



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOO  
INSENERITEADUSKOND  
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

# **EKVIVALENTSE ESTLINK 2 DÜNAAMIKA MUDELI KOOSTAMINE PSS/E TARKVARAS**

## **DEVELOPMENT OF EQUIVALENT DYNAMIC MODEL FOR ESTLINK 2 IN PSS/E SOFTWARE**

BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Daniel-Toomas Kojus

Üliõpilaskood: 213758EAAB

Juhendaja: Jako Kilter, professor

Kaasjuhendaja: Madis Leinakse, teadur

Tallinn 2025

# 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.

"....." ..... 20.....

Autor: .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Töö vastab bakalaureusetöö/magistritööle esitatud nõuetele

"....." ..... 20.....

Juhendaja: .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

Kaitsmisele lubatud

".....".....20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees .....

/ allkirjastatud digitaalselt /

## **Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks<sup>1</sup>**

Mina, Daniel-Toomas Kojus

Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ekvivalentse Estlink 2 dünaamikamudeli koostamine PSS/E tarkvaras“,

mille juhendaja on Jako Kilter, professor ja kaasjuhendaja Madis Leinakse, teadur,

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.

\_\_\_\_\_ (kuupäev)

---

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

**Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut**

**LÕPUTÖÖ ÜLESANNE**

**Üliõpilane:** Daniel-Toomas Kojus, 213758EAAB  
**Õppekava, peeriala:** EAAB, Elektroenergeetika  
**Juhendaja(d):** Professor, Jako Kilter, +3726203765  
Teadur, Madis Leinakse, +3726203755.

**Lõputöö teema:**

(eesti keeles) Ekvivalentse Estlink 2 dünaamikamudeli koostamine PSS/E tarkvaras  
(inglise keeles) Development of Equivalent Dynamic Model for Estlink 2 in PSS/E software

**Lõputöö põhieesmärgid:**

1. Ekvivalentse Estlink 2 dünaamikamudeli loomine
2. Mudeli parameetrite mõju ja talitluse analüüsimine PSS/E tarkvaras
3. Voolumuunduri tüüpi alalisvooluühenduse talitluse analüüs

**Lõputöö etapid ja ajakava:**

<b>Nr</b>	<b>Ülesande kirjeldus</b>	<b>Tähtaeg</b>
1.	Materjali kogumine ja läbitöötamine	Jaanuar 2025
2.	Mudeli loomine ja kirjaliku osa kirjutamine	Märts 2025
3.	Töö lõplik versioon valmis, esitamine	Mai 2025

**Töö keel:** Eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "15"Mai 2025. a

**Üliõpilane:** ..... ".....".....20.....a  
/ allkirjastatud digitaalselt /

**Juhendaja:** ..... ".....".....20.....a  
/ allkirjastatud digitaalselt /

**Programmijuht:** ..... ".....".....20.....a  
/ allkirjastatud digitaalselt /

# SISUKORD

EESSÕNA .....	6
LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU .....	7
SISSEJUHATUS .....	8
1. KÕRGEPIINGE ALALISVOOLUÜHENDUSTE TEHNILISED LAHENDUSED JA ESTLINK	
2 10	
1.1 Kõrgepinge alalisvooluühenduste põhilised tüübid.....	11
1.2 Voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendus .....	12
1.2.1 Voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduse süsteem .....	12
1.2.2 Alalisvoolu kaabli tüübid .....	15
1.2.3 Kaod voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendustes .....	16
1.2.4 Türistorid.....	16
1.2.5 Muunduri sild .....	18
1.3 Estlink 2 ühendus.....	22
1.3.1 Estlink 2 projekt .....	22
1.3.2 Estlink 2 tehnilised aspektid .....	24
2. EKVIVALENTSE ESTLINK 2 DÜNAAMIKAMUDELI KOOSTAMINE PSS/E TARKVARAS	
26	
2.1 PSS/E tarkvara .....	26
2.2 Ekvivalentne Estlink 2 püsitalitluse mudel.....	27
2.3 Estlink 2 mudeli elemendid .....	28
2.3.1 Kahe terminaliga alalisvooluühendus.....	28
2.3.2 Sõlmed.....	30
2.3.3 Šunt.....	31
2.3.4 Generaator .....	32
2.4 Muundurite dünaamikamudelid .....	32
2.4.1 CDC4T mudel .....	33
2.4.2 CDC6T mudel .....	36
2.4.3 CDC7T mudeli olemus ja võrdlus teiste mudelitega .....	36
3. MUDELI SIMULATSIOONIDE LÄBIVIIMINE JA TALITLUSE ANALÜÜS .....	39
3.1 Esimene stsenaarium.....	39
3.2 Teine stsenaarium .....	41
3.1 Katsed CDC7T-ga .....	42
KOKKUVÕTE .....	44
SUMMARY .....	46
KASUTATUD ALLIKAD.....	48
LISAD .....	50

## **EESSÕNA**

Lõputöö idee pärineb Tallinna Tehnikaülikooli professorilt Jako Kilterilt. Hetkel on elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis koostamisel Baltimaade elektrisüsteemi ekvivalentne mudel, mille abil oleks võimalik hinnata Balti elektrisüsteemide käitumist ja analüüsida erinevaid talitlusi. Kuna Estlink 2 mõjutab olulisel määral Eesti elektrisüsteemi, on selle lisamine koostavasse mudelisse olulise tähtsusega. Autor väljendab sügavat tänu oma juhendajale Jako Kilterile, kes pakkus välja antud lõputöö teema ning kelle juhised olid abiks lõputöö valmimise protsessi käigus tekkinud küsimuste lahendamiseks. Lisaks soovib autor tänada oma kaasjuhendajat Madis Leinakset, kelle ettepanekud teoreetilise osa kirjutamiseks ja üldised juhised aitasid kaasa lõputöö valmimisele.

Võtmesõnad: bakalaureusetööd, Estlink 2, PSS/E, voolumuundur

## **LÜHENDITE JA TÄHISTE LOETELU**

PSS/E – Elektrivõrkude simuleerimiseks ja analüüsimiseks kasutatav võrguarvutustarkvara  
(*Power System Simulator for Engineering*)

LCC – voolumuunduri tüüpi alalisvooluühendus (*Line Commutated Converter*)

VSC – pingemuunduri tüüpi alalisvooluühendus (*Voltage Source Converter*)

IGBT- isoleeritud väravaga bipolaartransistorid (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

HVDC – kõrgepinge alalisvool (*High Voltage Direct Current*)

HVAC – kõrgepinge alalisvool (*High Voltage Alternating Current*)

## SISSEJUHATUS

Eesti elektrisüsteem areneb pidevalt, mille tõttu toimub võrgus palju muutusi- uute liinide ehitus, võimalike ühenduste planeerimine ning sünkroniseerimine Mandri-Euroopaga. Kõik planeeritud uuendused/muudatused/ümberehitused mõjutavad suure tõenäosusega süsteemi stabiilsust ja töökindlust, mistõttu ei saa neid teostada ilma põhjaliku ettevalmistuse ja analüüsita.

Elektrivõrgu talitluse hindamisel on oluline roll matemaatilistel mudelitel ja võrguarvutustarkvaradel, mis võimaldavad simuleerida ja analüüsida süsteemi talitlust ning käitumist nii püsi- kui ka siirdetalitluses. Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika ja mehhatroonika instituudis on alustatud Baltimaade projekti eesmärgiga koostada Balti elektrisüsteemi ekvivalentne mudel, mille abil hinnata Balti riikide elektrisüsteemide toimimist ning analüüsida erinevaid mõjutegureid ja rikketalitlusi. Kuna Estlink 2 on oluline osa Eesti elektrisüsteemi talitlusest, on selle lisamine koostatavasse mudelisse kriitilise tähtsusega.

Käesoleva bakalaureusetöö eesmärgiks on luua ekvivalentne Estlink 2 dünaamikamudel, mille abil oleks võimalik hinnata voolumuunduri tüüpi alalisvooluühenduste parameetrite ja talitluse mõju ülejäänud elektrivõrgule. Üheks enamlevinumaks võrguarvutustarkvaradest, mis võimaldab analüüsida võrgu dünaamikat on PSS/E (*Power System Simulator for Engineering*), mille tõttu kasutab töö autor seda tarkvara ka käesolevas bakalaureusetöös.

Töö esimeses peatükis antakse ülevaade kahest põhilisest kõrgepinge alalisvooluühenduse tüübist selgitades lahti nende eripärad. Seejärel tutvustatakse põhjalikumalt voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendusega süsteeme ja Estlink 2. Samuti kirjeldatakse süsteemide ülesehitust, sealhulgas seadmeid, millest see koosneb ja nende tööpõhimõtteid. Lisaks antakse ülevaade nii Estlink 2 ehituse-ja planeerimise protsessist kui ka selle tehnilistest andmetest.

Töö teises peatükis tutvustatakse PSS/E tarkvara, kus selgitatakse lahti põhilised kasutusala ja peamised funktsioonid. Seejärel käsitletakse Estlink 2 ühenduse modelleerimise vajadust ning alustatakse püsitalitluse mudeli koostamisega, andes ülevaate mudelis olevatest elementidest ja nende parameetritest. Viimsena analüüsitakse

kolme põhilist muunduri dünaamikamudelit, kirjeldades nende eripärasid ning omavahelisi erinevusi.

Kolmandas peatükis käsitletakse autori poolt välja töötatud erinevate muunduri mudelite talitusrežiimide stsenaariume. Peatüki alguses on lahti kirjeldatud erinevad stsenaariumid ning nende eripärad. Seejärel kohandatakse erinevate mudelite parameetreid ja olemust vastavalt igale katsele ning teostatakse ekvivalentse Estlink 2 dünaamika mudeli parameetrite ja talitluse analüüs.

# 1. KÕRGEPIINGE ALALISVOOLUÜHENDUSTE TEHNILISED LAHENDUSED JA ESTLINK 2

Elektrienergia ülekande tehnoloogiad on viimaste aastakümnete jooksul tunduvalt arenenud. Lisaks 20. sajandil domineerinud vahelduvvoolu süsteemidele, on kasutusele võetud alalisvooluühendused, mille eesmärgistatud kasutamine aitab suurendada elektrienergia tarnimise efektiivsust ja tagada kõrgemat töökindlust. Tänapäevaks on üle maailma paigaldatud rohkem kui 200 kõrgepinge alalisvooluühendust ja alates 21. sajandi algusest on iga-aastaselt paigaldatud seadmete arv aina kasvanud [1]. Vaatamata kõrgetele muundurjaamade hindadele, eelistatakse tehnilistest ja majanduslikest teguritest tingituna üldistes rakendustes kasutada kõrgepinge alalisvooluühendust vahelduvvoolu asemel näiteks Estlink 1 ja Estlink 2. Väiksemate kadude ja majanduslike tegurite tõttu on suure võimsuse ülekandmiseks pikkadel vahemaadel mere- ja maakaablites mõistlikum kasutada alalisvooluühendust.

Jooniselt 1.1 on näha, et alalisvooluühenduste (HVDC) muundurjaamad vajavad suuremat alginvesteeringut kui vahelduvvoolu (HVAC) omad, ja seda muundurjaamade kõrge maksumuse tõttu. Liini pikkuse suurenedes jõuavad mõlemate ühenduste hindade kõverad lõikepunkti (umbes 40-70 km pikkused kaabelliinid ja 600-800 km õhuliinid) [1], alates millest on rahalist aspekti arvestades kõrgepingel võimsuse edastamiseks odavam rakendada alalisvooluühendusi.



Joonis 1.1 Alalisvoolu- ja vahelduvvooluühenduse hinna võrdlus [1].

Ühtlasi võimaldavad kõrgepinge alalisvooluühendused asünkrooniliste või erineva sagedusaladega elektrisüsteemide ühendamist ja eraldi seisvate süsteemide, nagu ranniku lähedal asuvas meres tuuleelektrijaamade või õliplatvormide, ühendamist. [2] [3]

## 1.1 Kõrgepinge alalisvooluühenduste põhilised tüübid

Maailmas on kasutusel kaks peamist kõrgepinge alalisvooluühenduse tüüpi, milleks on voolumuunduri (*Line Commutated Converter - LCC*) ja pingemuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendus (*Voltage Source Converter - VSC*). Mõlemad tehnoloogiad on ette nähtud alalisvoolu üle kandmiseks kõrgetel pingetel ning omavad sarnast ehitust, kuid erinevad elektrienergia muundamiseks vajaliku jõuelektroonika poolest. Kui voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduses kasutatakse türistore, siis pingemuunduris on kasutusel isoleeritud värvavaga bipolaartransistorid ehk IGBT-d. Voolu- ja pingemuunduri erinevused on välja toodud tabelis 1.1. Kahe erineva süsteemi kasutust saab välja tuua ka Eesti näitel. Kui Eesti ja Soome vaheline ühendus Estlink 2 kasutab voolumuunduri tüüpi tehnoloogiat, mis rakendab muundamiseks türistore, siis temale eelnevalt ehitatud ühendus Estlink 1 omab pingemuunduri tehnoloogiat ja kasutab IGBT-sid.

Tabel 1.1 Voolu - ja pingemuunduri erinevused [4] [2].

Parameeter	Voolumuundur ehk LCC	Pingemuundur ehk VSC
Muunduri tehnoloogia	Türistorid	IGBT-d
Voolusuund	Voolusuund on püsiv	Voolusuund muutub võimsuse muutumisega
Sisse- ja väljalülitamine	Sisselülitamine värvavale impulssi andmisega, kuid väljalülitamine sõltub välisest ahelast	Nii sisse- kui ka välja lülitamine toimub ilma välise ahela abita
Võimsuse ülekandemaht, MW	Kuni 12 000	Kuni 2000
Ülekoormamise võimekus	Hea ülekoormamise võimekus	Halb ülekoormamise võimekus
Isekäivitus	Vajab lisaseadmeid isekäivituseks	Omab isekäivituse võimekust
Vahelduvvoolusüsteemi nõuded	Vajab korrektseks töötamiseks tugevat vahelduvvoolu süsteemi	Ei vaja eriti tugevat vahelduvvoolusüsteemi korrektseks talitluseks
Filtrid	Vajab harmoonikute vähendamiseks filtreid	Ei vaja harmoonikute vähendamiseks filtrit
Reaktiivvõimsuse juhtimine	Halb reaktiivvõimsuse juhtimise võimekus	Hea reaktiivvõimsuse juhtimise võimekus
Muundurjaama hind	Madalam hind	Kõrgem hind
Kasutatav trafo	Spetsiaalne muundurtrafo	Tavaline jõutrafo
Võimsuse ülekande suuna muutmine	Toimub pinge polaarsuse muutmise kaudu	Toimub voolusuuna muutmise kaudu
Alalisvoolu pinge võimsuse ülekandel	Alalisvoolu pinge kuni 1000 kV	Alalisvoolu pinge kuni 600 kV
Peamine kasutusala	Kasutatakse üldjuhul suurema koguse võimsuse ülekandmiseks pikkadel vahemaadel	Kasutusel võimsuse edastamiseks kaugemast piirkonnast, millel on taastuenergia tootmine
Muundurjaama pind	Vajab suuremat maa-ala	Vajab väiksemat maa-ala

Tabel 1.1 järg

<b>Parameeter</b>	<b>Voolumuundur ehk LCC</b>	<b>Pingemuundur ehk VSC</b>
Süsteemi reaktsioon alalisvoolukaablis tekkinud lühisele	Sellise lühise tekkel on oluliseks kaitse parameetrikts türistoride süütenurk. See takistab rikkevoolu väärtuse kasvamist ning läbi selle vähendab lühise kahjustavat mõju süsteemile.	Kuna diodidel ei ole süütenurka, siis jätkavad IGBT-d voolu edastamist ka suureneva rikkevoolu korral, mis on süsteemile ohtlik. Selleks, et lühis katkestada tuleb ühendada süsteemi mõlemalt poolt võimsuslülitid välja.
Võimsuskaod	0,65-0,7% muundurjaama nimivõimsusest	0,85-0,9% muundurjaama nimivõimsusest

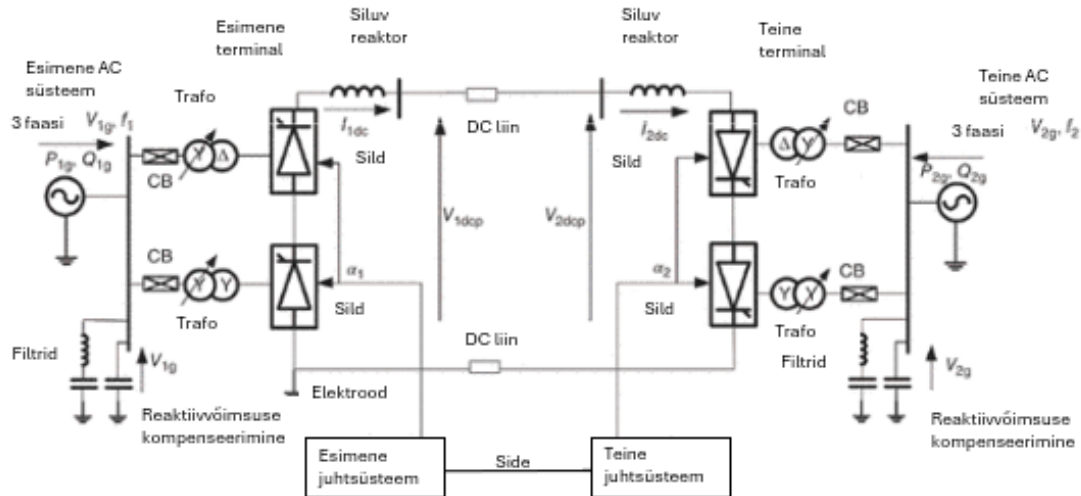
## 1.2 Voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendus

### 1.2.1 Voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduse süsteem

Voolumuunduri tüüpi ehk *LCC (Line Commutated Converter)* süsteemi, mis põhineb türistoride töö ja on üheks enamlevinumaks kõrgepinge alalisvooluühendustes, kirjeldab joonis 1.2. Joonisel on kujutatud kahe erineva vahelduvvoolusüsteemi ühenduskohad ehk terminalid ning neid ühendav alalisvooluühendus. Terminalid koosnevad järgmistest elementidest: muundurid, muundurtrafod, filtrid, reaktiivvõimsuse kompenseerimise seadmed ning juhtsüsteemid.

Muundurid koosnevad tavaliselt vähemalt ühest 6-pulsilisest türistor-, tänapäeval tuntud ka *Graetz*, sillast. Igal sillal on 6 türistorventiili, mis omakorda koosneb mitmetest türistoridest. Võimsamates süsteemides võivad sillad omavahel olla ühendatud jadamsi tekitades 12-pulsilise kooseisu [5]. Detailsemalt on muundursildu käsitletud punktis 1.2.5. Muundurtrafodeks on spetsiaalsed jõutrafod, mis erinevad nii hinna kui ka ehituse poolest tavalistest trafodest. Üheks erinevuseks on nende teistsugune disain, mis võimaldab neil taluda kõrgemaid harmoonilisi voole. Nende peamiseks ülesandeks on muundada pinge vahelduvvoolu süsteemist alalisvoolu süsteemi [6]. Alalisvoolu poolel (vaata joonist 1.3)

olevad siluvad reaktorid ühendatakse muunduriga jadamisi ja nende peamiseks ülesandeks on alalisvoolu silumine ja impulssvoolude piiramine. Reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks on muunduritel põikkondensaatorpatareid ja filtrid, mis varustavad muundureid reaktiivvõimsusega. [3]

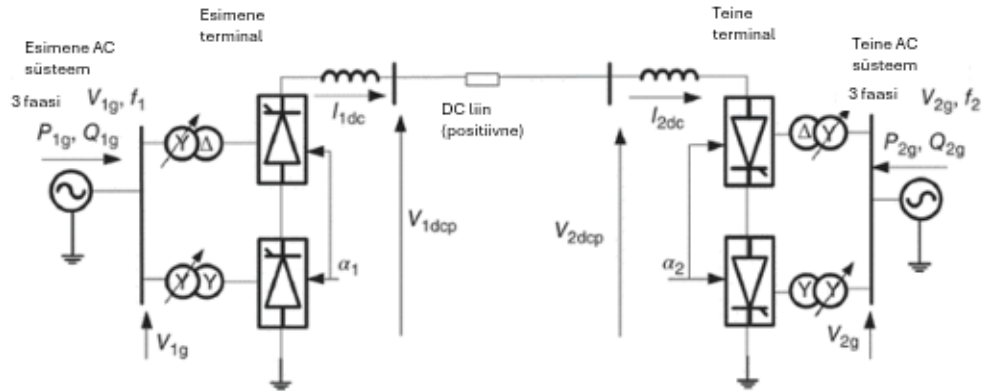


Joonis 1.2 Voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduse tüüpiline skeem [1].

Muunduri normaaltalituseks on vajalik reaktiivvõimsuse tootmine, mis moodustab 50-60% kogu ülekantava võimsuse mahust [7], kuid tuleb silmas pidada, et koormuse muutumisel muutub ka tarbitav reaktiivvõimsus, mistõttu peavad kondensaatorpatareid olema reguleeritavad. 12-pulsiline türistorsild tekitab kõrgemaid harmoonikuid, mille filtreerimiseks kasutatakse spetsiaalseid filtreid [1]. Vanemad kõrgepinge alalisvooluühendused kasutavad maa- või mere tagasisidet, kuid selline lahendus on tänapäeval, tingituna püsivate maavoolude mõjust keskkonnale, paljudele võrguoperaatoritele keelatud. Sellest tulenevalt on kasutusele võetud maaelektrood, mis on maasse või merre paigaldatud juhtivatest elementidest koosnev süsteem, moodustades alalisvooluahela punkti ja maa vahele madala takistusega ühenduse [1] [5]. Viimaseks tähtsaks elemendiks on mõlemal terminalil eraldiseisev juhtimissüsteem, mis tagab terminalidevahelise energia ülekande.

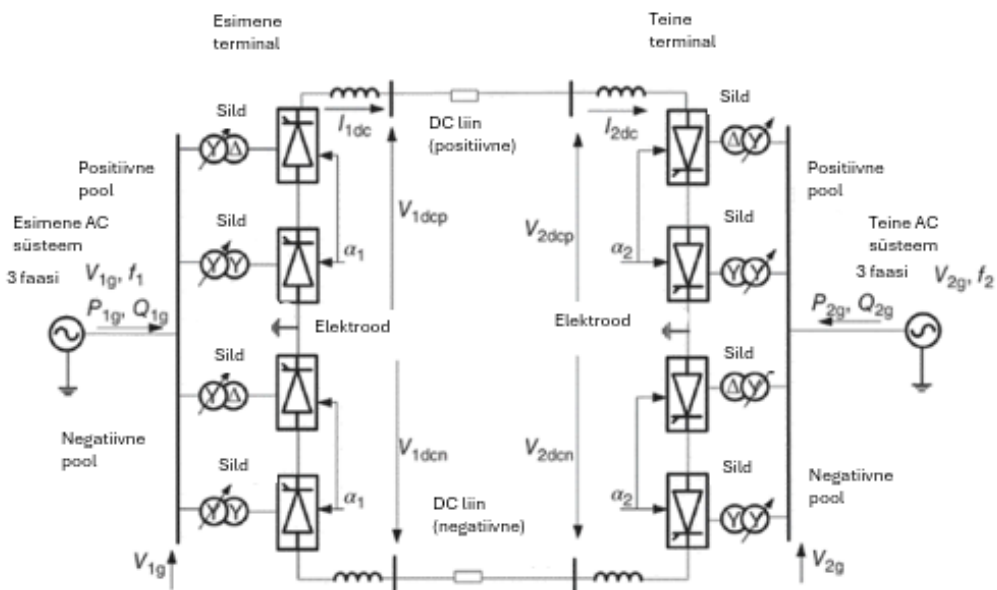
Alalisvooluühendused võivad olla ühepooluselise- või kahepooluselise alalisvoolusüsteemiga. Ühepooluseline süsteem, mida on näha joonisel 2.3, on üldjuhul

kasutuses madalama võimsusega süsteemides, sest see tekitab vähem koroonakadusid ja on odavam [1] [3]. Tagasiside võib kulgeda läbi maa või spetsiaalse kaabli.



Joonis 1.3 12-pulsiline ühepooluseline kõrgpinge alalisvooluühendus maa tagasisidega [1].

Kahepooluseline süsteem on nähtav joonisel 1.4 ning antud süsteemil on kaks iseseisvat alalisvoolusüsteemi poolust [8]. Ühe pooluse rikke korral suudab süsteem töötada poole võimsusega kasutades teist poolust või kaablit. Normaaltalituses on mõlemas pooluses ülekantav võimsus võrdne [5]. Ühe pooluse või kaabli rikke korral rakendub tööse maatagasiside. Mõningates süsteemides ei ole pika kestvusega maavool standarditele vastav. Sellisel juhul ühe pooluse või kaabli tööst välja kukkumisel kasutatakse kolmandat varuühendust. [1]



Joonis 1.4 Kahepooluseline ( 12-pulsiline) kõrgpinge alalisvooluühendus maatagasisidega. [1]

## 1.2.2 Alalisvoolu kaabli tüübid

Voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendused on leidnud kasutust nii alalisvoolu maa- ja merekaabelliinides kui ka õhuliinides. Lähtuvalt ühenduse asukohast ja ülekantava võimsuse mahust tuleb valida kindel kaabelliini tüüp. On olemas kolm peamist tüüpi kaabelliine: õliimmutusega ehk MI (*Mass-impregnated*), õlitäitega ehk *Oil-filled* ning *Extruded* ehk ristseotud alalisvoolukaablid [9]. Kaablite peavoolujuht ja ehitus on sarnane, kuid kasutatav isoleermaterjal on erinev, sest kaabli isolatsioon peab olema võimeline taluma sellele rakendatud pinget. Täpsustava ülevaate erinevatest kaabelliinidest annab tabel 1.2.

Tabel 1.2 Voolumuunduri tüüpi süsteemides kasutatavate kaablite andmed [1].

Parameeter	Õliimmutusega	Õlitäitega	XLPE
Voolujuhi materjal	Cu/Al	Cu/Al	Cu/Al
Isolatsioon	Paber ja mass	Paber ja vedelik	Ristseotud pooljuht
Pinge, kV	Kuni 600	Kuni 500	Kuni 320
Ülekande võimekus ühel kaablil, MW	Kuni 1000	Kuni 2800	Kuni 1000
Muunduri tüüp	LCC või VSC ( <i>Voltage Source Converter</i> )	LCC või VSC ( <i>Voltage Source Converter</i> )	VSC ( <i>Voltage Source Converter</i> ) või ühesuunaline LCC
Pikkus	Lõpmatu	Piiratud õli tõttu	Lõpmatu

MI (*Mass-impregnated*) ehk õliimmutusega kaablid on võimsuse ülekandes olnud kõrgepinge alalisvoolu süsteemides kasutuses viimased 60 aastat [9]. Kaabli dielektrikuks on paber, mis on immutatud kõrge viskoossusega vedelikuga. Võimsuse ülekandmiseks on need kaablid siiani kõige efektiivsemaks lahenduseks tänu nende võimele töötada kõrgetel pingetel kuni 500 kV. Lisaks on võimalik vajadusel muuta kiiresti võimsuse ülekande suunda, mis teeb nad eriti töökindlaks lahenduseks voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvoolu ühendustes. Nende võime töötada võimsusel kuni 1000 MW ja pingel 500 kV ühepooluselise-ning kuni 2000 MW kahepooluselise süsteemina on taganud nende pikaajalise kasutuse. Neid kaableid on võimalik paigutada mistahes pikkusega ning merre sügavusele kuni 1000 meetrit. [1]

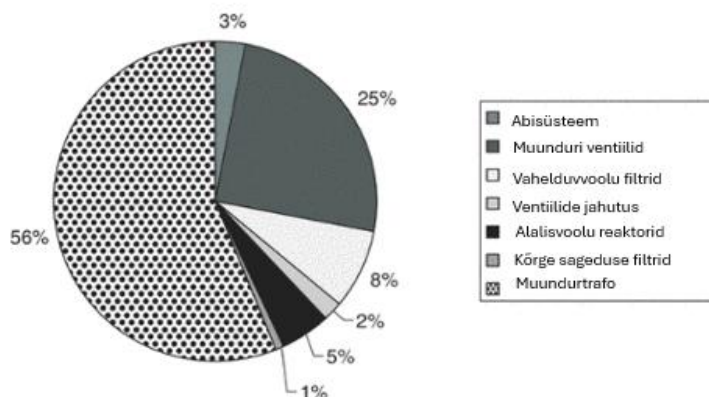
*Oil-filled* ehk õlitäitega kaablid on ehituslikult sarnased MI (*Mass-impregnated*) ehk massiga immutatud kaablitele, kuid nende dielektrikuks on paber, mis on immutatud madala viskoossusega õlis madalal rõhul [1]. Antud kaabel on maa-alusel paigaldusel võimeline töötama pingetel kuni 500 kV ja kandma üle võimsust kuni 2800 MW. Seda saab

kasutada nii alalisvoolu-kui ka vahelduvvoolu lahendustes, kuid kaablis voolava õli tõttu saab neid kaableid ehitada piiratud pikkusega, milleks on 30-60 kilomeetrit. [9]

*Extruded* ehk ristseotud alalisvoolukaabel kasutab isolatsioonina *XLPE (Extruded Cross-linked Polyethylene)* materjali. Sellised kaablid ei ole suutelised taluma kiiret polaarsuse muutumist ning ei ole tavaliselt kasutuses voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvoolu ühenduses, kui tegu ei ole just ühesuunalise võimsuse ülekandega. Eeliseks on kõrge temperatuuri taluvus [5]

### 1.2.3 Kaod voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendustes

Suurte võimsuste ülekandmisel tekivad märkimisväärsed kaod, eriti pikkadel distantsidel, mistõttu on oluline hinnata nende osakaalu ning nende mõju [10]. Joonisel 1.5 on toodud välja peamised kaod voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendustes. Kadude hulk sõltub jaama suurusest ja pinge tasemest. Kõige suuremad kaod on muundurtrafodes, mis moodustavad kokku ligikaudu 50% kogu kadudest.

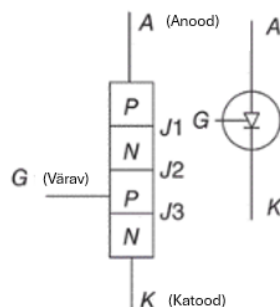


Joonis 1.5 Peamised kaod voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendustes [1].

### 1.2.4 Türistorid

Türistor on väga oluline komponent kõrgepinge alalisvooluühenduse muundurite ventiilides ja on kõige kasutatavam võimsuse ümberlülitamise seade kõikides valdkondades, seda

tänu kõrgele tõhususele ja omadusele taluda kõrget võimsust. Üks seade on suuteline taluma kuni 8500 V ja 4500 A [1] [8]. Türistor koosneb neljast kihist (P, N, P, N) ja kolmest terminalist ehk elektroodist (A – anood ehk positiivne elektrood, G – terminal ehk värav ja tüüreelektrood ning K – katood ehk negatiivne elektrood) (vt joonis 1.6).

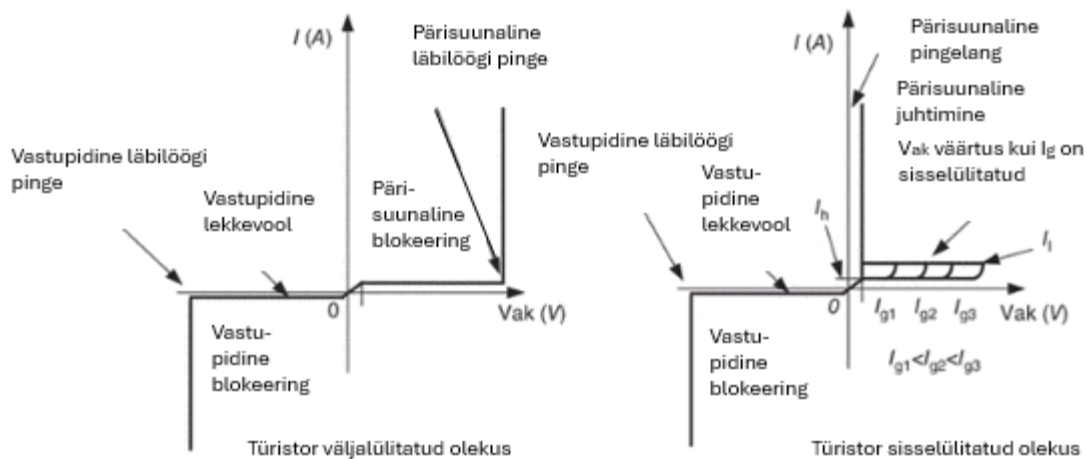


Joonis 1.6 Türistori skeem [1].

Kui türistori G- terminalile ei ole rakendatud voolu, siis on türistor mittejuhtivas olekus. Pärisuunalise pinge rakendamisel- kui anood on positiivne katoodi suhtes, muutuvad kihid J1 ja J3 samuti päri juhtivaks. Vastupidiselt J1-le ja J3-le on kiht J2 vastu juhtivas olekus ning türistorist voolab läbi ainult lekkevool. Suurendades terminalide A ja K vahelist pinget kriitilise piirini, võib kiht J2 võib ootamatult murduda ning türistor võib muutuda päri juhtivaks. G-terminalile voolu  $I_g$  rakendamine (lühiajaline vooluimpulss) vähendab eelmise juhtumi korral J2 murdumiseks vajalikku terminalide A ja K vahelist pinget. [1] [3]

Türistorist läbi voolav vool  $I_a$  on palju suurem, kui G-terminali vool  $I_g$ , sest selle voolu suurus määrab türistori sisselülitamise. Kui vool jõuab sisselülitamiseks vajaliku väärtuseni, siis ei ole G-terminali vool enam oluline, selle võib välja lülitada ning türistor jätkab põhivoolu läbi laskmist. Selleks, et tagada türistori efektiivne töö, saadetakse läbi G-terminali mõne aja tagant aga uus impulss. Kui türistor on juhtivas olekus, siis tema oleku muutus sõltub ainult anoodist sisenevast voolust (põhivool). Näiteks, kui A-elektroodi voolu  $I_a$  vähim lubatud väärtus on hoidevool  $I_h$  ja kui  $I_a$  väärtus väheneb alla hoidevoolu väärtust, lülitub türistor välja.

Kui türistorile rakendada vastupidine terminalide A ja K vaheline pinge, muutub pärijuhtivaks ainult kiht J2 ning kihid J1 ja J3 muutuvad vastu juhtivaks. Sellisel juhul läbib türistori ainult väike lekkevool. Kui seda pinget suurendada piisavalt palju, võivad kihid J1 ja J3 murduda ning põhjustada türistori purunemise. Antud türistori voolu sõltuvusi pingest saab näha jooniselt 1.7. [1]

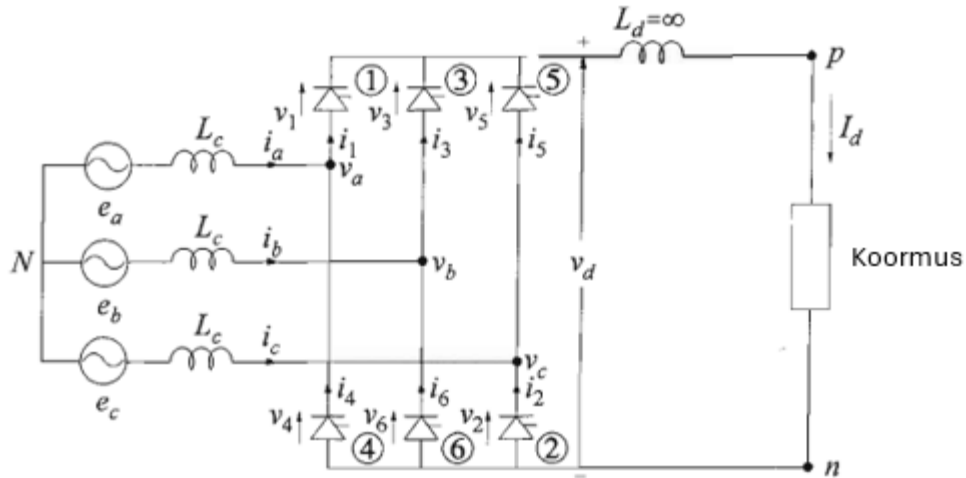


Joonis 1.7 Türistori talitlusskeem väljalülitatud (vasakul) ja sisselülitatud (paremal) olekus [1].

Seega saab türistori sisse lülitada, kui seade on pärijuhtivas olekus, temale rakendatud pinge elektroodide A ja K vahel on positiivne ja terminalile G on rakendatud voluimpulss. Väljalülitamiseks peab türistori läbiva voolu väärtus minema nulli ja elektroodile rakendatud pinge olema vastupidine. Türistor on võimeline taluma seda pinget välja lülitamise hetkel, kuid taaslülitamiseks, peale voolu väärtuse langemist nullini, peab türistor mingi aeg olema vastu juhtivas olekus (taastumiseks), et vabad laengukandjad saaksid PN- kihtides hajuda ning taastada päri-juhtivus pinge talumise omaduse. Vastasel juhul võib türistor ekslikult sisse lülituda või puruneda. [1] [5]

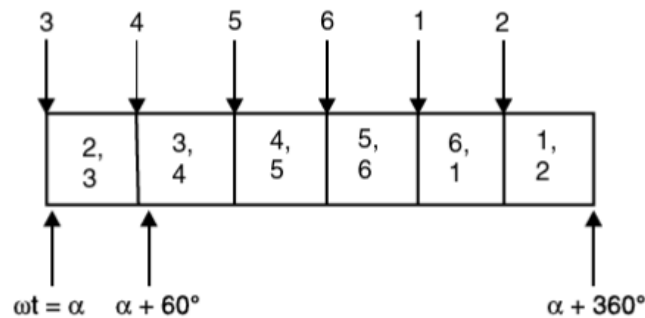
### 1.2.5 Muunduri sild

*Graetzi* ehk 6-pulsiline sild (vt joonist 1.8) on kõige tüüpilisem kolmeafaasiline muunduri sild, mida kasutatakse alalis-ja vahelduvvoolu muundamiseks. See koosneb kuuest erinevast ventiilist, mis on ühendatud nii omavahel kui ka trafo mähistega, kas täht- või kolmnurk ühenduses. Iga ventiil koosneb mitmetest jadamisi ühendatud türistoridest, et tagada vajalik pinge väärtus. [11]



Joonis 1.8 Graetzi silla skeem [8].

Vool saab kulgeda läbi türistori vaid ühes suunas. Ventiilid 1, 3 ja 5 kannavad voolu P-terminali ehk positiivse klemmi poole ning ventiilid 2, 4 ja 6 voolu N-terminali ehk negatiivse klemmi poole. Kui jätta arvestamata kommutatsiooni ehk juhtimise kattumist kahe sama grupi ventiili vahel, läbib vool samal ajal ühte ventiili ülemisest (1, 3, 5) ja ühte alumisest (2, 4, 6) grupist. Ühes tsüklis, kus läbi kõigi türistoride toimub voolu juhtimine, on 6 võrdset intervalli, pikkusega  $60^\circ$  [3], mis on nähtavad jooniselt 1.9, ja kus  $\alpha$  on avanemise-või süüte viitenurk. Võrku või G-terminali kasutades saab türistori sisse lülitamist viivitada ning selleks kasutatakse  $\alpha$  väärtust.  $\omega t=0$  korral läheks ventiil juhtivasse olekusse kohe, kui voolu väärtus läbib 0. Kasutades viitenurka  $\alpha$  saame ventiili viivitusega sisse lülitada.

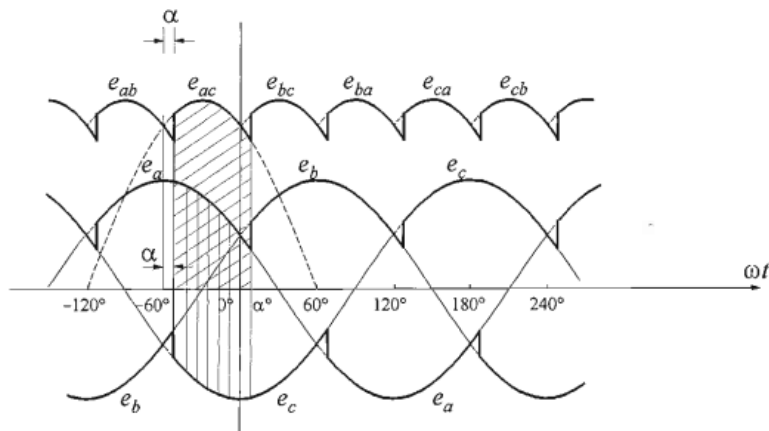


Joonis 1.9 Erinevate türistori ventiilide lülitusgraafik [3].

Joonis 1.10 kirjeldab väljundpinge diagrammi, mis moodustub türistorventiilide järjestikku lülitamise tulemusena. Kolmas ventiil lülitatakse sisse  $\omega t = \alpha$ , kuid enne seda on juhtivas olekus ventiilid 1 ja 2. Perioodi  $\omega t = \alpha$  saabumisel muutub pinge  $e_b$  positiivsemaks kui pinge  $e_a$  ja kolmas ventiil süttib ning esimene kustub, sest selle katoodelektroodi potentsiaal on

kõrgem kui anoodi oma. Järgneva perioodi ehk  $60^\circ$  kraadi vältel on juhtivas olekus ventiilid 2 ja 3. Perioodi  $\omega t = a + 60^\circ$  alguses muutub  $e_a$  väärtus negatiivsemaks, kui  $e_c$ , mistõttu lõpetab ventiil 2 juhtimise ning süttib ventiil 4.

Perioodi  $\omega t = a + 120^\circ$  saabumisega on pinge  $e_c$  positiivsem, kui  $e_b$  ja seega ventiil 3 kustub ning juhtima hakkab ventiil 5. Eelmistele perioodidele sarnaselt kustub perioodil  $\omega t = a + 180^\circ$  ventiil 4 ja juhtivas olekus on ventiil 6. Viimaseks impulsiks on perioodi  $\omega t = a + 240^\circ$  algus, kus juhtimine vahetub ventiilist 5 ventiilile 1 ja terve 6-pulsiline tsükkel saab läbi ning algab otsast peale. 6-pulsiline sild mõeldud alalis- ja vahelduvvoolu muundamiseks. Pidev türistorventiilide korrapärane lülitamine annab meile väljundiks, kas vahelduvvoolust alalisvoolu või vastupidi. Tekkiv alalispinge on nähtav jooniselt 1.10 ning tabel 1.3 kirjeldab, milliste türistoride lülitamine annab kindla osa alalisvoolu pingest.



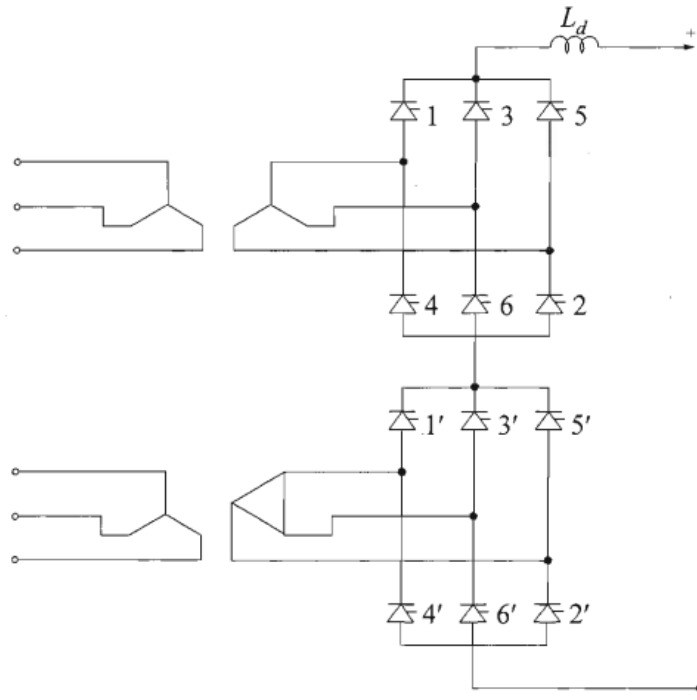
Joonis 1.10 Pingediagramm [8].

Tabel 1.3 Alalisvoolu pinge intervallid [3].

Intervall	1	2	3	4	5	6
Juhtivad ventiilid	2 ja 3	3 ja 4	4 ja 5	5 ja 6	6 ja 1	1 ja 2
Väljundpinge osa	$e_{bc}$	$e_{ba}$	$e_{ca}$	$e_{cb}$	$e_{ab}$	$e_{ac}$

12-pulsiline muundur on sild, mis koosneb kahest omavahel jadamisi ühendatud 6-pulsilisest sillast (vt joonist 1.11). Mõlemad 6-pulsilised sillad on ühendatud trafodega, millest üks on täht-täht ühenduses ja teine täht-kolmnurk ühenduses. Selline ühendusviis

võimaldab tekitada  $30^\circ$  faasinihke ning läbi selle saavad mõlema 6-pulsilise silla lülitamisel tekkivad pinged liituda, et saada stabiilsem alalispinge (alaldi funktsioon) või sinusoidaalsem (vaheldi funktsioon) väljundpinge [8].



Joonis 1.11 12-pulsiline sild [8].

Vähem tekkivate harmoonikute tõttu eelistatakse 12-pulsilist konfiguratsiooni 6-pulsilisele. 12-pulsilise silla kasutamine nõuab vähem filtreid, sest alalispinge lainetus on vähendatud ning kuues ja kaheksateistkümnes harmoonikud kaovad süsteemist [3]. 6-pulsiliste sildade arvude suurendamine rohkem kui kahe võrra muunduris ei ole praktiline, sest harmoonikute kõrvaldamiseks, mis tekivad ventiilide asümmeetrilisel süttimisel, on vajalikud filtrid tunduvalt kallimad ja keerulisema ehitusega [3].

Kui 6-pulsilise muunduri silla ühe intervalli pikkuseks oli  $60^\circ$ , siis 12-pulsilisel on 12 intervalli, igaüks pikkusega  $30^\circ$ . Iga pulsi või intervalli jooksul on 4 türistorventiili juhtivas olekus, 2 ülemisest ja 2 alumisest 6-pulsilisest sillast [3]. Need intervallid on kirjeldatud tabelis 1.4.

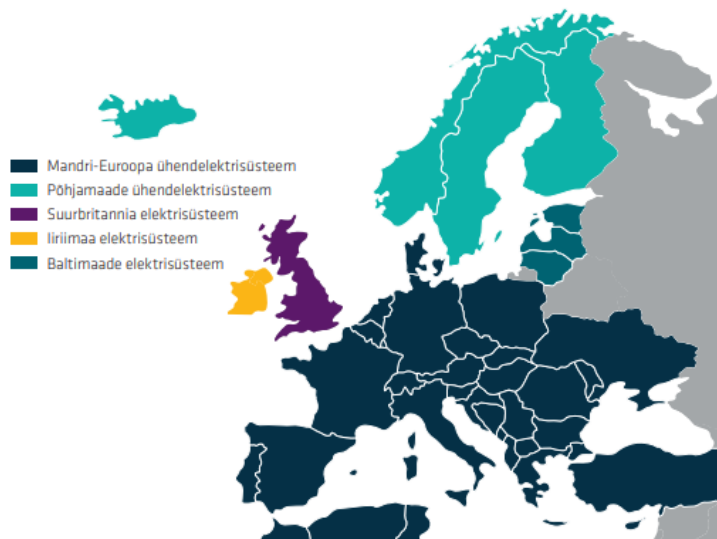
Tabel 1.4 12-pulsilise silla lülitus intervallid [3].

Intervall	1(a)	1(b)	2(a)	2(b)	3(a)	3(b)	4(a)	4(b)	5(a)	5(b)	6(a)	6(b)
Esimese silla juhtivad ventiilid	2 ja 3		3 ja 4		4 ja 5		5 ja 6		6 ja 1		1 ja 2	
$V_{d1}$	$e_{bcS}$		$e_{baS}$		$e_{caS}$		$e_{cbS}$		$e_{abS}$		$e_{acS}$	
Teise silla juhtivad ventiilid	1 ja 2	2 ja 3		3 ja 4		4 ja 5		5 ja 6		6 ja 1		1 ja 2
$V_{d2}$	$e_{acD}$	$e_{bcD}$		$e_{baD}$		$e_{caD}$		$e_{cbD}$		$e_{abD}$		$e_{acD}$

## 1.3 Estlink 2 ühendus

### 1.3.1 Estlink 2 projekt

Euroopa elektrisüsteemi kujundavad mitmed ühendelektrisüsteemid, mis on näha joonisel 1.12. *ENTSO-E* haldusalasse kuuluvad Põhjamaade ühendelektrisüsteemis asuvad Eesti ja Soome. Kui Baltimaad olid varasemalt sünkroonühenduses Venemaa ühendelektrisüsteemiga (*IPS/UPS*), siis alates 2025. aasta veebruarist kuuluvad nad Mandri-Euroopa ühendelektrisüsteemi poolt haldavasse sünkroonlasse. [12]



Joonis 1.12 Euroopa elektrisüsteem [12].

Estlink 2 (vt joonist 1.13) on teine Eesti ja Soome vaheline elektriühendus Soome lahes, mis valmis 2014. aasta alguses. Lisaks varasemalt ehitatud ühendusele Estlink 1, võimaldas uue kaabli rajamine tõsta ülekantava elektrienergia mahtu ligikaudu kolm korda. Kuna Eesti elektritarbimine kasvab aastas keskmiselt 2-3%, aitab kirjeldatud ülekantava energia mahu suurenemine tagada tõhusama varustuskindluse ning aitab vähendada Estlink 1 kaabli ülekoormamist [13]. Samuti on Estlink 2-el oluline roll elektrituru efektiivse toimimise tagamisel – suurendatud võimsuse ülekanne võimaldab optimaalsemat elektrienergia ülekannet nii Eesti ja Soome vahel, kui ka teiste riikidega, mis on nendega ühendatud.



Joonis 1.13 Eesti ja Soome merekaablid Estlink 1 ja Estlink 2 [14].

Projekt sai alguse 2008. aastal ettevalmistustöödega, milles viidi läbi erinevaid uuringuid, millest üheks oli merepõhjauuring. 2010. aastal käivitati hankekonkurss muundurjaamade ja kaabli ehituseks. Kaabli hanke võitis Nexans Norway AS, kes ka hiljem teostas kaabli rikke puhul remonditöid. Muundurjaama hanked võitis Siemens AG. Mõlemad hankelepingud sõlmiti 2010. aasta lõpus. [15]

2011. aastal alustati muundurjaamade ehitusega ja 2012. aasta lõpuks sai merekaabel merepõhja paigutatud. Seejärel alustati maakaabli paigaldusega ning 2013. aasta sügisel ühendati merekaabel ja maakaabel omavahel jätkumuhviga. Sellele järgnesid süsteemi viimased testid ning 2014. aasta veebruaris toimus Estlink 2 lõplik üleandmine tellijale [15]. Kui Estlink 1 projekti realiseerimine võttis aega ligikaudu 15 aastat, siis Estlink 2 valmis kaks korda kiiremini. [16] Estlink 2 kogu maksumuseks kujunes 320 miljonit eurot, millest 100 miljonit saadi toetuseks Euroopa Liidu poolt. Mere- ja maakaabli hinnaks kujunes umbes 180 miljonit ja muundurjaamade hinnaks 100 miljonit eurot.

### 1.3.2 Estlink 2 tehnilised aspektid

Estlink 2 on kõrgepinge alalisvoolu ehk HVDC ühendus, ühendab Eestis asuvat Püssi ja Soomes asuvat Anttila alajaama, kus kaablis voolav alalisvool muundatakse ümber vahelduvvooluks. Estlink 2 kogupikkus on ligikaudu 170 kilomeetrit, millest 145 kilomeetrit moodustab alalisvoolu merekaabel kaaluga 76 kilogrammi ühe meetri kohta. Ülejäänud osa moodustavad maal asuvad alalisvoolu ühendused muundurjaamadega. Püssi alajaamast kulgeb kaks maismaakaablit, mis asuvad maa all - üks on peavooluahela ja teine tagasivooluahela kaabel, mis omakorda koosnevad 12-st ühe kilomeetri pikkustest lõikudest. Eraldiseisvaid lõike ühendavad 11 jätkumuhvi ning üks üleminekumuhv ühendab mere- ja maakaablit. Merekaabel on samuti jagatud kaheks 70 kilomeetri pikkuseks lõiguks. Soomes ühendab muundurjaama ja merekaablit 14 kilomeetri pikkune alalisvoolu õhuliin. [15]

Estlink 2 ülekandevõimsus on 650 MW, mis koos Estlink 1-ga, mille ülekandevõimsuseks on 350 MW, moodustavad 1000 MW ülekandevõime. Kaabli alalisvoolu pingeks on 450 kV, mis ühendab Eesti 330 kV ja Soome 400 kV võrku. Estlink2 on suuteline juhtima võimsust mõlemas suunas - nii Eesti ja Soome vahel mõlemas suunas. Püssi ja Anttila muundurjaamade kõige olulisemaks komponendiks on muundur, mille peamiseks ülesandeks on vahelduvvoolu muundamine alalisvooluks ja vastupidi. Selline muundamine on võimalik tänu türistoride täppislülitamisele. Tegu on 12-pulsilise muundursillaga ehk sild koosneb 12st türistorventiilist, milles igaühes asub 64 optilise juhtimpulsiga türistori. Muundurhallis asuvad ka kolme muunduri jõutrafo läbiviigud ning trafod asuvad kõrval olevas siseruumis. Tegemist on kolmemähiseliste jõutrafodega, mille nimivõimsus on 261 MVA ja mass 341 tonni, kusjuures 80 tonni moodustab sellest õli [15]. Vahelduvvoolufiltreid, mis aitavad kompenseerida Estlink 2 reaktiivvõimsust ja vähendada kõrgema sagedusega harmoonikaid, on 4, millest iga ühe võimsuseks on 90 Mvar. Detailne koondülevaadet Estlink 2 andmetest on nähtav tabelis 1.5.

Tabel 1.5 Estlink 2 andmed [15].

Parameeter	Suurus
Ülekandevõimsus	650 MW
Alalisvoolu pinge	450 kV
Ülekandetehnoloogia	Kõrgepinge alalisvoolu ühendus

Tabel 1.5 järg

<b>Parameeter</b>	<b>Suurus</b>
Muunduri tüüp	Voolumuunduri tüüp
Muunduri sild	12-pulsiline sild
Türistoride arv ühes ventiilis	64
Ühenduskoht Eestis	Püssi 330 kV alajaam
Ühenduskoht Soomes	Anttila 400 kV alajaam
Estlink 2 pikkus	Kogupikkus 170 km, millest 145 km moodustab merekaabel, 12km maakaabel Eestis ja 14 õhuliin Soomes
HVDC liik	Ühepooluseline metallilise tagasisidega süsteem
Merekaabel	Kaal 76 kg/m kohta Läbimõõt 15 cm
Maismaakaabli peavooluahela kaabel	Kaal 45 kg/m kohta Läbimõõt 13 cm Paber-õli isolatsioon
Maismaakaabli tagasivooluahela kaabel	Kaal 20 kg/m kohta Läbimõõt 9 cm XLPE isolatsioon
Projekti algus (ettevalmistustööd)	2008. a jaanuar
Projekti lõpp (Estlink 2 lõplik üleandmine tellijale)	2013. a veebruar
Vahelduvvoolu filtrid Eesti poolel	4x 90 Mvar
Vahelduvvoolu filtrid Soome poolel	3x 110 Mvar 1x 32 Mvar
Kaabli ehitus	Nexans Norawy AS
Muundurjaamade ehitus	Siemens AG
Kogu maksumus	320 miljonit eurot, millest 100 miljonit oli Euroopa Liidu toetus. Mere- ja maakaabli hind 180 miljonit eurot Muundurjaamade hind ligikaudu 100 miljonit eurot

## **2. EKVIVALENTSE ESTLINK 2 DÜNAAMIKAMUDELI KOOSTAMINE PSS/E TARKVARAS**

Estlink 2 on tähtis element Eesti elektrisüsteemis. Selle töökindlus on oluline aspekt, mida tuleb jälgida ja planeerida. Töökindluse tagamiseks tuleb osata hinnata antud kõrgepinge alalisvoolu ühenduse töötamise nüansse nii püsi- kui ka siirdetalitluses. Hindamise protsessi lihtsustamiseks on võimalik luua erinevates arvutustarkvarades ekvivalentne Estlink 2 mudel, millega on võimalik analüüsida ühenduse parameetrite muutused, mis on põhjustatud võrgus või Estlink 2-s endas toimuvatest protsessidest, näiteks lühistest.

Antud lõputöös koostati dünaamikamudel, millega on võimalik analüüsida Estlink 2 parameetrite muutust ajas. Lisaks sellele võimaldab antud mudel simuleerida rikkeid ja koormuse muutmist ning hinnata kõrgepinge alalisvoolu ühenduse käitumist. Töös kasutatavaks arvutustarkvaraks valiti PSS/E, sest see sisaldab dünaamikamoodulit ja võimaldab simuleerida kõrgepinge alalisvoolu ühenduste iseärasusi.

### **2.1 PSS/E tarkvara**

PSS/E on Siemensi *PTI (Power Technologies International)* osakonna poolt loodud tarkvarapakett, mis on mõeldud ülekande- ja tootmisvõrkude analüüsiks nii püsi- kui ka muutuvates ehk dünaamikatingimustes. PSS/E käsitleb võimsusvoo katseid, vigade analüüsi, ekvivalentsete süsteemide ja võrkude loomist ning dünaamika simulatsioone. [17]

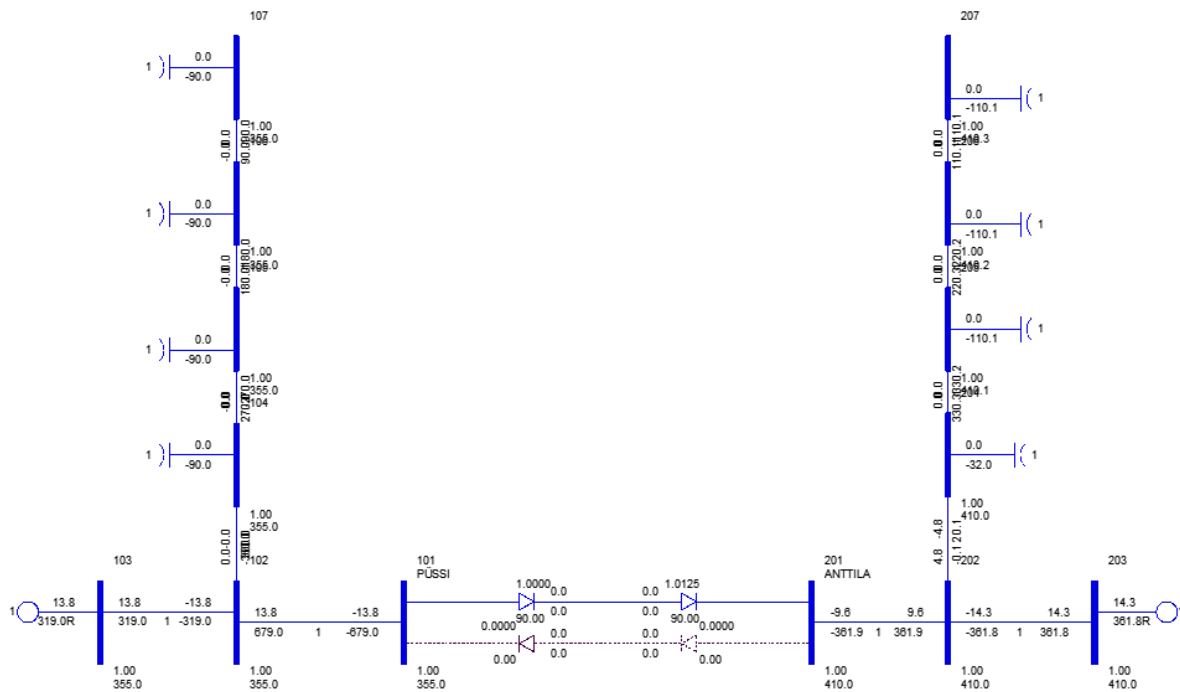
*PSS/E* tarkvaras on suures mahus erinevaid funktsioone, mida on võimalik näha esimesest lisast (vt lisa 1). See on võimalik tänu modulaarsele struktuurile ja sätetele, mis võimaldavad kasutada kasutaja poolt loodud süsteemide loogikat juhuks, kui standardselt pakutud lahendused ei ole sobivad. PSS/E funktsionaalsus on väga laialdane, mistõttu ei ole see loodud ühe konkreetse probleemi lahendamiseks. Tänu hoolikalt optimeeritud andmestruktuurile on kasutajal võimalik analüüsida mitmekesiste süsteemide talitlusi. [17]

## 2.2 Ekvivalentne Estlink 2 püsitalitluse mudel

Estlink 2 on oluline komponent nii Eesti kui ka Soome elektrisüsteemis. Selle kaudu toimub riikidevaheline elektrienergia ülekanne, mis aitab tagada energiavarustuskindluse ja süsteemi stabiilsuse. Käesolev mudel võimaldab simuleerida tulevikus potentsiaalselt tekkivaid lühiseid ning analüüsida, kuidas vastav ühendus erinevates töörežiimides käitub. Selleks on vaja koostada võimalikult täpne ja reaalsele Estlink 2 kõrgepinge alalisvooluühendusele vastav ekvivalentne mudel. Mudeli ja tegeliku HVDC - ühenduse vastavus tuleneb kasutatavates komponentides ja nende parameetrite täpsusest – mida suurem on komponentide ja nende omaduste sarnasus, seda täpsem on mudeli käitumine võrreldes realselt töötava süsteemiga.

Mudeli koostamisel tuli esmalt määratleda selle üldine struktuur. Esimeses etapis loodi mudel, mis võimaldab simuleerida Estlink 2 püsitalitlust ja arvutada optimaalse võimsusülekanne parameetreid ilma rikete või lühiste kaasamiseta.

Teiseks, tuli mudel jagada kaheks pooleks, kus üheks oli Eesti-poolne Püssi alajaam ja teiseks Soome-poolne Anttila alajaam, mille pingestmed valiti vastavalt riikide võrgupingele. Alajaamu kujutasid erinevad sõlmed, nendevahelised ühendused ja komponendid. Püssi- ja Anttila alajaama sõlmede vahele paigutati *2-Term DC Line (Two terminal direct current line)* ehk kahe terminaliga alalisvooluühendus, mis illustreeris Estlink 2 kõrgepinge alalisvooluühendust Eesti ning Soome vahel ja elektrienergia muundamiseks vajalikke muundurjaamu. Mõlemale mudeli poolele paigaldati ka pöikondensaatorid, et tagada türistoridele alalisvoolu vahelduvvoolu muundamiseks ja vastupidiselt vajalik reaktiivvõimsus. Igale elemendile lisati oma sõlm, et tagada täpsemad tulemused ning vajadusel simuleerida kindla elemendi lühist. Koostatud mudelit on näha jooniselt 2.1.



Joonis 2.1 Ekvivalentne Estlink 2 dünaamikamudel PSS/E tarkvaras

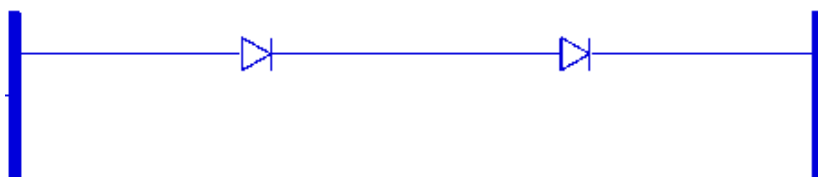
## 2.3 Estlink 2 mudeli elemendid

Selleks, et PSS/E tarkvaras modelleeritud ekvivalentne mudel, mis asub joonisel 2.1 töötaks korrektselt ja hiljem teostatud tulemuste analüüs oleks võimalikult usaldusväärne, on vajalik, et seda sisaldavad elemendid oleksid kirjeldatud õigete parameetrite ja omavaheliste ühendustega. Nendeks elementideks on kahe terminaliga alalisvooluühendus, erinevad sõlmed, põikkondensaatorid ja võrku toitvad generaatorid.

### 2.3.1 Kahe terminaliga alalisvooluühendus

PSS/E tarkvaras on võimalik kujutada erineva muunduri tüübiga kõrgepinge alalisvooluühendusi. Selle lõputöö raames vaadeldakse ainult voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendusi.

Selleks, et modelleerida antud ühendust, tuleb rippmenüüst valida kahe terminaliga alalisvooluühendus ehk *2-Term DC Line (Two terminal direct current line)* ning ühendada see kahe sõlme vahele (vt joonist 2.2). Selline mudel sisaldab kõiki tavalise voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduse põhilisi komponente: muundurit, mis koosneb muundurtrafodest, alaldist ja vaheldist ning kaablitest ja liinidest koosnevast ühendusest. Vaadeldav ühendus on monopolaarne ehk ühepooluseline, mis tähendab, et võimsus saab liikuda ainult ühte pidi. Siinkohal tuleb olla tähelepanelik, sest paigutades seda mudelit kahe sõlme vahele, on esimeseks valitud sõlm võimsust ja alalisvoolu edastav ehk alaldit ning teiseks valitud sõlm ehk vaheldit sisaldav pool. Jooniselt 2.2 on näha monopolaarset ühendust. Mõlemasuunalise ülekande simuleerimiseks on lisatud kaks ühendust, millest ühe kaudu toimub energia eksport Eestist Soome ja teist kaudu import Soomest Eestisse. Kuna reaalsuses saab ülekanne toimuda korraka vaid ühes suunas, on mudelis üks ühendustest alati töös ning teine kinni, vastavalt sellele, mida simuleeritakse.



Joonis 2.2 Voolumuunduri tüüpi alalisvooluühenduse mudel, mis on paigutatud kahe sõlme vaheliseks ühe suunaliseks ülekandeks PSS/E tarkvaras

Lisaks kindlate sõlmede valimisele, mille vahele ühendus paigutatakse, tuleb sisestada ka alalisvooluühenduse mudeli andmed nagu alaldi, vaheldi, muundurtrafo ning alalisvooluühenduse põhilised parameetreid. Nii Eesti kui ka Soome poolsed muundurjaamad on suhteliselt identsed, seega on mõlema kõrgepinge alalisvooluühenduse mudeli parameetrid samad, kuid esimesel ühendusel on alaldiks Eesti poolne ja vaheldiks Soome poolne sõlm ning teisel ühendusel vastupidi. Antud andmed on leitavad teisest lisast (vt lisa 2).

## 2.3.2 Sõlmed

Sõlmed on PSS/E tarkvaras ühenduspunktid erinevate elementide vahel, mida saab ühendada kokku, kas liinide või teiste mudelite abil. Enne sõlme lisamist mudelisse tuleb kindlaks määrata selle otstarve. PSS/E tarkvaras on olemas kolm peamist erineva tähistusega sõlme tüüpi. Sõlm numbriga 1 tähistab mitte tootvat sõlme. Selliseks sõlmeks võib olla koormuspunkt, kus toimub võimsuse tarbimine või ka lihtsalt vahesõlm erinevate elementide vahel. Numbriga 2 tähistatakse generaator-ehk tootmissõlme, kuhu ühendatakse külge generaator või muu tootmisjaam. Võrgu balansisõlme numbriks on 3 ning seda kasutatakse tasakaalusõlmene võrgu võimsusbilansi hoidmiseks (st. aktiiv- ja reaktiivenergia tootmist või tarbimist vastavalt võrgu vajadusele). On olemas ka sõlm, mis tähistatakse numbriga 4, kuid seda kasutatakse sellest järgneva ahela süsteemist välja jätmiseks.

Seejärel tuleb valida sõlme primaarpinge, mis toimub põhivõrgu pinge järgi, Eestis 330 kV ja Soomes 400 kV. Lisaks nime andmisele saab sõlmele määrata ka tuvastusnumbri. Tabelist 2.1 selgub, et numbriga 1 algavad sõlmed (101-107) tähistavad Eesti poolset Püssi alajaama, mille pingeks PSS/E tarkvaras on valitud 355 kV ja numbriga 2 algavad sõlmed (201-207) kujutavad pingega 410 kV Soome poolset Anttila alajaama. Joonisel 2.3 on näha Püssi alajaama ühte sõlmedest tuvastusnumbriga 101, mis on ühenduskohaks voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduse ja ülejäänud Püssi alajaama sõlmede vahel.

Tabel 2.1 Sõlmede tähistused PSS/E tarkvaras

Alajaam	Sõlmede numbrid	Pinge (kV)
Püssi	101-107	355
Anttila	201-207	410



Joonis 2.3 Sõlme mudeli kuju PSS7E tarkvaras

### 2.3.3 Šunt

PSS/E tarkvaras on võimalik kujutada kahte erinevat tüüpi šunte: reguleeritavad ja mittereguleeritavad. Reguleeritavate šuntide puhul juhib süsteem nende reaktiivenergia tootmist või tarbimist iseseisvalt vastavalt vajadusele. Mittereguleeritavate šuntide puhul tuleb ette anda reaktiivenergia väärtus, mida antud seade tarbib või toodab.

Šuntidega on võimalik kujutada nii põikreaktorit kui ka põikkondensaatorit. Põikreaktorid on induktiivsed elemendid, mis tarbivad võrgust üleliigset reaktiivenergiat ja nende kujutamiseks PSS/E tarkvaras on vajalik lisada reaktiivvõimsuse väärtusele ka miinusmärk. Põikkondensaatorid on seevastu mahtuvuslikud elemendid, mis lisavad võrku vajalikku reaktiivenergiat ja nende modelleerimisel ei ole vaja reaktiivvõimsuse väärtuse sisestamisel miinusmärki lisada. Antud lõputöös on kasutusel ainult mittereguleeritavad põikkondensaatorid, mis kujutavad endast türistoride tööks vajalikku reaktiivvõimsust tootvaid vahelduvvoolufiltreid. Sellist on näha joonisel 2.4.



Joonis 2.4 Mittereguleeritava šundi ehk põikkondensaatori mudel PSS/E tarkvaras

Kuna reaalses muundurjaamas on kasutusel 4 komplekti vahelduvvoolufiltreid, otsustati kasutada mudelis sarnast struktuuri. Eesti poolele lisati 4 põikkondensaatorit elementi, kus kõikide seadmete eraldiseisvaks võimsuseks kujunes 90 Mvar. Soome poolele lisati kolm põikkondensaatorit võimsusega 110 Mvar ja üks võimsusega 32 Mvar. Sõlmi, mille külge ühendati šundid ning šuntide võimsusi on näha tabelist 2.2.

Tabel 2.2 Šuntide mudelite võrdlus PSS/E tarkvaras

Alajaam	Ühendussõlme number	Reaktiivvõimsus (Mvar)
Püssi	104-107	4x 90
Anttila	204-207	3x 110, 1x 32

### 2.3.4 Generaator

Võimsuse genereerimiseks tuleb PSS/E tarkvaras olemasolevale sõlmele lisada generaator. Sõlme ja generaatori tüübi numbrid peavad olema samad. Näiteks, kui sõlme number on kaks, mis tähistab generaatorsõlme, tuleb ka lisatava generaatori numbriks panna kaks. Lisaks sellele tuleb ära märkida ka generaatori poolt toodetav aktiiv- ja reaktiivvõimsus. Bilansisõlme valimisel ei ole vaja generaatoril võimsusi määrata, sest bilansisõlm muudab seda ise vastavalt süsteemi vajadusele, seetõttu on ka antud töö alguses mudelis kasutatud kahte bilansisõlme, millega simuleeritakse Eesti ning Soome poolset tarbimist ja tootmist. Generaatori paremaks tuvastamiseks on soovitatav lisada generaatorile nimi või tuvastusnumber, eriti kui süsteemis on rohkem kui üks tootmisüksus. Generaatori kujutust PSS/E tarkvaras on näha jooniselt 2.5



Joonis 2.5 Generaatori mudel PSS/E tarkvaras

## 2.4 Muundurite dünaamikamudelid

Joonisel 2.1 on kujutatud mudelit, millega on võimalik teostada püsitalitluse analüüsi arvutades generaatorite poolt toodetavaid ja tarbitavaid võimsusi. Selleks, et antud mudeliga oleks võimalik analüüsida ka siirdetalitlust ja parameetrite muutust, on vaja sellele lisada dünaamikaandmeid sisaldav muunduri mudel. Siirdetalitluseks võib kujuneda mingi lühise teke, mis on põhjustanud pinge või voolu muutumisi mõnes sõlmes või ühenduses. Dünaamikaandmeid sisaldava muunduri mudeli valimiseks tuleb rippmenüüst avada dünaamikavaade. Seejärel tuleb valida element, millele soovitakse dünaamika mudelit lisada, antud juhul on tegu kahe terminaliga ehk *2-Term DC Line (Two terminal direct current line)* alalisvooluühendusega. Avaneb antud ühenduse dünaamika andmetabel, kus lahtri *Model* ehk mudelid avamisel tekib muundurite dünaamikamudelite nimekiri, mida on näha tabelist 2.3.

Tabel 2.3 PSS/E tarkvaras olevad muunduri dünaamikamudelid [18].

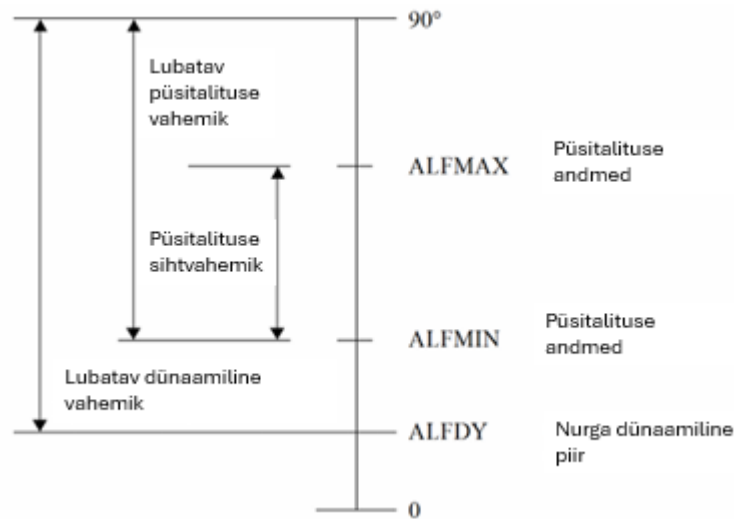
<b>Mudelid</b>
CDC1T
CDC4T
CDC6T
CDC6TA
CDC7T
CDCABT
CEEL2T
CEELRIT
CEELT
CHIGAT
CHVDC2
CMDWAST
CMDW2ST
CMFORDT

PSS/E tarkvaras on võimalik kasutada 14 erinevat muunduri dünaamika mudelit, mis aitavad kirjeldada voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühenduse käitumist nii püsi- kui ka siirdetalitluses. Enamik mudeleid nagu CDEELT, CDCABT, CMD2ST jne [19], antud tabelis kujutavad endast päriselt töötavaid kõrgepinge alalisvooluühendusi, kus igale ühele on vastavalt nende ehitusele loodud eraldi juhtimissüsteem. Teised mudelid, näiteks CDC4T, CDC6T ja CDC7T [18], on üldised mudelid, mida kasutatakse kõrgepinge alalisvoolusüsteemide kujutamiseks ning mis omavad kõiki uuritava süsteemi põhilisi juhtimisomadusi. Järgmisena keskendutakse üldistele mudelitele andes ülevaate nende nüanssidest ja omavahelistest erinevustest.

### **2.4.1 CDC4T mudel**

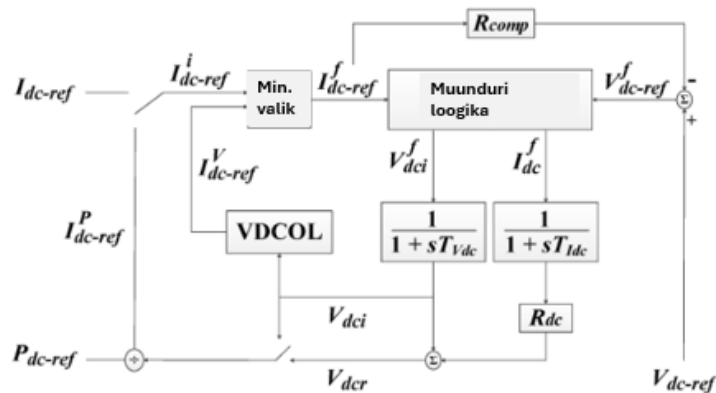
Normaaltalitluses reguleerib CDC4T mudel alaldi ja vaheldi süütenurki kindlate parameetritega piiratud vahemikus vastavalt joonisele 2.6, kust selgub, et siirdetalitluses on võimalik süüte nurga vahemikku algsest maksimaal väärtustest suurendada. Nimiparameetrid nagu võimsus, pinge ja vool on juhitud ning seadistatavad vastavate parameetritega nagu *SETVAL*, *VSCHEDE*, *MDC*. Juhul, kui  $MDC=1$ , on võimsuse ülekanne konstantne. Sellisel juhul reguleeritakse pidevalt mudeli teist voolu seadistamiseks parameetrit *Iset*, mille abil toimub alaldi ja vaheldi vooluvaru parameetri *DELTI* õiges

vahemikus hoidmine. Kui vaheldi süütenuga väärtus langeb dünaamilise miinimum parameetri  $ALFDY$ -ni, väheneb alalisvoolu väärtus samuti alla alaldi voolu seadistusparameetri  $Iset$ , kuid mitte alla vaheldi voolu seadistusparameetri väärtuse. Selletõttu toimub ülekantava võimsuse suuruse langus, isegi, kui mudel on konstantse ülekandmise olekus.



Joonis 2.6 PSS/E CDC4T mudeli süütenurkade tähistused ja seadistamise vahemikud [18].

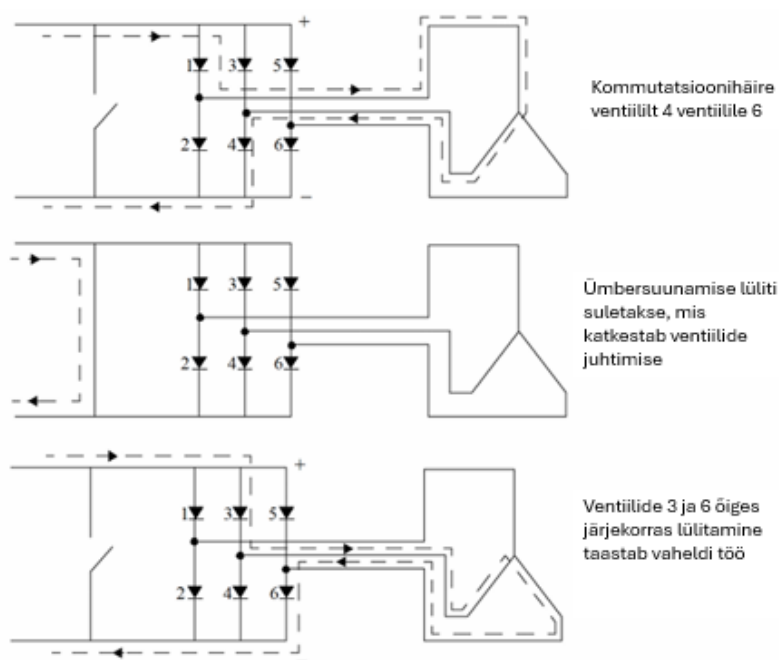
Konstantne võimsuse ülekanne säilitatakse seniks kuni vaheldi lõpus olev pinge väärtus ületab parameetri  $VCMODE$  suurust. Kui mingil põhjusel süsteem väljub konstantse võimsuse ülekande olekust on mudel CDC4T varustatud süsteemi kaitsega, mis ei lase ajavahemikul  $TCMODE$  taaslülitada enne, kui pinge väärtus on taastunud taas  $VCMODE$  väärtuseni. Antud mudeli trafo astmelüliti ei muuda pingeväärtusi siirdeolukorras automaatselt, vaid tuleb vajadusel manuaalselt sätetest muuta. Mudeli juhtimine toimub joonisel 2.7 asuva kontrollskeemi alusel [18].



Joonis 2.7 Muunduri dünaamikamudeli CDC4T juhtskeem [18].

Nii püsi- kui ka siirdetalitluses peab süsteem olema kaitstud erinevate häiringute eest. Siirdetalitluses võib selliseks häiringuks kujuneda lühise mõjul tekkinud kommutatsioonihäire. Kommutatsioonihäire põhjustab voolu ülekandes tõrke, mis on esile kutsutud muundursillas asuvate türistorventiili paaride rikkes. Sellise rikke korral hakkavad türistorventiilid voolu konstantselt juhtima läbi ühefaasilise trafo. Selleks, et selline rike katkestada, on vaja voolu juhtimine lühistatud türistorventiilides peatada kaitsemehhanismi abil, mis on CDC4T mudelile on lisatud. Kaitsemehhanismil on antud häiringute korral kaks peamist käitumismustrit.

Esiteks, kui alaldile antav vahelduvvoolu pinge langeb alla parameetri *VBLOCK* väärtuse blokeeritakse alaldi ja vaheldi töö. Teiseks on võimalik vaheldi ümbersuunamislüliti sulgeda, kui vaheldist muundamise teel tekkinud alalispinge langeb alla parameetri *VBYPASS* väärtuse. Kaitsemehhanismi tööd, millega toimub voolu juhtimise blokeerimine või ümbersuunamine teatud türistorventiilides, illustreerib joonis 2.8. [18]



Joonis 2.8 CDC4T mudeli kaitsemehhanismi tööpõhimõtte türistorventiilide kommutatsioonihäire korral [18].

Alaldis taoline madal alalispinge probleeme ei tekita. Kui ka alaldit toitev vahelduvpinge langeb kriitilise piirini, blokeeritakse vaheldi ajaks *TBLOCK*. Alaldit saab taaskäivitada alles peale pinge taastumist parameetri *VUNBL* väärtuseni ning sellega kaasneb ka vaheldi ümbersuunamislüliti rakendumine. Lüliti töö katkestatakse vähemalt parameetri *TBYPASS*

ajaks ning vaheldi normaaltalitlus taastub, kui alalispinge on saavutanud väärtuse *VUNBY*. Peale blokeeringut mudel taaskäivitatakse ning pinge ja voolu väärtused saavutavad oma esialgsed väärtused [18].

### **2.4.2 CDC6T mudel**

PSS/E CDC6T mudel on mõeldud kavandatavate ja uute kõrgepinge alalisvooluühenduste uurimiseks. CDC6T kasutab samasugust juhtimissüsteemi nagu CDC4T mudel omades samu dünaamikaparameetreid (21 CONs parameetrit). Sellel mudelil on lisaks 21-le CDC4T mudeli parameetrile veel 10 CONs parameetrit, mis on mõeldud kaitsemehhanismi täiustamiseks. Kui CDC4T võimaldab süsteemi kaitseks kasutada blokeerimist ja ümbersuunamist, siis CDC6T mudelil on lisa funktsioon, mis võimaldab antud omadusi kasutada viivitusega, selleks et kontrollida süsteemi võimet taastuda lühisest iseseisvalt ilma kaitsemehhanismi kasutamata [18].

Viivituse aega hakatakse lugema hetkest, kui alaldisse sisenev vahelduvpinge langeb alla parameetri *VDEBLK* väärtuse. Kui aja *TREBLK* möödudes ei ole pinge taastunud, siis suuremate kahjustuste vältimiseks liin blokeeritakse. Liini ei saa uuesti töösse viia enne, kui aja *TREBLK* möödudes ei ole vahelduvpinge alaldis taastunud *VUNBY* väärtuseni. Madala vaheldist väljuva pinge korral saab mudel saata signaali alaldile liini väljalülitamiseks. Sellisel juhul jääb liin väljalülitatud olekusse kuni vaheldi vahelduvpinge väärtus tõuseb taas *VUNBY* väärtuseni, peale *TINBLK* aja möödumist. [18]

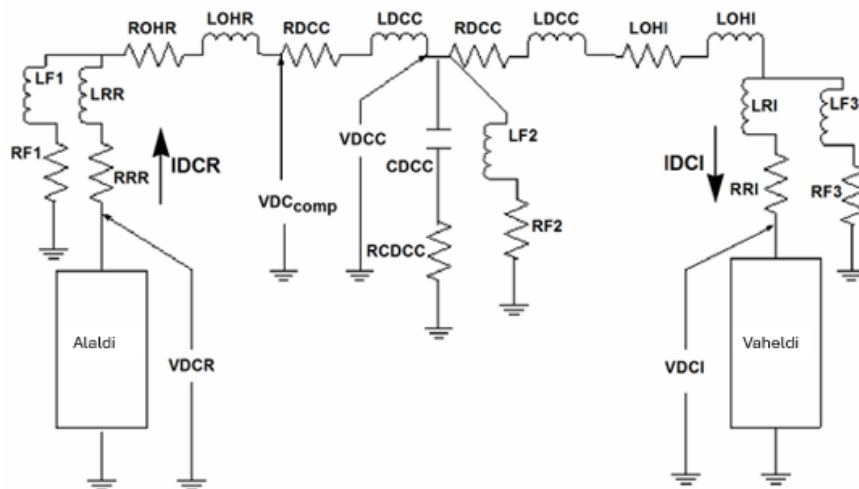
Mudelist CDC6T on olemas laiendatud versioon CDC6TA, millega saab lisaks kõikidele CDC6TA funktsioonidele modelleerida madaltaseme voolu modulatsiooni sisendeid muutes teatud parameetrit. Kui parameetrit VAR(L+23) ei muudeta, käitub CDC6TA identselt CDC6T-le. [18]

### **2.4.3 CDC7T mudeli olemus ja võrdlus teiste mudelitega**

CDC7T mudelit kasutatakse kahe terminaliga kõrgepinge alalisvooluühenduse modelleerimiseks. Kui võrrelda seda ja teisi üldiseid mudeleid nagu CDC4T ja CDC6T, siis erineb CDC7T neist märkimisväärselt juhtimissüsteemi käitumise poolest [18]. CDC4T ja

CDC6T mudelite juhtimisloogika kirjeldus on järgnev: lühise tekkel vahelduvvoolu süsteemides eeldavad need mudelid, et alalisvooluühendus reageerib parameetrite muutustele koheselt ehk muunduripaarid, alaldi ja vaheldi pool, suudavad muuta oma talitlust ning selle parameetreid hetkeliselt. Need dünaamikamudelid kasutavad kõrgepinge alalisvooluühenduse parameetrite arvutamiseks sarnast juhimisloogikat nagu püsitalitluses kasutatav mudel. See tähendab, et need alalisvooluühenduse mudelid ei arvesta muundurite ja liinide sisemise dünaamilise käitumisega. Antud mudelid suudavad kujutada alalisvoolu- ja pingeprofile, ainult osaliselt, vahelduvvooluvõrgus tekkinud lühise korral, sest mudelid on lihtsustatud ja ei arvesta kõrgepinge alalisvooluühenduse dünaamikat häiringute korral [18].

CDC7T mudel suudab simuleerida vahelduvvoolusüsteemi ja muundurite dünaamikat. Mudeli alalisvooluahel ja selle komponendid on näha joonisel 2.9. Alalisvooluühendus võib koosenda ainult õhuliinidest, kaablist või segaühendusest, mille kehtestab mudeli kasutaja. [19]



Joonis 2.9 CDC7T mudeli alalisvooluahel [18].

CDC7T mudeli alalisvooluahel meenutab T- kujulist skeemi, mis koosneb erinevatest takistustest. Õhuliinide olemasolul kujutavad neid aktiiv- ja induktiivtakistuste vastavad alaldi parameetrid  $ROHR$  ja  $LOHR$  ning vaheldi parameetrid  $ROHI$  ja  $LOHI$ . Kaabli olemasolul kujutavad seda aktiiv- ja reaktiivtakistuse ning mahtuvuse vastavad parameetrid  $RDCC$ ,  $LDCC$  ja  $CDCC$ . Lisatud on ka silivate reaktorite takistused nii alaldi poolele ( $RRR$ ,  $LRR$ ) kui ka vaheldi poolele ( $RRI$ ,  $LRI$ ). CDC7T alalisvooluahelasse on lisatud ka kolm LR-ühendust, mis kujutavad endast šunte. Nendega saab simuleerida alalisvoolusüsteemi lühiseid.

Püsitalitluses on nende takistuste väärtused suured, eesmärgiga takistada voolu liikumist. Lühise simuleerimiseks tuleb šuntide takistusi vähendada. Mudelite kirjeldusest tuleb välja, et igal mudelil on omad nüansid ja erinevad parameetrid, millega süsteemi dünaamilises ehk siirdeolukorras juhtida saab.

Mudelite CDC4T, CDC6T ja CDC7T dünaamika simulatsioonides juhtivaid parameetreid ja funktsioone on näha kolmandas lisas (Lisa 3). Lisaks siirdeolukorras kasutatavate funktsioonide erinevusele on iga mudeli seadistamiseks kindlate parameetrite loetelu, mille ülevaade ja erinevused CDC4T, CDC6T ja CDC7T vahel on toodud välja neljandas lisas (Lisa 4).

### **3. MUDELI SIMULATSIOONIDE LÄBIVIIMINE JA TALITLUSE ANALÜÜS**

Eelnevas peatükis kirjeldati püsitalitluse mudeli loomist ning erinevate muunduri dünaamikamudelite olemust. Nende dünaamiliste elementide lisamine püsitalitluse mudelisse võimaldab süsteemis lisaks püsitalitlusele kujutada ka siirdetalitlust ning hinnata süsteemi ja kõrgepinge alalisvooluühenduse talitusparameetrite muutusi ajas.

Käesolevas peatükis keskendutakse ekvivalentse Estlink 2 mudeli käitumise analüüsile dünaamilistes tingimustes. Simulatsioonide läbiviimiseks integreeritakse Estlink 2 ekvivalentne mudel kolme erineva muunduri dünaamikamudeliga, milleks on CDC4T, CDC6T ja CDC7T, ning iga stsenaarium teostatakse eraldi kõigi kolme mudeli puhul. Selline lähenemine võimaldab võrrelda mudelite talitluse erinevusi ning uurida mõju tervele süsteemile. Stsenaariumiteks on kaks erinevat siirdeolukorda, mis kujutavad endast kindlat tüüpi lühist ja on loodud süsteemi tasakaalust välja viimiseks.

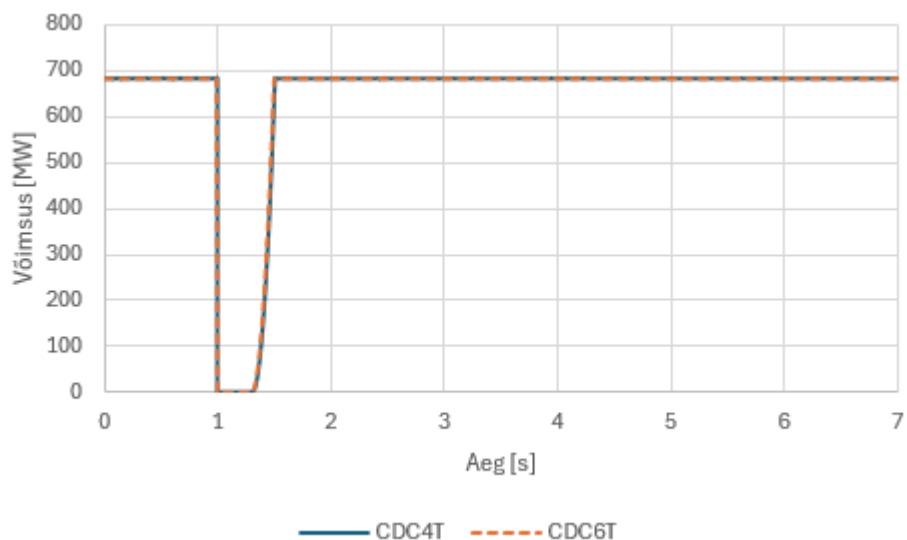
#### **3.1 Esimene stsenaarium**

Esimene stsenaarium põhineb Eesti poolse Püssi alajaama lattidele rakendatavale lühisele, mille käigus asetatakse sinna minimaalse takistusega element. Antud stsenaarium jaguneb kaheks osaks:

- a) Ideaalse lühise rakendamine
- b) Suurendatud takistusega lühise rakendamine

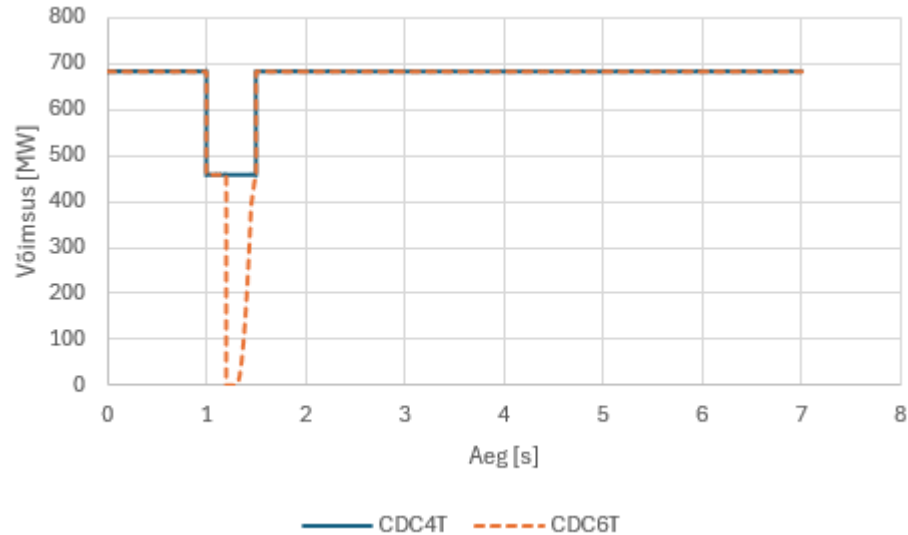
PSS/E tarkvaras peetakse ideaalset lühist takistusega  $X = -2e+09 \Omega$ , mis on nullile ligilähedane - ehk tekkiv lühisvool on maksimaalse väärtusega. Selle eesmärgiks on viia mudel äärmuslike tingimusteni ja kontrollida, kuidas mudeli parameetrid ning mudel ise sellises siirdeolukorras käitub. Jooniselt 3.1 on näha, et lühis rakendati simulatsiooni esimesel sekundil, peale mida mõlemad muunduri dünaamikamudelid CDC4T (sinine joon) ja CDC6T (oranž joon) blokeerisid võimsuse ülekande hetkeliselt. Kuigi CDC4T ja CDC6T vahel on oluline erinevus, mis seisneb kõrgepinge alalisvooluühenduse blokeerimise

viivituses, ei ole seda antud jooniselt näha ja seda lühise tugevuse tõttu. Kui CDC4T blokeerib võimsuse ülekande kohe, siis CDC6T on võimeline blokeeringut viivitama, et veenduda selles, et mudel ei ole suuteline iseseisvalt ülekannet ja pinget taastama. Kuna süsteemi pinge kukub piisvalt palju lühise tugevuse tõttu, käituvad mõlemad mudelid identselt ning blokeerivad võimsuse ülekande lühise tekkel ja taastavad selle alles lühise kadumisel peale 0,3 sekundit.



Joonis 3.1 Esimese stsenaariumi võimsuse ülekande muutus vastavalt ideaalsele lühisele

Selleks, et simuleerida esimese stsenaariumi teises osas mudelite CDC4T ja CDC6T käitumise erinevusi lühise korral, tuli lühise tugevust oluliselt vähendada, seda läbi lühise takistuse suurendamise. Rikkekoha takistuse tõstmine vähendab ka lühisvoolu suurust. Antud katsel rakendati lühist, mille rikkekoha takistuseks kujunes  $X = 15 \Omega$  ja lühise pikkuseks 0,5 sekundit. Vaadates joonist 3.2 on näha, et lühis rakendub süsteemile peale simulatsiooni esimest sekundit ning mudelite CDC4T ja CDC6T reageerimine lühisele on täiesti erinev. Kuna süsteemipinge ei lange alla blokeeringuks vajaliku pinge väärtuse, vähendab CDC4T (sinine joon) muunduri dünaamikamudel võimsuse ülekannet ligikaudu 200 MW võrra ning taastab püsitalituse peale lühise lõppu. CDC6T (oranž joon) seevastu vähendab algselt võimsust sama palju nagu mudel CDC4T, kuid peale lühikese ajavahemiku möödumist blokeerib CDC6T võimsuse ülekande kuniks pinge täieliku taastumiseni lühise lõppemisel. Selline käitumine kirjeldab CDC6T blokeerimise viivitamise funktsiooni, kus mudel peale lühikese aja möödumist, pinge mitte taastumisel, blokeerib võimsuse ülekande täielikult. Seega jätkab CDC4T võimsuse edastamist ka lühise toimet, mis võib olla süsteemile ohtlik, sest rikke mõju ei pruugi olla piiratud, seevastu CDC6T blokeerib süsteemi täielikult, kaitstes seda lühise eest.



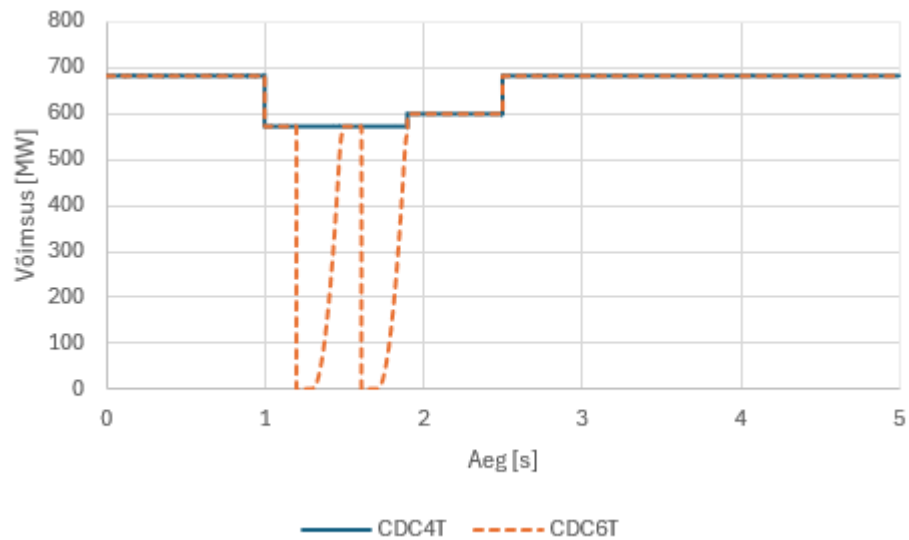
Joonis 3.2 Esimese stsenaariumi võimsuse ülekande muutus vastavalt suurendatud takistusega lühisele

### 3.2 Teine stsenaarium

Teine stsenaarium põhineb lühisele, milleks on türistoride muundamise tööks vajalike põikkondensaatorite sisse-ja väljalülitamine. Antud katse simuleerib olukorda, kus põikkondensaatorid lähevad mingil põhjusel tööst välja ning süsteem üritab end ilma püsitalituseks vajaliku reaktiivvõimsuseta tasakaalustada.

Teise simulatsiooni kestuseks on 5 sekundit. Peale esimest sekundit lülitatakse mudelitest CDC4T ja CDC6T välja Eesti poolse Püssi muundurjaama kolm põikkondensaatorit. 0,9 sekundi möödumisel lülitatakse taas sisse kaks kolmest välja lülitatud põikkondensaatorist ning simulatsiooni 2,5-ndal sekundil taastatakse süsteemi püsitalitus, lülitades sisse viimane tööst välja viidud põikreaktor. Jooniselt 3.3 on näha, et CDC4T muunduri dünaamika mudel vähendab ülekantava võimsuse mahtu ligikaudu 100 MW ning seejärel, samm-sammu haaval türistoride taas sisselülitamisel, taastab kogu võimsuse ülekande. CDC6T mudel seevastu vähendab algselt ülekantavat võimsust samas mahu, kuid lühikese aja vältel blokeerib võimsuse ülekande. Peale 0,2 sekundi möödumist üritab ta ülekantava võimsuse mahtu taastada, kuid kuna süsteemi pinge on liiga madal toimub taas blokeerimine ning võimsuse ülekande taastub samuti põikkondensaatorite järk-järgulisel

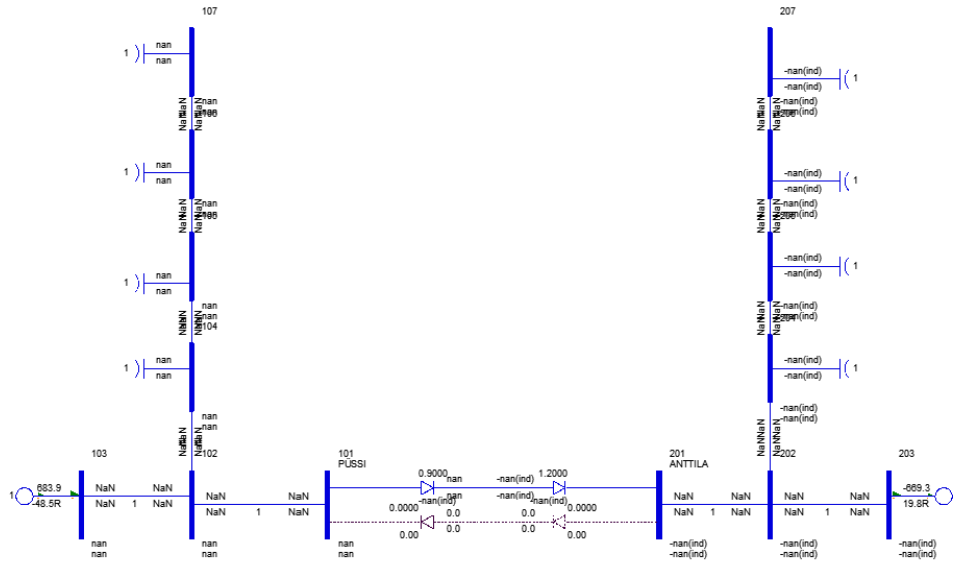
sisselülitamisel. Selline olukord näitab, et CDC6T kaitsefunktsioonid on palju tõhusamad kui CDC4T omad.



Joonis 3.3 Teise stsenaariumi võimsuse ülekande muutus vastavalt põikreaktorite välja- ja sisselülitamisele

### 3.1 Katsed CDC7T-ga

Kuigi dünaamikamudelid CDC4T ja CDC6T töötasid ootuspäraselt, osutus analüüsi teostamine CDC7T mudeliga problemaatiliseks, mis väljendus dünaamika simulatsiooni käivitamisel. Jooniselt 3.4 on näha, et peale simulatsiooni käivitust ei toimu süsteemis võimsuse ülekannet ning elementide suurused on *Nan* ehk pole numbrilisi (*Not a Number*) väärtusi. Jooniselt 3.4 on näha, et peale simulatsiooni käivitust ei toimu süsteemis võimsuse ülekannet ning elementide suurused on *Nan* ehk pole numbrilisi (*Not a Number*) väärtusi. See viitab sellele, et CDC7T muunduri dünaamikamudel ei suutnud korrektselt välja arvutada parameetrite muutust - ei toimunud arvutuse matemaatilist koondumist. Ilmselt on see tingitud puudulikest dünaamikaandmetest, sest võrreldes CDC7T mudelil CDC4T-ja CDC6T-ga, on antud mudelil 40 parameetrit rohkem, millest kõik ei olnud autorile kättesaadavad.



Joonis 3.4 Estlink 2 dünaamika mudeli olek peale ebaõnnestunud katset CDC7T-ga

Kuna mudel ei andnud usaldusväärseid tulemusi otsustati see stsenaariumite lõplikust analüüsist välja jätta ning autori soovitus on keskenduda õigete juhtparameetrite leidmisele, milleks on CDC7T CON (J+22) kuni (J+44), mis on leitavad neljandast lisast (Lisa 4). Antud parameetrid parandavad juhtimissüsteemi tööd, mis peaks tagama mudeli töötamise nii püsi- kui ka siirdetalituses.

## KOKKUVÕTE

Antud lõputöö eesmärgiks oli koostada ekvivalente Estlink 2 dünaamikamudel PSS/E tarkvaras, mis hiljem lisatakse mahukamasse ekvivalentssesse Balti elektrisüsteemi mudelisse. Lisaks oli eesmärk mõista voolumuunduri tüüpi alalisvooluühenduse süsteemi talitlust ning analüüsida, kuidas käitub mudel ja tema parameetrid nii püsi- kui ka siirdetalitluses.

Esimeses osas anti ülevaade kahest peamisest kõrgepinge alalisvooluühenduste süsteemist. Kirjeldati nende olemust, toodi välja erinevused ning põhilised kasutuselevõtu kriteeriumid. Seejärel võeti põhjalikuma käsitluse alla voolumuunduri tüüpi alalisvooluühendus. Kirjeldati eeliseid kõrgepinge vahelduvvooluühenduste ees ning toodi välja peamised süsteemi topoloogiad ja nende põhilised komponendid. Komponentide seas käsitleti sügavamalt türistore ja türistorsildu, mis on peamiseks komponendiks elektrienergia muundamisel.

Järgmisena kirjeldati Estlink 2 olemust, põhilist eesmärki, ehituse protsessi ning põhi parameetreid, mille alusel hakati looma püsitalitluse mudelit PSS/E tarkvaras. Mudelile lisati kõik peamised komponendid, milleks olid sõlmed ja nende vahelised ühendused, generaatorid, põikondensaatorid ning Estlink 2 kaablit muundurjaamu kujutav element. Selleks, et antud mudeliga oleks võimalik lisaks püsitalitlusele analüüsida ka siirdetalitlust, tuli sellele lisada muunduri dünaamikamudel. PSS/E tarkvara sisaldab kolme põhilist üldist mudelit, CDC4T, CDC6T ja CDC7T, millega on võimalik hinnata voolumuunduri tüüpi kõrgepinge alalisvooluühendus käitumist dünaamilistes tingimustes.

Mudeli käitumise hindamiseks loodi kaks stsenaariumit, millest esimene käsitles süsteemi reageerimist lühisele, mis on paigutatud otse mudeli latile ning teine hõlmas põikondensaatorite sisse- ja väljalülitamist. Tulemused näitasid, et CDC4T ja CDC6T mudelite vahel on oluline erinevus, mis väljendub süsteemi blokeeringu rakendumises lühise korral. Kui CDC4T jätkab võimsuse ülekannet väiksemas mahus lühise korral, mis põhjustab pingelangu süsteemis, siis CDC6T ootab hetke süsteemi taastumiseks, misjärel lülitab ta selle välja, et vältida suuremaid kahjustusi. Tuginedes antud katsete tulemusele soovitab autor tulevastes katetes ja mudeli loomistes kasutada CDC6T mudelit ja mitte CDC4T-d. Lisaks laiemale funktsionaalsusele, mis hõlmab paremaid kaitsefunktsioone, on CDC6T mudel uuem ja arenenum, kui CDC4T mudel. Katsed CDC7T-ga ebaõnnestusid

puudulike juhtparameetrite tõttu, millest lähtuvalt jäeti see stsenaariumite lõplikust analüüsist välja.

Järgmisena soovitab autor keskenduda just CDC7T juhtparameetrite otsingutele, mis peaksid tagama süsteemi töö nii püsi- kui ka dünaamikatingimustes. Lisaks sellele, tuleb olemasolev Estlink 2 mudel lisada koostatavasse Baltikumi mudelisse ning jälgida mõlema mudeli käitumist erinevatel juhtudel. Tulevikusuunana võiks kaaluda ka spetsiaalselt Estlink 2 ühendusele loodud muunduri dünaamikamudeli väljaarendamist. Selline lähenemine võimaldaks teostada detailsemat talituseanalüüsi ning hinnata ühenduse mõju elektrivõrgu parameetritele.

## SUMMARY

The aim of this thesis was to build an equivalent dynamic model of Estlink 2 in PSS/E software, which will later be incorporated into a more comprehensive equivalent Baltic power system model. In addition, the aim was to understand the operation of the HVDC link system and to analyze how the model and its parameters behave in both steady-state and transient conditions.

In the first part, an overview of the two main types of HVDC systems was given. Their nature was described, and the differences and the main deployment criteria were highlighted. The advantages of HVDC line commutated converter system over HVAC system, the main system topologies, the main components were then discussed in more detail. Among the components, thyristors and Graetz bridge, which are the main components in power conversion, were discussed in depth.

Next, the nature of Estlink2 was described, the basic purpose, the construction process, and the main parameters on the basis of which the steady-state model was created in PSS/E software. All the main components were added to the model, namely the busbars and their interconnections, the generators, shunt capacitors and the element representing the Estlink 2 cable and the converter stations. In order to be able to analyze not only steady-state but also the transient conditions, a dynamics model of the converter had to be added to the model. The PSS/E software includes three basic generic models, CDC4T, CDC6T and CDC7T, which allow the assessment of the behavior of the HVDC line commutated converter Under dynamic conditions.

Two scenarios were created to evaluate the behavior of the model, the first one dealing with the system response to a short circuit placed directly on the model busbar and the second one dealing with the switching on and off of the shunt capacitors. The results showed that there is a significant difference between CDC4T and CDC6T models in terms of the application of the system blocking in the event of a short circuit. While the CDC4T continues to transfer power at a lower level in the event of a short circuit that causes a voltage drop in the system, the CDC6T waits for a moment for the system to recover, after which it shuts it down to avoid major damage. Based on the results of these experiments, the author recommends the use of the CDC6T model rather than the CDC4T in future experiments and model creations. In addition to its broader functionality, which includes

better protective functions, the CDC6T model is newer and more advanced than the CDC4T model. Tests with the CDC7T failed due to insufficient control parameters, and it was therefore excluded from the final analysis of the scenarios.

Next, the author recommends focusing on the search for CDC7T parameters, which should guarantee the system's performance under both steady-state and dynamic conditions. In addition, the existing Estlink 2 model should be included in the Baltic model to be developed, and the behavior of both models should be observed in different cases. As a future direction, the development of a converter dynamics model specifically designed for the Estlink 2 connection could also be considered. Such an approach would allow a more detailed performance analysis and an assessment of the impact of the connection on the grid parameters.

## KASUTATUD ALLIKAD

- [1] D. Jovcic, High Voltage Direct Current Transmission: Converters, Systems and DC Grids, 2nd ed, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2019.
- [2] K. O. Papailiou, Springer Handbook of Power Systems, Springer, 2021.
- [3] K. R. Padiyar, HVDC Power Transmission Systems, New Academic Science, 2017.
- [4] O. E. Oni, I. E. Davidson ja K. N. Mbangula, „A review of LCC-HVDC and VSC-HVDC technologies and applications,” 2016. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7555677>. [Kasutatud 07. Aprill 2025].
- [5] IEC, „Alalisvooluülekanne- Sõnastik (EVS-EN IEC 60633:2020),” 2020.
- [6] C.-K. Kim, G.-S. Jang, S.-J. Lee, S.-J. Lim ja V. K. Sood, HVDC Transmission: Power Conversion Applications in Power Systems, Wiley-IEEE Press, 2009.
- [7] M. Eremia, C.-C. Liu ja A.-A. Ederis, Advanced Solutions in Power Systems: HVDC, FACTS, and Artificial Intelligence, Wiley-IEEE Press, 2016.
- [8] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [9] Z. Xu, J. Cao, H. Wang, M. Hao, G. Chen ja A. Vaughan, „Review of high voltage direct current cables,” *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2015.
- [10] T. W. May, Y. M. Yeap ja A. Ukil, „Comparative evaluation of power loss in HVAC and HVDC transmission systems,” %1 *Proceedings of the 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON)*, Singapore, 2016.
- [11] J. Arrillaga, High Voltage Direct Current Transmission (2nd Edition), Institution of Engineering and Technology, 2008.
- [12] Elering, Elektrituru käsiraamat, Tallinn, 2022.
- [13] European Investment Bank, „Estonia/Finland: EIB supports Estlink 2 cable linking Baltic States to Nordic power grid,” European Investment Bank, 12. Aprill 2010. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.eib.org/en/press/all/2010-204-eib-supports-estlink-2-cable-linking-baltic-states-to-nordic-power-grid>. [Kasutatud 19. Märts 2025].
- [14] Fingrid, „EstLink 2 – second high-voltage direct current link between Finland and Estonia,” Fingrid, [Võrgumaterjal]. Saadaval:

<https://www.fingrid.fi/en/grid/construction/arkisto/estlink-2/>. [Kasutatud 19. Märts 2025].

- [15] Elering, „Estlink 2,“ 2025. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.elering.ee/estlink-2>. [Kasutatud 22. Aprill 2025].
- [16] J. Sandenkova, Estlink 1 ühenduse kasutuse analüüs, Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool, 2014.
- [17] Siemens Industry, Program Operation Manual PSS/E 36.0.0, 2023.
- [18] Siemens Industry, Program Application Guide Volume 2 PSS/E 36.0.0, 2023.
- [19] D. Kwon ja Y. Kim, „Analyses and Comparisons of Generic and User Writing Models of HVDC System Considering Transient DC Current and Voltages,“ *Energies* 2021, kd. 14, nr 23, p. 7897, 2021.
- [20] Siemens Industry, Model Library PSS/E 36.0.0, 2023.
- [21] J. Kilter, Alalisvooluühenduse dünaamikamudeli andmed.

**LISAD**

## Lisa 1 PSS/E tarkvara erinevad funktsioonid

Tabel 1. PSS/E tarkvaras sisalduvad funktsioonid

<i>OPF (Optimal Power Flow)</i> ehk optimaalse võimsuse ülekande arvutused
<i>Fault Analysis</i> ehk vigade analüüs
<i>Dynamic Simulation</i> ehk dünaamilised simulatsioonid
<i>Dynamic Model Library Source</i> ehk dünaamikamudelite kataloogi allikas
<i>TMLC (Transmission Line Constant Calculation)</i> and <i>LINEPROP (Line Properties)</i> ehk ülekandeliinde konstantne arvutus ja liinide sätted
<i>LSYSAN (Linear System Dynamic Analysis)</i> ehk lineaarse süsteemi dünaamika analüüs
<i>WECC (Western Electricity Coordinating Council) Data Conversion Programs</i> ehk WECCi andmete ümberteisendamise tarkvara
<i>GMB (Graphic Model Builder)</i> ehk graafilise mudeli ehitamise funktsioon
<i>NEVA Eigenvalue Analysis</i> ehk omaväärtuse analüüs

## Lisa 2 Voolumuunduri tüüpi alalisvooluühenduse andmed PSS/E tarkvaras

Tabel 2. Voolumuunduri tüüpi alalisvooluühenduse andmed PSS/E tarkvaras

Andmete tüüp	Parameeter	Väärtus
Liin	Liini nimetus	ESTFIN_EL2
Liin	Juhtimisrežiim	Võimsus/blokeeritud (vastavalt vajadusele)
Liin	Edastatav võimsus (MW)	680
Liin	Kaabli DC pingeline (kV)	450
Liin	Kaabli taktistus ( $\Omega$ )	2,8
Alaldi	Sõlme number	101
Alaldi	Primaarpinge (kV)	355
Alaldi	12-pulsilise muundursildade arv seadmes	1
Alaldi	Maksimaalne süütenurk ( $^{\circ}$ )	18
Alaldi	Minimaalne süütenurk ( $^{\circ}$ )	12,5
Alaldi	Trafo sekundaarmähise kommutatsiooni aktiivtakistus ( $\Omega$ )	0,8
Alaldi	Trafo sekundaarmähise kommutatsiooni reaktiivtakistus ( $\Omega$ )	22,98
Alaldi	Ülekandesuhe (s.ü)	0,9073
Alaldi	Trafo ülekandesuhe (s.ü)	1
Alaldi	Trafo astmelüliti samm (s.ü)	0,0125
Alaldi	Maksimaalne astmelülitiga muudetav vahemik (s.ü)	1,2
Alaldi	Minimaalne astmelülitiga muudetav vahemik (s.ü)	0,9
Vaheldi	Sõlme number	201
Vaheldi	Primaarpinge (kV)	410
Vaheldi	12-pulsilise muundursildade arv seadmes	1
Vaheldi	Maksimaalne süütenurk ( $^{\circ}$ )	22
Vaheldi	Minimaalne süütenurk ( $^{\circ}$ )	18
Vaheldi	Trafo sekundaarmähise kommutatsiooni aktiivtakistus ( $\Omega$ )	0,8
Vaheldi	Trafo sekundaarmähise kommutatsiooni reaktiivtakistus ( $\Omega$ )	22,98
Vaheldi	Ülekandesuhe (s.ü)	1,072
Vaheldi	Trafo ülekandesuhe (s.ü)	1,0125
Vaheldi	Trafo astmelüliti samm (s.ü)	0,0125
Vaheldi	Maksimaalne astmelülitiga muudetav vahemik (s.ü)	1,2286
Vaheldi	Minimaalne astmelülitiga muudetav vahemik (s.ü)	0,9238

### Lisa 3 CDC4T, CDC6T ja CDC7T mudelite funktsioonid siirdetalitluse juhtimiseks

Tabel 3. CDC4T, CDC6T ja CDC7T mudelite funktsioonid siirdetalitluse juhtimiseks

<b>Funktsioon</b>	<b>CDC4T</b>	<b>CDC6T</b>	<b>CDC7T</b>
Alalisvoolu muutus ajas	X	X	X
Alalispinge muutus ajas	X	X	X
VDCOL- funktsioon	X	X	X
Blokeerimise ja ümbersuunamise funktsioonid	X	X	
Blokeerimise ja ümbersuunamise funktsioonide ajaline viivitus		X	
Minimaalne süütenurk ja kustutusnurk	X	X	X
Maksimaalne süütenurk ja kustutusnurk			X
Alalisvoolu ühenduse lühise simuleerimine			X

#### Lisa 4 Muunduri dünaamikamudelite CDC4T, CDC6T ja CDC7T parameetrid

Tabel 4. Muunduri dünaamikamudelite CDC4T, CDC6T ja CDC7T parameetrid

<b>Muutuja</b>	<b>CDC7T</b>	<b>CDC6T</b>	<b>CDC4T</b>
CONs (J)	Ts_VDC	ALFDY	ALFDY
CONs (J+1)	Ts_idc	GAMDY	GAMDY
CONs (J+2)	LRR	TVDC	TVDC
CONs (J+3)	RRR	TIDC	TIDC
CONs (J+4)	LRI	VBLOCK	VBLOCK
CONs (J+5)	RRI	VUNBL	VUNBL
CONs (J+6)	LOHR	TBLOCK	TBLOCK
CONs (J+7)	ROHR	VBYPAS	VBYPAS
CONs (J+8)	LOHI	VUNBY	VUNBY
CONs (J+9)	ROHI	TBYPAS	TBYPAS
CONs (J+10)	LDCC	RSVOLT	RSVOLT
CONs (J+11)	RDCC	RSCUR	RSCUR
CONs (J+12)	CDCC	VRAMP	VRAMP
CONs (J+13)	LF1	CRAMP	CRAMP
CONs (J+14)	RF1	C0	C0
CONs (J+15)	LF2	V1	V1
CONs (J+16)	RF2	C1	C1
CONs (J+17)	LF3	V2	V2
CONs (J+18)	RF3	C2	C2
CONs (J+19)	RCDCC	V3	V3
CONs (J+20)	IDCRated	C3	C3
CONs (J+21)	VDCRated	TCMODE	TCMODE
CONs (J+22)	VDCompR_Tdown	VDEBLK	
CONs (J+23)	VDCompR_Tup	TDEBLK	
CONs (J+24)	VDCompI_Tdown	TREBLK	
CONs (J+25)	VDCompI_Tup	VINBLK	
CONs (J+26)	IMargR	TCOMB	
CONs (J+27)	IMargI	VACBYP	

CONs (J+28)	VMargR	TDEBYP	
CONs (J+29)	VMargI	TINBLK	
CONs (J+30)	GMargR	TINBYP	
CONs (J+31)	GMargI	TVRDC	
CONs (J+32)	IDCERR_toV_GAIN_R		
CONs (J+33)	IDCERR_toV_GAIN_I		
CONs (J+34)	IDCERR_toG_GAIN_I		
CONs (J+35)	VDCComp_MEAS_GR		
CONs (J+36)	VDCComp_MEAS_GI		
CONs (J+37)	VDCComp_MEAS_TR		
CONs (J+38)	VDCComp_MEAS_TR		
CONs (J+39)	DSEL_KBR		
CONs (J+40)	DSEL_KBI		
CONs (J+41)	GPGR		
CONs (J+42)	TIGR		
CONs (J+43)	GPGI		
CONs (J+44)	TIGI		
CONs (J+45)	MAXALR		
CONs (J+46)	MINALR		
CONs (J+47)	MAXALI		
CONs (J+48)	MINALI		
CONs (J+49)	GAMA_ORDER1		
CONs (J+50)	GAMA_ORDER2		
CONs (J+51)	GAMDY		
CONs (J+52)	BLOCK_RATE		
CONs (J+53)	UNBLOCK_RATE		
CONs (J+54)	TVDCP		
CONs (J+55 kuni J+64)	Alaldi VDCL-i 5 koordinaatide paari		
CONs (J+65 kuni J+74)	Alaldi VDCL-i 5 koordinaatide paari		