUSLÜLITITE SEISUNDI HINDAMISE METOODIKA	40
2.1 Eesti ülekandevõrgu võimsuslülitite ülevaade	40
2.2 Seisundi hindamise metoodika põhimõtted	44
2.3 Seisundi hindamise metoodika	48
3. VÕIMSUSLÜLITITE SEISUNDI HINDAMISE METOODIKA RAKENDAMINE	54
3.1 Võimsuslülitite n-1 ja n-2 olukorrad Eesti ülekandevõrgu alajaamade näitel ...	54
3.2 Võimsuslülitite seisundi hindamiseks kasutatavad mõõteseadmed ja nende kasutamine	60
3.3 Teostatud võimsuslülitite mõõtmised ülekandevõrgu 110 kV alajaamas	63
3.4 Ülekandevõrgu operaatori hetketgevused ja nende arendamise võimalused ..	65
4. MAJANDUSLIKU TASUVUSE ANALÜÜS	68
4.1 Majandusliku tasuvuse analüüsi põhimõtted	68

4.2 Majandusliku tasuvuse analüüsi sisendid.....	68
4.3 Majandusliku analüüsi tulemused.....	70
KOKKUVÕTE	74
KASUTATUD KIRJANDUS	77
LISAD	82
Lisa 1 Ülekandevõrgu võimsuslülite jagunemine tootjate järgi nimipingeklassides ...	83
Lisa 2 Võimsuslülite jagunemine ülekandevõrgu alajaamades.....	84
Lisa 3 Mõõteseadmega Omicron CIBANO 500 teostatud mõõtmiste aruanne	85

EESSÕNA

Lõputöö teema „Eesti ülekandevõrgu alajaamade SF₆ võimsuslülitite seisundi hindamise metodoloogia arendamine ja analüüs“ idee ja sõnastuse pakkus välja Tallinna Tehnikaülikooli professor Jako Kilter, kellel oli algamas projekt Eleringi varade haldamise kontseptsiooni ja metodoloogia põhimõtete väljatöötamiseks. Lõputöö teema tekitas algusest peale huvi, kuna seostus praktilise väljundiga midagi paremaks muuta. Lõputöö kirjutamiseks võimaldas juhendaja Jako Kilter kasutada Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudi labori ruumi, mis aitas hoida motivatsiooni kogu magistritöö kirjutamise perioodi.

Esmalt soovin tänada juhendajaid Jako Kilter ja Henri Manninen, kelle poole oli võimalik pöörduda, et saada nõuandeid ja soovitusi edasisteks tegevusteks.

Soovin tänada kõiki Eleringi töötajaid, kes võimaldasid ligipääsu andmetele, mida on töö koostamisel kasutatud. Lisaks suure tänu väärivad kõik Tallinna Tehnikaülikooli doktorandid, kes andsid soovitusi ja nõuandeid keerulisemate küsimuste lahendamisel.

SISSEJUHATUS

Tänapäeval on oluline elektrisüsteemi kõrge töökindlus ja selle jätkusuutlik tagamine tulevikus. Elektrisüsteem koosneb elektritootjatest ja tarbijatest ning neid ühendavast elektrivõrgust. Elektrivõrgu haldaja peamiseks eesmärgiks on tarbijate varustuskindluse tagamine. Ühiskond muutub järjest enam elektrienergiast sõltuvaks, mis seab võrguoperaatoritele kõrgendatud nõudmised seadmete hoolduste teostamisel. Sellest tulenevalt on oluline pöörata tähelepanu alajaama seadmete korrektsele hooldamisele, mis tagab kõrge töökindluse.

Praegu hooldatakse võimsuslülititeid vastavalt kehtivatele hooldusjuhenditele ja võrguoperaatori varasematele kogemustele. Hooldusjuhendid on koostatud tootjapoolsete juhendite alusel. Kirjeldatud lähenemisi puuduseks on asjaolu, et hoolduseid planeerides ei arvestata seadmete tegeliku seisundi ja hooldusvajadusega, mis võib tekitada situatsiooni, kus hoolduse järgselt oodatud seadme töökindluse suurenemist ei saavutata. Kõik alajaama seadmed ei ole võrdse prioriteediga. Sellest tulenevalt tuleb pöörata tähelepanu nendele seadmetele, mille rike põhjustab suurema mõjuga kahjusid elektrisüsteemi toimimisele.

Varasemate suuremahuliste investeeringute tulemusena on enamikud Eesti ülekandevõrgu alajaamad renoveeritud. Ajapõhise hooldamise meetodika alusel tuleb lähiaastatel teostada paljude võimsuslülitite hooldus. Enamikel juhtudel ei ole planeeritav hooldus seadme tegeliku hooldusvajadusega põhjendatud, kuna hooldatava seadme töökindlus võib olla uue seadme vääriline, see tekitab ebavajalikke käidukulusid. Võimsuslülitid peavad, lisaks normaaltalitlustoimingutele, suutma rikke olukorras väga kiirelt välja lülitada suuri voolusid. Sellest tulenevalt on võimsuslülitid elektrisüsteemi ühed tähtsamad seadmed, mis riketel kaitsevad alajaama teisi seadmeid. Kõrge töökindluse tagamiseks on oluline jälgida võimsuslülitite seisundit. Võimsuslülitite seisundi jälgimisega on võimalik tuvastada seadme kulumisele viitavaid muutuseid enne rikke tekkimist.

Käesolevas magistritöös keskendutakse SF₆ võimsuslülitite seisundi hindamisele. Teostatakse võimsuslülitite parameetrite mõõtmine ja määratakse välja töötatud meetodika põhjal võimsuslülitite seisund.

Lõputöö on jaotatud neljaks peatükiks. Esimeses peatükis esitatakse kirjanduse baasil ülevaade erinevatest võimsuslülitite tüüpidest, nende ehitusest ja tööpõhimõtetest. Kirjeldatakse SF₆ võimsuslülitite üksikosade rikkeid ja nende peamisi tekke põhjuseid.

Teostatakse ülevaade võimsuslüliti hoolduste peamistest eesmärkidest ning kirjeldatakse Soome ja Belgia näitel võimsuslülitite hooldamise lähenemisviise.

Teises peatükis tehakse ülevaade Eesti ülekandevõrgu operaatori võimsuslülitite jagunemisest vanuse, pingeklassi, tootja ja lülitatava seadme järgi. Arendatakse ja analüüsitakse võimsuslüliti seisundi põhiseks hindamiseks vajaliku meetodikat. Kirjeldatakse välja arendatud meetodika rakendamist võimsuslülitite seisundi hindamiseks ja hoolduste planeerimiseks.

Kolmandas peatükis selgitatakse Eesti ülekandevõrgu alajaamade skeemide põhjal võimsuslülitite prioriteetsust. Antakse hinnang, millistele seadmetele on vajalik rohkem tähelepanu pöörata. Analüüsitakse jaotlaskeemide põhjal $n-1$ olukordasid, kus ühe võimsuslüliti rike võib põhjustada suurema ulatusega mõju tarbijate elektriga varustamisel või piiranguid võimsuse ülekandmisel. Analüüsitakse võimsuslülitite seisundi määramiseks kasutatavaid mõõteseadmeid lähtudes nende funktsionaalsusest. Teostatakse magistritöö raames hangitud mõõteseadmega Omicron CIBANO 500 võimsuslüliti kordusmõõtmised, mille tulemusi analüüsitakse vastavalt peatükis kaks arendatud meetodikale. Tehakse ülevaade Eesti ülekandevõrgu operaatori hetketegevustest võimsuslülitite hooldusest ja planeerimisest ning pakutakse välja selle arendusvõimalused.

Neljandas peatükis teostatakse majandusliku tasuvuse arvutused ja analüüsitakse mõõteseadmete kasutamise tasuvust võimsuslülitite seisundi hindamise rakendamiseks. Tuuakse välja erineva hinnaklassis olevate mõõteseadmete tasuvus ja kokkuvõttes mõõteseadmete kasutamisest saadav majanduslik kasu.

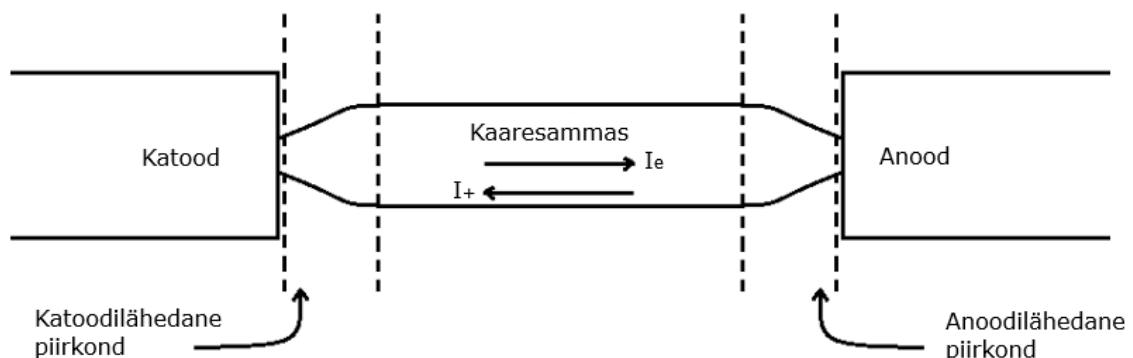
Lõputöö tulemusena arendatud seisundi hindamise meetodika on oluline eelkõige ülekandevõrgu operaatorile, kuid lisaks ka teistele elektrivõrgu operaatoritele ja ettevõtetele, kelle varade hulka kuuluvad SF₆ võimsuslülitid. Lõputöös kirjeldatud meetodikat kohandades on võimalik seisundi põhiseks hindamist rakendada ka teistel alajaama primaarseadmetel, et lõpptulemusena oleks võimalik hinnata kõikide alajaama seadmete seisundit ja sellest lähtudes anda hinnang alajaamale tervikuna.

1. VÕIMSUSLÜLITID ELEKTRISÜSTEEMIS

Võimsuslülid on ühed tähtsamad seadmed alajaamas, mida kasutatakse teiste seadmete (nt trafo) pingestamiseks ja eraldamiseks elektrivõrgust. Lisaks on võimsuslülid tarvilikud rikke tekkides rikkekoha isoleerimiseks ülejäänud elektrivõrgust. Käesolevas peatükis kirjeldatakse esmalt võimsuslüliti väljalülitamisel lüliti kontaktide vahele tekkivat elektrikaart, mille mõju võimsuslüliti seisundi halvenemisele on kõige suurem. Lisaks tuuakse välja erinevad võimsuslüliti tüübid, kuid peamiselt keskendutakse SF₆ võimsuslülititele ja nendes esinevatele riketele ja võimalikele põhjustele. Täiendavalt esitatakse ülevaade võimsuslülitite hooldamise meetodi rakendamisest kahe Euroopa Liidu riigi, Soome ja Belgia, näitel.

1.1 Elektriikare füüsikalised omadused

Elektrivõrgus peamiselt esinevad rikked on lühised või muud inimlikust eksimusest tekkinud rikked, mille tagajärjeks on seadme isolatsiooni kahjustumisest tingitud ülelöögiohu suurenemine vooluallikasse osasse, voolujuhtide katkemine või seadmete füüsilised vigastused. Tekkivaid seadme või liini rikkeid eraldatakse ülejäänud elektrivõrgust võimsuslülitiga. Lühise eraldamisel tekib suurte voolude lahutamisel lüliti kontaktide, mida võib vaadelda kui anoodi ja katoodi, vahele elektrikaar (joonis 1.1), mis omakorda põhjustab kontaktide kulumise ja lõpptulemusena eraldi rikke. Seega on oluline mõista elektrikaart ja selles toimuvaid füüsikalisi protsesse.

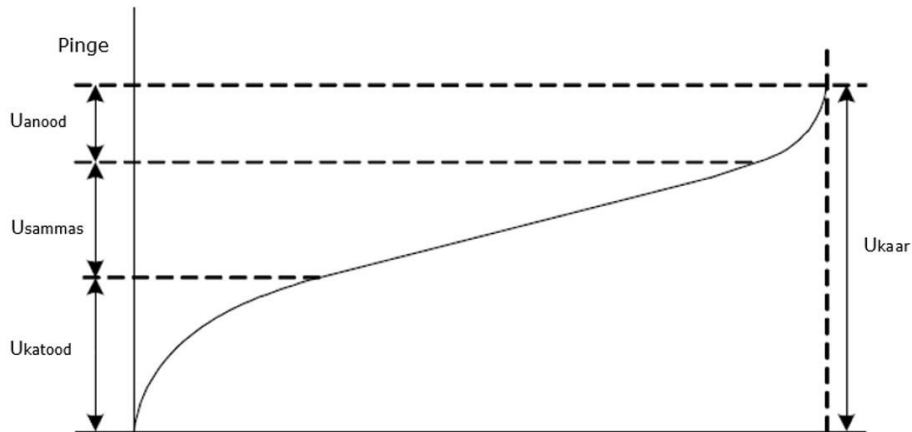


Joonis 1.1 Elektriikare võimsuslüliti anood- ja katoodkontakti vahel [1]

Vooluahela välja lülitamisel tekib lüliti kontaktide vahel õhkvahe, mis tugevalt ioniseerub ja selle tulemusena muutub voolujuhiks ehk elektrikaareks [2]. Elektriikare

kujutab endas kestvat kaarlahendust, mis on vastavalt võimsuslüliti tüübile, kas õhus, õlis või väävelheksafluoriidis (SF_6) [3]. Elektrihaar koosneb plasmast, mille moodustumiseks peab olema piisavalt vabu laengukandjaid, mis omakorda nõuab piisavalt suurt energia hulka, et ületada aatomite ioniseerimiseks vajalikku ionisatsioonienergiat. Elektrihaare peamiseks omaduseks on väga intensiivne protsess, mis tekitab soojus- ja valguskiirguse eraldumist ümbritsevasse keskkonda, mille tulemuseks on elektrihaare kõrge temperatuur. Kaaresambas tekkiv ionisatsiooni protsess leiab aset olukordades, kus neutraalsed osakesed, omades piisavat kiirendust, suudavad eraldada aatomilt elektrone, tekitades seeläbi vabu laengukandjaid, mis soodustavad elektrihaare põlemist [4]. See põhjustab võimsuslüliti kontaktide kuumenemise, sulamise ja lõpptulemusena elektroodi pinnalt metalli aurustumise ehk erosiooni [5]. Erosiooni tagajärjel väheneb kaarekustutuskontaktide pikkus, mille tulemusena väheneb võimsuslüliti lahutusvõime [5]. Suurema elektrihaare energia ja pikema kaarepõlemise aja koosmõjul kahjustuvad võimsuslüliti kontaktid [5]. Kaaresamba temperatuur vahelduvvoolu siinuse amplituud- ja nullväärtusel on erinev. Madalamatel temperatuuridel termoionisatsioon väheneb ja suureneb deionisatsiooni protsesside osakaal, mis koosneb difusioonist ja gaaside rekombinatsioonist ning omakorda loob tingimused, et elektrihaar saaks kustuda [4]. Halvimal juhul on kirjeldatud protsessi tulemuseks rike, mille puhul ei ole võimsuslüliti võimeline lahutama tekkinud lühist ülejäänud elektrivõrgust, põhjustades seeläbi kahjustusi nii võimsuslülitile endale kui ka alajaama teistele seadmetele. Olukorras, kus elektrihaart toidetakse piisavalt võimsa toiteallikaga, võib elektrihaar põleda lõpmatult kaua, põhjustades seadmete hävinemise ja selle tagajärjel laiaulatusliku elektrikatkestuse ning ohu inimelule [2]. Seega on oluline tagada kaarekustutuskeskkonna kõrge dielektriline tugevus, et vältida elektrihaare taassüttimist.

Vahelduvvoolu elektrihaares läbib vool nulli iga poolperioodi järel, kus elektrihaar kustub ja süttib uuesti [2]. Voolu juhtiv kaaresammas tekib võimsuslüliti avanemisel kontaktide vahele, seejuures pingelang kaarevahemikus on vahemikus 20–30 V [3]. Pingelang jaguneb kaaresambas erinevalt, katoodi piirkonnas 10–25 V ja anodi piirkonnas 5–10 V, seda ilmestab ka joonis 1.2. Pingelang kaaresambas sõltub kustutuskeskkonna gaasist, gaasirõhust, voolu amplituudist ja elektrihaare pikkusest [3]. Vahetult peale elektrihaare kustumist muutub pinge kaarevahemikus kustumisingest võrgupinge hetkväärtuseni ning tekkivat pinget nimetatakse taastuvpingeks. Siirdeprotsessi sagedus ja amplituud, mis tekib pinge taastumisel, sõltub lahutatava vooluahela induktiivsusest, mahtuvusest ja aktiivtakistusest. Elektrihaare kustumiseks võimsuslüliti kontaktide vahel peab läbilöögipingele tõusukiirus ja hetkväärtus olema väiksem, kui elektrihaare taassüttimiseks vajalik pinge. [2]



Joonis 1.2 Pinge jagunemine kaaresambas [3]

Elektrikaar peab võimsuslüliti avanemisel püsima kontaktide vahel piisavalt kaua, et vältida voolulõiget [4]. Sellises olukorras osutub tehniliselt keerukaks elektrikaare juhtimine selliselt, et voolu nulli läbides kaar kustuks ja samas oleks loodud tingimused, kus elektrikaare taassüttimine kontaktide vahel on välistatud [3]. Protsessi keerukust ilmestab asjaolu, et elektrikaare kustumine peab toimuma voolu nulli läbimisel nii rikkeolukordades kui ka normaaltalitusel. Rikkeolukorras võib lühisvool ulatuda kümnetesse kiloampritesse, kuid normaaltalitusvoolude lahutamisel on vool kuni paar kiloamprit. Vältimaks eelnevalt kirjeldatud võimsuslüliti rikete tagajärgi on oluline mõista elektrikaart, selle tekkimist ja kustumist.

1.2 Võimsuslülitite tüübid ja nende tööpõhimõte

Võimsuslüliti on alajaamas asendamatu seade, mille ülesandeks normaaltalitusel on koormusvoolude sisse ja välja lülitamine ning avariitalitusel rikke põhjustanud seadme või võrgu osa eraldamine ülejäänud elektrivõrgust. Lisaks lühisvooludele peab võimsuslüliti olema võimeline eraldama erinevat tüüpi voolusid, milledeks on mahtvuslik-, induktiiv- ja koormusvool [6]. Võimsuslüliti oma funktsioonidega on esindatud kõikides pingeklassides, alustades kodumajapidamises olevatest kaitselülititest ja lõpetades ülekandeliinidega, mis talitlevad ülikõrgepingel kuni 1150 kV.

Rahvusvahelise Elektrotehnikakomisjoni (IEC) 62271-100 standardi [7] alusel jaotatakse võimsuslülitid pingeklassi järgi kahte kategooriasse:

- madalpingekaitselülitid nimipingega kuni 1000 V;
- kõrgepingevõimsuslülitid nimipingega 1000 V ja enam.

Lisaks eelnevale on IEC standardis 62271-100 [7] jaotatud kõrgepingevõimsuslülitid edaspidi võimsuslülitid pingeklassi järgi kaheks, millest jaotusseadmed on nimipingega kuni 72,5 kV ja ülekandevõrgu seadmed nimipingega 123 kV ning enam.

Võimsuslüliti on keerukas ja oluline seade elektrivõrgus ning seega esitatakse tootjale järgnevad nõuded võimsuslüliti projekteerimisel [8]:

- suletud asendis hea, väikese takistusega, voolujuht nimivoolu edastamiseks;
- avatud asendis taluma impulsspinget, et vältida liigpinge korral ülelööki kontaktidel;
- kiire ja töökindel lülitamine suletud asendist avatud asendisse ja vastupidi;
- lülitamisel ei tekita ülemäärast transientliigpinget.

Kõikidest eelnevalt nimetatud nõuetest lähtudes on võimsuslüliti üks keerulisemaid seadmeid elektrivõrgus. Võimsuslülitid on mehaanilised lülitusseadmed, milles lüliti kontaktide liigutamiseks on ajamimehhanism. Suletud asendis peab võimsuslüliti suutma edastada pidevalt nimivoolu, kuid kaitsereleest saadud väljalülitussignaali korral opereerima kiirelt ja tõrgeteta välja lülitama erineva suurusega voolusid, alates nimivoolust kuni maksimaalse lühisvooluni [8].

Lisaks on võimalik võimsuslüliteid grupeerida ka järgnevate kriteeriumide alusel [6]:

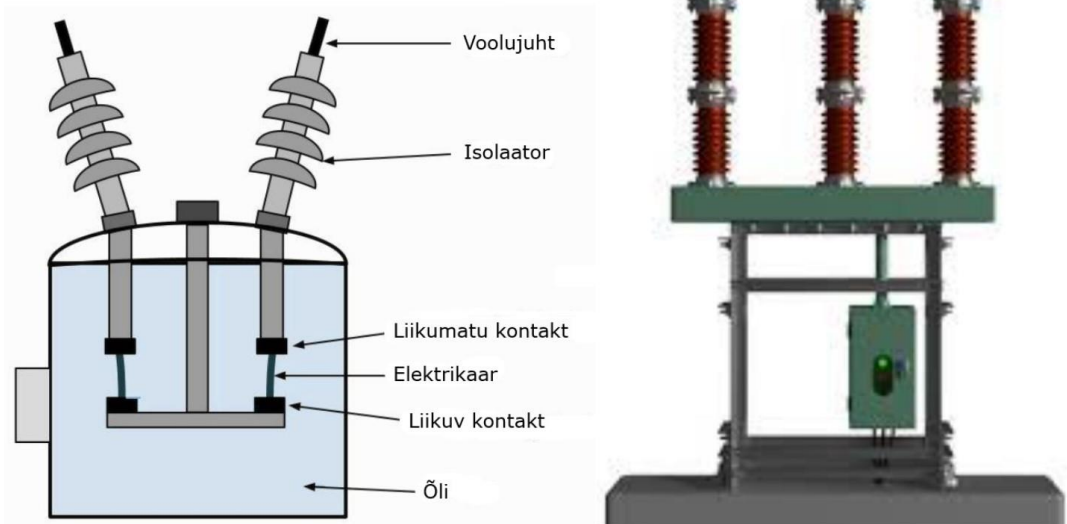
- pingeklass;
- seadme paigalduse asukoht;
- välised tunnused;
- kaarekustutuskeskkond.

Kõige sagedasemalt jaotatakse võimsuslüliteid just viimase, kaarekustutuskeskkonna, järgi. Järgnevates alampeatükkides kirjeldatakse ülekandevõrgus peamiselt kasutuses olevaid võimsuslülite tüüpe, milleks on õli, vaakum- ja SF₆ võimsuslülitid.

1.2.1 Õlilülitid

Õlitäitega võimsuslülitid jagunevad peamiselt kaheks: suure õlimahuga ja vähese õlimahuga lülititeks. Suure õlimahuga võimsuslüliti (joonis 1.3 vasakul) on seade, milles elektrikaare kustutamine toimub õlikeskkonnas, selle protsessi tulemusena tekivad õligaasid ja sellest tulenev ülerõhk summutatakse võimsuslüliti paagi ülaosas asuvas õhureservuaaris [9]. Elektrikaare põlemisel õlikeskkonnas tekivad kõrvalproduktid ja kõrge temperatuuri mõjul õligaas, mis peamiselt koosneb vesinikust ~80% ja

atsetüleenist ~20% [6]. Vesiniku väikese aatommassi tõttu on see võimeline liikuma väga kiiresti ja seega juhib elektrikaare põlemisel tekkivat soojust kaaresambast eemale. Seetõttu kustutab elektrikaart kontaktide avanemisel õlist eraldunud gaas, mitte õli ise. [6]. Kõikides õlitäitega võimsuslülites on kasutusel gaasiventiidid, mille eesmärgiks on tekkinud vesiniku juhtimine võimsuslüliti paagist välja, et vältida võimalikku võimsuslüliti plahvatust alajaamas. Lisaks elektrikaare kustutamisele on õli heaks isoleerivaks materjaliks võimsuslüliti pingestatud ja normaalselt pingestamata osade vahel, millest viimased on maandatud [3]. Tagamaks piisavat isolatsiooni, peab õlimaht olema väga suur, 145 kV nimipingega võimsuslülitel on vajalik õlimaht 12 000 liitrit [3] ja 230 kV võimsuslülitel ulatub see üle 50 000 liitri [3], mis õnnetuse tagajärjel tekitab suure keskkonna reostuse ja majandusliku kahju. Vähendamaks alajaamale vajalikku maa-ala ja võimalikku riski õnnetuse korral hakati arendama minimaalse õlitäitega (joonis 1.3 paremal) võimsuslüliteid.



Joonis 1.3 Suure õlimahuga (vasakul) ja vähese õlimahuga (paremal) võimsuslülitid [10] ja [11]

Võimsuslüliteid, milles õlimaht on minimaalne, nimetatakse kirjanduses ka [3], [4] ja [8]:

- vähese õlimahuga võimsuslüliti;
- madala õlisisaldusega võimsuslüliti;
- õlivaene võimsuslüliti.

Õlivaesel lülitel kasutatakse õli elektrikaare kustutamiseks, kuid võrreldes suure õlimahuga võimsuslülitel ei taga õlivaeses võimsuslülitis õli kogus isolatsiooni pingestatud ja pingestamata osade vahel [6]. Vähese õlimahuga võimsuslülite kambrid on maast isoleeritud ja faasid omavahel eraldatud. Sellised võimsuslülitid on laialdaselt

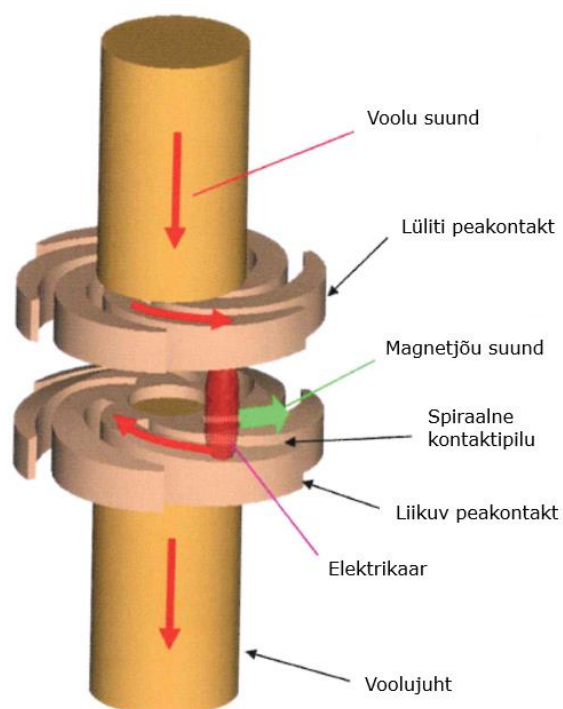
kasutusel elektrivõrgus, mille nimipinge on kuni 72,5 kV [8]. Õlitäitega võimsuslülitid tänapäeval enamasti ei paigaldata, selle asemel, sõltuvalt nimipingest, kasutatakse kas SF₆- või vaakumvõimsuslülitid [8].

1.2.2 Vaakumlülidid

Vaakumvõimsuslülitid on võimsuslülitid tüüp, mille nimetus tuleneb sellest, et elektrikaare kustutuskeskkonnaks on vaakum. Vaakumvõimsuslülitid leiavad peamiselt kasutust keskpinge võrgus nimipingega kuni 72,5 kV [12]. Elektrikaare kustutamine vaakumis on erinev võrreldes ülejäänud tüüpi võimsuslülititest. Kustutuskeskkonna väiksel rõhul või atmosfäärirõhul tekkivad elektrikaart nimetatakse vaakumkaareks, mida iseloomustab väike kaaresambapinge, jäädes oluliselt madalamaks, kui survestatud gaasi kustutuskeskkonna kaaresambapinge [3]. Vaakumkaare kaaresambas tekkivaid protsesse mõistetakse eelkõige kui nähtust metalli aurustumisest kontaktpinnalt protsessi isoleerivas keskkonnas [12].

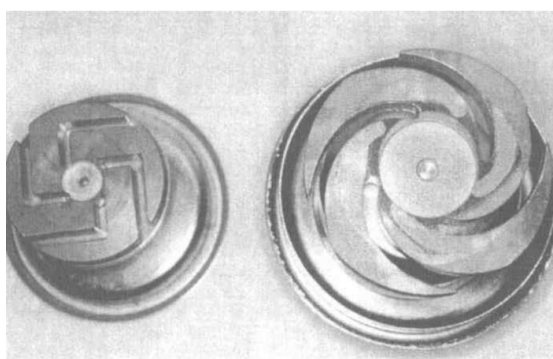
Voolu nulli lähedal, lüliti kontaktide vahemikus, ionisatsioon väheneb kiirelt, kuna metalli aurud kondenseeruvad elektroodidele. Elektrikaare püsivus sõltub kontaktpinnalt aurustunud metalliosakestest, mille tihedus on otseses sõltuvuses vooluga [12]. Vahetult enne voolu jõudmist nulli võib tekkida voolulõige, mis tähendab, et elektrikaar kustub enne voolu nulli läbimist ja põhjustab elektrivõrgus ajutisi suuri liigpingeid. Kirjeldatud protsessis tekkiv liigpinge esineb eelkõige olukorras, kus vaakumvõimsuslülitiga lülitatakse välja induktiivset voolu, näiteks tühijooksu trafot või lukustatud rootoriga mootorit [6].

Vaakumvõimsuslülitid puuduvad võimalused elektrikaare jahutamiseks keemiliste ainete koostõel. Vältimaks võimsuslülitid kontaktpinna ebaühtlast kulumist (eelkõige katoodi), tuleks elektrikaart hoida hajutatuna või spiraalses liikumises [6]. Võimsuslülitid kontaktide vahele, voolu amplituudiga alla 10 kA, tekib hajutatud kaaresamm, mis koosneb mitmest väikest eraldiseisvast paralleelsest elektrikaarest [8]. Lüliti kontaktide vahel olev väike elektrikaar käitub kui magnet ja kaaresamm simuleerib magnetpooluseid, mille tulemusena tekkinud kaaresambad tõrjuvad üksteist ja seeläbi tagatakse kontaktide vahel hajutatud elektrikaar. Lahutatava voolu amplituudi suurenedes üle 10 kA pöördub üksikute elektrikaarte omavaheline tõukejõud tõmbejõuks ja elektrikaarte liitumisest tekivad suuremad kaaresambad [8]. Lüliti kontaktide vahele tekkinud suuremal kaaresambal on kõrge temperatuur, mis põhjustab liigselt metalli aurustumist võimsuslülitid kontaktpinnalt [12].



Joonis 1.4 Elektriikaare juhtimine, kus vastassuunas pöörlevate peakontaktide ja magnetjõuga jahutatakse elektrikaart [8]

Spiraalses liikumises olevat elektrikaart mõjutatakse kontaktpinnal olevate piludega (joonis 1.4) ja tekkinud magnetväljaga. Vaakumkaart jahutatakse magnetväljas aurustunud metalli osakeste juhtimisega peakontaktide vastassuunalise pöörlemisega jahedamale kontaktpinnale (joonis 1.4) ja seeläbi välditakse kontaktpinna liigselt ja ebaühtlast kulumist [12]. Võimsuslüli peakontaktid on spiraalse kujuga, millele lühisvoolu toimel tekitatakse piki vektoriaalne elektromagnetväli ning selle tulemusena avanevate lüliti kontaktide vahele tekivad väiksed paralleelsed elektrikaared omades sama polaarsust [8]. Vaakumlüliti kontaktide (joonis 1.5) lahutamiseks vajaliku vähese energia hulga ja ajamimehhanismi disaini tulemuseks on tegu töökindla ja hooldusvaba võimsuslülitiga [6].

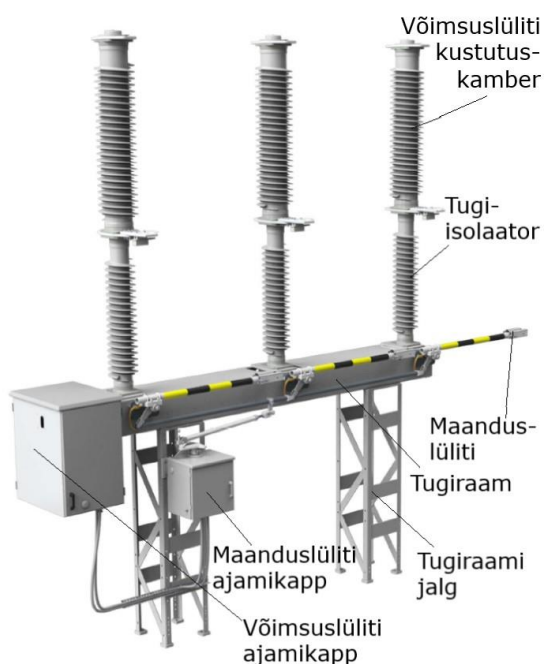


Joonis 1.5 Vaakumvõimsuslüli spiraalsed peakontaktid [3]

1.2.3 SF₆ tüüpi võimsuslülitid

SF₆ tüüpi võimsuslülitites kasutatakse elektriikare kustutamiseks puhast SF₆ gaasi või selle segu. Puhta SF₆ korral on tegu inertse, termiliselt stabiilse, süttimatu, värvitu, lõhnatu ja mitte mürgise gaasiga. Elektriikare mõjul, temperatuuri tõustes üle 500 °C, hakkab SF₆ lagunema, mille tulemusena tekivad mürgised ained (SF₂ ja SF₄). Peale elektriikare kustumist rekombineeritakse tekkinud ühendid taas mitte mürgiseks SF₆ gaasiks [8]. Tagasipöörduv keemiline protsess on SF₆ gaasi omadus, mis tagab väga hea kaarekustutuskeskkonna pika aja vältel. Elektriikare toimel ei taastu SF₆ gaas täielikult ning võimsuslüliti kustutuskambrisse ladestub vähesel määral väävlit, mille sisaldust SF₆ gaasi analüüsidest mõõdetakse. SF₆ omab häid elektriikare kustutamiseks vajalikke omadusi ja lisaks elektrilise isolatsiooni tagamiseks piisavat dielektrilist tugevust. Seega on SF₆ gaasi sobiv kasutada võimsuslülitites [13]. Vastavalt Kyoto protokollile on SF₆ tunnustatud kasvuhuonegaasiks, mille looduses lagunemine võtab aega hinnanguliselt kuni 3200 aastat. Vähendamaks SF₆ gaasi sattumist keskkonda on see maksustatud ja selle kasutamist Eestis tuleb registreerida fluoritud kasvuhuonegaaside ja osoonikihti kahandavate ainete registris (FOKA registris).

SF₆ võimsuslüliti koosneb kolmest identsest faasisambast, mille igal faasisambal on sõltumatu SF₆ täitega kustutuskamber ning võimsuslüliti ühe faasisamba gaasirõhu alanedes ei ole teiste faaside poolused mõjutatud [14]. Ülekandevõrgus 110 kV nimipingel on SF₆ võimsuslülitel (joonis 1.6) ühise ajamivardaga lülitusmehhanism, nimipingega 330 kV lülitel on igal poolusel eraldi ajam.



Joonis 1.6 110 kV ABB LTB D1/B võimsuslüliti koos maanduslülitiga [15]

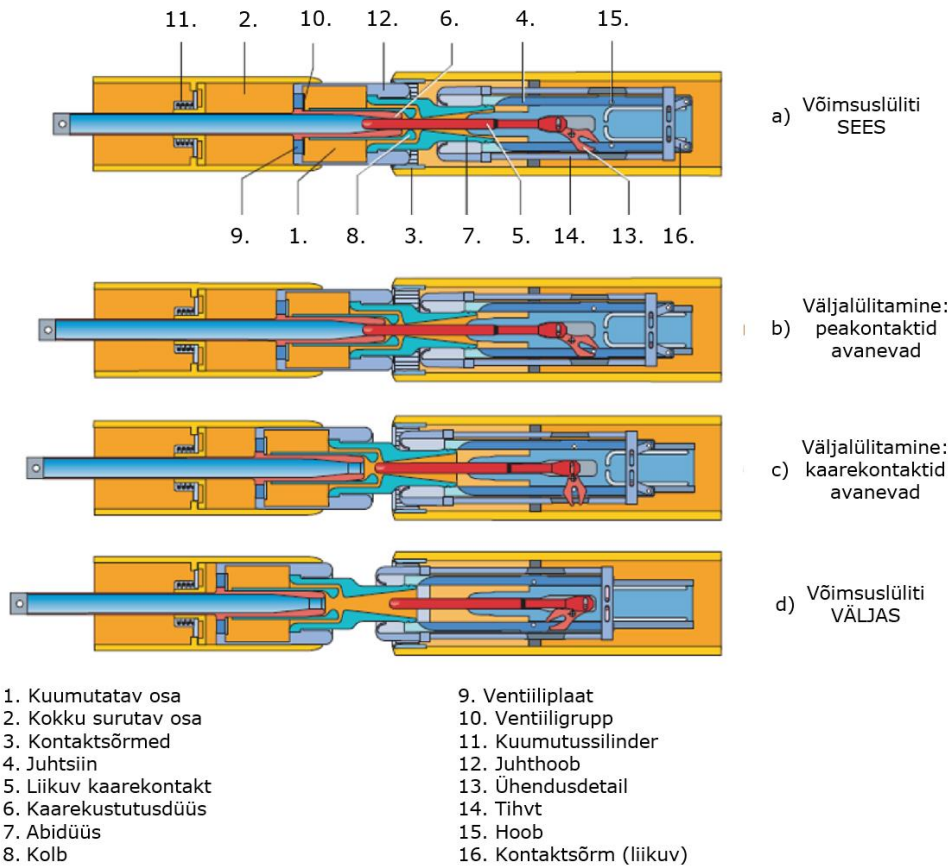
Võimsuslüliti koosneb järgnevatest peamistest komponentidest [8]:

- peakontaktid, mille ülesandeks on normaaltalituluvoolu edastamine;
- kaarekustutuskontaktid, mis aitavad kontrollida elektrikaart väljalülitusel;
- kaarekustutuskamber, kus tekib elektriakaare põlemisel kuum gaas;
- ajamimehhanism, millesse eelnevalt salvestatud energiaga liigutatakse võimsuslüliti kontakte;
- tugiisolaatorid.

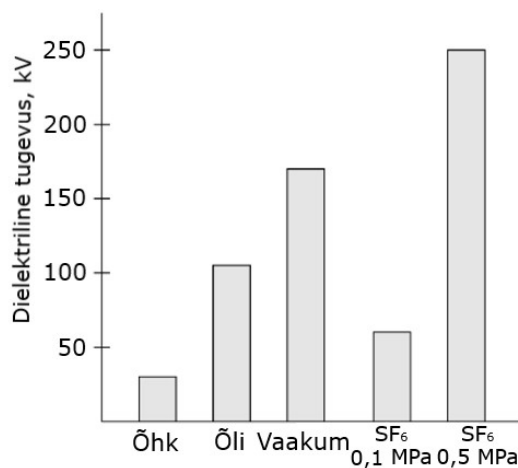
Võimsuslüliti kontaktide sisse- ja väljalülitamiseks vajalikku energiat saadakse eelnevalt vinnastusvedrusse salvestatud energiast [14]. Vedruajami ajamivarda, võlli, isoleermaterjalist valmistatud lülitusvarda ja vaheajami abil kantakse vinnastatud vedrusse salvestatud energia üle kaarekustutuskambrisse, mille väljalülituse tulemusena võimsuslüliti kontaktid avanevad ja sisselülitusel sulguvad [14]. SF₆ täitega võimsuslülitites on kaare kustutuskamber disainitud selliselt, et lüliti liikuv kontakt survestab gaasi, mida puhutakse elektriakaarele eesmärgiga jahutada kaaresammast. Voolu nulli läbimisel vooltugevus väheneb ja gaasipuhumise koostoimel tekib sobiv keskkond, mille tulemusena saab elektrikaar kiiremini kustuda ning ei toimu voolulõiget [3]. SF₆ võimsuslülitites kaarekustutamine sõltub võimsuslüliti tehnoloogiast: lüliti avanemisel survestatud gaasi vabanemisel tulenevast gaasi puhumisest või elektriakaare kõrge temperatuuri tulemusena gaasirõhu tõusust [3].

Joonisel 1.7 on kirjeldatud võimsuslüliti väljalülitamist etapiviisiliselt. Lähteolukorras on võimsuslüliti sisse lülitatud (joonis 1.7 a). Võimsuslüliti väljalülitamisel avanevad esimesena kontaktsõrmedest ja kuumutussilindrist moodustuvad peakontaktid (joonis 1.7 b). Kaarekontaktid, mis koosnevad kontaktsõrmedest ja liikuvast torust on sellel hetkel veel suletud ja kogu lahutatav vool kulgeb kaarekontaktide kaudu. Ajami töö toimel liigutab juhthoob liikuvat kaarekontakti (lüliti väljalülitamine). Järgnevalt avanevad kaarekontaktid, millele järgneb kaarleegi süttimine (joonis 1.7 c). Samaaegselt liigub kuumutussilinder vasakule, survestab kolvi ja ventiilgrupi vahel oleva gaasi. Kustutusgaas voolab vastupidiselt liikuva kontakti liikumissuunale läbi tagasilöögiventiili, mis moodustatakse kolvist ja ventiilplaadist, kuumutussilindrisse ja sealt edasi liikuva kaarekontakti ja kaarekustutusdüüsi vahelisest praost läbi ning kustutades seeläbi kaarleegi. Kontaktide lahutamisel tekkiva elektriakaare termilisel mõjul suureneb rõhk võimsuslüliti paagis ja ventiilplaadi abil kindlustatakse, et kõrge rõhu all olev gaas ei pääseks tagasi esialgsesse kambrisse. Rõhu tõustes SF₆ gaasi dielektriline tugevus suureneb (joonis 1.8) ja selle tulemusena elektriakaare kustutamiseks vajalikud tingimused paranevad veelgi enam. Kui kontaktid on lõpuni avanenud ja elektrikaar kontaktide vahel kustunud on võimsuslüliti asend väljas

(joonis 1.7 d). SF₆ gaas sobib väga hästi kasutamiseks võimsuslülites, sest tegu on elektronnegatiivse gaasiga, sidudes endaga, kontaktide avanemisel, vabu elektrone, mis omakorda tekitab piiratud liikumisvõimega negatiivsete ionide moodustumist [14].



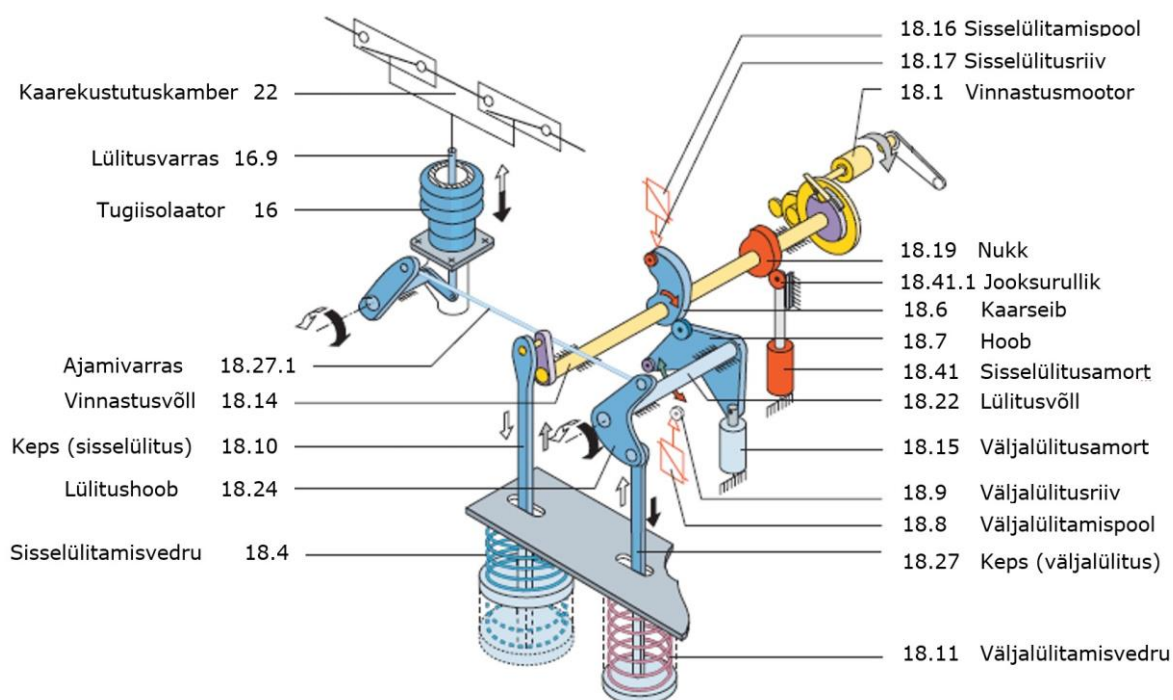
Joonis 1.7 SF₆ võimsuslüliti avanemise läbilõige neljas etapis (a-d) [14]



Joonis 1.8 Elektriikare kustutuskeskkonna dielektriline tugevus (kV) 10 mm vahemikul [15]

Järgnevalt kirjeldatakse võimsuslüliti vinnastamisel vedruajami erinevate osade omavahelist koostööd (joonis 1.9). Võimsuslüliti vedrude vinnastamine toimub

lähteolukorras, kus sisse- ja väljalülitusvedru on vinnastamata ning võimsuslüliti ei ole võimalik juhtida, käesolevat olukorda nimetatakse võimsuslüliti asend VÄLJAS [14].



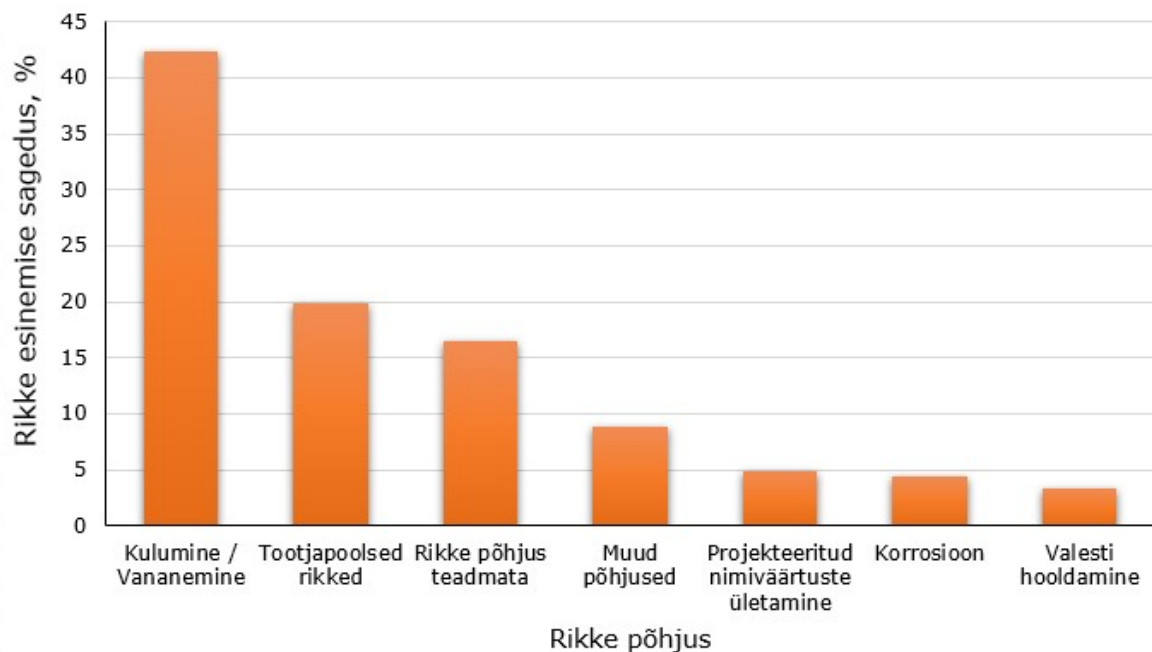
Joonis 1.9 Vinnastusvedruga võimsuslüliti ajamimehhanism [14]

Sisselülitamisvedru vinnastamiseks pööratakse mootoriga vinnastusvõlli. Vinnastusvõlli pööratakse seni, kuni tugirullik jõuab sisselülitisriivini ja seejärel lahutatakse vinnastusvõll vinnastusmehhanismist. Selle tulemusena jääb ajamimootor koos ajamiga seisma. Sisselülitamisvedru on vinnastatud ja ajam on valmis võimsuslüliti sisselülitamiseks. Sisselülitamispooli juhtimisel vabastatakse kaarseib sisselülitisriivi ja tugihoova kaudu. Võimsuslüliti sisselülitamine toimub sisselülitamisvedrus salvestatud energia mõjul. Vinnastusvõlli pöörlemisel lülitatakse sisse võimsuslüliti kontaktid ja vinnastatakse väljalülitusvedru. Järgnevalt vinnastatakse uuesti mootoriga sisselülitamisvedru ja seejärel on võimsuslüliti sisse lülitatud ehk asendis SEES ning valmis kiireks taaslülitamise tsükliks. [14]

Võimsuslülite sisse-välja lülitamisel ning lühiste lahutamisel elektrikaare mõjul tekib võimsuslüliti kulumine, mille tagajärjeks võivad olla erinevat tüüpi rikked. Vältimaks ootamatuid rikkeid, on oluline mõista võimsuslülite ajajooksul toimuvaid muutuseid, et ära hoida tarbijate elektrikatkestusi. Halvimal juhul võib katkestuse kestvus olla kogu võimsuslülite remondi aeg. Arvestades Eesti ülekandevõrgus laialdaselt kasutusel olevate võimsuslülite koosseisu, millest peamise osa (80%) [16] moodustavad SF₆ võimsuslülid, keskendutakse käesolevas töös just seda tüüpi võimsuslülite seisundi hindamisele.

1.3 Võimsuslülitite rikked

Võimsuslülitite tehnoloogiline ja tehniline areng on aidanud kaasa olukorrale, kus seadme üksikosade rikked, mis põhjustavad võimsuslülitite mitte töötamise, on aastate jooksul vähenenud suurel hulgal. CIGRE (*International Council on Large Electric Systems*) uurimisrühmad on koostanud üle Euroopaliselt suuremahulise uuringu kolmel ajaperioodil, 1974–1977 [17], 1988–1991 [18] ja 2004–2007 [19], hinnates alajaama seadmete rikke esinemissagedusi ja põhjuseid. Võimsuslülitite rikkeid jagatakse peamiselt kaheks: kriitilised rikked ja vähemtähtsad rikked (joonis 1.10). Kriitilised rikked põhjustavad seadme mitte töötamise ja vähemtähtsad rikked otseselt ei mõjuta seadme normaaltalitusel töötamist, kuid aja jooksul võib vähemtähtsast rikkest välja areneda olukord, kus võimsuslülitite ei võimeline ettenähtud funktsiooni täita. CIGRE uurimisrühmade esimese [17] ja viimase [19] uuringu põhjal selgus, et kriitiliste rikete sagedus on vähenenud aja jooksul üle viie korra. Võimsuslülitite vananemisest, kulumisest ja roostetamisest tulenevate kriitiliste rikete osakaal oli 47%, millele järgnes tootmise praak ligikaudu 20% [20]. CIGRE uuringu [19] tulemustest järeldub, et rikete vähenemine ei välista olukorda, kus võimsuslülitite ühe kriitilise rikke tekkides võib seadme valesti töötamise või mitte töötamise tulemusena olla kahjud laiaulatuslikud. Järgnevates alapeatükkides kirjeldatakse võimsuslülitite üksikosadel esinevaid peamiseid rikkeid, nende esinemissagedust ja põhjuseid.



Joonis 1.10 Võimsuslülitite rikete peamised põhjused [21]

1.3.1 Võimsuslüliti ajami rikked

Võimsuslüliti ajamimehhanismi vigadeta töötamine on oluline, sest ajami eesmärgiks on salvestatud energia ülekandmine võimsuslüliti kontaktidele. Mehhanismi kaudu üle kantavat energiat kasutatakse kontaktide sulgemiseks ja avamiseks. Oluliseks aspektiks on siinkohal lühisele lülitamine, kus hetk peale kontaktide sulgemise operatsiooni peab võimsuslüliti suutma kontakte uuesti töökindlalt avada. Peamiselt eristatakse kolme tüüpi võimsuslüliti ajamimehhanisme: vedru-, pneumaatiline- ja hüdrauliline ajam. Eesti ülekandevõrgus on laialdaselt levinud vedruajamiga mehhanismid seega käesolevas töös keskendutakse vedruajamiga võimsuslülititele.

Elektri ülekandevõrgus võib esineda olukordasid, kus võimsuslülitiga lülitatakse harva ja võimsuslüliti ei suuda vajalikul hetkel täita ettenähtud funktsiooni. Võimsuslüliti ajam konstruktsioonilt on tootja poolt määratud töötama enam kui kaksikümmend aastat ilma, et seadme töötamisel tekiks korrosioon ja muud välistest tingimustest tulenevad probleemid. Võimsuslüliti mehhaanilistest osadest tingitud rikete osakaal on ligikaudu 43% [22] kõigist võimsuslülitiga seotud rikestest.

Lisaks CIGRE uuringutele on Soome ja Rootsi ühiselt läbiviinud uuringu [23], vaatlusperioodiga 1994-2005 (Soome) ja 1999-2006 (Rootsi), kus vaatluse all oli 1546 võimsuslüliti, mis jagunesid omakorda SF₆ ja väikse õlimahuga võimsuslülititeks. Selles uuringus toodi välja, et ülekandevõrgus sagedasti lülitatavad võimsuslülitid on kasutusel pingejuhtimiseks kasutatavate seadmete lülitamiseks nagu põikireaktor, kondensaatorpatarei ja reaktiivvõimsust tarbivad filtrid. Sagedasti lülitatavate seadmete lülitamiste arv võib ulatuda üle 350-ne [23] lülitamiskorra aastas.

Tabelist 1.1 järeldub, et SF₆ võimsuslüliti rikete peamiseks põhjuseks on mehaanilise osa kahjustumisest tingitud rikked. Tabelist 1.2 nähtub, et rikete hulk suureneb märgatavalt võimsuslülitel, millega teostatakse aastas 50 ja enam korda sisse-välja lülitustsükli. Tabelis 1.2 tähendab tsükkel ühte võimsuslüliti sisse-välja lülitust.

Tabel 1.1 Rikke põhjustanud võimsuslüliti komponent sõltuvalt lülitatavast seadmest [23]

	Kaarekustutus-keskkond	Kontaktid	Isolaator	Ajami-mehhanism	Põhjus teadmata
Trafo võimsuslüliti	1	0	0	13	0
Põikreaktori võimsuslüliti	1	2	0	0	3
Latistuse võimsuslüliti	0	0	0	1	0
Liini võimsuslüliti	0	1	0	7	1

Tabel 1.2 Ajamiga seotud rikete sagedus SF₆ võimsuslülitel [23]

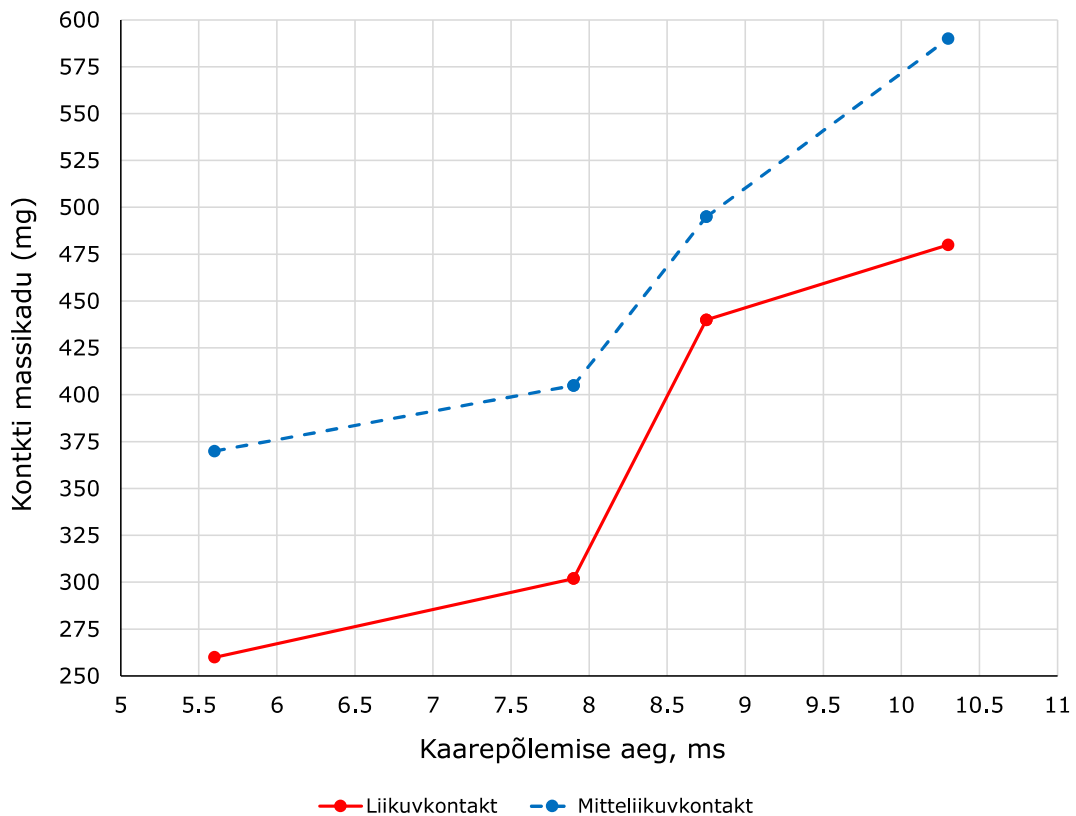
	Rike lüliti sisselülitamisel	Rike lüliti väljalülitamisel	Rike ajamivardaga	Muud rikked
<50 tsüklit aastas	6	0	0	0
>= 50 tsüklit aastas	9	4	1	1

Eesti ülekandevõrgu operatori – Elering AS andmetel [16] oli ajaperioodil 2015 - 2019 12 võimsuslüliti, mida lülitati kokku vähemalt 50 korda. Oluline on esile tuua, et 12-st võimsuslülitist üheksat kasutatakse liinide ja pöikreaktorite sisse- ja välja lülitamiseks, et vähendada alakoormatud ülekandeliinide poolt genereeritud reaktiivvõimsust ja seeläbi juhtida võrgupinget.

1.3.2 Võimsuslüliti kontaktid

Võimsuslüliti peamiseks ülesandeks on sooritada sisse- ja väljalülitus operatsioon. Sisselülitatud võimsuslüliti peakontaktid peavad edastama normaaltalitusvoolu, seega on oluline, et peakontaktide üleminekutakistus oleks minimaalne (alla 100 $\mu\Omega$) [24], et tagada hea juhtivus kontaktide vahel. Saavutamaks maksimaalset voolujuhtivust kaetakse võimsuslüliti vasest peakontaktid hõbedaga [13]. Kaarekustutuskontaktid valmistatakse temperatuurile vastupidavamast materjalist nagu volfram või grafiit, et vähendada kontakti otste liigselt kiiret kulumist elektriikaare toimel [24].

CIGRE uurimisrühma viimasest uuringust [19] selgub, et 31% võimsuslüliti riketest on põhjustatud kõrgepingekomponentidest, millest 14% on seotud võimsuslüliti kaarekustutuskambriga. Võimsuslüliti avanemisel tekkiv elektriikaar põhjustab kontaktide kulumist, mida kirjanduses kirjeldatakse erosioonina. Võimsuslüliti väljalülitamisel tekib elektriikaar lüliti kontaktide vahele enamasti uuele, seni kahjustamata kontakti pinnale. Metallilise aurustumine lüliti kontakti pinnalt on tihedalt seotud kontaktide polaarsuse, geomeetria ja elektriikaare põlemise ajaga [5]. Igal väljalülitamisel on kontaktide vahele tekkiv elektriikaar erineva voolu ja kaarepõlemise ajaga, seega mõju lüliti kontaktidele igakord erinev. Jooniselt 1.11 on näha, et samal voolul suurendades elektriikaare põlemise aega kaks korda, suureneb kontaktpinnalt aurustunud metalli kogus alla kahe korra. Kontaktide lühenemist põhjustav kulumine on tingitud erosioonist, mis lõpptulemusena põhjustab kaarekustutuskontaktide töövõime langust. Raskematel juhtudel võib kulunud võimsuslüliti kontaktid tekitada olukorra, kus elektriikaar ei teki enam mitte kaarekustutuskontaktide vahele, vaid lüliti peakontaktidele ja selle tulemuseks on võimsuslülitilüliti rike.



Joonis 1.11 Liikuva ja mitteliikuva kontakti massikadu sõltuvalt elektrikaare põlemisajast konstantsel voolul [5]

Lüliti kontaktipinna erosioon on vältimatu ja seega on seadme rikete ennetamiseks oluline teada kontaktide seisukorda ja sellest tulenevat hoolduse aega, millal peaks võimsuslüli kontakte vahetama. Kontaktide seisundit hinnatakse sisselülitatud võimsuslüli kontaktide üleminekutakistuse mõõtmisega, mida nimetatakse ka staatilise üleminekutakistuse mõõtmiseks [8], sest mõõtmise teostamise ajal kontaktid ei avane. Võimsuslüli kontaktide üleminekutakistuse mõõtmiste tulemus sõltub mõõteseadme täpsusest ja testimiseks kasutatavast voolust [24]. IEC 62271-100 standardi [7] kohaselt tuleb kontaktide üleminekutakistust mõõta alalisvooluga vähemalt 50 A. Suurema täpsusega üleminekutakistus saadakse, kui testimisel kasutatakse standardis kirjeldatust kõrgemat voolu [25]. Lisaks staatilisele üleminekutakistusele on võimalik hinnata võimsuslüli kontaktide seisundit liikuvatelt kontaktidelt ehk dünaamiliselt [26]. Liikuvate kontaktide üleminekutakistuse mõõtmistulemuste põhjal on võimalik hinnata kontaktide pikkust ehk ajajooksul toimunud erosiooni ulatust [24].

Seadme tootjad kirjeldavad juhendites elektriliste kontaktide kulumise hindamiseks meetodikat, mis sõltub ainult lahutatavast voolust [15] ja [14]. ABB võimsuslüli juhendis [15] on esitatud summaarne teostatud lülituste voolude ruut ($\sum I^2$), mille väärtuse saavutades tuleb teostada võimsuslülile põhjalik hooldus ehk remont.

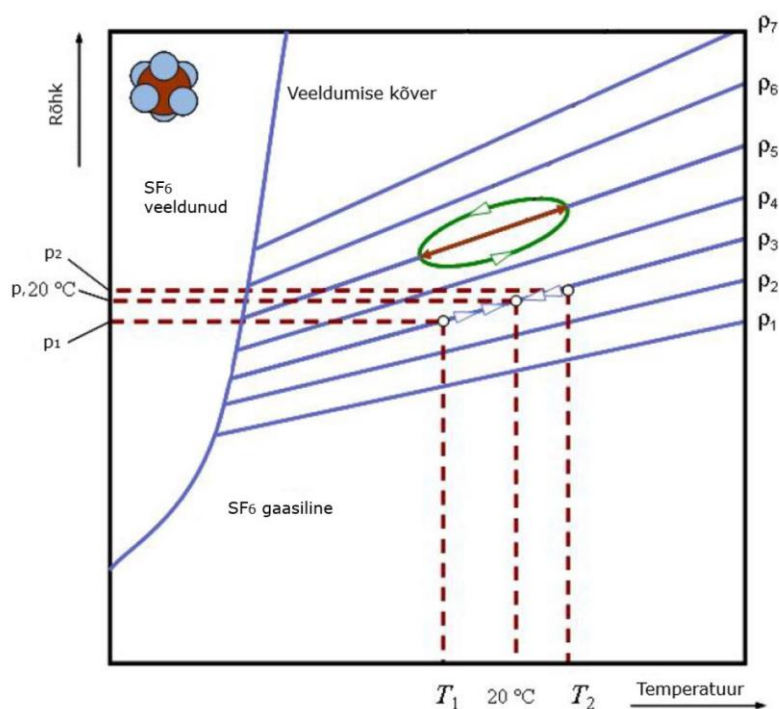
1.3.3 Elektriikare taassüttimine

Elektriikare taassüttimine on võimalik, kui võimsuslüliti kaarekustutuskambri kustutuskeskkonna dielektriline vastupidavus on langenud või ladestunud metalliosakeste hulk piisav. Taassüttimine on samuti võimalik ajami aeglase töö tulemusena, kui kontaktide avanemise kiirus on vähenenud ning kontaktid elektriikare kustumise hetkel ei ole enam üksteisest piisavalt kaugel. Elektriikare kustumise hetkel toimub võimsuslüliti kontaktide vahel kiire ja suure sagedusega pingetõus, mida nimetatakse transienttaastuvpingeks (TRV – *Transient Recovery Voltage*). Kui TRV ei ületa kustutuskeskkonna dielektrilist ülelöögi tugevust, siis elektriikare kustub ja taassüttimist ei toimu [13]. Probleem muutub tõsiseks, kui kustutuskeskkonna dielektriline tugevus on langenud ja tekib võimalus TRV-st tingitud ülelöögil, mille tulemusena toimub võimsuslüliti kontaktide vahel elektriikare taassüttimine. Elektriikare taassüttimisel tekib võimsuslüliti peakontaktide vahele kaar, mis kahjustab olulisel määral peakontakte [13]. Elektriikare taassüttimise tagajärjel kahjustuvad kustutuskeskkonnas olevad lüliti osad niivõrd, et seadme remont ei ole majanduslikult mõttekas, seega enamasti asendatakse nimetatud rikke tagajärjel kahjustunud lüliti uuega. Sõltuvalt alajaam skeemist võib katkestus kesta tarbijale kogu võimsuslüliti vahetuse perioodi.

Kustutuskambri seisundi hindamiseks kasutatakse peamiselt kustutuskeskkonnaks oleva gaasi analüüsimist. Gaaside analüüsis olulisteks parameetriteks on SF₆ ja SO₂ protsentuaalne sisaldus. Vastavalt IEC 62271-100 standardile [7] peab SF₆ sisaldus olema vähemalt 97%, seejuures SO₂ sisaldus ei tohi ületada 13 ppmV. Võimsuslüliti tootjajuhendites [15] ja [14] on minimaalseks SF₆ protsentuaalseks sisalduseks 95%, mille väärtuste langemisel ei ole tagatud võimsuslüliti tõrgeteta töötamine.

Lisaks gaaside analüüsile on oluline jälgida võimsuslülitipaagis oleva SF₆ gaasirõhku. Jooniselt 1.12 on näha väliskeskkonna temperatuuri muutusest tulenev SF₆ rõhu muutus. Madalamatel temperatuuridel toimub gaasitihenduse muutusest tulenev rõhu alanemine. Lähtudes tootjapoolsetest juhenditest [15] on lubatud SF₆ gaasileke kuni 0,5% aastas. Praktika on näidanud, et aastane gaasileke on ligikaudu 0,1% [27]. Vältimaks võimsuslülitiga opereerimist, mille gaasirõhk on alanenud kriitilise piirini, blokeeritakse lüliti ja sellest tekkinud signaal saadetakse juhtimiskeskusele, kes omakorda reageerib tekkinud olukorrale. Vältimaks SF₆ gaasirõhu alanemisest tingitud võimsuslüliti blokeerimist on võimalik kasutada SF₆ lekke tuvastamiseks sensorit ja digitaalset rõhumõõtmist. SF₆ gaasirõhu kontrollimist visuaalselt on võimalik asendada digitaalsete anduritega, mis võimaldavad rõhumuutuse trendi jälgida reaalselt.

Vastavalt praegusele praktikale toimub võimsuslüliti SF₆ rõhu kontrollimine alajaama seadmete visuaalse ülevaatus käigus kaks korda aastas.



Joonis 1.12 SF₆ gaasi veeldumise sõltuvus temperatuurist, kus roheline ring näitab rõhul p₅ temperatuuri kõikumisest tingitud rõhu muutust, millest keskpunkt on rõhk temperatuuril 20°C. Kõver joonise vasakus ääres on veeldumise kõver, mis näitab SF₆ gaasi kastepunkti [28]

1.3.4 Võimsuslüliti toite- ja juhtahelad

Võimsuslüliti tööks on oluline toite- ja juhtahelate terviklikkus. Juht- ja toiteahelate katkemisel ei jõua releest lülituspoolile signaal ning võimsuslüliti ei tööta. Lisaks puudub vool vinnastusmootori käivitamiseks, mille tulemusena sisselülitamisvedru vinnastamine ei ole võimalik. Olukorras, kus lühise ajal on võimsuslüliti toite- või juhtahelad katkenud, rakendub lähim järgmine võimsuslüliti, mille tulemusena suureneb katkestuse ulatus. Eelnevat kokkuvõttes on oluline seega hinnata toite- ja juhtahelate seisundit, et vältida võimalikke rikkeid.

1.4 Võimsuslüliti seisundi hindamine

Tulenevalt vananevate seadmete suurest hulgast peavad elektrivõrgu operaatorid seadmete hooldamisel optimeerima kulusid. CIGRE uuringust [19] selgub, et kuni 60%

elektrivõrgu operaatoreid kasutab seadmete hooldamisel ajapõhist metoodikat. Võimsuslülite ajapõhisel hooldamisel võib tekkida olukord, kus hoolduse järgselt oodatud töökindluse suurenemist ei saavutata. Ajapõhisest hooldusest efektiivsem on seisundipõhine varade haldamise metoodika, kuid selle rakendamisel peab teadma seadme kulumisest tingitud iseärasusi. Selles peatükis käsitletakse võimsuslüliti komponente, millel on mõju seadme seisukorra halvenemisele. Lisaks kirjeldatakse võimsuslüliti üksiku komponendi rikkest tulenevaid tagajärgi kogu võimsuslülitile. Võimsuslüliti rikete peamisteks põhjusteks on:

- Ajamist tulenevad rikked;
- Lülituskäsu saamisel võimsuslüliti mitte töötamine;
 - Juhtahela katkemine;
 - Toiteahela katkemine;
- SF₆ rõhu alanemisest tingitud võimsuslüliti blokeerimine;
- Kustutuskeskkonna halvenenud dielektriline tugevus.

Suurima osa võimsuslülite riketest põhjustab ajamimehhanism, mida on käsitletud ka eelmises peatükis 1.3.1.

1.4.1 Ajamit mõjutavad tegurid

Tänapäeval ei hinnata ajami seisundit hoolduse planeerimisel, vaid lähtutakse seadme vanusest ja lülituskordadest. Seadmetootjad teevad tehases igale võimsuslülitile tehasekatsetused (FAT – *Factory Acceptance Test*), mis peab vastama standardile IEC 62271-100 [7]. Induktiivsete seadmete lülitamisel tulenevate protsesside iseärasusest on nendele võimsuslülitile tehtavad katsetused erinevad, mis teostatakse vastavalt standardile IEC 62271-110 [29].

Tabelis 1.3 kirjeldatud katsetamise käigus mõõdetakse võimsuslüliti lülitustsükli toimeaegasid, mida võrreldakse piirväärtustega. Peale võimsuslüliti paigaldust alajaama, teostatakse uuesti parameetrite mõõtmine. Tehasekatsetuse järgselt võetakse võimsuslüliti osaliselt lahti, et vältida transpordi käigus kahjustuste tekkimist. Võimsuslüliti paigaldamise järgselt alajaama teostatakse mõõtmised uuesti, et olla veendunud seadme funktsionaalsuses, mis peab vastama tehase poolt eelnevalt määratud kriteeriumitele. Võimsuslüliti toimeaegade analüüsimisega saab tuvastada muutuseid ajami töös, mis võivad viidata tekkivatele probleemidele. Tabelis 1.4 on toodud erinevate parameetrite kõrvalekaldest tingitud võimalikud rikete tekkimise põhjused.

Tabel 1.3 Võimsuslüliti katsetusel kasutatavad standardsed lülitustsüklid ja pinged vastavalt standardile IEC 62271-100 [7]

Tsüklite arv	Lülitustsükel	Toitepinge
5	Sisse	Maksimaalse pingega
5	Välja	Maksimaalse pingega
5	Sisse	Minimaalse pingega
5	Välja	Minimaalse pingega
5	Sisse-välja	Nimipingega
5	Sisse-0,3s-sisse-välja	Nimipingega

Tabel 1.4 Ajamimehhanismi ajaliste piirväärtustest kõrvalekaldumise võimalikud põhjused [24]

Sisselülituse aeg	Väljalülituse aeg	Summutuse aeg	Vinnastusmootor	Rikke võimalik põhjustada
Kiirem/Aeglasem	Normis	Normis	Normis	Vinnastusmehhanism defektne
Normis	Aeglasem	Normis	Normis	Halvenenud määardeomadused lukustussüsteemis.
Kiirem	Aeglasem	Normis/Aeglasem	Normis/Aeglasem	Vinnastusvedru vähenenud jõudlus. Vinnastusvedru vigastus.
Aeglasem	Aeglasem	Normis/Aeglasem	Normis/Aeglasem	Suurenenud hõõrdumine ajami liikuvate osade vahel, nt rooste.
Normis	Normis	Kiirem	Kiirem	Väljalülituse summutusamortisaatori vigastus nt. vähenenud õli hulk summutusamordis.
Normis	Normis	Aeglasem	Aeglasem	Väljalülituse summutusamortisaatori vigastus nt. suurenenud hõõrdumine summutusamordis.

1.4.2 Kontaktide seisundit mõjutavad tegurid

Liinide sisse- ja väljalülitamine on võimsuslülitele normaaltalitlustoiming, mille tulemusena ei tohi tekkida seadmele ebanormaalseid kahjustusi. Võimsuslülitiga liinide väljalülitamisel avaldab kõige suuremat mõju transientliigpinge. Kontaktide avanemisel tekkivad liigpinged on seotud olukorraga, kus võimsuslüliti kontaktpoolused on erineva võrgupingega. Tekkivat liigpinget ei saa täielikult vältida, kuid seda on võimalik minimeerida, kasutades sünkroniseeritud lülitamist või lisatakistit. Lisaks transientidele mõjutavad ka lühised võimsuslülite kontaktide kulumist. Lühise väljalülitamisel on vool kordades suurem nimitalitlusvoolust, kuid kõige raskemaks osutub, kui lühise järgselt lülitatakse võimsuslüliti uuesti sisse lühisele, sel hetkel peab võimsuslüliti taluma hetkeliselt suuri voolusid ja suutma kiirelt sooritada väljalülituse. Lühisele lülitamisel tekkivat liigpinget iseloomustatakse pinge löögiteguriga, mis näitab pinge suurima hetkväärtuse suhet sundkomponendi amplituudi [30]. Lisaks sõltub liigpingete tekkimine lülitamishurgast, mis on maksimaalne, kui sisselülitamisnurk on 90°. Koormamata liini vool on mahtuvuslik ning liini väljalülitamisel tekib elektrihaar, mis kustub, kui vool läbib nullväärtust. Mahtuvusliku voolu nullväärtuse hetkel on pinge

maksimaalne ja elektrikaar võib lüliti pooluste vahel taas süttida [30]. Erinevat tegurid mõjutavad võimsuslüliti kontakte ning selles tulenevalt on vaja hinnata nende seisundit.

Võimsuslüliti kontaktide seisundit saab efektiivselt hinnata pea- ja kaarekustutuskontaktide takistuse mõõtmisel staatiliselt kui ka dünaamiliselt. Võimsuslüliti kontaktide üleminekutakistuse mõõtetulemused kirjeldavad võimsuslüliti kontaktide kulumist [5]. Staatilise ja dünaamilise mõõtmise erinevuseks on, et staatilise üleminekutakistuse mõõtmisel on võimsuslüliti sisse lülitatud kogu mõõte perioodil. Dünaamilise üleminekutakistuse mõõtmisel on katsetuse alguses võimsuslüliti sisse lülitatud, seejärel antakse lülitile väljalülituskäsk, mille tulemusena kontaktid avanevad. Kontaktide avanemisel toimub takistuse mõõtmine. Mõõteväärtuse tulemuseks on takistus $\mu\Omega$ -des, mille piirväärtuse ületamisel tuleb võimsuslüliti kontaktid asendada uutega.

1.4.3 SF₆ gaasi omadusi mõjutavad tegurid

Võimsuslüliti SF₆ gaasilekke tuvastamiseks kasutatakse erinevaid meetodeid. Tavapäraselt saadetakse gaasirõhu alanedes signaal, mille tekkimisel viiakse läbi võimsuslüliti SF₆ gaasi lisamine. Rõhu alanedes teise taseme alarmini, blokeeritakse võimsuslüliti ning seetõttu ei ole seade enam võimeline täitma määratud funktsiooni. Nimetatud meetodi puuduseks on asjaolu, et rõhu alanemine tuvastatakse alles siis, kui on saabunud alarm. Eelnevat on võimalik vältida, kui jälgida gaasirõhku reaalsajas. Andurid, mis mõõdavad pidevalt SF₆ gaasirõhu muutust, on kasutusel Soome ülekandevõrgus, mida täpsemalt kirjeldatakse peatükis 1.6.1. SF₆ gaasi seisundist saab veelgi täpsema ülevaate, kui gaasianalüsaatoriga mõõta gaasi koostise sisaldust. Analüüsi tulemustest saab välja selgitada, kui palju ja milliseid jääkaineid sisaldub SF₆ gaasis, ehk kui saastunud gaasiga on tegu. Nimetatud meetodi puuduseks on reaalsajas mõõtmiste teostamise keerukas lahendus ja kõrge maksumus.

1.4.4 Võimsuslüliti töökindlus tulenevalt hooldusest

Elektrivõrgus olevate seadmete hooldamine on eelduseks, et seade suudab talitleda ilma tõsisemate rikeeta kogu planeeritava eluea – 40 aastat. Seadme tootjad kirjeldavad juhendites [14] ja [15] ajalist perioodi, mille möödumisel või lülitustsükli arvu täitumisel tuleb võimsuslüliti hooldada. Võimsuslülite hoolduseid jagatakse A-, B-, C- hoolduseks [15], millest esimene A-hooldus hõlmab lihtsamaid hooldustoiminguid sh.

visuaalne ülevaatus ja viimasena C-hooldus ehk remont eeldab seadme lahti võtmist ning kulunud osade asendamist uutega. Tootjajuhendi kohaselt C-hoolduse järgselt pikendatakse võimsuslüliti eluiga märkimisväärselt. Olukorras, kus võimsuslüliti lülitamiste arv on minimaalne või null ei ole tootjapoolsed soovitused enamasti põhjendatud. Lisaks ei ole standardites ega tootjajuhendites välja toodud, mida tuleb teha, kui seade on ületanud oma eeldatava elueapiiri. Väheste lülituskordadega võimsuslülitel on oluline hinnata seadmete seisundit ja vastavalt sellele vastu võtta otsus, kas hooldus on vajalik või mitte. Kui hooldada võimsuslüliti, mis tegelikult ei vaja hooldust, võib tulemus olla oodatust hoopis vastupidine. Hooldusel tekkivad eksimused võivad viia seadme rikke tõenäosuse suurenemiseni ja seeläbi vähendada töökindlust [31].

Artiklis [32], kus vaatluse all oli kaks sarnaste parameetritega võimsuslüliti, üritati tuvastada, kuidas aeg mõjutab seadme töökindlust. Varasemalt teostatud hoolduste tulemusena olid nimetatud võimsuslülid võimelised teostama normaalalitalitlustoiminguid, kuid oodatud töökindluse suurenemist ei tuvastatud. Artiklis käsitletud võimsuslülitite vananedes isolatsioonimaterjalid mõranesid ning hoolduste järgselt ei saavutatud esialgset töökindlust. Lisaks ei läbinud võimsuslülid maksimaalse lühisvoolu katset. Lühisvooluga katsetamise ebaõnnestumist ilmestab joonis 1.13.



Joonis 1.13 Keskpinge võimsuslülitite vigastumine maksimaalselt lubatava lühisvooluga katsetamisel [32]

Kõik hetkel kasutusel olevad seadmed peavad vastama tänastele normidele, kuid artiklist [32] järeldeb, et seadmed, mis on ehitatud varasemate standardite järgi, ei pruugi hetkel kehtivatele nõuetele vastata. Seega tekib olukord, kus võimsuslüliti ei suuda läbida kehtivatele nõuetele vastavaid katsetusi. Joonisel 1.13 näidatud katsetamise tulemusena tekkinud riket saanuks ennetada, kui oleks rakendatud seisundipõhist hooldust ning lisaks sellele isolatsioonitakistuse- ja osalahenduste mõõtmist [32].

1.5 Võimsuslülitite hooldamise põhilised eesmärgid

Energeetika valdkonnas on hoolduste planeerimisel peamiseks tingimuseks tagada tarbijatele varustuskindlus. 2019. aastal koostatud varustuskindluse aruandes [33] tuuakse välja varustuskindluse kriteerium. Sellel, on kaks külge: kõrgem varustuskindlus, kõrgem hind. Ülekandevõrgu operaatori töö peamiseks eesmärgiks on tagada tarbijatele mõistliku hinnaga varustuskindlus. Selle saavutamiseks on seatud järgnevad eesmärgid [33]:

- Vähendada katkestuste ja rikete arvu ning sellega seoses ka andmata jäänud energiat;
- Maksimeerida seadme eluiga ja sellega seoses minimeerida investeeringute vajadust tulevikus.

Varade haldamisel on elektrivõrgu ettevõtetele suureks väljakutseks teadmatus seadmete hetkelisest olukorrast. Kulutõhusama varade haldamise olulisust ilmestab asjaolu, et Eesti ülekandevõrgu operaatori võimsuslülitite keskmine vanus on 13 aastat [16]. Sellega seonduvalt on lähiaastatel vajadus paljudele võimsuslülititele teostada hooldus. Töökindla seadme hooldamisega töökindlus ei suurene ja eelnevalt väljatoodud eesmäärke ei saavutata.

Järjest enam püütakse rakendada erinevaid meetodeid, et tuvastada võimalik seadme rike enne selle toimumist. Enim kehtib see varadele, mille hind on niivõrd suur, et ühe seadme rike mõjutab ettevõtet majanduslikult. Soodsamate ja vähem kriitiliste seadmete puhul kasutatakse rikkepõhist hoolduse metoodikat või ajalis lähenemist, kus teatud perioodi möödudes asendatakse seade uuega. Kallimate seadmete korral ajapõhist hooldust, mille intervallid on eelnevalt määratud. Ajaliselt reguleeritud hoolduse intervallid annab tootja koos seadme käidujuhenditega. Kulutõhusa seadmete hoolduse saavutamiseks on vajalik teada, milliseid hooldusmeetodeid on otstarbekas rakendada, kuid seejuures tuleb hinnata mitme aspekti omavahelist koosmõju [33].

Järgnevalt kirjeldatakse meetodeid seadmete hoolduseks [24]:

- Rikkepõhine hooldus – seadmeid ei hooldata, rikke tekkides remonditakse või vahetatakse vigane seade uue vastu;
- Ajapõhine hooldus – seadmeid hooldatakse või vahetatakse välja regulaarse intervalliga. See meetod võimaldab suurendada seadme töökindlust. Olukorras, kus seade on töökindel, ei saavutata hooldusega oodatud tulemust;
- Seisundipõhine hooldus – hoolduseid planeeritakse vastavalt seadme seisundile. Seadme seisundi hindamiseks rakendatakse optimaalselt kogutavate andmete

analüüsi, mille tulemusena tõstetakse seadme töökindlust ja seda kokkuvõttes optimeeritud kuludega;

- Ennetav hooldus – seadmeid hooldatakse eesmärgiga tagada seadmete võimalikult tõhus töökindlus. Selle meetodi rakendamine on vajalik, kui seadme rikkest tulenev kahju on ebaproportsionaalne võrreldes seame remondikuluga.

1.6 Võimsuslülitite hooldamine teiste riikide näidetel

Käesolevas peatükis esitatakse kirjanduse baasil ülevaade kahe Euroopa riigi ülekandevõrgu operaatori varade haldamisest. Esimeses alapeatükis kirjeldatakse Soome ülekandevõrgu operaatori Fingrid [27] ja teises Hollandi ettevõtte TenneT [34] lähenemist.

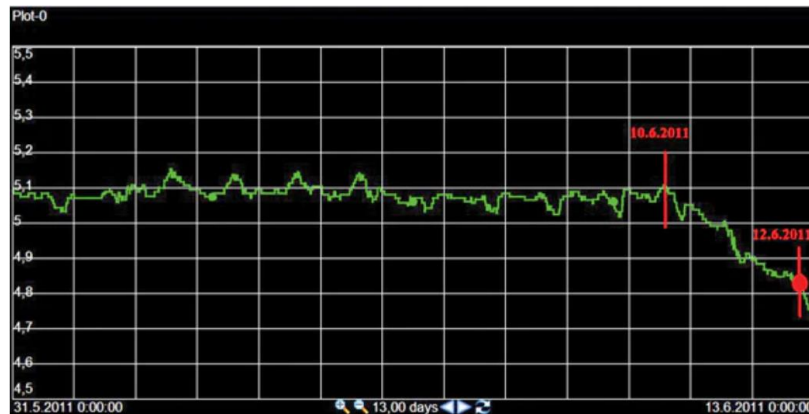
1.6.1 Soome ülekandevõrgu operaator Fingrid

Aastal 2012 otsustati [27] Soome ülekandevõrgus hakata rakendama seadme seisundipõhist hindamismetoodikat. Kogutud andmete haldamine jaguneb osadeks, mille kesksel kohal on andmeladu, kuhu ühekordselt sisestatakse alajaama seadmed ja nende seisundit kirjeldavad andmed. Alajaama visuaalse ülevaate käigus koostatakse seadmete aruanded digitaalselt, mis andmebaasis seostatakse eelnevalt sisestatud andmetega. Selle tulemusena on kiirelt võimalik saada ülevaade seadmete seisundist ja milliseid jätkutegevusi tuleb vajadusel rakendada. Kõiki kogutud andmeid on võimalik kiirelt ja sidusalt kasutada ning analüüsida. Andmelattu jõudev informatsioon võib olla nii reaajas kui ka pikemate ajavahemike tagant uuendatav. Lisaks on andmebaas liigendatud ettevõtte teiste süsteemidega, et vältida ühe ja sama informatsiooni mitmekordset sisestamist ning seeläbi liigset töökoormust.

Soome ülekandevõrgus kogutakse järgnevaid andmeid võimsuslülitite seisundi hindamiseks [27] ja [35]:

- Mõõteseadmega mõõdetavad parameetrid on:
 - Võimsuslülitite pea- ja kaarekustutuskontaktide takistused;
 - Faaside lülitusaegade erinevused;
 - Lülituspoolide madalaim tööpinge;
 - Vinnastusmootori töövool ja vinnastamiseks kuluv aeg.
- SF₆ gaasitihedus:

- Mõõdetakse anduriga, mille väljundiks on vool (mA);
- Mõõdetud gaasitihedus teisendatakse temperatuuriga kompenseeritud rõhkuks, muutes väärtuste lugemise kasutajatele mugavamaks (joonis 1.14);
- Mõõteandur, tuvastades rõhulanguse, tekitab kahte tüüpi signaali, millest esimene on 90 päeva keskmine rõhk ning selle langus ei tohi ületada 0,3 bar. Teine signaal on tuvastamiseks kiire rõhulangus, kus päevane maksimaalne lubatav rõhulangus on kuni 0,004 bar.



Joonis 1.14 Rõhuanduriga mõõdetud ühe päevane SF₆ gaasirõhu muutus võimsuslüli paagis [35]

- Lülituspoolide voolu mõõtmine seadmega Camlin Power Pro File P3, mille mõõtesagedus on 12,8 kHz [35]. Tulemused esitatakse graafikuna (joonis 1.16) ja võrreldakse eelnevalt defineeritud ideaalväärtustega ja seeläbi hinnatakse ajami teatud osade kulumist ning potentsiaalsele rikkele viitavaid tunnuseid.



Joonis 1.15 Võimsuslüli väljalülitusel lülituspooli voolugraafik kasutades mõõteseadet Camlin Power Pro File P3 [27]

- Soojuskaameraga seadmete pildistamine, tuvastamiseks seadmetel kuumapunkte [27]. Suurimaks eeliseks tuuakse välja, et pildistamiseks ei pea kontrollitavat seadet tööst välja lülitama.
- Kaitseleed mõõdavad võimsuslülitiga lahutatavat voolu ja väljalülituseks kuluvat aega [35].

Süsteemse informatsiooni kogumise ja arendatud algoritmi analüüsi tulemusena antakse hinnang võimsuslüliti seisundile, mis võimaldab pikemalt ette planeerida seadme hooldusvajadust ja seeläbi optimeerida varahalduskulusid [36].

1.6.2 Hollandi võrguoperaator TenneT

Enamik Hollandi ülekandevõrgu operaatori TenneT võimsuslüliteid on töös alates seitsmekümnendatest aastatest [34], mis omakorda tähendab, et need seadmed on jõudmas planeeritava eluea lõppu. TenneT arendas 2008. aastal [34] meetodika alajaama seadmete seisundi määramiseks. Võimsuslüliti seisundi määramist teostati kahes etapis, kus esimeses võeti arvesse varasemad hooldused ja seadmete ülevaatuste aruanded ning koostati selle põhjal statistiline andmebaas. Teises etapis lisati seisundi hindamiseks mõõtetulemused ja vastavad kaalutegurid ja seejärel arvutati võimsuslüliti seisund. Lisaks eelnevale arvutuslikult hinnati rikke tekkimise sagedust ja sellega kaasnevat riski. Seejuures on oluline välja tuua, et ligi pooled sisendandmed põhinesid hinnangutel: hea–rahuldav–keskmise–kehv. Lisaks saab välja tuua, et hinnangutel põhinevateks sisenditeks kasutati ekspertarvamust. Kirjeldatud meetodikat ettevõttes ei juurutatud, kuna ilmsid suured erinevused meetodiliselt arvatud seadme seisundi ja tegeliku seisundi vahel. Ühe põhjusena toodi allikas [34] välja, et erinevat tüüpi võimsuslülitite korral tuleks seisundi hindamisel läheneda vastavalt seadme tüübile. Lisaks toodi välja, et hinnangutel põhinevad lähteandmed muudavad sisendandmete kvaliteeti niivõrd, et saadud seadme seisundi tulemus ei vasta tegelikkusele. Kokkuvõttes toodi välja, et parem tulemus on võimalik saavutada, kui rakendada suuremas mahus mõõtmisi ning seejuures olulist tähelepanu tuleb pöörata sisendandmete kvaliteedile.

2. VÕIMSUSLÜLITI SEISUNDI HINDAMISE METOODIKA

Võimsuslüliti seisundi hindamine on oluline, et määrata seadme jääkressurss ja seeläbi tagada õigeaegsete hoolduste teostamisega seadme pikem eluiga. Käesolevas peatükis esitatakse ülevaade Eesti ülekandevõrgus kasutusel olevatest võimsuslülititest ja nende paiknemistest alajaamades. Lisaks esitatakse konkreetselt selle lõputöö raames koostatud metoodika, mille kasutuselevõtuga on võimalik hinnata võimsuslülitite seisundit. Samuti tuuakse peatükis välja võimsuslüliti elukaarel tehtavad tegevused kuni seadme asendamiseni. Olukorras, kus alajaamades olevate seadmete seisundit ei ole võimalik hinnata, tuleb varade hooldamisel lähtuda ajapõhisest intervallist. Lisaks koostatakse plokk skeem sisendandmetest, millest lähtuvalt saab hinnata võimsuslüliti seisundit. Informatsioon plokk skeemil on jaotatud värvide järgi rakendatavuse keerukuse alusel.

2.1 Eesti ülekandevõrgu võimsuslülitite ülevaade

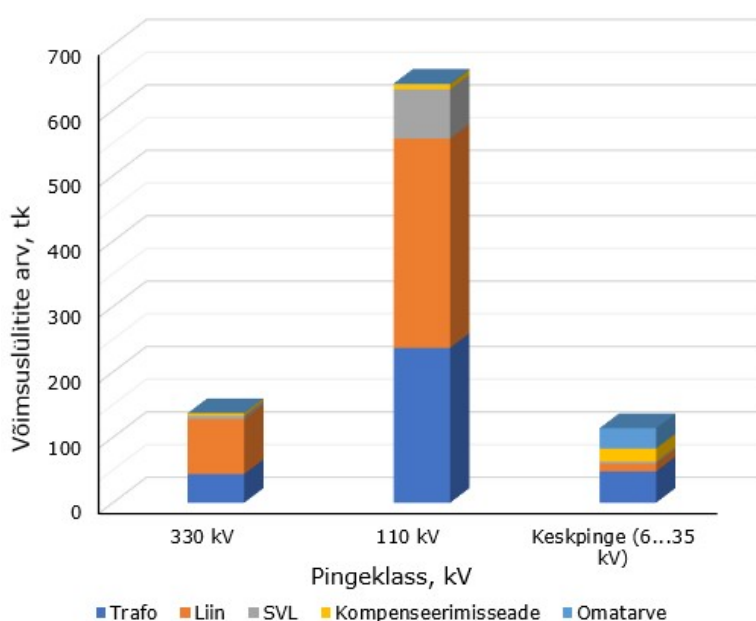
Elektriliinid algavad ja lõppevad alati alajaamas, kus toimub elektrienergia jaotamine ja pingestme muutmine tarbijale sobivaks pingeks. Eesti ülekandevõrgus on kasutusel kaks pinget astet, 330 kV ja 110 kV, millest 330 kV elektrivõrk moodustab süsteemivõrgu ja 110 kV elektrivõrk ülekandevõrgu [37]. Vähesel määral on ülekandevõrgu alajaamades ka keskpingel 35, 20, 10 ja 6 kV talitlevaid seadmeid. Eesti siseriiklikud võimsusvood liiguvad suuremal määral Narva–Tallinn ja Narva–Tartu suunal [38]. Põhja-lõuna suunalised 330 kV ülekandeliinid on kasutusel peamiselt elektrienergia transiidiks Lähti või vastupidi. Eesti elektriülekandevõrgus on kokku 153 alajaama, milles 140-s on vähemalt üks võimsuslüliti (tabel 2.1) [16].

Alajaamad, kus võimsuslüliti puudub, on kommutatsiooniseadmeks lahuti-lühisti kombinatsioon või lahklüliti. Lahuti-lühisti tööpõhimõtteks on lühise tekkides lühisti lühistamise, mille tulemusena ülekandeliini vastas otsas olev liinivõimsuslüliti tuvastades rikke olukorra rakendub ja lülitub välja. Võimsuslüliti väljalülitumise järel toimub lahuti välja lülitumine juba pingetus olukorras. Lahuti-lühisti kombinatsiooni puuduseks on asjaolu, et nimetatud seadmega ei ole võimalik pingestada seadmeid. Lisaks ei ole lahuti-lühisti mõeldud lühise eraldamiseks ülejäänud elektrivõrgust, sest see tekitaks kontaktide vahele püsiva elektrikaare.

Võimsuslülitid jagunevad alajaamas vastavalt lülitatavatele seadmetele. Tabelis 2.1 on esitatud ülekandevõrgu alajaamades paiknevad võimsuslülitid jaotatuna pingeklassidesse vastavalt lülitatavatele seadmetele. Joonise 2.1 alusel on kõige enam võimsuslüliteid nimipingega 110 kV ja sellele järgneb nimipingega 330 kV seadmed (joonis 2.1).

Tabel 2.1 Eesti ülekandevõrgu alajaamad ja võimsuslülitid jaotatuna nimipingele, kustutuskeskkonna ja peamiste tootjate järgi [16]

Nimipinge	Alajaamad, tk	Võimsuslülite arv, tk	Kustutuskeskkond		Tootja - ABB, tk	Tootja - SIEMENS, tk
			SF ₆ , tk	Vaakum/Õli, tk		
330 kV	14	132	132	0	40	54
110 kV	139	634	590	44	288	122



Joonis 2.1 Võimsuslülite jagunemine pingeklassi ja lülitatava seadme järgi [16]

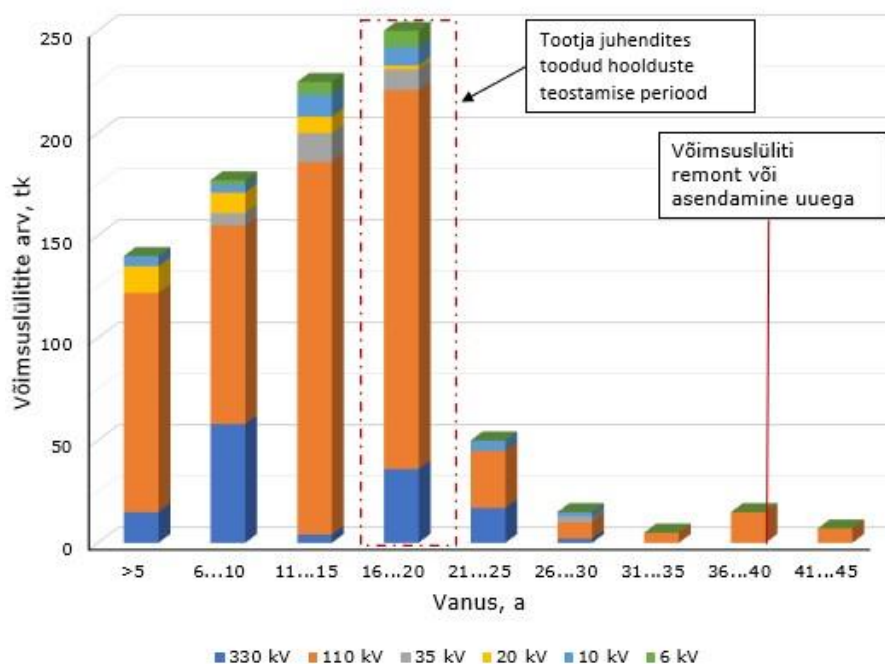
Vältimaks ulatuslikke katkestusi ülekandevõrgus on oluline hinnata võimsuslüliti seisundit lähtudes mõõteandmetest ja selle alusel on tarvilik planeerida seadme hooldus enne kriitilise rikke tekkimist. Lisaks on võimalik võimsuslülite seisundit hinnates vältida põhjendamatuid hoolduseid, millega ei kaasne seadme töökindluse suurenemist, halvimal juhul on tagajärjeks töökindluse langus. Tabelis 2.2 on esitatud ülekandevõrgu alajaamades olevad võimsuslülitid, mis on jaotatud kolme pingeklassi, millest 330 kV ja 6...35 kV võimsuslüliteid on arvuliselt tunduvalt vähem, kui 110 kV võimsuslüliteid. Seejuures on oluline välja tuua, et nimipingega 330 kV ühe võimsuslüliti hind on kordades kõrgem, kui teistel vaadeldavatel, madalama pingeastmega, võimsuslülitel. Sellest järeldub, et ühe 330 kV võimsuslüliti rikke tagajärjel tekkivad kulud, seadme asendamisel, on oluliselt suuremad kui 110 kV ja 6...35 kV võimsuslülite rikked. Vältimaks pika ajalisi katkestusi on 330 kV võrgus võimsuslülitid valdavalt dubleeritud

ning ühe võimsuslüli rike ei põhjusta tarbijatele toite katkestust. Alajaamadele nimipingega 110 kV ei esitata nii kõrgeid nõudmisi töökindlusele kui 330 kV jaotlatele ja seega võimsuslülitid üldiselt ei dubleerita. Rikke korral katkestuse kestvus võrdub ümberlülitamiseks kuluva aja või halvimal juhul seadme remondi ajaga.

Tabel 2.2 Võimsuslülitite maksumus pingeklasside kaupa [16]

Pingeklass	Võimsuslülitite arv, tk	Ühe võimsuslüli hind, mln €	Võimsuslülitite hind kokku, mln €
330 kV	132	0,10	13,20
110 kV	643	0,03	19,29
Keskpinge (6...35 kV)	107	0,02	2,14

Joonisel 2.2 on esitatud ülekandevõrgus kasutusel olevate võimsuslülitite vanuseline jaotumine pingeklassi järgi. Jooniselt 2.2 järeldub, et valdav osa võimsuslülitid on vanuses kuni kakskümmend aastat, mis tuleneb asjaolust, et ülekandevõrgu alajaamasid on valdavalt renoveeritud. Ligi 250 võimsuslülitit on vanuses 16...20 aastat, mis vastavalt tootjate juhenditele [14] ja [15] tähendab, et neile tuleb teostada suuremahuline hooldus. Seejuures on iga võimsuslüli jaoks määratud erinev vanus, millal peaks teostama hoolduse ehk ühel võimsuslülitil võib see olla 15 aastat, kuid mõnel teisel 20 aastat. Lisaks ei ole kõikide seadmete hooldust võimalik teostada üheaegselt, mis tähendab, et see tuleb hajutada pikemale perioodile. Joonisel 2.2 on riskülikuga tähistatud võimsuslüli vanused, millal peaks teostama nende suuremahulise hoolduse.



Joonis 2.2 Ülekandevõrgu võimsuslülitite vanuseline jaotumine vastavalt pingeklassile (seisuga 31.12.2020), lisaks on toodud ajapõhise meetodi piirid seadme hooldusel ja asendamisel [16]

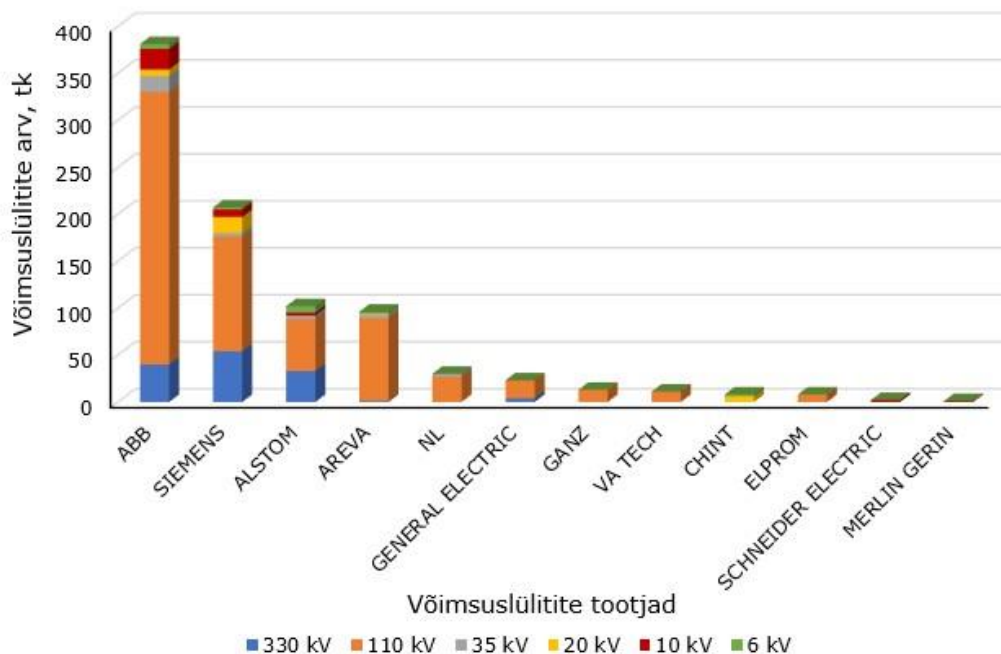
Lisaks on joonisel 2.2 esitatud punane joon, mis näitab vastavalt tootja informatsioonile seadme eluiga, mille täitudes tuleb võimsuslüliti täielikult remontida. See omakorda tähendab võimsuslüliti kustutuskambri lahti võtmist ja kõikide kulunud osade asendamist uutega. Niivõrd suuremahulise remondi teostamiseks tuleb kutsuda kohale tehase remondimeeskond, millest tulenevalt on võimsuslüliti remondi hind ligikaudselt võrdne seadme asendamisega. Hoolduseks ettenähtud ajalise piiri saavutades ei ole tehniliselt ja majanduslikult mõistlik kõiki võimsuslüliteid hooldada samaaegselt, seega varahalduskulude optimaalseks juhtimiseks on vajalik eelnevalt välja selgitada võimsuslülite seisund ning selle põhjal otsustada, kas kohene hooldus on vajalik. Olukorras, kus seisundi hindamise tulemusel järeldub, et võimsuslüliti hooldus on tarvilik, saab seda planeerides olla veendunud, et teostatav hooldus on põhjendatud ja suurendab seadme töökindlust.

Eesti ülekandevõrgu näitel, kus aastane keskmine võimsuslüliti lülitamiskordade arv on 25 lülitust [16], ei ole mõistlik lähtuda tootjajuhenditest, sest võimsuslüliti, millega teostatakse aastas väga vähe lülitusi, ei kulu määral, mida tootjad on juhendite koostamisel prognoosinud. Lisaks on jooniselt 2.2 näha, et ülekandevõrgu alajaamades on võimsuslüliteid, mille planeeritud eluiga, 40 aastat, on ületatud, seega sellest järeldub, et ressurss ei pruugi ammenduda eeldatava eluea täitumisel. Alajaamades, millede seadmete vanus on vahemikus 41...45 aastat, on tegu vanemate ehk Nõukogude Liidu (NL) aegsete võimsuslülititega ja alajaama renoveerimine on planeeritud lähimal viiel aastal [16]. Eeldatava eluea lõpus või selle juba ületanud võimsuslülite katse tulemuste analüüsi muudab keeruliseks asjaolu, et puuduvad referentsväärtused, mille suhtes hinnata seadme seisundi halvenemist. Lisaks ei ole käesoleval hetkel vanemates alajaamades olevate võimsuslülite seisundi hindamine optimaalne ja vastavalt võimalustele tuleks alajaama seadmed asendada uute ja kaasaegsetega.

Joonisel 2.3 on esitatud ülekandevõrgu kõikide võimsuslülite jaotumine tootjate vahel. Kokku on võrgus 882 võimsuslülitit [16], mis jagunevad kuue pingeklassi vahel. Võimsuslülite tootjatest kerkib esile kaks: ABB ja Siemens (joonis 2.3). Ülejäänud seadmed on teistelt tootjatele, mis on arvuliselt esitatud käesoleva töö lisas tabelina (Lisa L1.1 Ülekandevõrgu võimsuslülite jagunemine tootjate järgi nimipingeklassides). Suurima arvu ühte tüüpi võimsuslüliteid on ABB mudel LTB 72,5-170 kV (tabel 2.3 ja joonis 2.3). Selle mudeli pinge vahemik 72,5-170 kV tuleneb asjaolust, et tehases toodetakse ühte tüüpi seadet, kuid erinevuseks on informatsioon sildandmetes, sest võimsuslüliti sildandmed trükitakse vastavalt kliendi tellimusele [39].

Tabel 2.3 Vastavalt nimipingele SF₆ võimsuslülite jagunemine ülekandevõrgus tootjate järgi [16]

Nimipinge	110 kV			330 kV		
Tootja mudel	ABB LTB 72,5-170 kV	SIEMENS 3AP1 FG	Teised tootjad	ABB LTB 362-420 E2	SIEMENS 3AP2 FI	Teised tootjad
Võimsuslülid, tk	281	122	225	40	50	42



Joonis 2.3 Ülekandevõrgu võimsuslülite jagunemine pingeklassides tootjate järgi

2.2 Seisundi hindamise meetodika põhimõtted

Võimsuslülite seisundi või rikke tekkimise sageduse hindamiseks on võimalik kasutada erinevaid meetodikaid. Tõenäosusjaotust kasutatakse võimsuslüliti üksikosade kui ka tervikliku seadme rikke hindamisel. Rikke tõenäosusjaotus koosneb põhiliselt ajalisest faktorist, millal rike tekib, mis omakorda sõltub võimsuslüliti tootjast, mudelist ja talitleva seadme väliskeskkonnast. Rikke tekkimise aega ei ole enamasti võimalik hinnata otseselt seadme seisundist vaid tuleb teostada seadmetele võrdlevaid mõõtmisi või analüüsida eelnevalt kogutud andmeid.

Tabelis 2.4 on toodud võimsuslüliti seisundi hindamiseks kasutatavad võimalikud meetodikad, mille põhjal on võimalik anda hinnang, millal tekib rike ja mis on rikke tekkimise tõenäosus:

Tabel 2.4 Võimsuslüliti seisundi hindamiseks kasutatavad meetodid, millega põhjal on võimalik hinnata võimsuslüliti seisundit

	Kirjeldus	Eelised	Puudused
Markovi mudel [40]	Hinnatakse seadme vanusest tulenevalt töökindlust seadme seisundile	Analüüsitakse võimsuslüliti osasid eraldi	Arvestatakse rikke tekkimise sagedust ja seadme remondiks kuluvat aega
Rikke esinemissageduse estimateerimise mudel [34]	Hinnatakse üksikosade seisundi põhjal rikke tekkimise sagedust	Sisenditeks kasutatakse ka mõõtmistulemustest saadud väärtuseid	Arvestatakse rikke tekkimise sagedust. Seisundi hindamisel kasutatakse kaudseid hinnanguid
Töökindluse mudel [34]	Arvestatakse võimsuslüliti esimese ja teise rikke tekkimise aega ning selle põhjal arvutatakse millal võib tekkida kolmas ja neljas rike. Seeläbi antakse seadme töökindlusele hinnang	Võimalik hinnata järgnevate rikete oletatavat aega ja seeläbi seadme seisundist tulenevat töökindlust	Võimsuslüliti seisundi hindamiseks ei kasutata ühtegi reaalset mõõteväärtust. Väljundiks on võimsuslüliti rike, kuid üksikosa taset ei saavutata

Võimsuslüliti seisundi määramisel ja hoolduse planeerimisel, kasutades töökindluse hindamist või rikke tekkimise tõenäosust, on tegu hinnangulise meetodikaga, mis ei väljenda tegelikku seadme seisundit. Kaudse seisundi hindamiseks kasutatavate meetodikate puuduseks on, et seadme seisundi hindamisel kasutatakse seadme vanust või rikke tekkimise sagedust, mis ei ole otseses sõltuvuses seadme seisundiga. Võimsuslülite hoolduseid tuleks planeerida vastavalt seadme seisundile, et vältida seadme seisundi hindamisel kasutatavaid kaalutegureid ja vanusest tingitud hinnangute ebamäärasust. Saavutamaks täpsemaid seisundihindamise tulemusi on vajalik teostada võimsuslülitele mõõtmisi ja selle põhjal on võimalik hinnata võimsuslüliti osade kaupa. Samas iga mõõdetava parameetri seisundit eraldi hinnates on võimalik kokkuvõttes määrata terviklik hinnang seadme seisundile.

Võimsuslüliti katsetamise käigus saadavaid mõõteandmeid on võimalik võrrelda varasematega mõõtmistulemuste ja lubatud piirväärtustega ning selle alusel on võimalik esitada hinnang seadme seisundile suhtelises ühikutes (s.ü.). Oluline on mõõteandmete analüüsi teostamisel, et oleks olemas eelnevad mõõtmistulemused tehasekatsetuse aruandest. Ilma nendeta ei ole võimalik hinnata seadme seisundit. Kui uue võimsuslüliti kohta on teada parameetrite mõõteandmed ja ka piirväärtused, mille ületades võib eeldada, et võimsuslüliti ei ole võimeline talitlema töökindlalt, saab määrata intervalli kordusmõõtmiste teostamiseks. Kasutades esmase mõõtmise, kordusmõõtmise ja piirväärtuse andmeid saab seadme seisundit hinnata kasutades avaldist 2.1, mis on tuletatud allika [41] põhjal:

$$s. \ddot{u}. = \frac{Val_{m\ddot{o}o\ddot{d}e\ddot{t}u\ddot{d}} - Val_{algne}}{Val_{max} - Val_{algne}} \quad (2.1)$$

kus $s.ü.$ – mõõtetulemus seisundi hindamiseks, $s.ü.$;
 $Val_{mõõdetud}$ – mõõtmiste käigus saadud mõõteväärtus;
 Val_{algne} – eelmise mõõtmise mõõtetulemus;
 Val_{max} – mõõdetud parameetri piirväärtus.

Avaldise 2.1 arvutuse tulemus on vahemikus 0...1, millest 0 näitab, et mõõdetud parameeter ei ole muutunud esialgsest väärtusest kahe mõõtmise vahelisel perioodil ja 1 näitab, et mõõdetud väärtus on võrdne mõõdetud parameetri piirväärtusega, mis omakorda tähendab, et seadme parameetri ressurss on täielikult ammendunud. Joonisel 2.4 esitatud suhtühikute skaala põhineb allikas [41] välja toodul, kuid seda täiendati vastavalt käesoleva magistritöö eesmärkidele. Suhtühikute kasutamine võrreldes reaalseste mõõteväärtustega võimaldab hinnata ühtsel alusel erineva skaala ja ühikuga mõõteväärtuste muutuseid. Suhtühikute skaala paremaks mõistmiseks on joonisel 2.4 esitatud avaldise 2.1 tulemused jaotatud neljaks. Igale jaotisele on vastab seadme töökindluse kirjeldus või järgnev tegevus seadmega. Mõõdetud parameetritele esitatud hinnang väljendab konkreetse parameetri seisundit (HI – *Health Index*) ja seadmele tervikuna rakendub kõige suurema HI väärtuse saanud üksikosa väärtus, mis kirjeldab seadme seisundit tervikuna. Lisaks on võimsuslülitit tervikseisundi alusel võimalik tuvastada seadme probleemne osa.

$$s.ü. \rightarrow \begin{array}{l} 0 \leq s.ü. \leq 0,6 = 1 \\ 0,6 \leq s.ü. \leq 0,8 = 2 \\ 0,8 \leq s.ü. \leq 0,9 = 3 \\ s.ü. > 0,9 = 4 \end{array} \rightarrow \begin{array}{l} 1 = \text{Seade töökindel} \\ 2 = \text{Töökindlus langenud} \\ 3 = \text{Hoolduse planeerimine} \\ 4 = \text{Seadme hooldus või asendamine uuega} \end{array}$$

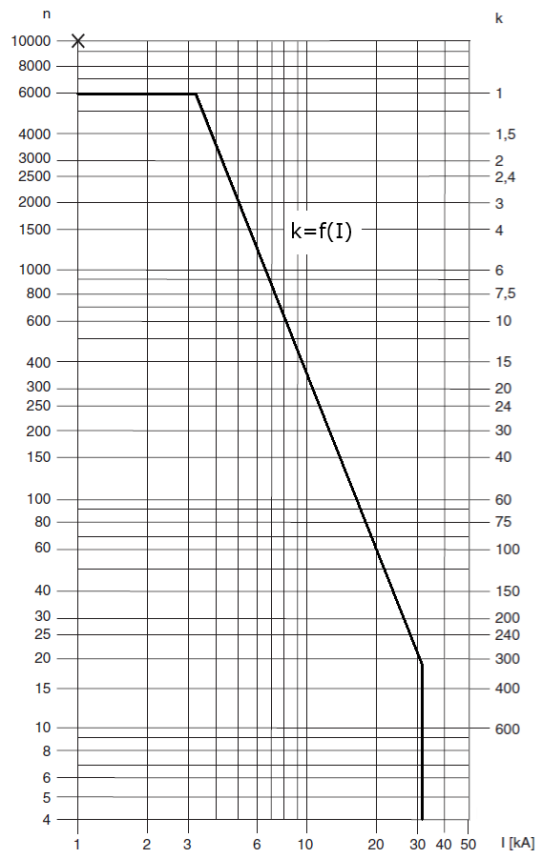
Joonis 2.4 Suhtühikute teisendamine seadme seisundi (HI – *Health Index*) skaalale vahemikus 1-4 koos vastava kirjeldusega [41]

Kõige keerulisem on hinnata võimsuslülitit kontaktide ressursi ilma kustutuskambrit avamata. Järgnevalt, käesolevas kontekstis, tuleb eristada võimsuslülitit elektrilistele kontaktidele lubatavat lülitusressurssi ja mehhaanilist lülitusressurssi. Kasutades avaldis 2.2 [14] on võimalik hinnanguliselt määrata võimsuslülitit pea- ja kaarekustutuskontaktide lülituste jääkressursi lahutataval voolul ehk elektrilistele kontaktidele lubatavat lülitusressurssi. Avaldises 2.2 võetakse arvesse nimi- ja lühisvooluga teostatud lülituskorrad, millest lahutatakse võimsuslülitile projekteeritud lülituskorrad ning jagatakse teguriga k_x , mis arvutatakse avaldisega 2.3. Iga võimsuslülitit tootja mudelil on erinev funktsioon $k = f(I_x)$, mis tuleneb joonisel 2.5 esitatud graafikult. Joonisel 2.5 esitatud graafik vastab võimsuslülitile Siemens 3AP1 FG.

$$n_x = \left(\frac{y - (n_{In} \cdot k_{In} + \sum (n_j \cdot k_j + n_{jn} \cdot k_{jn}))}{k_x} \right) \quad (2.2)$$

$$k_x = 0,020343 \cdot I_x^{2,815763} \quad (2.3)$$

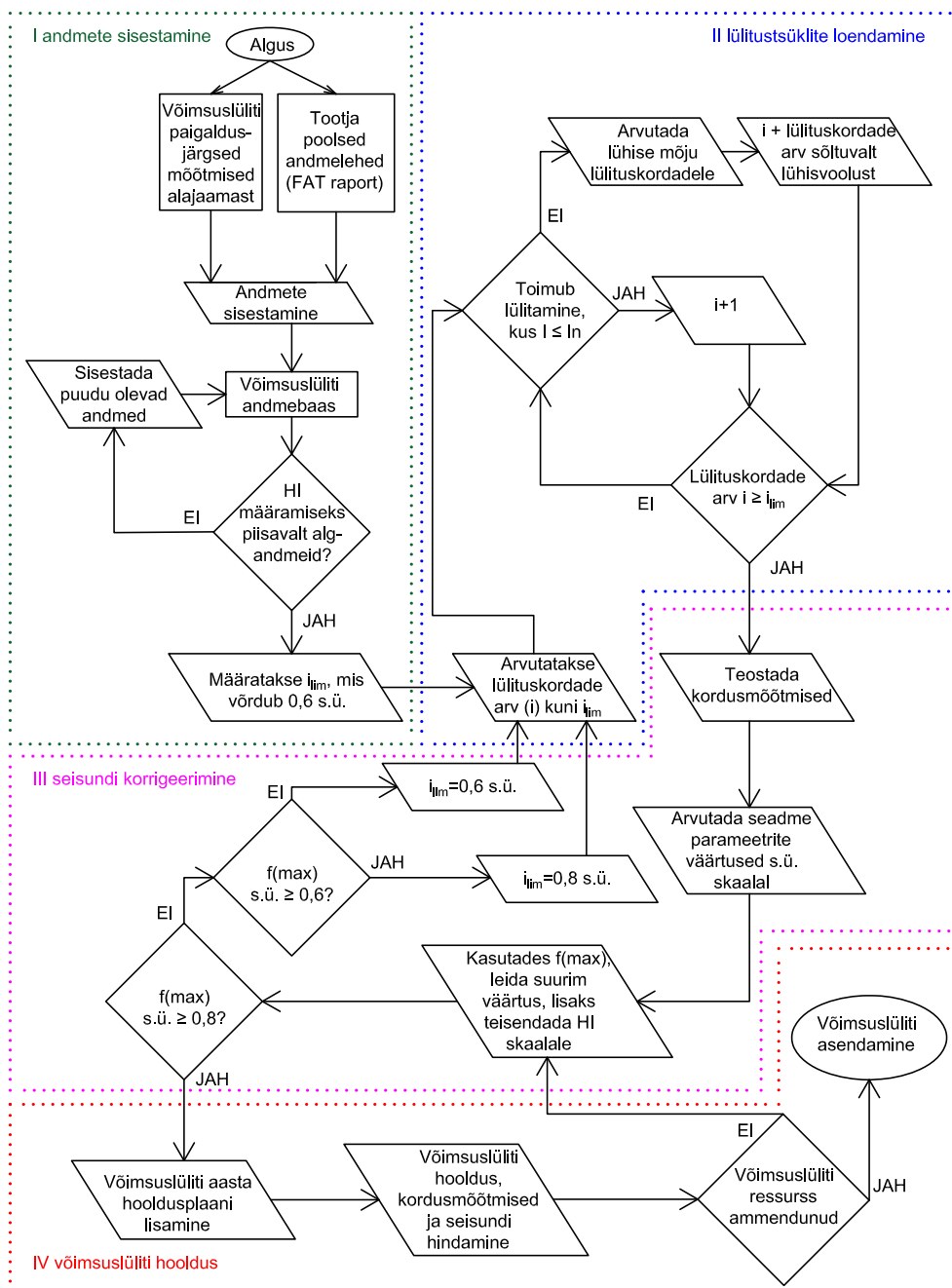
- kus n_x – lubatavate väljalülituste arv sõltuvalt lahutatavast voolust, tk;
 y – maksimaalne lülituskordade arv nimivoolul, tk;
 n_{In} – nimivooluga teostatud lülitamiste arv, tk;
 k_{In} – tegur k võimsuslülitil nimivoolul;
 n_j – lühiste arv, tk;
 k_j – lühisvool, kA;
 k_x – tegur k voolul I_x , millele jääkressurssi otsitakse, kA;
 I_x – lahutatav vool, kA.



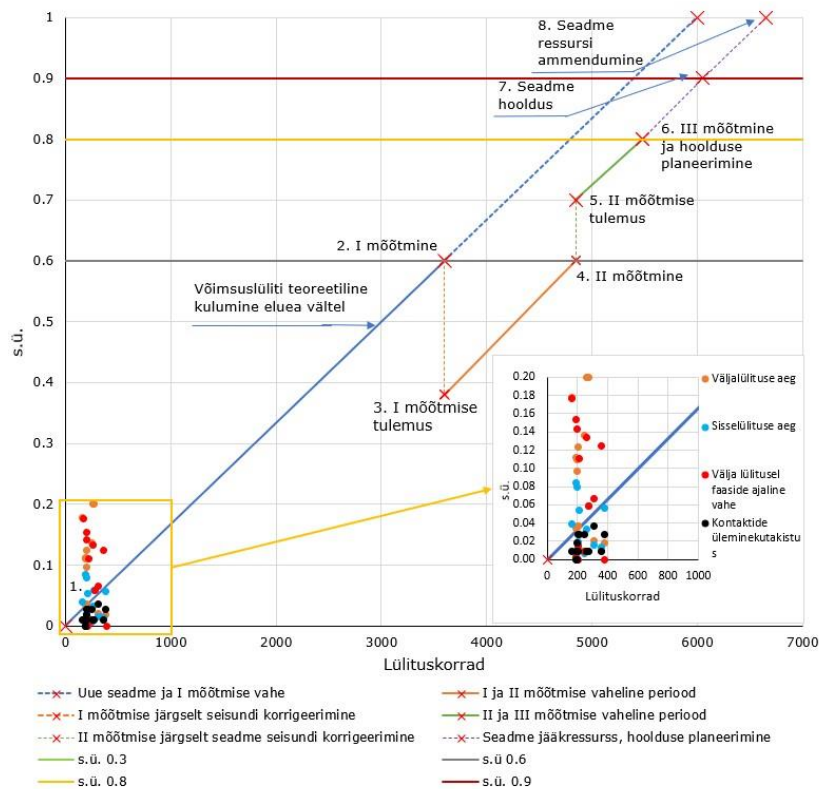
Joonis 2.5 Võimsuslülitil 3AP1 FG maksimaalselt lubatud väljalülitamiste arvu sõltuvus lahutatavast voolust [14]

Võimsuslülitil kolme faasisamba lahutatavat lühisvoolu on võimalik mõõta individuaalselt, seega võimsuslülitil pea- ja kaarekustutuskontaktide jääkressurssi täpsemaks hindamiseks on võimalik igat faasi vaadelda eraldi. Elektrivõrgus ei ole lühised enamasti kolmefaasilised, seega lühisvoolust tingitud võimsuslülitil faaside kulumine on erinev. Kõige sagedasemad lühised Eesti ülekandevõrgus on ühefaasilised

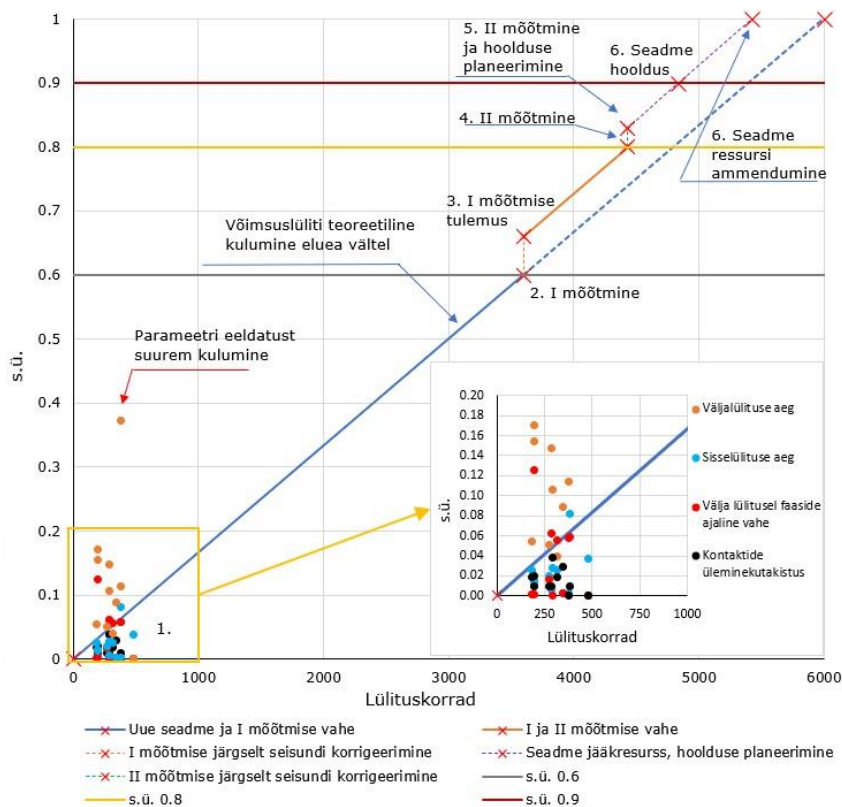
loendamise osasse, millest esimese sammuna arvutatakse välja lülituskordade arv i , mille täitumisel saavutatakse 0,6 s.ü. piir i_{lim} . Edasi toimub lülituste loendamine, kus jagatakse lülitamised kaheks. Esiteks, kui lülitatav vool on väiksem või võrdne lüliti nimivooluga, siis liidetakse eelnevalt teostatud lülitustele juurde üks lülituskord. Teiseks, kui lülitatav vool ületab nimivoolu, arvutatakse lühisvoolu mõju lülitamiskordadele ja saadud tulemus liidetakse eelnevalt teostatud lülitamistele. Iga lülitamise järel kontrollitakse, kas on saavutatud lülitamiskordade piir i_{lim} , kui ei ole, siis jätkub lülitamiste loendamine eelnevalt kirjeldatule.



Joonis 2.6 Võimsuslülitite seisundipõhist hindamist kirjeldava meetodi voodiagramm seadme eluea vältel



Joonis 2.7 Võimsuslülitite seisundi hindamine eluea vältel, mille kordusmõõtmiste lõpptulemusena seadme lülitusressurs on suurenenud, lisaks on toodud reaalse mõõteandmete [16] põhjal arvutatud võimsuslülitite seisund ühe 110 kV alajaama näitel



Joonis 2.8 Võimsuslülitite seisundi hindamine eluea vältel, mille kordusmõõtmiste lõpptulemusena seadme lülitusressurs on vähenenud, lisaks on toodud reaalse mõõteandmete [16] põhjal arvutatud võimsuslülitite seisund ühe 110 kV alajaama näitel

Kui lülitamiskordade arv on täitunud ehk võrdne lülitamiskordade piiriga i_{lim} , liigutakse voodiagrammis edasi kolmandasse jaotisesse, kus teostatakse võimsuslülitile kordusmõõtmised ja saadud tulemuste alusel arvutatakse mõõdetud parameetrite väärtused s.ü. skaalal. Võimsuslülitiseisundit tervikuna kirjeldab suurima s.ü. väärtuse saanud üksikosa väärtus, mida arvutatakse kõikidest arvutatud parameetritest funktsiooniga $f(\max)$ ja saadud tulemus teisendatakse ka HI skaalale. Järgnevalt liigutakse voodiagrammis suurima s.ü. väärtuse saanud parameetriga edasi, mille põhjal otsustatakse järgnevad tegevused. Kui parameeter $f(\max) \leq 0,8$ s.ü., siis saab järeldada, et seade ei vaja hetkel hooldust ja voodiagrammis liigutakse tagasi lülitamiskordade loendamise tsükli suunas. Järgmise sammuna kontrollitakse, kas saadud väärtus on suurem kui 0,6 s.ü. Olukorras, kus võimsuslülitiseisundit kirjeldav väärtus ületab 0,6 s.ü., siis määratakse uueks piiriks 0,8 s.ü. (joonis 2.4), mis on ühtlasi ka hooldusele eelnevaks piiriks. Järgnevalt liigutakse voodiagrammis tagasi lülitamistsüklite loendamisse, kus toimub eelnevalt kirjeldatud. Olukorras, kus võimsuslülitiseisund on eeldatust väiksem ehk alla 0,6 s.ü., arvutatakse uuesti i_{lim} 0,6 s.ü.-le ja seejärel liigutakse edasi lülitamiskordade loendamise tsükklisse.

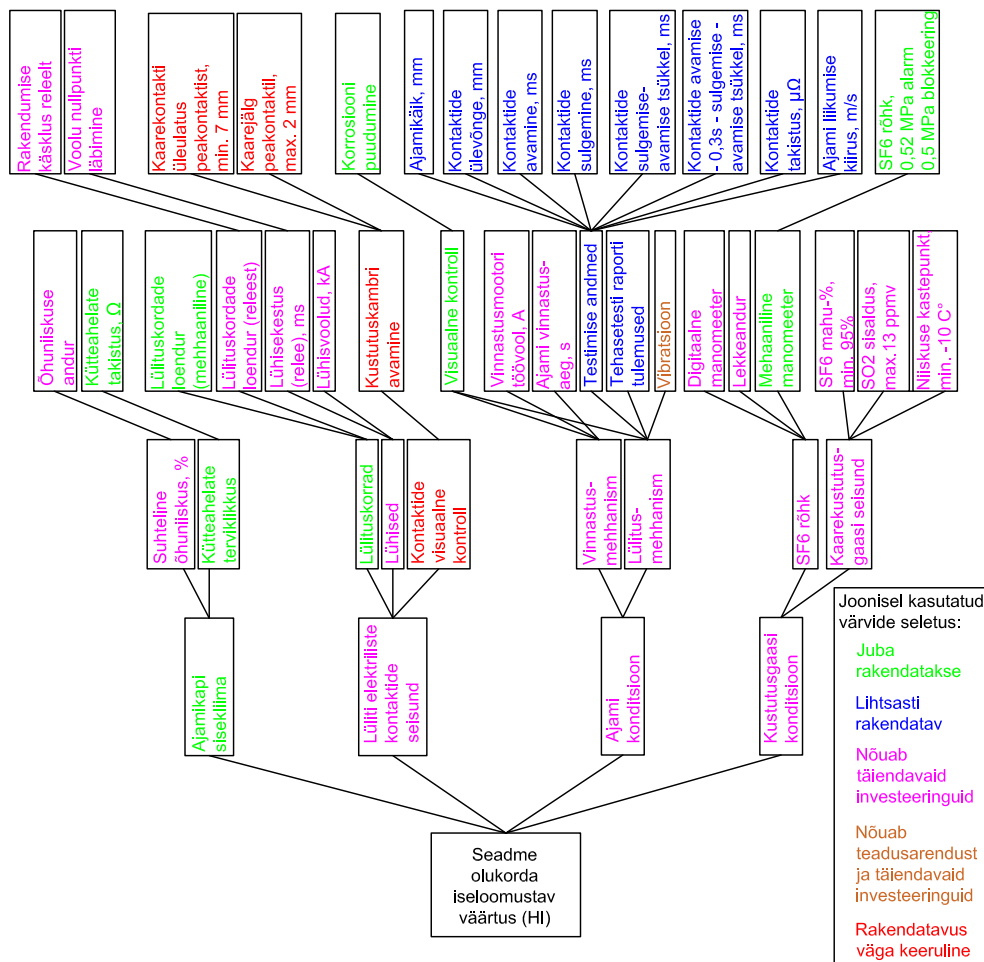
Kui üks mõõdetud parameeter on suurem või võrdne 0,8 s.ü., siis vastavalt voodiagrammile liigutakse kolmandast tsüklist neljandasse, mis kirjeldab seadme hooldamist ja sellele järgnevat tegevusi. Neljandasse tsükklisse liikumise piiriks on võetud 0,8 s.ü., mille korral jääb lülitamisteks reserv ning seeläbi on võimalik pikemalt planeerida hoolduse aega. Hooldus lõppeb kordusmõõtmistega, mille tulemusena hinnatakse seadme ressursi ja teostatud hoolduse efektiivsust. Olukorras, kus seade on niivõrd halvas seisundis, liigutakse edasi seadme asendamise juurde, millega ühtlasi lõppeb võimsuslülitiseisund ja voodiagramm. Enne vana võimsuslülitiseisundi asendamist tuleb eelnevalt hinnata alajaama teiste seadmete seisundit ja seeläbi on võimalik otsustada, kas asendada konkreetne seade või renoveerida terve alajaam. Seda meetodikat kasutades on võimalik pikendada seadme eluiga.

Eelnevalt kirjeldatud voodiagrammi (joonis 2.6) aitab hästi visualiseerida joonised 2.7 ja 2.8, kus esimesel (joonis 2.7) on peale kordusmõõtmiste teostamist seadme seisund eeldatust oluliselt parem (joonis 2.7 punkt 2 ja 3). Vastupidist olukorda kirjeldab joonis 2.8, kus kordusmõõtmiste tulemusena on võimsuslülitiseisund eeldatust kehvem (joonis 2.8 punkt 2 ja 3). Seega käesolevat meetodit rakendades on võimalik hinnata seadme lülitusressursi ja planeerida hoolduseid. Võrreldes hetkel kasutusel oleva ajapõhise hooldusmeetodikaga saavutatakse seisundipõhise lähenemisega märkimisväärne varahalduskulude kokkuhoid, sest võimsuslülitiseisundite teostatakse vastavalt seadme seisundile.

Eelnevalt kirjeldatud seadme seisundi hindamine on üks osa võimsuslüliti terviklikust käidust. Seda meetodikat on keeruline rakendada võimsuslülititele, millega teostatakse aastas vähe lülitamisi. Ülekandevõrgu 882-st võimsuslülitist on 108-ga lülitatud kuni viis korda viimase viie aasta jooksul ehk keskmiselt üks kord aastas. Äärmusliku näitena saab välja tuua, et kõikidest võimsuslülititest 43-ga ei ole kordagi viimase viie aasta jooksu lülitamisi teostatud. Väheste lülitamiste korral ei ole võimsuslüliti peamiseks rikke põhjuseks mitte seadme kulumine, vaid mitteopereerimisest tingitud amortiseerumine. Seega väikse lülituskordade arvuga lüliteid tuleb hinnata teisiti võrreldes sageli opereeritavate võimsuslülititega. Võimsuslülitid, millega aastas ei tehta ühtegi lülitamist, on seadme seisundi kontrollimise võimaluseks esmane lülitamise test ehk *first trip test*. Selle katsetamise käigus ühendatakse mõõteseade võimsuslüliti sekundaarahelate ja ajamiga ning seejärel toimub vastavalt seadme normaalasendile välja-sisse või sisse-välja lülitus. Saadud mõõtmise tulemuste alusel on võimalik hinnata, kas mitteopereerimisest on ajami liikuvates osades toimunud muutused. Nimetatud meetodiga saadakse teada, milline on mõju võimsuslülitele, kui viimasest lülitamisest on möödas enam kui aasta. Lisaks on vaja personali, kes vajalikud mõõtmised teostaks, millest viimane omakorda tekitab lisakulu. Kord aastas lülitamine aitab vältida olukorda, kus ajami liikuvate osade määrdeaine saaks hanguda niivõrd, et lülitamisel tekiks tõrge [32]. Seega käidujuhenditesse tuleks lisada punkt, kus igat võimsuslüliti peab aastas vähemalt korra sisse ja välja lülitama.

Seisundi hindamise parema täpsuse saavutamiseks on vajalik rakendada reaalarajas jälgimist ehk *online* jälgimist, kus kordusmõõtmiste sagedus on suur ja seadme HI väärtust korrigeeritakse vastavalt seisundi muutusele. Üks võimalikest variantidest *online* jälgimist rakendada on võtta kasutusele alajaamades olevad kaitsereleed. Lühise tuvastamisel kaitsereleed annavad võimsuslülitele väljalülitamise käsu, mille tulemusena lahutatakse rikke põhjustanud seade või liin ülejäänud elektrivõrgust. Lisaks kaitserelee põhifunktsioonile on võimalik aktiveerida ka võimsuslüliti seisundi hindamiseks vastav funktsioon, Siemens SIPROTEC 5 näitel funktsioon *Monitoring of equipment* [42]. Kui kaitserelees on seisundi hindamise funktsioon aktiivne, siis kasutatakse mõõdetud lühisvoolu ja lülituskordade loendamist võimsuslüliti seisundi hindamiseks. Selle tulemusena kaitserelees teostatakse arvutused I^2t meetodiga [43-45] mille põhjal hinnatakse võimsuslüliti kontaktide kulumist. Olukorras, kus kontaktide kulumine on saavutanud eelnevalt määratud piirväärtuse, annab kaitserelee sellest vastava signaaliga märku. See meetod on sarnane eelmises peatükis kirjeldatud valemiga 2.2 põhimõttega, kuid lisaks arvestab kaitserelee lühise välja lülitamiseks kuluvat aega. Elektriikaare põlemise aeg lüliti kontaktide vahel on üks tegur, mis kiirendab kontaktide kulumist (joonis 1.11). Seeläbi on võimalik saada ilma suuremate lisakulutusteta üks

komponent kogu võimsuslülitist reaajas mõõdetavaks. Ülekandevõrgus kasutusel olevatest kaitserleedest võimaldab võimsuslülitiseisundi jälgimist rakendada Siemensi SIPROTEC 5 [45] ja ABB-lt REF500 [44] ning REF600 [43]. Siiski, kasutades võimsuslülitise kontaktide seisundi hindamiseks kaitserlee funktsiooni, ei saa kordusmõõtmiste teostamisel jätta kõrvale üleminekutakistuse mõõtmist, sest see võimaldab saada täpsema ülevaate võimsuslülitise pea- ja kaarekustutuskontaktide tegelikust seisundist ilma, et peaks avama võimsuslülitise kustutuskaambi. Joonisel 2.9 on toodud põhimõtteskeem, mille koostamisel lähtuti ülekandevõrgu operatori poolt kogutavatest andmetest ja täiendati kirjandusest saadud informatsiooniga [24] ja [46], mida on võimalik võimsuslülitise seisundi hindamiseks koguda, seejuures on oluline välja tuua, et iga tekst joonisel on teatud värv, mis näitab andmete kogumise keerukust.



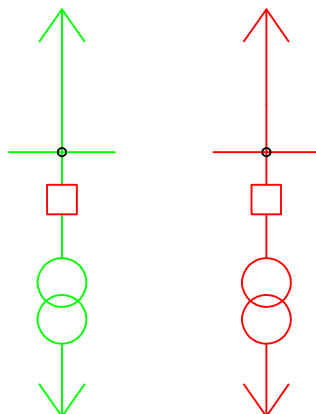
Joonis 2.9 Võimsuslülitise seisundi hindamiseks kasutatavate informatsiooni plokskeem, kus andmed on värvitud vastavalt nende rakendatavuse keerukusele seisundi hindamisel [16]

3. VÕIMSUSLÜLITI SEISUNDI HINDAMISE METOODIKA RAKENDAMINE

Järgnevas peatükis kirjeldatakse ülekandevõrgu alajaama skeemide põhjal n-1 ja n-2 olukordasid, mille tulemusena tekib alajaamaga seonduvatel ühendustel toitekatkestus või riikidevahelised ülekandevõimsuse piirangud. Pingeastmel 330 kV nõutav töökindlus on oluliselt suurem, kui pingeastmel 110 kV, seega ei ole lubatud 330 kV ülekandevõrgus n-1 olukorras tarbijate toitekatkestus. Ülekandevõrguoperaatori 330 kV elektriülekandeliinidel ja olulisematel trafodel on toiteskeemis kaks võimsuslülitit, mis välistab n-1 olukorras toite katkestuse tarbijatele, kuid tekivad piirangud ülekandevõimsuste edastamisel. Samuti esitatakse ülevaade võimsuslülitite seisundi hindamiseks kasutatavatest võimalikest mõõteseadmetest. Lisaks esitatakse peatükis käesoleva magistritöö raames teostatud võimsuslülitite mõõtmistulemused, mis teostati ülekandevõrgu operaatori 110 kV alajaamas. Samuti antakse ülevaade ülekandevõrgu operaatori hetketegevustest ja nende võimalikust arendamise võimalustest ning alapeatüki lõpus on koostatud joonis kirjeldamaks võimsuslülitite andmebaasi struktuuri ja selles sisalduvat informatsiooni.

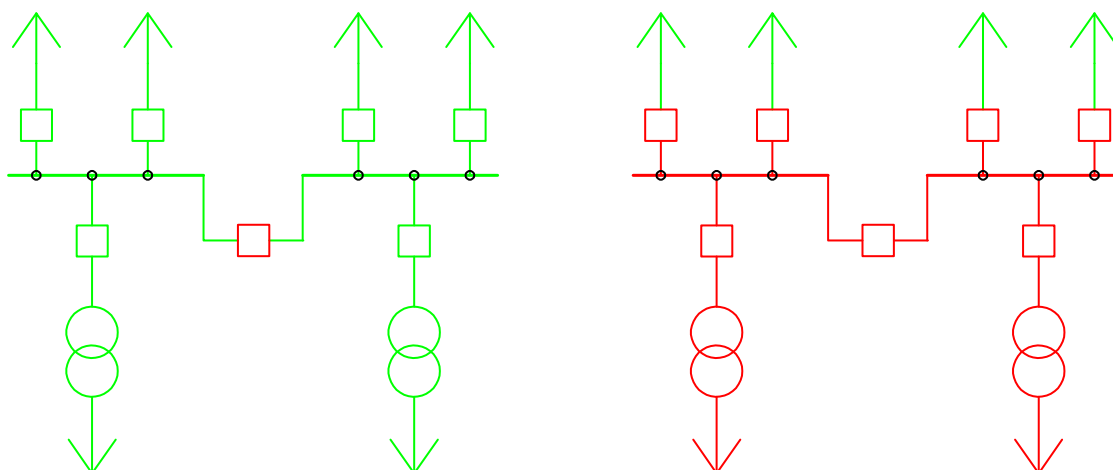
3.1 Võimsuslülitite n-1 ja n-2 olukorrad Eesti ülekandevõrgu alajaamade näitel

Ühe kogumislatisüsteemiga sektioneerimata jaotla skeemil ehk tupikalajaama skeem (joonis 3.1), kus üks võimsuslülitit on nii liinile kui ka trafode ühine, tekib võimsuslülitite väljalülitusel alati seonduvatel ühendustel toitekatkestus. Tupikalajaama skeem on kasutusel ülekandevõrgu alajaamades, kus varustuskindluse tagamine ei ole esmatähtis ja toitekatkestuse korral on võimalik tarbijaid, jaotusvõrgus ümberlülitusi tehes, elektriga varustada. Siiski on oluline mõista, et võimsuslülitit on sellise skeemiga alajaamas kriitilise tähtsusega seade, kuna põhjustab alajaama, kui terviku välja lülitumise ja kokkuvõtteks toitekatkestuse tarbijatele. Eesti ülekandevõrgus on tupikalajaamasid kokku 40 [16], kus võimsuslülitite rikke korral tekib seonduvatel ühendustel toitekatkestus. Tupikalajaamade välja lülitumisel, ei tekitata üldiselt suure ulatusega toitekatkestust, seda ilmestab andmata jäänud energia, mis on keskmiselt 0,36% [16] ühe alajaama kohta, mis omakorda viitab sellele, et tupikalajaama skeemi kasutatakse hajaasustusega maapiirkondades.

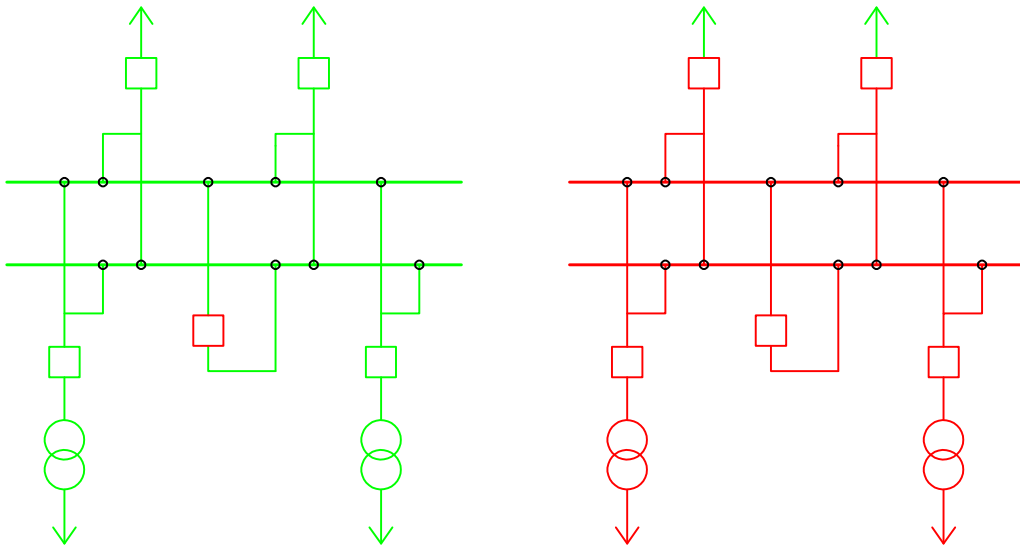


Joonis 3.1 Ühe kogumislatisüsteemiga sektioneerimata jaotla skeemi n-1 olukord, võimsuslüüti (vasakul punane ruut) rikke tagajärjel toite katkestus alajaamaga seonduvatel ühendustel (joonis paremal) [37]

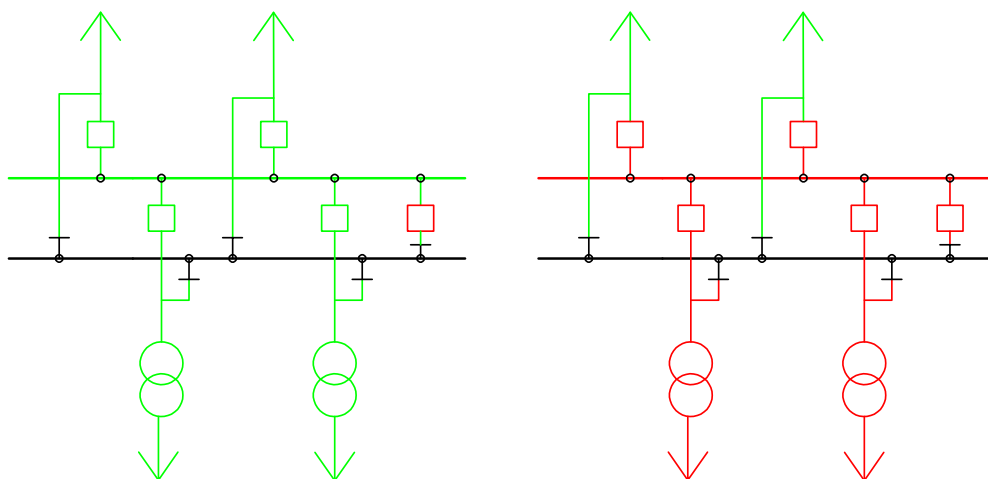
Jaotla skeemid (joonised 3.2...3.4) on kasutusel tähtsamates 110 kV alajaamades, kus on vajalik tagada kõrgem töökindlus. Normaalolukorras on seadmete hooldamine ja remont teostatav ilma katkestuse tekitamiseta tarbijatele. Halvimas n-1 olukorras, kus töötab võimsuslüüti tõrkekaitse sektionide vahelisel võimsuslülitil (SVL), lülitatakse rikke ulatuse piiramiseks välja kõik rikke põhjustanud seadmega seonduvad võimsuslülitid. Võimsuslüüti tõrkekaitse rakendub olukorras, kus lühise või mõne muu rikke tulemusena peab võimsuslüüti sooritama väljalülituse, kuid seda ei toimu. Tekkinud tõrget sellises olukorras käsitletakse kui eraldi riket, mille tulemusena lülitatakse välja kõik rikke põhjustanud seadmega seonduvad võimsuslülitid.



Joonis 3.2 Ühekordsete kogumislattidega sektioneeritud jaotla skeemi (H-skeemiga) n-1 olukord, sektionidevahelise võimsuslüüti (vasakul punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud toite katkestus alajaamaga seonduvatel ühendustel (joonis paremal) [37]



Joonis 3.3 Kahekordse kogumislattiga jaotla skeemi n-1 olukord, sektsioonidevahelise võimsuslüli (vasakul punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud toite katkestus alajaamaga seonduvatel ühendustel (joonis paremal) [37]



Joonis 3.4 Ühekordsete kogumislattidega ja möödaviiklattidega jaotla skeemi n-1 olukord, möödaviikvõimsuslüli (vasakul punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud toite katkestus alajaamaga seonduvatel ühendustel (joonis paremal) [37]

Joonistel 3.2...3.4 n-1 olukorda kirjeldab parempoolne pilt, kus on välja lülitunud mõlemad trafod kui ka liinivõimsuslülitid, liinid ise jäävad vastasalajaamade kaudu pingestatuks. Seega ühe võimsuslüli tõrge põhjustab kogu alajaama välja lülitumise ehk kustumise. Nendel alajaama skeemidel ei ole tagatud SVL-i rikke korral n-2 olukorda, sest juba n-1 olukord tekitab toitekatkestuse kõikidel alajaamaga seonduvatel ühendustel. SVL-i rikked kestab toitekatkestus tarbijatele rikke põhjustanud võimsuslüli ümberlülitamise aja, mille järgselt on võimalik tarbijate elektriga varustamine kiirelt taastada. Oluline on nende skeemide juures mõista, et hooldustööde perioodil ei ole enamasti alajaama normaalskeem ja n-1 olukord võib suurema

töenäosusega realiseeruda. Tabelites 3.1 ja 3.2 on toodud ülekandevõrgu alajaamade jaotla skeemide jaotumine vastavalt nimipingele. Tabelis 3.1 on toodud 110 kV alajaamade skeemid, millest valdav osa on ühekordsete kogumislattidega sektioneeritud skeemid ehk H-skeemiga alajaamad, sellele järgneb ühe kogumislattiga sektioneerimata ja kahekordse kogumislattiga jaotla skeem. Eesti ülekandevõrgus on kokku kolm alajaama, milles on kasutusel ühekordsete kogumislattidega ja möödaviiklattidega jaotla skeem ehk möödaviiksüsteemiga jaotla. Möödaviiksüsteemi ja kahekordse kogumislattiga skeemid on peamiselt kasutusel alajaamades, kus on koos nii 330 kV kui ka 110 kV jaotlad, mis võimaldab võrguoperaatorile piisavalt paindliku ja töökindla süsteemi, mille tulemusena on tarbijatele tagatud kõrge varustuskindlus.

Tabel 3.1 Ülekandevõrgu 110 kV alajaamade hulk vastavalt alajaama skeemile [16]

Nimipinge, kV	Ühekordsete kogumislattidega sektioneerimata skeem	Ühekordsete kogumislattidega sektioneeritud skeem	Möödaviik-süsteemiga skeem	Kahekordse kogumislattiga skeem
110	40	71	3	15

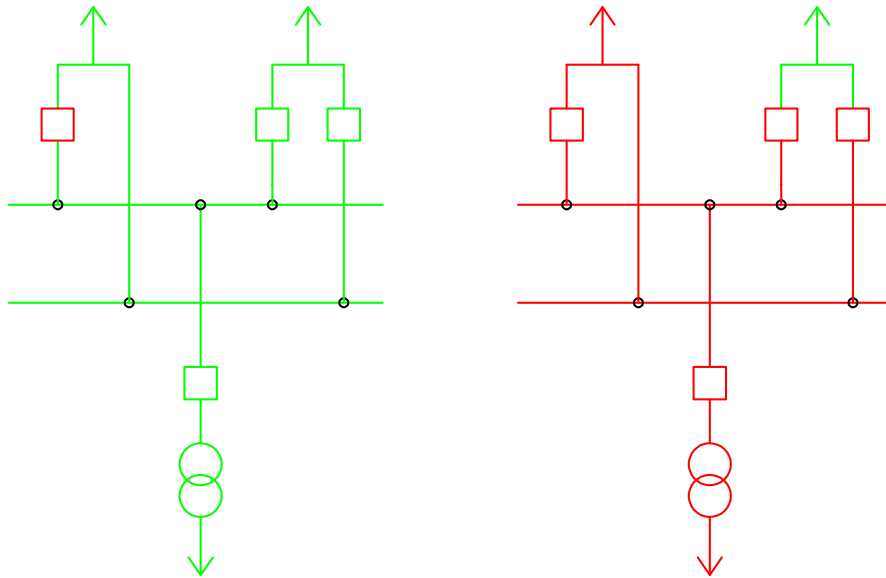
Tabel 3.2 Ülekandevõrgu 330 kV alajaamade hulk vastavalt alajaama skeemile [16]

Nimipinge, kV	Poolteistlüliti skeem	Kolmnurk-lüliti skeem	Modifitseeritud kakslüliti skeem	Kakslüliti skeem
330	0	2	11	0

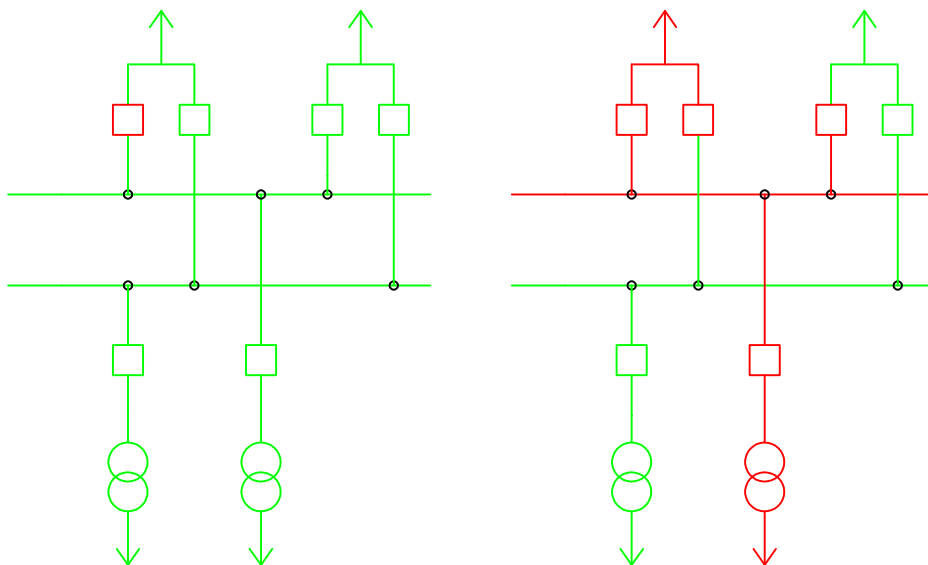
Eristada tuleks SVL-i ja liini võimsuslüliti n-1 olukord, millest SVL-i rike põhjustab alajaama kustumise ja liini võimsuslüliti n-1 olukord tekitab töökindluse languse, kuid otsest mõju võimsusvoogude piirangule ja toitekatkestusele ei ole. Seega saab liini võimsuslülitite rikke tekkimisel rääkida n-2 olukorrast, mille tulemuseks on SVL-i n-1 olukord ehk alajaama lattide pingetuks jäämine ja seeläbi tarbijate toitekatkestus.

Joonistel 3.5...3.8 toodud jaotlaskeeme kasutatakse ülekandevõrgus pingel 330 kV, mille töökindlusele esitatakse kõrged nõudmised. Eesti 330 kV ülekandevõrk on peamiselt mõeldud võimsuse ülekandmiseks elektriyaamadest suurematesse sõlmalajaamadesse ja riikide vaheliseks võimsusvoogude transiidiks [38]. Nõutava töökindluse saavutamiseks tehtav investeering on kordades kõrgem, sest ühe fiidri kohta on vajalik paigaldada kaks komplekti seadmeid. Eesti ülekandevõrgu näitel on investeeringu kulusid optimeerides ehitatud kolmnurklüliti skeemiga (joonis 3.5) alajaamad. Rahalise kokkuhoiu ja piisava töökindluse seisukohast on tegu optimaalse lahendusega, kuid võimsuslüliti rike alajaamades põhjustab ülekandevõimsuse piirangu ja olukorra, mille tulemusena võib tekkida tarbijatele toitekatkestus. Eestis on kokku 13 nimipingega 330 kV alajaama, millest kaks on kolmnurklüliti skeemi põhimõttel (tabel 3.2) ja üksteist modifitseeritud kahekordsete lattidega ja kahe võimsuslülitiga liini kohta (joonis 3.6). Joonisel 3.6 esitatud n-1 olukorras tekib toitekatkestus ühel

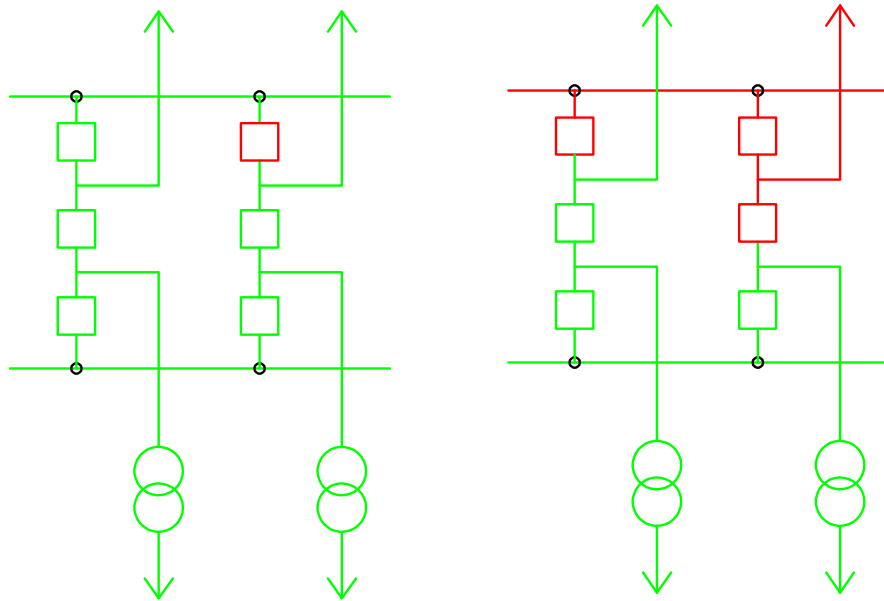
alajaama siseneval liinil ja trafol, mille tulemusena piiratakse võimsusvoogusid ülekandevõrgus, kuid katkestust tarbijatele ei teki. Lisaks on välja toodud poolteistlüliti skeem (joonis 3.7) ja kahekordsete lattidega ja kahe võimsuslülitiga fiidri kohta jaotla skeem (joonis 3.8), kuid Eesti ülekandevõrgus nende skeemidega alajaamasid ei ole kasutusel.



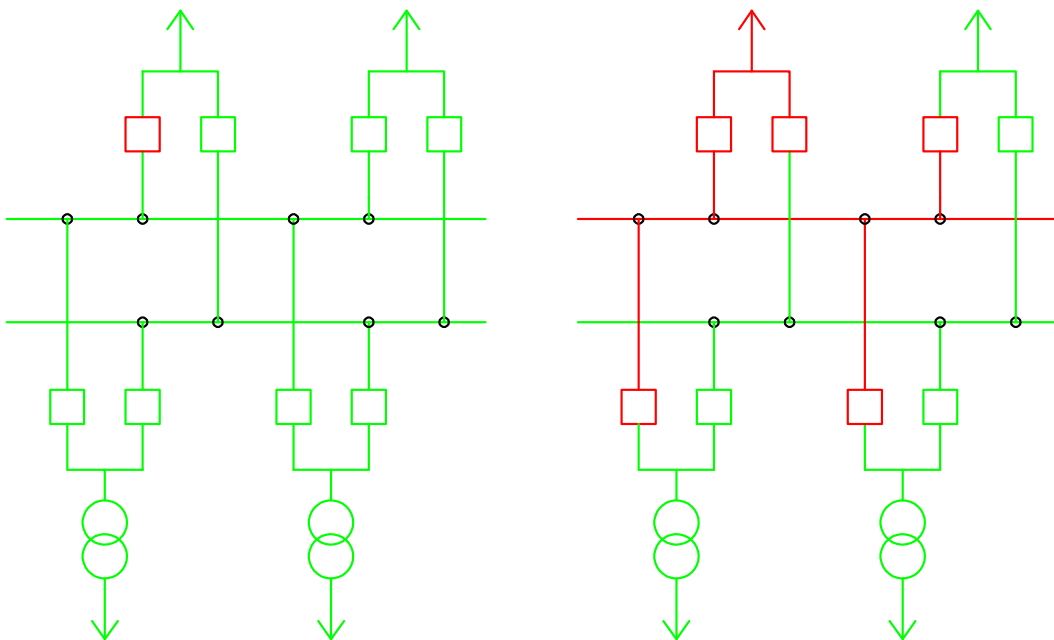
Joonis 3.5 Kolmnurklüliti skeemiga jaotla n-1 olukord, võimsuslüliti (vasakul joonisel punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud toite katkestus kõikidel alajaamaga seonduvatel ühendustel (joonis paremal) [37]



Joonis 3.6 Modifitseeritud kahekordsete lattidega ja kahevõimsuslülitiga liini kohta jaotla skeem, kus trafo lahtris on kahe võimsuslüliti asemel üks skeemi n-1 olukord, võimsuslüliti (vasakul joonisel punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud seonduvate võimsuslülitite väljalülitumine (joonis paremal) [37]



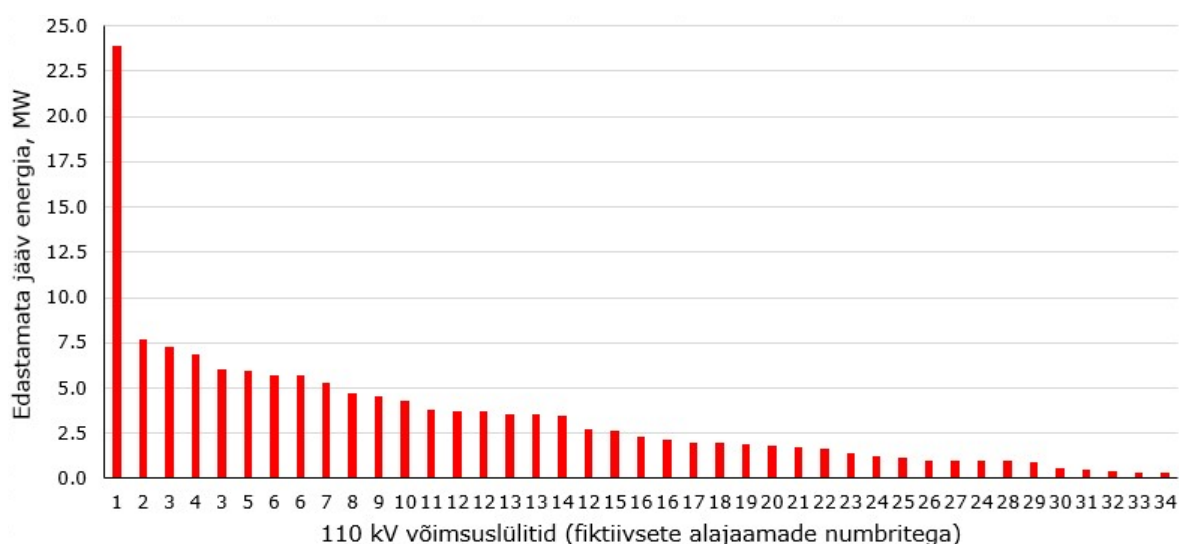
Joonis 3.7 Poolteistlüliti skeemiga jaotla n-1 olukord, võimsuslüliti (vasakul joonisel punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud toite katkestus alajaamaga seonduvatel ühendustel (joonis paremal) [37]



Joonis 3.8 Kahekordsete lattidega ja kahe võimsuslülitiga fiidri kohta jaotla skeemi n-1 olukord, võimsuslüliti (vasakul joonisel punane ruut) rikke tagajärjel tekkinud seonduvate võimsuslülitite väljalülitumine (joonis paremal) [37]

3.2 Võimsuslülitite seisundi hindamiseks kasutatavad mõõteseadmed ja nende kasutamine

Seisundipõhisel hooldusel tuleb olulist tähelepanu pöörata peamiselt nendele võimsuslülititele, millede rike põhjustab tarbijatele suuremas hulgas edastamata jäävat energiat või piirangu ülekandevõimsuse edastamisel riikidevaheliselt. Joonisel 3.9 on esitatud 110 kV ülekandevõrgu alajaamade võimsuslülitid, kus rike põhjustab andmata jäänud energiat. 110 kV ülekandevõrgus piiranguid põhjustavaid alajaamasid on 117-st kokku 34 (joonis 3.9). Analüüsitava alajaamade erisuseks on asjaolu, et tegu on ühe liini toitega või sektsioneerimata ühe latisüsteemiga jaotlaga (joonis 3.1) alajaamad. Seega need 110 kV võimsuslülitid saavutavad kõrgema taseme hoolduse prioriteedi skaalal võrreldes teiste 110 kV võimsuslülititega.



Joonis 3.9 110 kV võimsuslülitid, mille n-1 olukorras tekib edastamata jääv energia, igale tulbale diagrammil vastab üks võimsuslülitit ja horisontaalne number viitab alajaamale, kus võimsuslülitit asub [16]

110 kV võimsuslülitite hind võrreldes 330 kV lülitite hinnaga on kolm korda madalam (tabel 2.2). See seab piirid funktsionaalsemate reaalajamõõteseadmete kasutamisel, sest ebamõistlik on investeerida mõõteseadmesse, mille hind on ligikaudu pool [39] võimsuslülitit hinnast. Optimaalsemaks lahenduseks on odavama, samas ka väiksema funktsionaalsusega reaalajamõõteseadmed (nt tabel 3.3 ionSIGN 2 ja 3). Olukorras, kus puuduvad abisüsteemid mõõteseadmetelt kogutavate andmete salvestamiseks ja töötlemiseks, on mõistlik kasutada kaasas kantavaid mõõteseadmeid (tabel 3.4). Nendega on võimalik teostada võimsuslülitile oluliste parameetrite mõõtmised. Käesoleva töö raames on ülekandevõrguoperaator hanke korras ostnud, tabelis 3.4 toodud, kaasaskantava mõõteseadme Omicron CIBANO 500 (joonis 3.10). Nimetatud

mõõteseadmega saadud mõõtmistulemuste põhjal on võimalik hinnata võimsuslüliti seisundit.

Tabel 3.3 Võimsuslüliti reaalamõõteseadmete omavaheline võrdlus [47] ja [48]

Mõõdetavad parameetrid	CB Watch 3	ABB CBS	QUALTR OL QBCM	ionSIGN IoT2*	ionSIGN IoT3
SF ₆ gaasirõhu jälgimine	X	X	X		
SF ₆ gaasilekke tuvastamine	X	X	X		
Ajami mootori töövool			X	X	
Vedru vinnastuse aeg	X	X	X		
Elektrikaare põlemise aeg	X	X	X		
Kontaktide kulumise tuvastamine	X	X	X		
Lüliti sisse/välja lülitamise aeg	X	X	X		X
Lülituspoolide seisukord	X	X	X		
Lülituspoolide vool	X	X	X	X	X
Lülituspoolide pinge	X	X	X		
Lülituskordade arv	X	X	X		
I ² t energiahulga mõõtmine		X			
Ajami toitepinge (alalisvool)	X	X	X		
Ajamikapi temperatuur	X	X	X	X	X
Suhteline õhuniiskus ajamikapis*				X	X
Ajami kiirendus	X	X	X		
Logide salvestamine	X	X	X	X	X
Kasutaja liides	X	X	X	X	X
Ajamikapis heli*				X	
Ajami akustika*					
Ajami mootori akustika*				X	
Summutusamordi vibratsioon				X	

* Täiendatud allikast [47] saadud tabelit

Tabel 3.4 Võimsuslüliti seisundi hindamiseks kaasaskantavate mõõteseadmete omavaheline võrdlus [49-52]

Mõõdetavad parameetrid	Omicron CIBANO 500	ELCON SA10	Megger TM 1600	Megger TM 1800
Üleminekutakistus	X	X	X*	X
Lüliti sisse/välja lülitamise aeg	X	X	X	X
Ajami mootori töövool	X	X		
Vedru vinnastuse aeg	X	X		
Minimaalse pingega lülitamine	X	X		
Ajami kiirendus	X			X
Lülituspoolide seisukord	X	X		X
Lülituspoolide pinge	X	X		X
Lülituspoolide vool	X	X		X
Vibratsioon				X
Juhtmete ümberühendamine vajalik testidel		X	X	X
Kasutajaliides	X	X		X
Kohandatav aruandevorm	X			

* Eeldab lisa mõõteseadet



Joonis 3.10 Kaasaskantav võimsuslüliti mõõteseadet Omicron CIBANO 500 koos kahe analoog-digitaal konverter ja mõõtmiste teostamiseks kasutatava tarkvara näidisega [49]

Jooniste 3.6...3.8 põhjal selgub, et ühe 330 kV võimsuslüliti rikke tagajärjel lülitub välja ülekandeliin, mille tulemusena tekivad piirangud ülekandevõrgus riikidevaheliselt võimsusvoogude edastamisel. Eesti 330 kV ülekandevõrgus on kokku 23 õhuliini, millest võimsuslüliti n-1 olukorras tekitavad piiranguid nendest 21 [16]. Sellest tulenevalt on need võimsuslülidid kõrgema prioriteediga. Vastavalt võimalustele on optimaalseks lahenduseks paigaldada kriitilistele seadmetele reaalamõõteseadmed (tabel 3.4), sest seeläbi on võimalik tuvastada seadme seisund rikke eelses olukorras. Siiski seni kuni puuduvad paremad lahendused reaalamõõtesüsteemi rakendamiseks on võimalik kasutada mõõteseadet Omicron CIBANO 500. Kõik 330 kV pingel talitlevad võimsuslülidid ei oma kõrgemat prioriteeti (nt. trafo võimsuslüliti). Põhjuseks on asjaolu, et trafod on alajaamades dubleeritud, seega trafo võimsuslüliti rikked ei tekitata katkestust tarbijatele ega ka riikidevahelisi võimsusvoogude piiranguid.

Hajaasustuse piirkonna alajaamades on tootmissuunaline ühendus elektrivõrguga valdavalt teostatud läbi ühe võimsuslüliti [16]. Nimetatud lüliti rikke tagajärjel katkeb tootmisüksuse ühendus elektrivõrguga. Olulisena täpsustusena saab välja tuua, et tootmissuunalisi elektrikatkestusi ei käsitleta edastamata jäänud energiana ja seega ei ole käesolevast tööst sellega arvestatud. Lisaks saab lugeda vähemolulisteks neid võimsuslüliteid, mille rikke tulemusena lülitub liin välja, kuid katkestusi ega piiranguid ei kaasne. Ülekandevõrgu normaaltalitluse seisukohast ei ole hajaasustuse piirkonda toitvate alajaamade tähtsus kriitiline. Eelnevast lähtudes on oluline leida tasakaal ülekandevõrgu stabiilse talitluse ja tarbijate elektriga varustamise vahel. Optimaalseks lahenduseks terviksüsteemi kontekstis on oluline pöörata tähelepanu neile võimsuslülititele, mille rike põhjustab kogu alajaama kustumise. 110 kV alajaamas on oluline jälgida nende võimsuslülite seisundit, kus võimsuslüliti rike põhjustab kogu alajaamas lattide kustumise.

3.3 Teostatud võimsuslülitite mõõtmised ülekandevõrgu 110 kV alajaamas

Käesoleva magistritöö teoreetilises osas kirjeldatud meetodika praktiliseks väljundiks teostati ülekandevõrgu 110 kV alajaamas ühe võimsuslülitite seisundi hindamiseks parameetrite mõõtmised. Mõõtmiste aruanne on esitatud käesoleva töö lisan (Lisa 3. Mõõteseadmega Omicron CIBANO 500 teostatud mõõtmiste aruanne). Mõõtmised teostati Harku alajaama võimsuslülitile ehitusaastaga 2005 ja seni teostatud lülituskordade arv enne mõõtmisi oli 286. Parameetrite mõõtmisi 110 kV võimsuslülitil teostas käesoleva töö autor. Mõõtmiste eesmärgiks oli saada praktiline kogemus võimsuslülitite seisundi parameetrite mõõtmisest. Enne mõõtmiste alustamist teostati võimsuslülitile visuaalne ülevaatus, mille käigus kontrolliti manomeetrilt SF₆ rõhku, lisaks korrosiooni ja visuaalselt nähtavate vigastuste puudumist seadmel. Lisaks paigaldati üks täiendav maandus võimsuslülitile, et tagada töökeskkonna kõrgem elektriohutus.

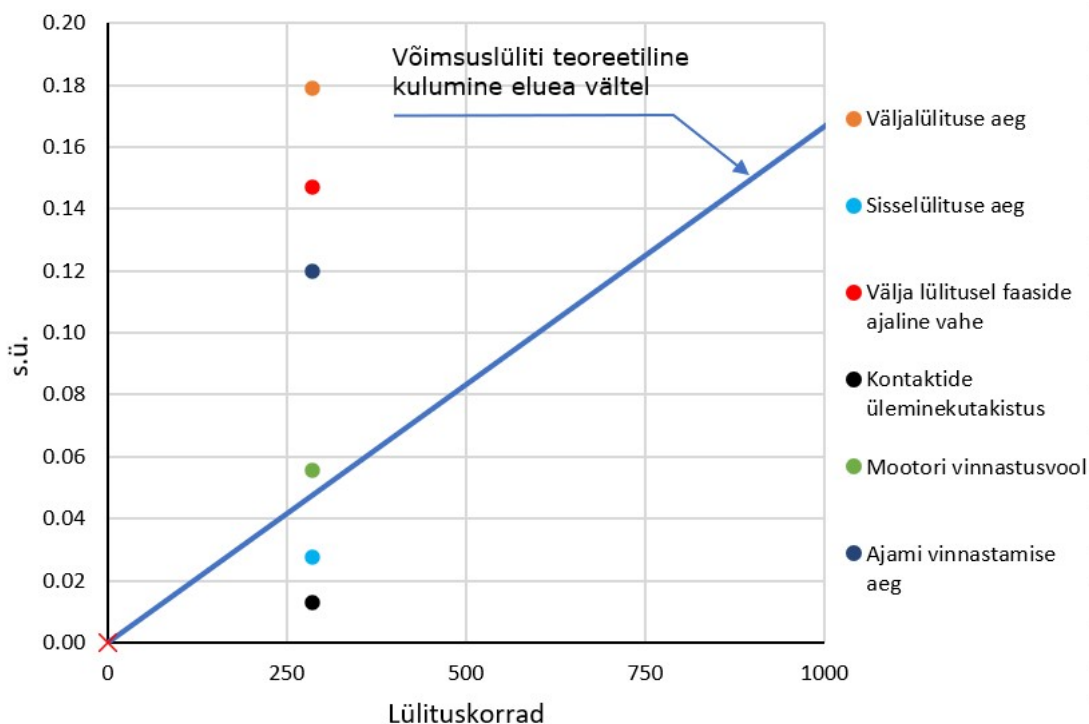
Võimsuslülitite seisundiparameetrite mõõtmiseks kasutati mõõteseaded Omicron CIBANO 500, millega teostati kokku viis erinevat katset:

- Vinnastusmootori töövoolu mõõtmine;
- Sisselülitusel dünaamiliste kontaktide üleminekutakistuse ja sisselülitusaegade mõõtmine;
- Staatiline kontaktide üleminekutakistus;
- Väljalülitusel dünaamiliste kontaktide üleminekutakistus ja väljalülitusaegade mõõtmine;
- Lülitustsükli välja-sisse-välja dünaamiliste kontaktide üleminekutakistuse ja lülitusaegade mõõtmine;
- Sisse- ja väljalülituspooli minimaalse tööpinge mõõtmine.

Vinnastusmootori mõõtmisel mõõdeti lisaks töövoolule ajami vinnastamiseks kulunud aega ja minimaalset pinget. Järgneva katse käigus mõõdeti võimsuslülitite kaarekustutuskontaktide üleminekutakistust liikuvatelt kontaktidelt. Peakontaktide üleminekutakistuse mõõtmiseks kasutati staatilist üleminekutakistust. Dünaamilise ja staatilise üleminekutakistuse mõõtmiseks kasutati alalisvoolu 100A. Lisaks kontaktide üleminekutakistuse mõõtmisele liikuvatelt kontaktidelt, mõõdeti lülitamiseks kulunud aega ja faaside vahelist ajalist nihet, mis ei tohi ületada juhendites esitatud piire. Eelviimase mõõtmisena teostati lülitustsükkel välja-sisse-välja, mis imiteerib taaslülitamist. Esimese väljalülitamise järgselt teostatakse uuesti ebaõnnestunud proovipingestamine, mille korral peab võimsuslülitite suutma lühisele lülitades kiirelt välja

lülituda. Viimase katse käigus mõõdeti lülituspoolide tööks vajalikku minimaalset pinget, millega korral lülituspool on võimeline vabastama ajamiriivi.

Katsetatud võimsuslüliti vanus mõõtmiste teostamise ajal oli 16 aastat seejuures arvestades eelnevalt nimetatud lülitamiste arvu 286 on käesoleva võimsuslülitiga teostatud aastas keskmiselt 18 lülitust. Joonisel 3.11 on esitatud mõõtmistulemustest arvutatud väärtused suhtühikutes, mis kirjeldavad seadme tegelikku seisundit. Nimetatud jooniselt selgub, et eeldatust suurema s.ü. väärtusega on võimsuslüliti väljalülituse aeg ja faaside vaheline aegade erinevus väljalülitusel. Nimetatud parameetrite muutus võib kirjeldada ajami liikuvate osade minimaalset liigest hõõrdumist üksteise suhtes, mis käesoleval hetkel ei ole kriitiline probleem. Lisaks on kõrgema s.ü. väärtus ajami vinnastamiseks kulunud aja parameetril, mis viitab väljalülituse summutusamortisaatori seisundi halvenemisele või vähenenud õli mahule summutusamordis (tabel 1.4). Ülejäänud parameetrid joonisel 3.11 ei ole kulunud eeldatust rohkem vaid pigem vähem. Väikseim s.ü. väärtus, mõõtmistulemuste põhjal, on kontaktide üleminekutakistus, mis omakorda kinnitab väidet, et võimsuslüliti kontaktide kulumine ei ole sõltuvuses ajalise faktoriga.



Joonis 3.11 Harku alajaamas teostatud 110 kV võimsuslüliti kordusmõõtmiste tulemused esitatuna suhtühikutes, mis kirjeldab seadme tegelikku seisundit

3.4 Ülekandevõrgu operaatori hetketegevused ja nende arendamise võimalused

Eesti ülekandevõrguoperaator on seni kogunud võimsuslülitite kohta kergelt kättesaadavaid andmeid, mis kirjeldavad seadet, kuid seejuures ei kirjelda otseselt selle seisundit. Varasemalt ei ole olnud vajalik teostada täiendavaid tegevusi võimsuslülitite seisundi hindamiseks, sest seadmete eluea täitudes hooldamise asemel alajaamad renoveeriti. Viimasel kahekümnel aastal on teostatud suures mahus alajaamade rekonstrueerimisi, mille tulemusena enamik võimsuslülititeid on kaasaegsed (joonis 2.2). Vastavalt hetkel kehtivatele hooldusjuhenditele teostatakse kõik hooldused ajapõhiselt, olenemata sellest kas see on vajalik. Kaasaegsete võimsuslülitite kõrgest töökindlusest tulenevalt on tõsiste tagajärgedega rikete arv minimaalne. Seega on varasemalt puudunud vajadus võimsuslülitite seisundi hindamiseks. Eesti ülekandevõrguoperaatori poolt hetkel kogutavad võimsuslülitite ja selle seisundit kirjeldavad andmed on:

- Võimsuslülitite sildiandmed;
- Paigalduse aeg;
- Tehasekatsetuse (FAT – *Factory Acceptance Test*) aruanne – osaliselt puudulik;
- Teostatud lülituskordade arv;
- Võimsuslülitite kordusmõõtmise aruanne;
- Lühisvoolude ja lühise kestvuse kohta releekaitse salvestused.

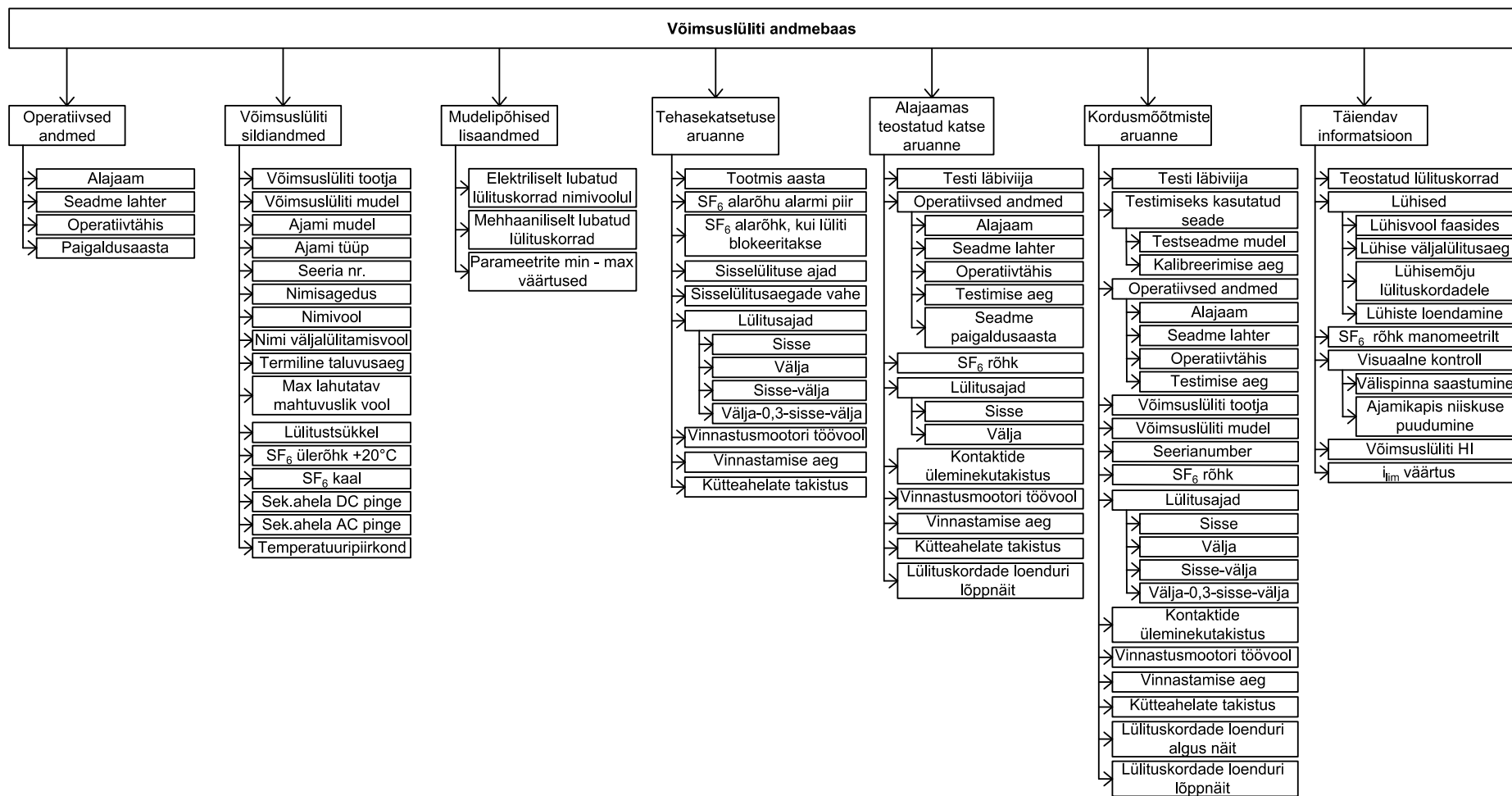
Olemasolevate aruannete hoiustamisel pole järgitud süsteemset loogikat, seega on vajaliku aruande leidmine andmebaasist [16] (võrgukettalt) ajamahukas. Tehasekatsetuste ja kordusmõõtmise aruanded on salvestatud võrgukettale [16] PDF formaadis, milles sisalduva informatsiooni töötlemine seondub suure ajakuluga, kuna kõik numbrid tuleb käsitsi läbi töötada. Lisaks saab välja tuua, et praeguses andmebaasis puuduvad teatud võimsuslülitite kohta nii tehasekatsetuste kui ka pärast alajaama valmimist teostatud mõõtmiste aruanded. Olukord tuleneb sellest, et alajaama valmimise järgselt ei ole kindlaks määratud, milliseid dokumente alajaama ehitajalt nõutakse. Seega võimsuslülitite korral, mille varasemate andmete kohta puudub informatsioon, on nende seisundi hindamine keerulisem. Võimsuslülitite siltide andmed on hetkel sisestatud nii varahaldustarkvarasse kui ka salvestatud fotodena. Sildiandmete digitaliseerimiseks on ülekandevõrguoperaatori poolt koostatud alajaama seadmetest piltide kogum ehk fotopank [16]. Käesoleval hetkel ei ole siiski fotopank terviklik, sest osade seadmete kohta puuduvad pildid ja osad juba sisestatud pildid on madala kvaliteediga ehk loetamatud. Siiski kokkuvõttes on loodud fotopank heaks lähtepunktiks, mille alusel saab täiendada olemasolevat digitaliseeritud informatsiooni ja luua ühtne süsteem võimsuslülitite andmebaasile. Hetkel olemasolev süsteem

võimaldab igapäevaseid toiminguid teostada, kuid selle põhjal ei saa andmeid analüüsida.

Eelnevalt nimetatud ja tulevaste kogutavate andmete paremaks kasutamiseks on esmalt vajalik luua võimsuslülitite andmebaas, mille loomisel lähtutakse ühtsest loogikast. Andmebaasi sisestatakse informatsioon võimsuslülitite kohta ühekordselt ja selle alusel on võimalik kogutud andmeid rakendada seisundi hindamisel ja hoolduse planeerimisel. Lisaks võimaldaks andmebaas teostada vähese vaevaga olulist statistikat. Kui loodud andmebaas sisaldab piisavalt informatsiooni saab tulevikus rakendada masinõpet, tuvastamaks seadme kulumise ja rikete tekkimise mustreid ning seeläbi täpsustada käesolevas töös kirjeldatud seisundihindamise metoodikat. Joonisel 3.12 on esitatud andmebaas ühe võimsuslülitite näitel, kus on jaotatud oluline informatsioon seitsmesse gruppi. Joonisel 3.12 on parempoolses grupis toodud täiendav informatsioon, mida saab pidevalt täiendada, lisades vajalikke andmeid, näiteks visuaalsel ülevaatusel registreeritud võimsuslülitite lülituskorrad ja lühise järgselt saadav informatsioon. Selline lähenemine võimsuslülitite andmete kogumisel ja seeläbi seisundi hindamisel võimaldab tulevikus varade haldamise ressursse paremini kasutada ning planeeritavad kulutused on majanduslikult põhjendatud.

Ülekandevõrgu operaatore edasised tegevused, et rakendada võimsuslülitite seisundipõhine hooldusmetoodika:

- Informatsiooni koondamiseks andmebaasi loomine;
- Olemasoleva informatsiooni digitaliseerimine ühtsel alusel loodud andmebaasis;
- Olemasoleva informatsiooni põhjal selgitada välja puudu olev informatsioon;
- Selgitada lühisel järgselt lühisvool ja võimsuslülitite kontaktide lahutamiseks kulunud aeg ja saadud informatsiooni sidumine andmebaasis vastava võimsuslülitiga;
- Määrata võimsuslülitite prioriteet hindamaks nõudmisi töökindluse tagamiseks;
- Võimsuslülitite hanke tingimustesse tuleb lisada punkt, kus küsitakse tootjalt seadme parameetrite piirväärtused, mille ületades ei ole tagatud seadme töökindlus;
- Muuta kohustuseks võimsuslülitite kordusmõõtmised alajaama valmimise järgselt;
- Kaitserleedes jälgimisfunktsiooni aktiveerimine (*Monitoring of equipment*);
- Võimsuslülitite tegeliku seisundi määramiseks kordusmõõtmiste teostamine;
- Kordusmõõtmiste aruande vorm;
- Selgitada välja võimsuslülitite tegelik seisund ja sellest tulenev hooldusvajadus;
- Hoolduste planeerimine vastavalt seadme seisundile;
- Vastavalt võimalustele reaalamööteseadmete rakendamine seisundi hindamiseks.



Joonis 3.12 Võimsuslüüti andmebaasi ülesehitus koos andmebaasis sisalduva detailse alaminformatsiooniga

4. MAJANDUSLIKU TASUVUSE ANALÜÜS

Käesolevas peatükis teostatakse võimsuslülitite seisundi hindamiseks kasutatavate mõõteseadmete majandusliku tasuvusanalüüs. Analüüsis võrreldakse kolme erineva mõõteseadme paigaldamist 110 kV ja 330 kV võimsuslülititele. Seejuures hinnatakse diskontomäära ja mõõteseadme maksumuse mõju investeringu tasuvusele.

4.1 Majandusliku tasuvuse analüüsi põhimõtted

Alajaamades võimsuslülitite mõõteseadmete kasutuselevõtmise majandusliku tasuvuse analüüsi teostamisel piirduti nüüdispuhasväärtuste (*net present value*, NPV) arvutustega. NPV on kõige sobivam kapitali eelarvestamise meetod, millega saab võrrelda ja hinnata projektide vahelist kasumlikust [53]. Käesoleva majandusliku tasuvuse analüüsi eesmärk on hinnata mõõteseadmete ABB CBM, ionSIGN IoT2 (tabel 3.3) ja CIBANO 500 (tabel 3.4) finantsilist tasuvust. Kuna mõõteseadmete investeringu otsus ja selle mõjud on pikaajalise iseloomuga, sest varagruppide eluiga on võrreldes tavainvesteeringutega pikem, siis sisaldab käesolev analüüs olulisel mahul ebamäärasust. Seepärast on majandusliku tasuvuse analüüsi täiendatud ka tundlikkuse analüüsiga, kus hinnatakse saavutatud finantsanalüüsi tulemusi olulisemate muutujate suhtes. Tasuvuse hindamiseks lahutatakse pikendatud eluea NPV väärtusest nominaalse eluea NPV väärtus, mis kokkuvõttes väljendab saadavat kasu. Peatükis 4.2 on välja toodud finantsanalüüsi jaoks olulisemate algandmete eelduslikud arväärtused ja allikad. Majandusliku tasuvuse analüüsi tulemusi kirjeldab peatükk 4.3.

4.2 Majandusliku tasuvuse analüüsi sisendid

NPV nullist suurema väärtuse korral on seda investeringut otstarbekas rakendada ja negatiivse väärtuse juures ei ole lähenemisviis majanduslikult põhjendatud. Majanduslikus võrdlusarvutuses on vaadeldud võimsuslülitite pikendatud eluiga 60 aasta perioodis, mis on vara pikendatud eluea pikkus. Nominaalset varade soetamise ja haldamise kulu võrreldakse pikendatud elueaga varahalduse kuluga. Majandusliku tasuvuse analüüsis teostati mõõteseadmete võrdlev analüüs, milles võrreldi hetkel kasutatavat hooldusmetoodikat ja käesolevas töös esitatud metoodikaga. Analüüsi teostamisel võeti mõõteseadmete elueaks 15 aastat, mis on võrdne

releekaitseseadmete elueaga. Analüüsis kasutatavad mõõteseadmed on toodud tabelis 4.5, mis erinevad üksteisest hinna ja kasutusviisist. Analüüsis kasutatavad mõõteseadmed on erinevad üksteisest kasutusviisi ja hinna seisukohast. Kasutades avaldisi 4.1 ja 4.2 arvutatakse NPV võimsuslülitite nominaalse eluea 40 a ja pikendatud eluea 60 a korral.

$$C_t = C_{inv t} + C_{kulu t} \quad (4.1)$$

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{C_t}{(1+i)^t} \quad (4.2)$$

- kus C_t – rahavoog aastal t , €;
 $C_{inv t}$ – investeeringu kulud aastal t , €;
 $C_{kulu t}$ – üldkulud aastal t , €;
 NPV – nüüdispuhasväärtus;
 n – investeeringu periood;
 t – vaadeldav aasta;
 i – diskontomäär, %.

Tabel 4.1 Majandusliku tasuvuse analüüsis kasutatud mõõteseadmed ja nende eeldatav hind [16] ja [39]

Mõõtesead	Kasutusviis	Mõõteseadme hind, €
Omicron CIBANO 500	Kaasaskantav	60000
ionSIGN 2 ja 3	Statsionaarne	5000
ABB Circuit Breaker Sentinel (CBM)	Statsionaarne	15000

Käesolevas analüüsis võrreldakse erinevaid mõõteseadmeid hinna alusel, seejuures võrdluses ei arvestata funktsionaalsusega. Tabelis 4.1 toodud kasutusviisidest kaasaskantav tähendab, et ühe mõõteseadmega on võimalik mõõta erinevaid võimsuslülititeid, samas statsionaarne mõõteseadme paigaldatakse ühele võimsuslülitile ajamikappi. Viimast kahte mõõteseadet eristab hind, millest ionSIGN on kolm korda soodsam kui ABB CBM. Lisaks on oluline välja tuua, et ionSIGN-il on vähem funktsioone, millest tulenevalt on tingitud ka märkimisväärne hinnavahe. ABB CBM reaalamajanduse mõõteseadme võrreldes CIBANO-ga on neli korda soodsam, kuid CIBANO eeliseks on mõõteseadme mobiilsus ja samaväärne võime. Tabelis 4.2 on toodud detailsemalt kulude jaotus, millest investeeringud jagunevad investeringud võimsuslülititesse ja investeringud mõõteseadmesse. Algandmed tabelis 4.2 on saadud ülekandevõrgu operaatore sisematerjalidest [16]. Nominaalse vaatlusperioodi vältel tehtavad kulutused on esitatud vastavalt ülekandevõrgu operaatore hetkel kehtivate juhendite põhjal. Seejuures on oluline välja tuua, et investering mõõteseadmesse tähendab, et pikendatud eluea vaatlusperioodil 60 a investeeritakse mõõteseadmesse tänases

vääringus kolmel korral 5000€. Võttes arvesse Euroopa keskpankade ja suurte finantsinvesteeringute intressimäärasid ning Eesti Panga poolt sätestatud inflatsiooni taset on käesolevas töös võetud infrastruktuuri investeeringute puhul on nominaalseks diskontomääraks 4%.

Tabel 4.2 Nominaalse ja pikendatud eluea meetodika korral tehtavad investeeringu- ja hoolduskulud ühel võimsuslülitil, vaatlusperiood 60 aastat ning diskontomäär 4%

	110 kV nominaalne vaatlusperiood, 60 a	110 kV pikendatud eluga, 60 a	330 kV nominaalne vaatlusperiood, 60 a	330 kV pikendatud eluga 60 a
Investeering võimsuslülitisse, €	36 000	30 000	120 000	100 000
Hoolduskulu, €	4 000	3 000	7 000	1500
Investeering mõõteseadmesse, €	0	10 500	0	10 500
Kulu kokku, €	40 000	43 500	127000	112 000

4.3 Majandusliku analüüsi tulemused

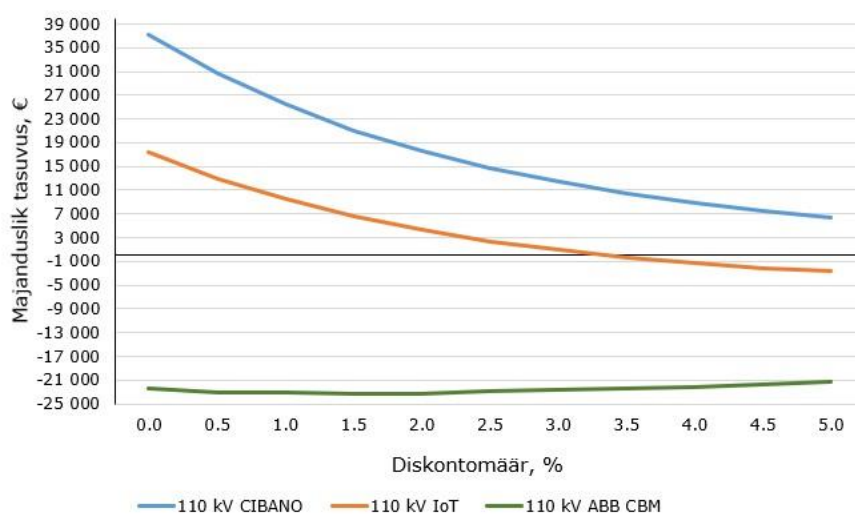
Tasuvusanalüüsi teostamiseks arvatud NPV väärtused on esitatud tabelis 4.3, mis on teostatud vastavalt alapeatükis 4.1 kirjeldatud meetodikale ja püstitatud eesmärkidele. Hindamaks erinevate mõõteseadmete tasuvust ehk saadavad kasu, esitatakse tabelis 4.3 kokkuvõtlikult majandusliku analüüsi tulemused, milles võrreldi tabelis 3.5 esitatud mõõteseadmete tasuvust 4%-lise diskontomääraga.

Tabel 4.3 110 kV ja 330 kV võimsuslülitite seisundihindamiseks kasutatavate mõõteseadmete majanduslik tasuvusanalüüs pikendatud seadme eluea 60 aasta perioodis, diskontomäär 4% [16]

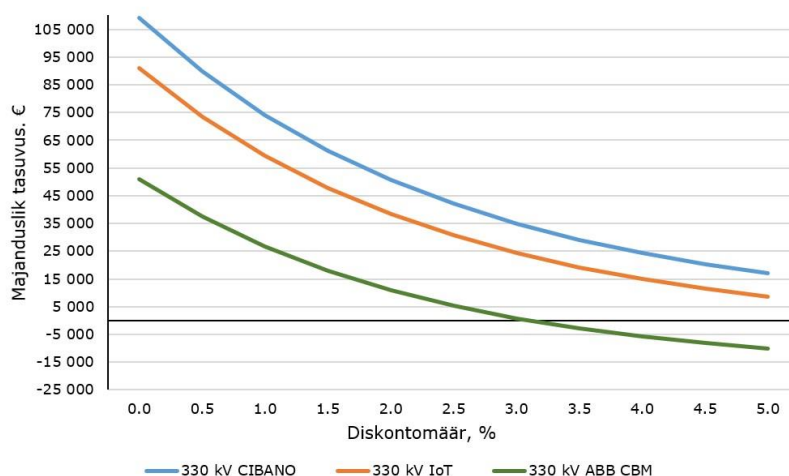
Kasutatav mõõtesead	Võimsuslülitite arv, tk	Majanduslik tasuvus	
		PÜKS LÜLITIL, €	PKÕIK LÜLITID, €
110 kV _{ABB CBM} (15 000€)	566	-24 000	-13 584 000
110 kV _{CIBANO}	566	9 000	5 094 000
110 kV _{IoT} (<5000€)	566	-3 500	-1 981 000
330 kV _{ABB CBM} (15 000€)	132	-5 800	-765 000
330 kV _{CIBANO}	132	24 000	3 168 000
330 kV _{IoT} (<5000€)	132	15 000	1 980 000

NPV diskontomääratundlikkusanalüüsi tulemused 110 ja 330 kV võimsuslülitite puhul on esitatud vastavalt joonistel 4.1 ja 4.2. NPV arvutustulemusena saadud tasuvusega võrreldakse täna kasutusel olevat hooldusmeetodikat käesolevas töös kirjeldatud seisundipõhise meetodikaga, millest viimane eeldab mõõteseadmete kasutamist. Tundlikkuse analüüsi tulemused ühe võimsuslülitiga kohta on esitatud joonistel 4.1 ja 4.2, kus nullväärtus kirjeldab hetkel kasutusel olevat ajapõhist hooldamise meetodikat.

Peamiseks võrdluseks on erinevate mõõteseadmete rakendamisel saadav kasu 60 aasta perioodil, mille analüüsis hinnati kasumlikkust diskontomääral 0...5%.



Joonis 4.1 Ühe 110 kV võimsuslüliti seisundi hindamiseks kasutatavate mõõteseadmete majandusliku tundlikkuse analüüs perioodil 60 aastat. Võrreldakse kahte mõõteseadet: Omicron CIBANO 500, IoT tehnoloogia, ABB Circuit Breaker Sentinel



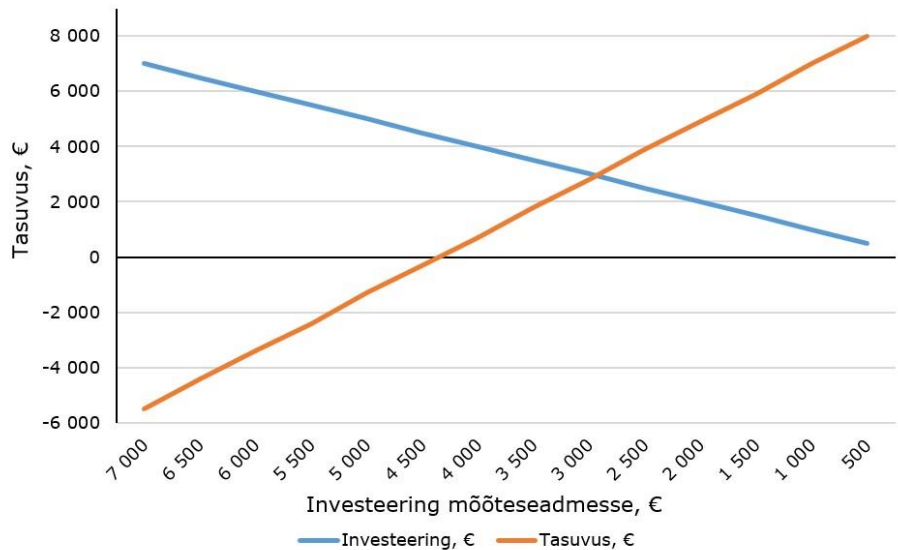
Joonis 4.2 Ühe 330 kV võimsuslüliti seisundi hindamiseks kasutatavate mõõteseadmete majandusliku tundlikkuse analüüs perioodil 60 aastat. Võrreldakse kolme mõõteseadet: Omicron CIBANO 500, IoT tehnoloogia, ABB Circuit Breaker Sentinel

Joonistelt 4.1 ja 4.2 on näha, et madalama diskontomääraga on tasuvus suurem. Seisundipõhise hindamise meetodika rakendamisel oleks erinevate lahenduste puhul majanduslik tasuvus järgnev (tabel 3.5, diskontomäär 4%):

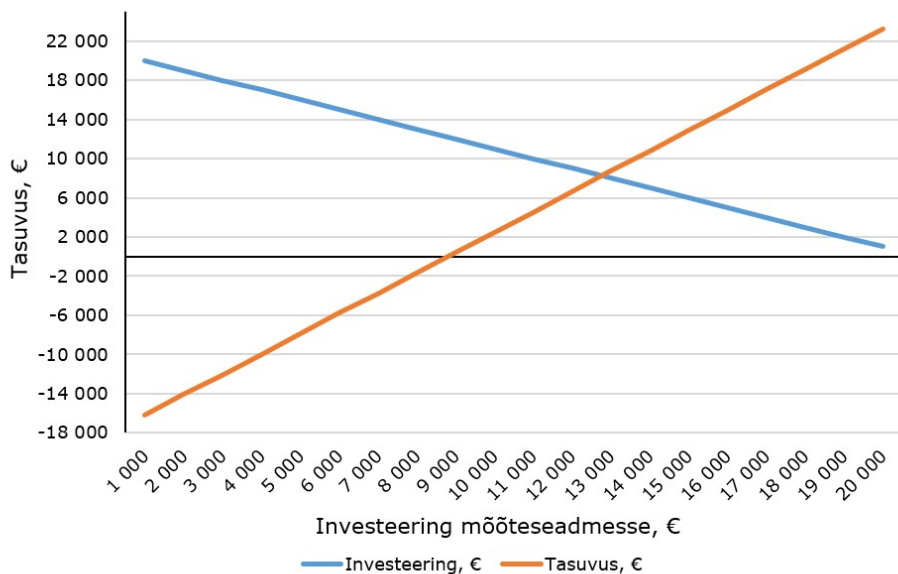
- CIBANO-ga saavutatav vara ühikuline tasuvus 110 kV võimsuslülite puhul on 9000€ ja 330 kV võimsuslülite korral 24 000€ ühe võimsuslüliti kohta.
- IoT mõõteseadmete kasutamisel on tasuvus madalam võrreldes CIBANO-ga, olles 1500€ 110 kV võimsuslülitel ja 15 000€ 330 kV võimsuslülitel.

- ABB CBM mõõteseadmete kasutamine ei ole tasuv, kuna NPV on 110 kV võimsuslülititel -24000€ ja 330 kV võimsuslülititel -5800€.

Järgnevalt kasutades avaldise 4.1 ja 4.2 teostati NPV tundlikkusanalüüs lähtuvalt mõõteseadme hinnast, mille tulemused 110 ja 330 kV võimsuslülitite puhul on esitatud vastavalt joonistel 4.3 ja 4.5. Seejuures on diskontomäär fikseeritud 4%.



Joonis 4.3 Majandustundlikkuse analüüs statsionaarsete mõõteseadmete investeeringuks 110 kV võimsuslülititele



Joonis 4.4 Majandustundlikkuse analüüs statsionaarsete mõõteseadmete investeeringuks 330 kV võimsuslülititele

Tundlikkuse analüüs viitab, et investeeringu kasumlikkus on tundlik kapitalihinna suhtes. Olulisim on aga investeeritava mõõteseadme hinna muutus. Investeeringute kasumlikkus läheneb nullile, kui investeering reaalajamõõteseadmesse 330 kV

võimsuslülitle paigaldatava mõõteseadme hind ei ületa 12200€ ja 110 kV võimsuslüliti korral 4400€. Siinkohal tuleb märkida, et käesolevas analüüsis ei arvestatud võimsuslüliti rikkest põhjustatud kuludega, mille arvestamisel võib kallim reaalarajamõõteseade olla siiski põhjendatud. Lisaks on kallimatel reaalarajamõõteseadmetel rohkem funktsioone, millega jälgida võimsuslülite parameetrite muutust. Analüüsi tulemusena selgus, et eelnevat välja toodud lahendustest võimsuslülite seisundipõhise hindamise meetodika rakendamiseks majanduslikult kõige efektiivsem Omicron CIBANO 500. Märkimisväärne majanduslik kasu saavutatakse seadmete seisundi jälgimisest ja selle põhjal hoolduste planeerimisest, kui ennetatakse tõsisemate tagajärgedega rikete tekkimist, mille korral tekib edastamata jäävat energiat. Näitena, kus ühe võimsuslüliti rike tekitab kümne tunnise elektrikatkestuse tööstustarbijale, on andmata jäänud energia hinnaks 5700€ MW/h [54], mis 1 MW/h korral tekitab katkestusest tulenevaks kuluks 57000€.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli välja töötada kõrgepingevõrkude võimsuslülitite tegeliku seisundi ja hooldusvajaduse määratlemise meetodika. Hetkel kasutusel oleva ajapõhise hoolduse meetodika kasutamisega ei ole olnud ülekandevõrgu operaatoril võimalik hinnata võimsuslülitite tegelikku seisukorda. Senises praktikas on lähtutud visuaalsest ülevaatuselt saadavast informatsioonist, mis põhineb subjektiivsel hinnangul.

Töös arendati võimsuslülitite seisundi hindamiseks vajalik meetodika, millega on võimalik tuvastada seadme erinevate parameetrite muutused ja seeläbi kindlaks määrata seadme üksikosade kulumine. Võimsuslülitite rikkeid jagatakse kaheks, millest ühed on vähemtähtsad rikked, mis ei mõjuta oluliselt seadme normaaltalituse toiminguid ja teised kriitilised rikked, mille tulemusena ei ole võimsuslülitiga võimalik teostada normaaltalituseks ettenähtud toiminguid. Võimsuslülitil, millega teostatakse palju lülitusi, kuluvad enam ajami liikuvad osad, samas võimsuslülitil, millega ei teostata aastas ühegi lülitust ei kulu ja rike põhjuseks võib olla määrdeainete hangumisest tulenev aeglane sisse- või väljalülitus toiming.

Töös käsitleti elektriikaare mõju võimsuslülitite seisukorrale. Lisaks esitati arvutusmeetodika hindamiseks lühisvoolust tingitud mõju võimsuslülitite seisundile. Kirjeldatakse võimsuslülitite pea- ja kaarekustutuskontaktide seisundi hindamiseks vajalikke tegevusi, millest peamisena saab välja tuua, et lühise järgselt on vajalik üles märkida ja siduda vastava võimsuslülitiga lahutatavad lühisvoolud. Nimetatud tegevuse olulisust ilmestab asjaolu, et ühe 20 kA lühisvoolu lahutamine on võrdne 100 lülitusega nimivoolul.

Võimsuslülitite erinevate mõõdetavate parameetrite seisundi hindamiseks ja omavahel võrdlemiseks võeti kasutusele suhtühikute skaala. Kirjeldatakse läheneviisi võimaldab omavahel hinnata erineva skaala ja ühikuga parameetreid ja seeläbi anda hinnangu võimsuslülitile tervikuna. Seadme seisundile hinnangu andmiseks koostati lõputöös *Health Index* – HI skaala vahemikuga 1...4. Hindele üks vastab suhtühikud 0...0,6 ja kõige kõrgemale hindele neli suhtühikud, mis on suuremad kui 0,9. HI skaala igale väärtusele vastab tegevus või seadme seisundit kirjeldav seletus, mis võimaldab mõista seadme seisundit ilma sellese põhjalikumalt süvenemata. Olukorras, kus siiski on vajalik välja selgitada seadme kõrge HI väärtuse põhjus on võimalik täpsemalt uurida igat võimsuslülitite parameetrit ja seeläbi tuvastada konkreetne üksikosa, mille parameeter on suurenenud, mis omakorda võimaldab läheneda võimsuslülitite hooldusel konkreetselt

ühele osale ja saavutada minimaalsete kuludega maksimaalne tulemlikkus. Teisalt, kus võimsuslüliti kulumine on toimunud niivõrd, et hoolduse teostamine ei anna oodatavat tulemust saab põhjendatud otsusega asendada konkreetse võimsuslüliti. Nimetatud metoodika rakendamise eelduseks on asjaolu, et tuleb teada hinnatava võimsuslüliti parameetritele maksimaalselt lubatavaid piirväärtuseid ja tehasekatsetuste aruannetes esitatud väärtuseid. Viimane määrab seadme uue seadme algse seisundi. Lähteinformatsiooni alusel on võimalik tulevaste kordusmõõtmiste järgselt hinnata seadme parameetrite muutumist ja tuvastada riketele viitavaid tunnuseid. Lisaks on koostatud plokkskeem võimsuslüliti seisundi hindamiseks kasutatavatest võimalikest mõõtmistest ja tegevustest.

Käesolevas töös analüüsiti erinevaid mõõteseadmeid, millega on võimalik teostada võimsuslüliti oluliste parameetrite mõõtmised seadme seisundi hindamiseks. Teostati majanduslik finantsanalüüs võimsuslüliti seisundi hindamiseks kasutatavatele seadmetele, mida täiendati tundlikkuseanalüüsiga. Elektrivõrgu investeringute eripärast võeti analüüsis vaatlusperioodiks 60 aastat, mille tulemusena selgus, et 330 kV võimsuslülititele on majanduslikult tasuv paigaldada reaalamööteseadmeid, mille maksumus ei ületa 12200€ ja 110 kV võimsuslülititele 4400€. Kaasaskantavate mõõteseadmete analüüsi tulemusena selgus, et kui mõõteseadme maksumus on 60 000€ on projekt tasuv mõlema pingeklassi võimsuslülititel. Seejuures suurem tasuvus saavutatakse 330 kV võimsuslülitite korral, mis tuleneb asjaolust, et 330 kV võimsuslülitite soetusmaksumus on kolm korda kõrgem kui 110 kV võimsuslülititel. Analüüsitud mõõteseadmete hulgas oli nii reaalaja- kui ka kaasaskantavad mõõteseadmed. Seejuures on oluline välja tuua, et käesoleva magistr töö raames soetas Elering hanke korras võimsuslüliti seisundi hindamiseks mõõteseadme Omicron CIBANO 500, mille hanke koostamisel osales ka käesoleva töö autor.

Nimetatud mõõteseadmega teostati ühele ülekandevõrgu alajaama võimsuslülitile kordusmõõtmised, mille tulemusi on analüüsiti käesolevas töös arendatud seisundi hindamise metoodikaga. Nimetatud võimsuslüliti nimipingeline oli 110 kV ja paigalduse aastaga 2005 ja seni teostatud lülitamiskordade arv enne kordusmõõtmisi oli 286. Mõõtmiste tulemusena selgus, et võimsuslüliti väljalülitamise aeg oli muutunud eeldatust suuremaks, seejuures on oluline välja tuua, et ka väljalülitamisajad faaside vaheliselt oli muutunud eeldatust rohkem. Lülitusaegade analüüsimise tulemusena selgus, et nimetatud võimsuslüliti väljalülitamise aja suurenemist põhjustab liikuvate osade hõõrdumise suurenemine üksteise suhtes. Ülejäänud mõõtmiste järgselt analüüsitud võimsuslüliti parameetrid olid eeldatud kulumisega.

Lõputöö eesmärgid said täidetud. Võimsuslülite seisundi hindamiseks loodud meetodikat on edaspidi võimalik ülekandevõrgu operaatoril kasutada tulevaste hoolduste planeerimiseks ja seeläbi vähendada ebavajalike hoolduste mahtu ja sellest tulenevaid kulusid varade haldamisel. Käesoleva töö jätkamiseks on võimalik mõõta ülekandevõrgu oluliste võimsuslüliteid ja arendatud meetodikaga analüüsida saadud tulemusi ning seeläbi selgitada välja lühise mõju nimetatud võimsuslülitele. Teise aspektina on võimalik uurida, milline on mõju võimsuslüliti seisundile, kui võimsuslülitiga ei ole viimastel aastatel teostatud ühtegi lülitamist. Käesolev magistr töö keskendus ülekandevõrgu operaatori SF₆ võimsuslülitele, kuid nimetatud meetodikat on võimalik rakendada ka teistel võrguoperaatoritel ja ettevõtetel, kelle varade hulka kuulub nimetatud tüüpi võimsuslülid. Lisaks saab käesolevat tööd kasutada sisendiks tulevastele teadusuuringutele.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] P. G. Slade, *Electrical Contacts Principles and Applications*, Boca Raton: CRC Press, 2014.
- [2] R. Teemets, *Kaitselülitid*, Tallinn: Trükikoda Printall RdE, 1994.
- [3] R. D. Garzon, *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*, New York: Marcel Dekker, 2002.
- [4] Peter Perengrinus Ltd, *Power circuit breaker theory and design*, London: Short Run Press Ltd, 1982.
- [5] M. Mohammadhosein, K. Niayesh, A. A. S. Akmal ja H. Mohseni, „Online Assessment of Contact Erosion in High Voltage Gas Circuit Breakers based on different Physical Quantities,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 34, nr 2, pp. 580-587, 2019.
- [6] S. Stewart, *Distribution Switchgear*, London: MPG Books Limited, 2004.
- [7] Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon, *High-voltage switchgear and controlgear - Part 100: Alternating-current circuit-breakers IEC 62271-100:2017*, IEC, 2017.
- [8] H. Ito, *Switching Equipment*, Springer International Publishing, 2019.
- [9] O. D. Thapar, „Modern Hydroelectric Engg Practice by Prof OD Thapar - Department of Hydro and Renewable Energy,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.iitr.ac.in/departments/HRE/uploads/modern_hydroelectric_engg/VOL_2/Chapter-7_High_Voltage_Circuit_Breaker.pdf. [Kasutatud 16.03.2021].
- [10] ElectricalWorld360, „Bulk Oil and Minimum Oil Circuit Breaker,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.electricalworld360.com/2018/11/bulk-oil-and-minimum-oil-circuit-breaker.html>. [Kasutatud 21.04.2021].
- [11] About Circuit, „Minimum oil circuit breaker maintenance,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.aboutcircuit.com/minimum-oil-circuit-breaker-maintenance/>. [Kasutatud 21.04.2021].
- [12] A. Greenwood, *Vacuum Switchgear*, London: Short Run Press Ltd, 1994.

- [13] H. Ryan ja G. Jones, *SF6 switchgear*, London: Peter Perengrinus Ltd, 1989.
- [14] Siemens AG, *Siemens 3AP2 FI Manual*, Siemens, 2013.
- [15] ABB Switchgear AB, „ABB CDB LTB 72,5-145 kV D1_B Manual,” ABB, Ludvika.
- [16] *Elering AS sisematerjal*.
- [17] CIGRE WG, „The first international enquiry on high voltage circuit-breaker failures and defects in service,” *Electra*, nr 79, 1981.
- [18] CIGRE WG A13.06, „Final report of the 2nd international enquiry on HV circuit-breaker failures and defects in service,” *CIGRE Technical Brochure*, nr 083, 1994.
- [19] CIGRE WG A3.06 , „Final Report of the 2004-2007 International Enquiry on Reliability of High Voltage Equipment - Part 2: SF6 Circuit Breakers,” *CIGRE Technical Brochure*, nr 510, 2012.
- [20] A. Janssen, D. Makareinis ja C. Solver, „International surveys on circuit breaker reliability data for substation and system studies,” *IEEE Transaction Power Delivery*, kd. 29, nr 2, 2014.
- [21] C. Antoun, „High Voltage Circuit Breaker and Power Transformer Failure Modes and Their Detection,” *2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD)*, pp. 1-6, 2018.
- [22] X. Zhang, J. Zhang, E. Gockenbach ja H. Borsi, „Life Management of SF6 Circuit Breakers based on Monitoring and Diagnosis,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, kd. 25, pp. 21-29, 2009.
- [23] T. Lindquist, L. Berling ja R. Eriksson, „Circuit breaker failure data and reliability modelling,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, kd. 2, nr 6, 2008.
- [24] Megger, „Megszakito-diagnosztika alapjai,” [Vörgumaterjal]. Saadaval: <http://www.maxicont.hu/doc/hirek/Megszakito-diagnosztika%20alapjai.pdf>. [Kasutatud 18.03.2021].
- [25] A. Oliveira, R. Souza, E. Costa, W. Sousa ja A. Santos, „Analysis of test current and contact opening speed influence on dynamic resistance tests on circuit breakers,” *The 19th International Symposium on High Voltage Engineering*, Pilsen, 2015.

- [26] M. Landry, O. Turcotte ja F. Brikci, „A Complete Strategy for Conducting Dynamic Contact Resistance Measurements on HV Circuit Breakers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, kd. 23, nr 2, 2008.
- [27] T. Haila, „Häiriötallennin- ja suojareletietojen hyödyntäminen katkaisijoiden kunnonvalvonnassa,” Aalto University, Espoo, 2016.
- [28] A. Pörtl ja M. Lane, *Field Experiences with HV Circuit Breaker Condition Monitoring*, 2015.
- [29] Rahvusvaheline Elektrotehnikakomisjon, *High-voltage switchgear and controlgear - Part 110: Inductive load switching IEC 62271-110:2017*, IEC, 2017.
- [30] I. Palu, M. Leinakse, Ü. Treufeldt ja M. Meldorf, „Reaktiivvõimsuse kompenseerimine Eesti elektrisüsteemis,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2017.
- [31] A. Razi-Kazemi, „Applicability of auxiliary contacts in circuit breaker online condition assessment,” *Electric Power Systems Research*, kd. 128, pp. 53-59, 2015.
- [32] T. Gräf, „Operational Aged Switchgear with the Age up to 50 Years - Investigations, Testing, Results - Considerations for Design and Operation of New Switchgear,” *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering*, pp. 417-428, 2019.
- [33] Elering AS, *Eesti elektrisüsteemi varustuskindluse aruanne 2019*, Tallinn: ELERING, 2019.
- [34] E. J. de Haan, *High voltage asset performance modeling*, Delft: Delfti Tehnikaülikool, 2011.
- [35] T. Laitinen, „Fingrid's Asset Care Reaches the Next Level | T&D World,” Fingrid Oyj, 25.11.2013. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.tdworld.com/overhead-transmission/article/20963856/fingrids-asset-care-reaches-the-next-level>. [Kasutatud 18.03.2021].
- [36] D. Kuosa, *Vika- ja kunnossapitotietojen hyödyntäminen suurjännitekytkinlaitteiden kunnonhallinnassa*, Espoo: Helsingi Tehnikaülikool, 2007.
- [37] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, *Jaotusvõrgud*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.

- [38] Elering AS, „2.1.1 Eesti põhivõrk | Elering,” Elering AS, [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/2-eesti-elektrisüsteem/21-euroopa-ja-eesti-elektrisüsteemi-ulevaade/211>. [Kasutatud 22.03.2021].
- [39] ABB AS *sisematerjal*.
- [40] P. Choonhapran, „Applications of High Voltage Circuit-Breakers and Development of Aging Models,” Dramstadti Tehnikaülikool, Dramstadt, 2007.
- [41] P. L. Vianna, L. Canha, A. d. R. Abaide ja E. A. L. Vianna, „SF6 Gas Circuit Breakers Reliability Estimation, Considering Likely Wear Points,” *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2016.
- [42] SIEMENS, „SIPROTEC 5 Catalog,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.siemens.com/download?DLA07_3057. [Kasutatud 04.05.2021].
- [43] ABB, „Feeder protection and control REF615 IEC,” 20.05.2019. [Võrgumaterjal].
Saadaval: <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/numerical-relays/feeder-protection-and-control/relion-for-medium-voltage/feeder-protection-and-control-ref615-iec>. [Kasutatud 2021.04.15].
- [44] ABB, „Preventive maintenance for SPACOM and RE500 protection and control equipment,” 13.06.2018. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/numerical-relays/monitoring-devices>. [Kasutatud 14.04.2021].
- [45] Siemens, „SIP5_Operatong_V08.40_Manual_C00D_en,” 22.12.2020. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109742321/siprotec-5-operation-manual?dti=0&lc=en-WW>. [Kasutatud 14.04.2021].
- [46] Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE, *IEEE Guide for the Selection of Monitoring for Circuit Breakers - Redline*, IEEE, 2018.
- [47] J. Kilter, M. Pill, G. Andreesen ja M. Leinakse, „Riskipõhise varahalduse põhimõtted tuleviku elektrisüsteemides,” Tallinna Tehnikaülikool, Tallinn, 2021.
- [48] ionSign, „The task force for IoT data acquisition | ionSign,” ionSign Oy, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.ionsign.fi/all-products/>. [Kasutatud 16.04.2021].

- [49] Present GROUP, „Omicron CIBANO 500 | Test Equipment Inventory,” Powertech Pty Ltd, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://presentgroup.com.au/precise-equipment-omicron-cibano-500/>. [Kasutatud 16.04.2021].
- [50] Elcon AB, „Elcon AB - SA10A,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.elcon.se/index.php/products/sa10a>. [Kasutatud 05 05 2021].
- [51] Megger, „Megger-TM1600,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powerpoint-engineering.com/downloads/data-sheets/megger-TM1600.pdf>. [Kasutatud 05.05.2021].
- [52] Megger, „TM1899 - Dual Ground Circuit Breaker Analyzer,” [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://megger.com/circuit-breaker-analyser-system-with-dualground-safety-tm1800>. [Kasutatud 05.05.2021].
- [53] OÜ Trinity Capital, „Nüüdispuhasväärtus (NPV),” OÜ Trinity Capital, [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.rahandus.ee/et/npv>. [Kasutatud 28.04.2021].
- [54] H. Manninen, J. Kilter ja M. Landsberg, „Adanced Methodology for Estimation of Value of Lost Load (VOLL) Using Equipment Specific Health Indices,” *2019 Electric Power Quality and Supply Reliability Conference (PQ) & 2019 Symposium on Electrical Engineering and Mechatronics (SEEM)*, Kärkla, 2019.

LISAD

**Lisa 1 Ülekandevõrgu võimsuslülitite jagunemine tootjate järgi
nimipingeklassides**

Tabel L1.1 Ülekandevõrgu võimsuslülitite tootjate jagunemine nimipingeklassides [16]

Tootja \ Nimi- pinge	330 kV	110 kV	35 kV	20 kV	10 kV	6 kV
ABB	40	290	17	7	22	5
SIEMENS	54	122	4	17	8	2
ALSTOM	33	55	4	0	3	7
AREVA	1	88	4	1	0	2
NL (Nõukogude Liit)	0	27	3	0	0	0
GE GRID SOLUTIONS	4	19	0	0	0	0
GANZ	0	13	0	0	0	0
VA TECH	0	11	0	0	0	0
CHINT	0	0	0	6	0	2
ELPROM	0	8	0	0	0	0
SCHNEIDER ELECTRIC	0	0	0	0	2	0
MERLIN GERIN	0	0	0	0	1	0

Lisa 2 Võimsuslülitite jagunemine ülekandevõrgu alajaamades

Tabel L2.2 Võimsuslülitite jagunemine alajaamas lahtrite kaupa [16]

Seadme lahter	Trafo	Liin	SVL	Kompenseerimisseade	Omatarve
330 kV	44	84	5	4	0
110 kV	237	320	75	8	1
35 kV	17	12	1	0	2
20 kV	10	0	0	14	9
10 kV	15	0	1	6	13
6 kV	6	0	1	0	7

Lisa 3 Mõõteseadmega Omicron CIBANO 500 teostatud mõõtmiste aruanne

Client	Harku 1V14 katsetamine 100A		
Execution date	06.05.2021	Reason of the job	Routine
Tested by	Tauri Kalmet	Location	Harku
Approved by		Asset	Circuit Breaker
Report ID	1	Asset type	Live tank SF ₆ breaker
Report issue date	06.05.2021 19:55:53	Asset serial number	35090*
Work order		Manufacturer	Siemens

Performed tests	Assessment
Motor Current	Not assessed
C Dynamic Contact Resistance	Not assessed
Contact Resistance	Not assessed
O Dynamic Contact Resistance	Not assessed
O-CO Dynamic Contact Resistance	Not assessed
Minimum Pickup	Not assessed

Live tank SF ₆ breaker nameplate data			
Serial number	35090*	No. of interrupters p. phase	1
Manufacturer	Siemens	Pole operation	Ganged
Manufacturing year	2005	Pre-insertion resistors	No
Manufacturer type	3AP1 FG	Grading capacitors	No
Apparatus ID	1V14	Capacitor value	pF
Feeder	L002	Interrupting medium	SF ₆
No. of phases	3	Tank type	Live tank

Ratings	
Rated frequency	50 Hz
Rated voltage L-L	123 kV
Rated current	1250 A
Rated SC breaking current	25 kA
Short-circuit nominal duration	1s
Rated insul. Level L-G (BIL)	230 kV

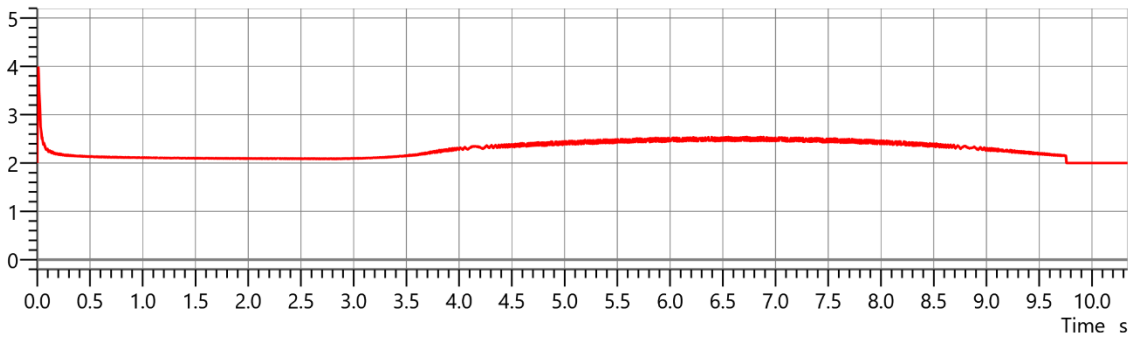
Others		
Total weight with gas	1500 kg	
Weight of gas	8,1 kg	
Rated gas pressure	600 Pa	@ 20 °C

Test set information			
Model	Serial number	Calibration date	Charge status
CIBANO 500	KB08*	2021-03-24	-
CB MC2	JB87*	2021-02-25	92 %
CB MC2	JB87*	2021-02-25	87 %
CB MC2	JB87*	2021-02-25	86 %
CB TN3	JC60*	2021-04-06	-

Global test conditions			
Weather	Cloudy	Humidity	40 %
Unit location	Harku, Estonia	Ambient temperature	10 °C

Operations counter	
Counter reading found	286
Counter reading left	300

Motor Current	
Execution date/Time	06.05.2021 15:50:28
Motor supply voltage	220 V DC
Sample rate	1 kHz

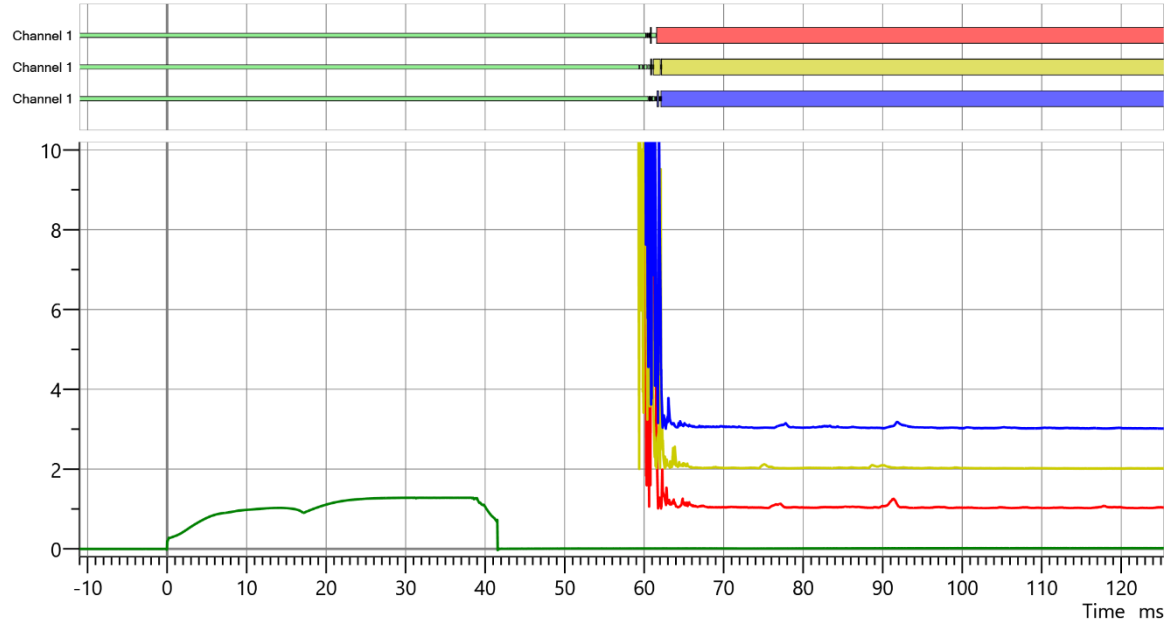


Label	Unit/div.	Y-Axis pos.
Motor (A)	5A	2

Motor characteristics					
	Inrush current	Charging time	Charging current	Minimum voltage	Assessment
Motor	9,87 A	9,75 s	2,33 A	216,06 V	Not assessed

C Dynamic Contact Resistance	
Execution date/Time	06.05.2021 15:51:13
Sequence	C
Coil supply	220 V DC
Time calculation	According to IEC 62271-100
CB MC2 settings	
Test current	100 A
V DC range	10 V
Sample rate	40 kHz

Main, resistive and auxiliary contact



Label	Unit/div.	Y-Axis pos.	Label	Unit/div.	Y-Axis pos.
Close coil (A)	1 A	0	Channel 1 (Ω)	2,5 mΩ	2
Motor (A)	2,5 mΩ	1	Channel 1 (Ω)	2,5 mΩ	3

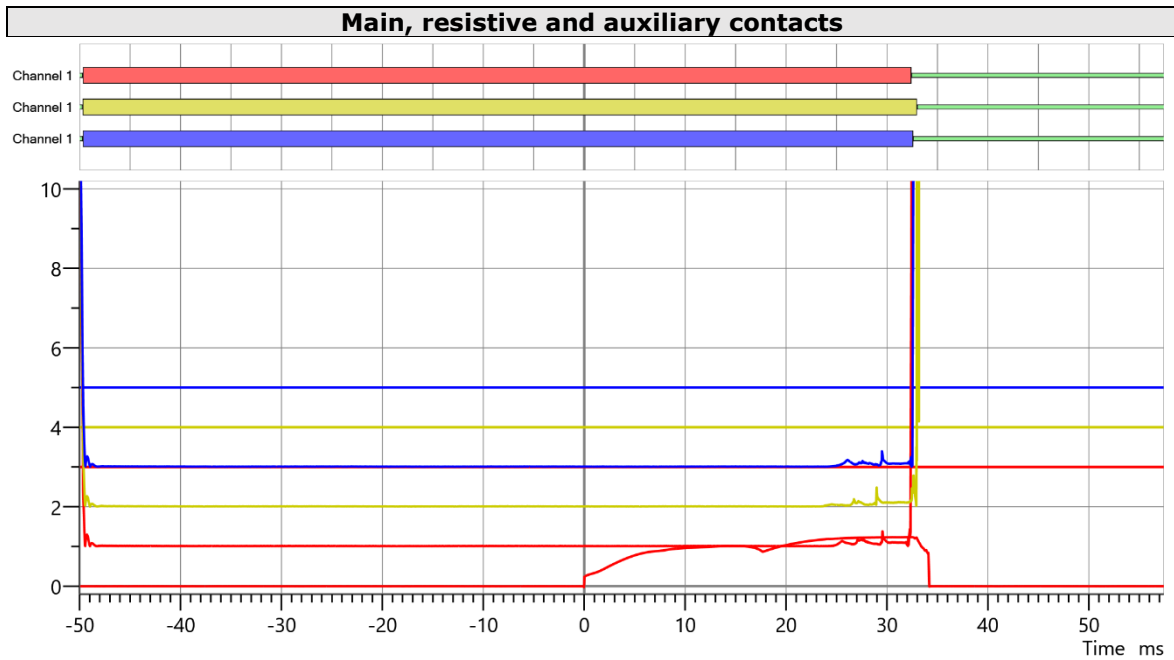
Operating times			
Measured	Closing time (ms)	Closing sync. (ms)	Assessment
Breaker	60,52	1,14	Not assessed
A	60,25		Not assessed
B	59,38		Not assessed
C	60,52		Not assessed

Coil characteristics					
	Peak current (A)	Average current (A)	Average voltage (V)	Resistance (Ω)	Assessment
Close	1,25	1,09	217,95	199,76	Not assessed

Contact Resistance	
Execution date/Time	06.05.2021 15:51:40
Test current	100 A
Ambient temperature	10 °C

Channel	Phase	I DC	V DC	R measured	Assessment
Channel 1	A	99,92 A	2,333 mV	23,35 $\mu\Omega$	Not assessed
Channel 1	B	99,46 A	2,426 mV	24,39 $\mu\Omega$	Not assessed
Channel 1	C	99,80 A	2,392 mV	23,97 $\mu\Omega$	Not assessed

O Dynamic Contact Resistance	
Execution date/Time	06.05.2021 15:52:18
Sequence	O
Coil supply	220 V DC
Time calculation	According to IEC 62271-100
CB MC2 settings	
Test current	100 A
V DC range	10 V
Sample rate	40 kHz



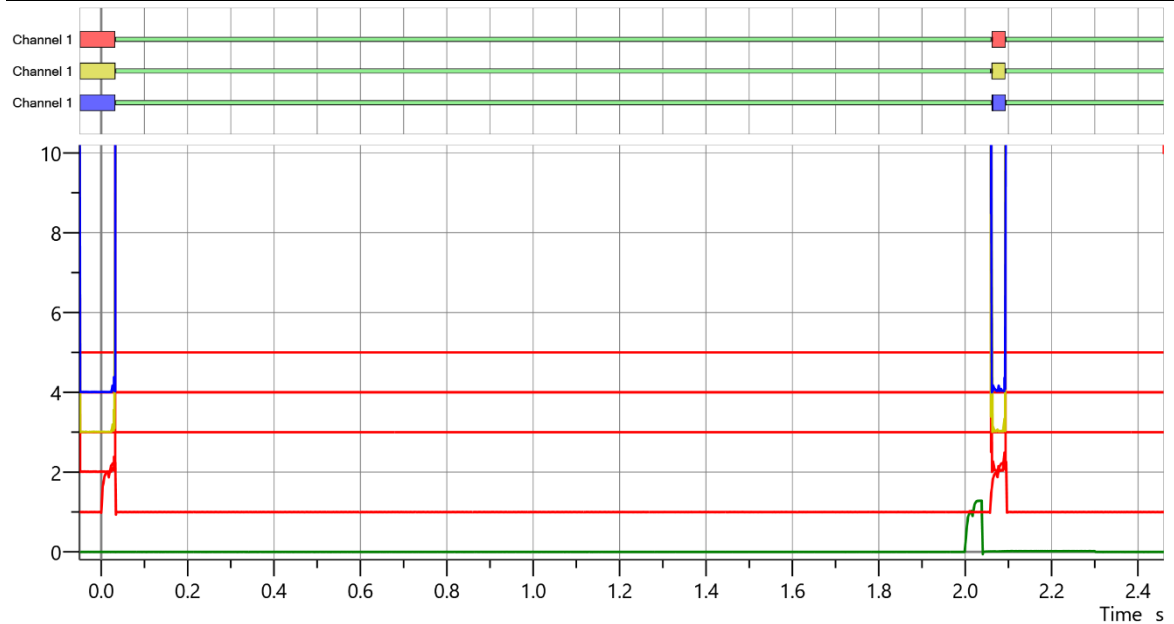
Label	Unit/div.	Y-Axis pos.
Trip coil (A)	1 A	0
Channel 1 (Ω)	2,5 m Ω	1
Channel 1 (Ω)	2,5 m Ω	2
Channel 1 (Ω)	2,5 m Ω	3

Operating times			
Measured	Closing time (ms)	Closing sync. (ms)	Assessment
Breaker	32,97	0,55	Not assessed
A	32,42		Not assessed
B	32,97		Not assessed
C	32,60		Not assessed

Coil characteristics					
	Peak current (A)	Average current (A)	Average voltage (V)	Resistance (Ω)	Assessment
Close	1,23	1,01	217,93	216,19	Not assessed

O-CO Dynamic Contact Resistance	
Execution date/Time	06.05.2021 15:54:38
Sequence	O-CO
Coil supply	220 V DC
Time calculation	According to IEC 62271-100
CB MC2 settings	
Test current	100 A
V DC range	10 V
Sample rate	40 kHz

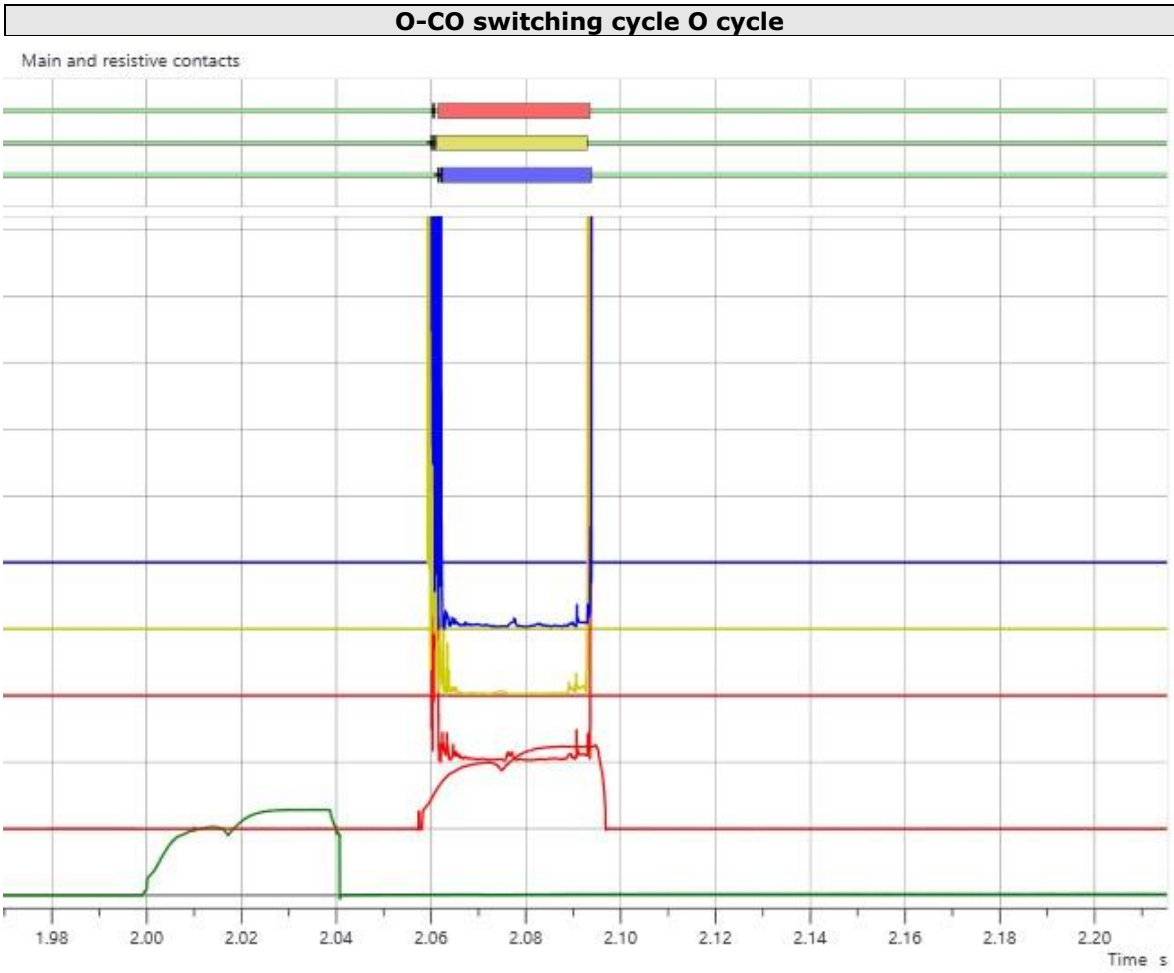
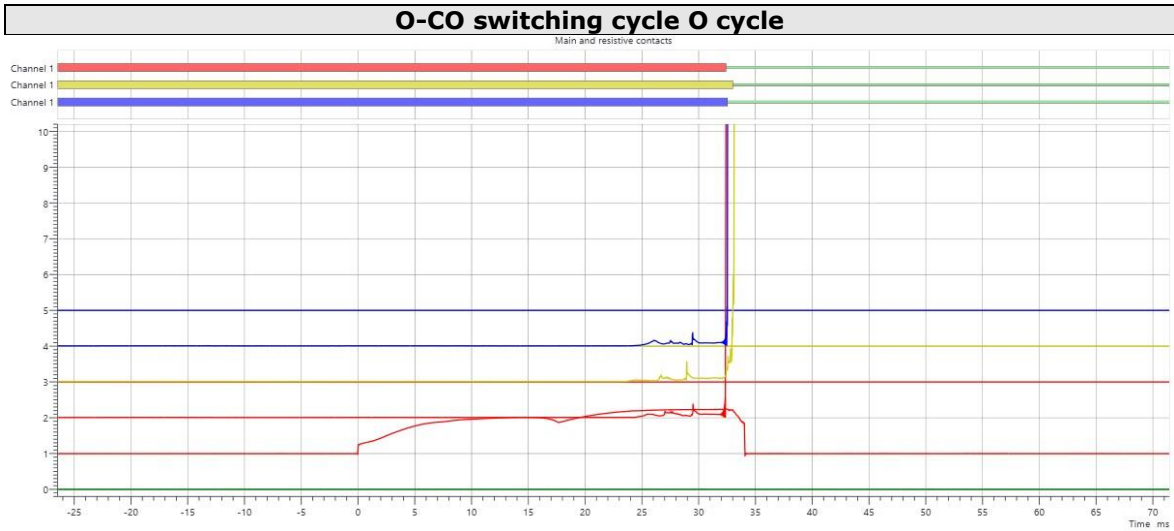
Main, resistive and auxiliary contact



Label	Unit/div.	Y-Axis pos.	Label	Unit/div.	Y-Axis pos.
Close coil (A)	1 A	0	Channel 1 (Ω)	2,5 mΩ	2
Trip coil (A)	2,5 mΩ	1	Channel 1 (Ω)	2,5 mΩ	3
			Channel 1 (Ω)	2,5 mΩ	4

Operating times							
Measured	Opening time (ms)	Opening sync. (ms)	Closing time (ms)	Closing sync. (ms)	Open-Close time (ms)	Close-Open time 1 (ms)	Assessment
Breaker	33,02	0,60	60,78	1,53	26,23	34,63	Not assessed
A	32,42		60,10		27,68	33,50	Not assessed
B	33,02		59,25		26,23	33,75	Not assessed
C	32,55		60,78		28,22	33,10	Not assessed

Coil characteristics					
	Peak current (A)	Average current (A)	Average voltage (V)	Resistance (Ω)	Assessment
Close	1,28	-	-	-	Not assessed
Trip A	1,26	-	-	-	Not assessed



Minimum Pickup	
Execution date/Time	06.05.2021 15:57:22
Coil supply voltage start	55 V
Coil supply voltage end	220 V
Coil supply voltage step	5 V

No.	Operation	V pickup	Assessment
1	Trip	105 V	Not assessed
2	Close	100 V	Not assessed