



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

# **Kaabelvõrgud ja nende mõjud ülekandevõrgu talitlusele**

Uurimustöö Lep15070 lõpparuanne

Tallinn 2015

Uurimistöö täitjad:

Ivo Palu	professor, tellimustöö vastutav täitja, TTÜ elektroenergeetika instituut
Triin Kangro	nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Tanel Sarnet	nooremteadur, TTÜ elektroenergeetika instituut
Jako Kilter	PhD, elektrisüsteemi ekspert, R&D projekti juht, Elering AS
Andrus Reinson	releekaitse ja automaatika talitluse juhataja, Elering AS
Rain Maripuu	elektrisüsteemi spetsialist, Elering AS

## SISUKORD

Sissejuhatus .....	4
1. Kaabelvõrkude eripärad .....	8
1.1. Ülevaade kaabelliinidega seotud uurimistööst .....	8
1.2. Kaabelliinide ja õhuliinide vaheline erinevus süsteemis.....	10
1.3. Reaktorid kaabelvõrkudes .....	13
1.4. Sagedusspekter .....	14
2. Siirdeprotsessid kaabelliinides .....	15
2.1. Liinide lülitamised.....	17
2.2. Elektrisüsteemi saarestumine .....	19
2.3. Tühjakslaadumine .....	20
2.4. Koormuse vähenemine .....	21
2.5. Mahtvusliku iseloomuga vool .....	21
2.6. Voolu nullpunkti puudumine .....	22
3. Kaabelliinide modelleerimispõhimõtted .....	24
3.1. Kaabli ehitus ja elektrilised parameetrid .....	24
3.2. Kaabli mudeli sisendparameetrid <i>PSCAD</i> tarkvaras .....	30
3.3. Modelleerimismudelid .....	33
4. Kaabelliinide paigalduslikud tegurid ja komponendid.....	36
4.1. Ekraani voolud ja ekraanide elektriline sidumine .....	36
4.2. Ekraanide ühendusmeetodi määramine .....	41
4.3. Kaabelliini saatemaandus .....	43
4.4. Visangu pikkus .....	44
4.5. Abikomponendid .....	45
5. Kaabelvõrgu modelleerimine .....	46
5.1. Modelleeritava elektrisüsteemi osa määramine .....	46
5.2. Modelleeritava elektrivõrgu iseloomustus .....	48
5.3. Olemasolevate kaabelliinide andmed.....	52
5.4. Tallinna elektrivõrgu mudeli koostamine .....	62
6. Tallinna kaabelliinide analüüs.....	69
6.1. Ekraani ühendusmeetodi mõju .....	70
6.2. Visangu pikkuse mõju .....	92
6.3. Saatemaanduse mõju .....	98
6.4. Maandusjuhi paigaldamisega liini keskele.....	108
7. Kokkuvõtte ja edasised tegevused.....	116
Kirjandus .....	121

## Sissejuhatus

Ülekandevõrkudesse kaabelliinide paigaldamine on ülemaailmselt aktuaalne ning üha enam kasvav trend. Ühest küljest on see tingitud olemasolevate õhuliinide amortiseerumisega ning neile alternatiivse lahenduse leidmisega tiheasustusega piirkondades, risustamata sealjuures loodusruumi ning arvestades teiste kommunikatsioonidega. Teisest küljest, pidades silmas elektrisüsteemi seisukohta, on kaabelliinide näol tegemist liinirikkeid vähendava teguriga. Uute ülekandeliinide ehitamist soodustab toimiv elektriturg, mis loob vajaduse suurte võimsuste edastamiseks riigiülestel energiavahetustel, tagades sealjuures olulise tähtsusega kõrge töökindluse. Kaabelliinide ehitamine võib sellistel puhkudel olla tihtipeale ainsaks lahenduseks, näiteks liinitrassil esinevate takistuste tõttu (veekogud). Mainimata ei saa jätta ka tänast julgeolekuolukorda, mistõttu on tarvis kriitiliselt hinnata ülekandesüsteemide töökindlust ja nende valmistamist ka keerulistes olukordades. Kaabelliinide puhul on tegemist vähem haavatavate ühendustega, kui seda on õhuliinid. Lisas eelnevale, soodustavad kaabelliinide rajamist ka kliimapolitikast hoo sisse saanud tuuleelektrijaamade võrku ühendamisest. Merepealsete tuuleelektrijaamade ühendamine ülejäänud elektrisüsteemiga saab võimalikuks ainult tänu kaabelliinidele. Seega kaalukaid põhjuseid kaabelliinide paigaldamiseks on mitmeid.

On selge, et lähitulevikus kõrgepinge kaabelliinide osakaal elektrisüsteemides kasvab, olgu nendeks siis AC või DC liinid. Asendatakse olemasolevaid liine ning rajatakse uusi, mistõttu ülekandesüsteemid muutuvad kiiresti ning koosnevad paljudest erinevate parameetrite ja iseloomulike omadustega komponentidest. Ülekandesüsteemis leiavad pidevalt aset dünaamilised protsessid, näiteks erinevad lülitustoimingud aga ka loodusjõududest tingitud nähtused. Süsteemi kuuluvad komponendid reageerivad muutustele erinevalt. Hoolimata esialgselt olukorralt uuele süsteemi püsiseisundile ülemineku lühiajalisest kestvusest, võivad süsteemi muutustega kaasneda järsud ning kõrged voolu ja pinged väärtused. Viimased ohustavad elektrisüsteemi komponente ja seadmeid ning võivad nende talitluse tasakaalust välja viia. Iga ülekandesüsteem on omanäoline ning siirdeolukordades süsteemi käitumise iseloomustamine tuginedes üldistele järeldustele on riskantne. Ülekandevõrgu planeerimiseks ja süsteemi töökindluse tõstmiseks on oluline omada informatsiooni süsteemi käitumisest nii püsitalitluses, kui ka siirdeprotsessides. Vastava informatsiooni hankimine saab võimalikuks ülekandevõrgumudeli koostamise ja talitlusolukordade modelleerimise tulemusena.

Käesolev uurimistöö on TTÜ elektroenergeetika instituudi ja Elering AS vaheline teadus- ja arendustegevuse alane koostöö, mille eesmärgiks on teaduslikult käsitleda kaabelvõrke ja

uurida nende mõju ülekandevõrgu talitlusele. Eesti elektrisüsteemihalduri Elering AS perspektiivsetest plaanidest tulenevalt, kus linnasisesed õhuliinid asendatakse maakaablitega, on vajadus hankida informatsiooni kaabelvõrkude talitluslikest eripäradest ja nendega kaasnevatest võimalikest mõjudest Eesti elektrisüsteemi seisukohast. Kaabelvõrgud ning nende koostalitlus õhuliinide ja teiste elektrivõrgu elementidega on täna vähe uuritud valdkond, kus lai praktika veel puudub. Käesolev uurimistöö keskendub seega kaabelvõrgu omapärasest tuleneva ülekandevõrgu talitlusele avalduva mõju analüüsimisele.

Uurimistöö üheks peamiseks suunaks on kaabelliinide modelleerimispõhimõtete väljaselgitamine ja Tallinna ülekandevõrgule vastava mudeli koostamine. Kaabelliinide modelleerimine on kordades keerukam, kui õhuliinide modelleerimine. Kaabelliinid on oma ehituselt mitmekihilised ja nende paigalduslikust eripärasest tulenevalt, kus kaabelliin jaotatakse ekraanikihtide ühendamiseks mitmeteks sektsioonideks, on modelleerimismudel detailide rohke. Mudelisse kaasatud kaabelliinide arv ja nende ekraanide ristühenduse teostamiseks määratud sektsioonide hulk on kaks peamist tegurit, mis piiravad simulatsiooni efektiivsust. Mudeli detailsus määrab modelleerimisprotsessi arvutussammu, mis kaabelliinide modelleerimisel on väike. Isegi piisava võimsusega riistvara olemasolul, on simulatsiooniprotsessi läbiviimine võrdlemisi ajamahukas.

Lisaks modelleerimispõhimõtetele on uurimistöös käsitletud kaabelliinidega seotud siirdeprotsesse, mille analüüsimine elektrivõrgu seisukohast on oluline. Kaabelliinide paigaldamine avaldab mõju elektrienergia kvaliteedile. Võrreldes õhuliinidega on kaabelliinidel märgatavalt suurem mahtuvus, millest tulenevalt võib osutuda vajalikuks ka reaktiivvõimsuse kompenseerimine. Lülitustoimingutega kaasnevad kaabelliinides siirdeliigpinged, mis sõltuvalt elektrivõrgu konfiguratsioonist võivad liini ühenduspunktidest laine peegeldumise ja murdumise tagajärjel võimendada. Kaabelvõrgus on suurem vajadus resonantsnähtuste hindamiseks sagedusspektri madalamatel astmetel ja siirdeprotsesside poolt genereeritud pinge lainekuju komponentide vaatlemine.

Uurimistöö esimene peatükk koondab enda alla kaabelvõrkude peamised eripärad. Peatükis rõhutatakse kaabelliinide erinevust võrreldes tavapäraselt tuntud õhuliinidega. Välja on toodud kahe liinitüübi peamised erinevused, pidades silmas just siirdeprotsesside analüüsimist. Esimene peatükk annab ühtlasi ka lugejale ülevaate, miks on kaabelliinide paigaldamisel vaja tih-tipeale paigaldada ka reaktoreid ning mida sealjuures silmas tuleks pidada. Lisaks käsitletakse kaabelliinide resonantsageduse väärtust ning selgitatakse kuidas on sageduse väärtus sõltuv kaabelliini konfiguratsioonist.

Uurimistöö teine peatükk keskendub siirdeprotsessidele, mida kaabelliinide modelleerimisel tuleks silmas pidada. Põhjalikumalt on selgitatud liinide lülitamisega kaasnevaid probleeme, elektrisüsteemi võimalikku saarestumist, kaabelliinide juures iseloomulikku mahtuvuslikku voolu ja mahtuvuse laadumist. Ühtlasi kirjeldatakse ka olukorda, kus elektrisüsteemi koormus järsult langeb aga ka olukorda, kus voolu lainekuju ei läbi nullpunkti.

Kolmas peatükk annab ülevaate kaabelliinide modelleerimispõhimõtetest, kus vaadeldakse nii kaabli ehitust, kui selle elektrilisi parameetreid. Eraldi on välja toodud *PSCAD*i tarkvaras kaabelliini mudeli koostamiseks vajalikud sisendparameetrid. Kaabelliinide modelleerimiseks sobivaima modelleerimismudeli välja selgitamiseks võrreldakse omavahel enam levinud modelleerimismudeleid.

Uurimistöö neljas peatükk annab aga põhjaliku ülevaate kaabelliinide paigalduslikest teguritest, mille arvestamine modelleerimisel on äärmiselt oluline. Selgitatakse kaabelliini ekraanide elektrilist sidumist ja antakse ülevaade erinevatest ekraaniühendusmeetoditest. Lisaks käsitletakse kaabelliini saatemaanduse põhimõtteid ja sellega kaasnevaid mõjusid. Kirjeldatakse ka kaabelliini visangu pikkusest tulenevaid mõjusid kaabli ekraani indutseeritud pinge väärtusele. Täiendavalt antakse ülevaade kaabelliini ehitusel ühenduste teostamiseks vajalikest abikomponentidest.

Viies peatükk kirjeldab kaabelvõrgu modelleerimist. Selgitatakse, kuidas määrata modelleerimismudelisse kaasatavat elektrisüsteemi ulatust ning ekvivalenteerida ülejäänud, modelleerimismudelitest välja jäävat elektrivõrku. Antakse põhjalik kirjeldus uurimistöös vaadeldavast elektrivõrgust ja eraldi on välja toodud olemasolevate kaabelliinide andmed, nii ehituslikud kui elektrilised. Peatüki viimases osas keskendutakse uurimistöös vaadeldava elektrisüsteemi ja kaabelliinide mudelite koostamisele *PSCAD* tarkvaras.

Kuues peatükk koondab enda alla aga uurimistöös läbi viidud simulatsioonide peamised tulemused ja nende põhjal tehtud analüüsid. Vaadeldakse kaabelliinide ekraanide ühendusmeetoditest tulenevaid mõjusid kaabelliini talitlusele, seda nii ekraanide kahest otsast ühendamisel kui ka ristühendamisel. Analüüsitakse ka visangu pikkuse mõju ning selgitatakse välja, kuidas mõjutab kaabelliini võrdsete pikkustega sektsioonide saavutamise saadavaid tulemusi. Valdav osa uurimistöös vaadeldavatest kaabelliinidest on paigaldatud koos saatemaandusega. Simulatsioonitulemuste põhjal on hinnatud saatemaandus mõju kaabelliini talitlusele erinevate ekraaniühendusmeetodite juures. Omavahel on võrreldud kahe erineva paigalduskohaga saatemaanduse mõju kaabelliini jõukaablitele.

Kokkuvõttes antakse lühike ülevaade tehtud tööst ja peamistest uurimistöö tulemustest. Uurimistöö läbiviimise käigus on selgunud, et kaabelliinide modelleerimisel ja kaabelvõrgu siirdeprotsesside analüüsimisel on palju nüansse. Esineb palju probleeme, millele senise vähese teadustöö ja praktika tõttu puuduvad vastused nii Eestis, kui ka maailma mastaabis. Sellest tulenevalt ei ole käesolev uurimistöö kindlasti lõplik ning palju on teemasid, mis vajaksid täiendavat käsitlemist. Esile kerkinud probleemid ja täiendavat analüüsi vajavad teemad on eraldi välja toodud.

# 1. Kaabelvõrkude eripärad

## 1.1. Ülevaade kaabelliinidega seotud uurimistöödest

Käesoleva uurimistöö teostamiseks on läbi töötatud suurel hulgal kõikvõimalikke HVAC (*High-Voltage Alternating Current*) kaabelliine ja elektrisüsteemi siirdeprotsesse käsitlevaid teaduspõhiseid kirjandusallikaid. Põhjalikku tutvust on tehtud kaabelliinide modelleerimist käsitlevate, nii teadusasutuste kui ka süsteemioperaatorite poolt seni läbi viidud uurimistöödega.

Mahukaimad kaabelliine käsitlevad uurimistööd on läbi viidud Taani ülekandevõrgus ajaperioodil 2009-2012, koostöös sealse süsteemioperaatoriga Energinet.dk. Taani võrgus teostatud analüüsid [1], [2], [3] on tingitud õhuliinide maakaablistesse viimise ettekirjutusest riigis ning käsitlevad 132-400 kV pingestmega ülekandeliine.

Tulenevalt tuuleelektrijaamade rahvusvahelisest populaarsusest on saadaval mitmeid analüüse merepealsete tuuleelektrijaamade võrku ühendamise kohta, näiteks Rootsis [4], [5]. Tuuleelektrijaamade ja ülekandevõrgu vahelise vastastikmõju kujunemisel on suur rolli ka süsteemi ühendaval kaabelliini talitlusel. Tuuleelektrijaamade talitlusega seoses on suurel hulgal kirjutatud teadusartikleid, mis vähemal või rohkemal määral käsitlevad ka kaabelliinide talitlust ning nende modelleerimist. Enamasti käsitlevad sellised analüüsid merekaableid ning peamiseks probleemiks on pika kaabelliini mahtuvusliku komponendi kompenseerimine või kompenseerimiseadmete talitlusest tingitud probleemid siirdeolukordades.

Jaapanis 400 kV õhuliini kaabelliiniga asendamise võimalusi analüüsib [6]. Ka selle näite puhul on tegemist võrdlemisi pika liiniga ning peamine rõhk asetseb erinevate kompenseerimismetodite efektiivsusel. Kaabelliini ümbritsev elektrivõrk on ekvivalendina koondatud liini lähimatele sõlmpunktidele ning kaugemale ulatuvaid mõjusid [6] ei käsitle.

Suurbritannia ülekandevõrgus on vaadeldud lülitustoimingutest tingitud liigpingeid 400 kV kaabelsüsteemis [7], tulenevalt Londoni elektrivõrgu rekonstrueerimisest. Olemasolevad amortiseerunud 245 kV õlitäitega kaablid (aastast 1960) soovitakse üle viia kõrgemale 400 kV pingestmele, tänu millele tõuseks süsteemi läbilaskevõimsus ja efektiivsus. Ka [7] käsitleb probleemi kitsa osana kogu elektrivõrgust, kus vaatluse alla on kolme alajaama poolt läbi kaabelliinide toidetav sõlmpunkt ning kaabelvõrgu ligikaudseks pikkuseks on 20 km.

Kirjeldatud seni tehtud uurimistöid ja analüüse kokkuvõtvalt võib öelda, et mainitud tööd käsitlevad kaabelliinide talitlust ja siirdeprotsesside modelleerimist ühe konkreetse kaabelliini näitel. Analüüsitud liinid on võrdlemisi pikad (10-100 km) ning enamasti käsitletakse kahte



süsteemi ühendava konkreetse kaabelliini talitlust. Sellisteks näideteks on tuuleelektrijaamade ülekandesüsteemi ühendamine aga ka riikidevahelised elektrisüsteemide kaabelühendused. Toodud näidetest tulenevalt käsitleb suurem osa teadustöödest merekaabliteid, nende paigaldust ja talitluse iseloomu. Teatavasti erinevad aga merekaabelliinid oma ehituse ja parameetrite poolest tavapäraestest maakaabelliinidest, kus isegi modelleerimisel vajalike parameetrite arvu-  
tamine on kahe liinitüübi puhul mõneti erinev, rääkimata modelleerimismudeli koostamisest.

Kaabelliinidega seoses seni läbi viidud teadustöödest, keskendub suurem osa neist eelkõige kaabelliinidele iseloomuliku mahtuvusliku komponendi analüüsimisele ja mahtuvusest tulenevate talitluslike probleemide hindamisele. Analüüsitakse kaabelliinide mahtuvusliku komponendi kompenseerimisvõimalusi ja nende efektiivsust konkreetsete liinide näitel. Ühtlasi vaadeldakse kompenseerimisseadmete talitluse ja ülekandevõrgu protsessidega kaasnevaid vastastikmõjusid ning nende leevendusmeetodeid.

Seni tehtud uurimistööd ei käsitle reeglina ülekandevõrku, kuhu uuritav kaabelliin ühendatakse. Ülejäänud elektrivõrk koondatakse kaabelliinile lähimatesse sõlmpunktidesse. Sellest tulenevalt ei vaadelda kaugemale ulatuvaid mõjusid ega analüüsita kaabelvõrgu iseloomulikust talitlusest tingitud mõjusid ülekandevõrgule.

Eesti ülekandesüsteem ning kaabelvõrk on kirjeldatud teadustöödest suuresti erinev. Eesti ülekandevõrgus asub tihedaimalt kaabelliine Tallinnas, mistõttu on kaabelvõrk koondunud võrdlemise kitsasse piirkonda võrreldes kogu Eesti ülekandevõrguga. Olulisemateks erinevuseks Eesti ja seni tehtud uurimustöodes kirjeldatud kaabelvõrgu vahel on asjaolu, et Eesti ülekandevõrgu kaabelliinide pikkused jäävad alla 5 km ning on koondatud ühte piirkonda. Seega on Eesti kaabelliinid lühikesed, kuid kaabelvõrk on vaadeldavas ülekandevõrgu piirkonnas tihe.

Ühtlasi erinevad ka ülekandesüsteemide pingeastmed. Suurem osa mujal maailmas läbi viidud uurimistöid käsitleb kaabelliine pingeastmel 400 kV, mida liigitatakse ülikõrgepingeastmeks. Samas kui Eesti ülekandevõrgu kaabelliinid talitlevad oluliselt madalama 110 kV pingeastmel.

Lisaks ei saa mainimata jätta ka ülekandesüsteemide elektrilisest tugevusest tulenevaid erinevusi. Seni tehtud uurimistööd käsitlevad valdavalt suuri, piirkondade vahelisi elektriliselt tugevaid ülekandevõrke, mis oma mastaabilt erinevad Eesti ülekandevõrgust. Käesolev uurimistöö vaatleb aga Eesti ülekandevõrku kitsamas, Tallinna linnasiseses piirkonnas.

Kokkuvõtvalt on käesolevas uurimistöös Eesti ülekandesüsteemi vaadeldav elektrivõrk võrdlemisi tihe, sisaldades palju alajaamu ning õhuline ja kaabelliine. Teisest küljest on liinid võrdlemisi lühikesed, eriti kaabelliinid ning suurem osa kaabelvõrgust on koondunud ühte konkreetsesse võrgu piirkonda.

Tulenevalt ülekandesüsteemide ning kaabelvõrkude suurtest erinevustest, ei saa maailmas seni läbi viidud teadustöö ja uurimistulemuste põhjal järeldusi teha Eesti kaablivõrgu talitluse ja siirdeprotsesside iseloomustamiseks.

## **1.2. Kaabelliinide ja õhuliinide vaheline erinevus süsteemis**

Vaadeldes pikki ülekandeliine, ei erine talitluslike eesmärkide täitmisel kaabelliinid tehnilisest küljest tavapäraselt tuntud õhuliinidest. Füüsiliste omaduste seisukohalt on aga erinevus märkimisväärne. Järgnev loetelu toob välja AC kaabelliinidest koosneva süsteemi peamised erinevused võrreldes AC õhuliinidest koosneva süsteemiga, võttes aluseks sama pingestme ning ühesuguse ülekandevõimsuse [8].

- Reaktiivvõimsuse kompenseerimise vajadus on suurem tulenevalt kaablite mahtuvuslikust iseloomust
- Jadaaktiivtakistus on madalama väärtusega tulenevalt faasijuhtide üksteisele lähemal paiknemisest
- Süsteemi resonantssageduse väärtus on väiksem
- Siirdeprotsesside korral on lainetakistus ja laine levimise kiirus madalamad
- Eritähelepanu nõuavad kaabli metalliline kest (selle olemasolul) ja kaabli ekraani ristühendamine
- Kaabli rikked on enamasti püsivad ning nende likvideerimine on aeganõudev

Kaabelliinid omavad õhuliinidega võrreldes suuremat mahtuvuslikku komponenti. Sisuliselt võib väita, et kaabelliinide näol on tegemist võrgus hajutatud kondensaatoriga, mis toodab mahtuvuslikku võimsust. Sellest tulenevalt on kaabelliinide paigaldamisel suurem vajadus reaktiivvõimsuse kompenseerimiseks.

Võrreldes õhuliinidega on kaabelliinidel nii madalam pärijärgnevustakistus kui ka lainetakistus. Paralleeltalitluses õhuliinidega tuleb arvestada, et kaabelliinid kalduvad olema rohkem kooramatud [9].

Süsteemi resonantssageduse väärtus on kaabesüsteemi korral väiksem, millest tulenevalt nõuab erilist tähelepanu resonantsnähtuste analüüsimine madalamate sagedusväärtuste juures. Siirde- nähtuste juures on voolu ja pingelaineekujus tarvis vaadelda madalamaid sageduskomponente.

Võrreldes õhuliinidega, mis koosnevad paljasjuhtmetest, on kaablid oma ehituselt tunduvalt keerulisemad, kuna sisaldavad endas erinevaid kihte. Iga kaablikiht on tulenevalt oma funktsioonist ja kasutusel olevast materjalist erinevate elektriliste ja geomeetriliste parameetritega. Mistõttu ei saa kaabelliini vaadelda kui ühtset terviklikku juhti.

Kaabelliinide modelleerimine on tunduvalt keerulisem ja parameetritelt nõudlikum kui õhuliinide modelleerimine, seda iseäranis võrgusagedusest erinevate sageduste juures [8]. Kaabelliinide modelleerimisel tuleb tähelepanu pöörata liini paigaldusmeetoditele ja ehituslikele iseärasustele. Olulist rolli mängib mitme ühesoonelise (reeglina kolme või kuue) kaabli paigutusmeetod kaablikaevises aga ka kaablite vahelised vahekaugused ning paigaldussügavus. Mitmefaaasilise süsteemi korral rakendatakse kaabelliini ekraani indutseeritud voolu ja pinge väärtuste vähendamiseks, ekraanikihtide ristühendamist ning ekraani maandamist piki trassi, selleks ettenähtud ühenduspunktides iga teatava vahemaa ehk liini visangu tagant. Ristühenduspunktide modelleerimine omab mõju modelleerimistulemuste täpsusele, mistõttu on tarvis hinnata nende mudelisse kaasamise vajalikkust. Teisest küljest muudab ristühenduspunktide modelleerimine aga mudeli keeruliseks ja mahukaks, mistõttu väheneb mudeli arvutussamm ning modelleerimise efektiivsus.

Kaabel- ja õhuliinide üheks erinevuseks on ka nende rikkealdsus. Teatavasti on mitmed õhuliinide rikked ajutised ja tihti isemööduvad. Samas kui rikked kaabelliinides on püsivad ja kumulatiivse iseloomuga nähtused. Viimast tuleks silmas pidada kaitseseadmete valimisel ja seadistamisel.

Reeglina ei koosne ükski ülekandesüsteem ainuüksi kaabelliinidest. Iseäranis juhul kui vaadeldakse olemasolevat süsteemiosa, kus on planeeritud tavapäraselt õhuliinidelt üleminek kaabelliinidele. Sellistel puhkudel tekivad elektrivõrgus enamasti kombineeritud liinid ja hübriidsüsteemid, kus samaaegselt koosneb ülekandevõrk nii õhuliinidest kui kaabelliinidest nende erinevas osakaalus. Haruldased pole ka ülekandeliinid, mille erinevates lõikudes toimub üleminek õhuliinilt kaabelliinile ja vastupidi. Selliseid liine tuntakse kombineeritud ja hübriidliinide nime all. Kombineeritud liinid nõuavad täiendavaid analüüse, kus suuremat rõhku tuleks panna liigpingelaine kulgemisele üle eritüübiliste liinide ühenduspunktide.

Kombineeritud liinide paigalduse juures tuleb täiendavalt meeles pidada, et kaabelliinide maksimaalselt lubatud koormusvool on õhuliinidest reeglina madalam. Viimase üheks põhjuseks on kaabelliinide paigaldamine pinnasesse ja sellest tulenev temperatuuritundlikkus. Maksimaalselt lubatud koormusvoolule tuleb erilist tähelepanu osutada just kombineeritud liinide juures ja õhuliinide asendamisel kaabelliinidega, et ei ületataks kaabelliinile lubatud maksimaalseid taluvuspiire [9]. Lisaks kehtestab AC kaabelsüsteemides püsivad termilised piirangud ka märkimisväärne laadimisvool [9].

Varasemalt on juba mainitud pikkade kaabelliinide käsitlust ning seda tuleb ette ka edaspidises arutelus. Seetõttu on vajalik pika kaabelliini, kui mõiste määratlemine. Kaabelliini määratlemist pikaks liiniks võib võtta suhtelise väärtusena, olenevalt vaadeldava süsteemi suuruselt ja sinna kuuluvate liinide pikkusest. Pikkadeks kaabelliinideks loetakse reeglina liine, kus tulenevalt mahtuvuslikust komponendist osutub vajalikuks reaktiivvõimsuse kompenseerimine. Sellisteks kõrgepinge kaabelliinideks osutuvad reeglina liini, mis on pikemad kui 20 km [8]. Lisaks pikusele iseloomustavad pikki kaabelliine ka kaabli ekraani ristühendus- ja maanduspunktide olemasolu liinitrassil [8].

Eespool kirjeldatud kaabelliinide füüsilistest omadustest ja paigalduslikest eripäradest tingitud mõjude ulatus ülekandesüsteemis sõltub paljudest asjaoludest. Olulisemad on kaabelliini pikkus, liinide osakaal vaadeldavas ülekandevõrgus ning süsteemi kuuluvate komponentide iseloomust ja talitlusest tulenevad vastastikmõjud. Ülekandesüsteemis, õhuliinide asendamisel kaabelliinidega, ei saa teha üldisi järeldusi, kuna kindlad tähelepanekud ei kehti kõikides olukordades võrdväärselt. Nii osutub vajalikuks konkreetsete juhtumite eraldi vaatlemine ja analüüsimine, kus tuleb lähtuda kaabelliinide iseloomulikest parameetritest, nende paigaldusest ja ülekandevõrgu talitlusest. Kaabelliinide korrektne modelleerimine ja parameetrite õige käsitlemine on siinjuures määrava tähtsusega.

Kaabelliinide modelleerimisel esineb mitmeid raskendusi. Esiteks on kaabelliinide mudeli koostamine, mis vastaks liini reaalsele parameetritele ja paigaldusele, keerukas juba ainuüksi kaabli ehitusest tulenevalt, kuna viimane koosneb mitmetest erinevate parameetritega ja elektriliste omadustega vahekihtidest. Teisalt tuleb arvestada kaablite hajutatud parameetritega ja nende sageduslikus sõltuvusest, mistõttu nõuab kaabelvõrkude analüüs modelleerimist laias sagedusvahemikus. Modelleerimismudeli täpsust mõjutavad kaabli parameetrite kättesaadavus ja nende andmete detailsus. Mudeli efektiivsus ja tulemuste paikapidavus on otseselt sõltuv lähteandmete täpsusest. Viimaste kättesaadavus on aga tihtipeale raskendatud. Modelleerimismudeli koostamisel ja simulatsioonide läbi viimisel selgub aga asjaolu, kus mudeli detailsus ja

andmete liigne täpsus suurendab simulatsiooniprotsessi teostamiseks kuluvat aega. Selle tagajärjel muutub modelleerimismudel ebaefektiivseks. Kaabelliinide modelleerimine nõuab ühest küljest andmete täpsust ja liini detailset käsitlust, mis teist küljest muudab aga modelleerimise keeruliseks ja ebaefektiivseks. Siinkohal tuleb lähtuvalt modelleeritavast süsteemist ja huvi pakkuvatest nähtustest leida võimalikke lihtsustusi ilma, et modelleerimistulemuste kvaliteet sealjuures kannataks.

### 1.3. Reaktorid kaabelvõrkudes

Kaabelliinide mahtuvus on võrreldes õhuliinidega 10-20 korda suurem [8]. Sedavõrd suur mahtuvus põhjustab märkimisväärset reaktiivvõimsuse genereerimist elektrisüsteemi. Vältimaks kaabli voolutaluvuse vähendamist ja pinget kasvu kaablis, osutub vajalikuks kaabli poolt genereeritava reaktiivvõimsuse tarbimine. Selleks paigaldatakse rööpselt kaabelliiniga süsteemi reaktoreid. Viimased kujutavad endast induktiivset takistust, millede eesmärk on edastada süsteemi induktiivse iseloomuga elektrivoolu [8].

Pinget kasvu kaablis põhjustab *Ferranti* efekti tõttu. *Ferranti* efekt tekib koormamata või madala koormusega liini pingestamise, kus mahtuvuslik vool liinis on suurem kui liini koormus. Tulevalt kaabelliinide mahtuvuslikust iseloomust on *Ferranti* efekti esinemine kaabelliinides tavapärane. *Ferranti* efektist tingitud pinget tõus on võrdeline liini pikkuse ruuduga, mistõttu on pinget tõus probleemiks just pikkades liinides. Pinget tõusu taseme juures on oluline silmas pida elektrisüsteemile kehtestatud efektiivväärtuse piirmäärasid [8].

Lisaks vähendab kaabli poolt genereeritud mahtuvuslik vool, kaabli aktiivvõimsuse edastusvõimet. Kui genereeritavat reaktiivvõimsust ära ei tarbita, levib see ka teistesse naabruses paiknevatesse liinidesse ning vähendab ühtlasi ka nende voolutaluvust. Vooluedastuse efektiivsuse tõstmiseks paigaldatakse pikki HVAC kaabelliine sisaldavasse süsteemi kompenseerivad reaktorid. Viimaste paigaldamise asukoht on määrava tähtsusega nii püsi- kui ka siirdetalitlusel (tulevalt kaabli ja reaktori vastastikmõjust siirdeprotsessides) [8].

Reaktor kujutab endast induktiivpooli ning on nii mõnestki vaatenurgast võrreldav tavapärase trafoga. Reaktoritega kaasnevad aga mõned elektromagnetilised nähtused, millele tuleks täiendavat tähelepanu pöörata. Nendeks on küllastumine, vastastikune sidestus, magneetimiskaod, vaseskaod ja nende lisanduvad kaod (uitkaod, pinnaefekt jne) [8].

Reaktorit modelleeritakse enamasti kui takistusega jadamisi lülitatud induktiivsust (RL vooluahel). Selline lihtne mudel on enamasti piisav, kuid mõningatel juhtudel on siiski tarvis arvestada

ka reaktori faaside vahelist vastastikust induktiivsust ja küllastumist, et saavutada täpsemaid modelleerimistulemusi [8].

#### **1.4. Sagedusspekter**

Tulenevalt kaabelliinide suuremast mahtuvusest, on kaabelliinide resonantssagedus madalam kui õhuliinidel. Kaabelliini sagedusspektrile avaldab mõju ka liini ekraani elektrilise sidumise meetod (peatükk 4.1). Juhi ja ekraani vaheline vahemaa ei sõltu otseselt ekraani ühendustüübist, seega on juhtivusmaatriksid sarnased nii kahest otsast- kui ka ristühendamisel. Küll aga esineb erinevusi näivtakistuse maatriksites [10].

Ristühendatud kaabelliini korral on resonantspunktis kõrgem väärtus ja madalam sagedus, võrreldes ekraanide mõlemast otsast ühendamisega [10]. Juhi pärijärgnevus induktiivsus on ristühendatud kaabelliinil suurem, samas kui takistus on väiksem. Sellest tulenevalt on resonantssagedus ristühendatud kaabelliinis madalam. Ühtlasi põhjustades ka suuremat näivtakistuse ulatust rööpresonantspunktis ja madalamat näivtakistuse ulatust jadaresonantspunktis, võrreldes kahest otsast ühendatud ekraanidega kaabelliiniga. Suurema induktiivsususe tõttu on ristühendatud kaabli ekraanis ringlev elektrivool väärtuselt madalam, kui mõlemast otsast ühendatud kaabli puhul. Kuna vool on madalam, siis on ka viimase poolt indutseeritud magnetväli madalam. Seega avaldab kaabelliini ühenduse konfiguratsioon otseselt mõju kaabli sagedusspektrile [10].

Kahe erineva ekraanikihi ühendusmeetodi mõju on analüüsitav allikas [10]. Tulemustest selgub, et 250 Hz juures on tegemist kaabli-trafo vahelise resonantspunktiga. Kõrgematel sagedustel kui 600 Hz, on aga tegemist juba kaabliresonantsiga. Esimeseks resonantspunktiks ongi 250 Hz. Resonantsipunkti näivtakistuse ulatus sõltub kaabelliini ekraani ühendusmeetodist, samas kui resonantspunkti sagedus on mõlema ühendusmeetodi juures ligilähedane.

Sageduse kasvamisega muutub enam silmnähtavaks ka kahest ekraani ühendusmeetodist tulenev erinevus [10]. Ristühendatud kaabelliinil on rohkem resonantspunkte kui kahest otsast ühendatud kaabelliinil. Vaadeldes näivtakistuse väärtusi resonantspunktides kahe ühendusmeetodi puhul, siis ristühendatud kaabelliini näivtakistuse väärtus on suurem rööpresonantspunktis ja madalam jadaresonantspunktis, võrreldes kahest otsast ühendatud ekraanidega liini näivtakistuse väärtustega.

## 2. Siirdeprotsessid kaabeliinides

Elektrisüsteemis esinevad siirde nähtused on tagajärg konkreetsetele süsteemis aset leidvatele sündmustele, kus on toimunud järsk muutus vooluahelas. Nendeks sündmusteks võivad olla näiteks elektrisüsteemis aset leidvad lülitustoimingud. Siirde nähtused ilmnevad aga ka süsteemi ühelt püsiseisundilt uuele püsiseisundiolukorrale üleviimisel, mille käigus saab häiritud elektrisüsteemi tavapärase tasakaal. Tegemist on väga lühiajaliste protsessidega, mida vaadeldakse reeglina millisekundites või isegi lühema aja jooksul. Lühiajalisest kestvusest hoolimata võivad kirjeldatud situatsioonides ilmnedu tavapärasest märkimisväärselt kõrgemad, ja seega ka ohtlikud, tippväärtused süsteemi voolu ja pinge kõverates [11].

Üldlevinud arusaam siirdeprotsessidest hõlmab endas mitmeid eri päritolu liigpingeid [12], mis tulenevad suuresti just erinevatest lülitustoimingutest. IEC standard [13], [14] käsitleb nelja tüüpi liigpingeid, milleks on:

- Ajutised liigpinged (*TOV – Temporary Overvoltages*)
- Aeglase frondiga liigpinged (*SFO – Slow-Front Overvoltages*)
- Kiire frondiga liigpinged (*FFO – Fast-Front Overvoltages*)
- Väga kiire frondiga liigpinged (*VFFO – Very-Fast-Front Overvoltages*)

Kaabeliinide käsitlemisel siirde nähtuste seisukohast nõuavad eespool mainitud tähelepanu ajutised ja aeglase frondiga liigpinged. Kiire frondiga liigpingete puhul on enamasti tegemist pikseliigpingetega ning väga kiire frondiga liigpinged esinevad gaasisolatsiooniga seadmete juures [10].

Siirde nähtuste eripära kaabeliinides tuleneb peamiselt viimaste laadimisvoolust, mis on mahtvusliku iseloomuga, ja faasijuhti ümbritseva metallilise ehk juhtiva ekraani olemasolust. Kõrgepingekaablite talitlusel vajavad kõige enam käsitlust ajutised liigpinges, kuna kaablite suurem mahtvuslik komponent toob kaasa tavapärasest madalama süsteemi omasageduse väärtuse [3]. Sageduskomponendi madalama väärtuse tõttu, on madalam ka liigpinge võnkeline hajumine süsteemis, mistõttu võivad ajutised liigpinged süsteemis püsida tavapärasemast pikeaajaliselt [15]. Liigpingete pikem kestvus põhjustab aga lisastressi, nii kaablite endi kui ka teiste elektrisüsteemi kuuluvate seadmete isolatsioonile. Ajutiste liigpingete kestvus võib seega kujuneda kuni ühe minuti pikkuseks [10]. Ajutisi liigpingeid põhjustavad näiteks elektrisüsteemi saarestumine (*islanding*), koormuse järsk vähenemine süsteemis, erinevad rikked ja lülitusolukorrad aga ka resonantsnähtused.

Koormuse järsust vähenemisest ja resonantsnähtustest tingitud seadmetele ohtlike liigpingete tekkimine eeldab konkreetseid elektrivõrgu tingimusi [3]. Enamasti on selleks liigpingete tekkiks soodsa väärtusega põikreaktori ühendamine kaabelliinile konkreetses asukohas. Seega on mainitud nähtuste juures süsteemi seadmetele ohtliku liigpinge tekkimine võrdlemisi väikese tõenäosusega [3]. Teisest küljest on aga seda keerulisem spetsiifiliste tingimuste ja elektrivõrgu konfiguratsiooni välja selgitamine, et vältida koormuse järsust vähenemisest ja resonantsnähtustest tingitud liigpingetega kaasnevaid tõsiseid tagajärgi.

Aeglase frondiga liigpinged on oma loomult võnkuvad ning kestavad kuni mõned millisekundid. Ajutisi liigpingeid põhjustavad elektrisüsteemis näiteks liinide sisse- ja väljalülitused, (maaihenduslikud) rikked, mahtuvuslike ja induktiivsete elementide lülitamised ning võrgus aset leidvad välgutabamused [10]. Tavapärase, õhuliinidest koosneva elektrisüsteemi korral, ei põhjusta aeglase frondiga liigpinge seadmeid otseselt ohustavaid olukordi, kuna liigpinged ei ületa isolatsiooniklassile kehtestatud vastupidavuse piirmäärasid [3]. Seega jäetakse nende põhjalikum käsitlemine reeglina kõrvale. Kaabelvõrgu puhul puudub seni aeglase frondiga liigpingetele vastav praktika ja kogemus [3], mistõttu tasub kaaluda teatud tüüpi aeglase frondiga liigpingete analüüsi kaasamist. Seda kinnitab ka asjaolu, et erinevalt tavapärastest elektrisüsteemidest, tuleks kaabelliinide lülitustest tingitud liigpingeid vaadelda kui ajutisi liigpingeid, sest tulenevalt kaabelliinide mahtuvuslikust komponendist kestavad kaabelliinide lülituslikud liigpinged õhuliinides pikemalt [3].

Lisaks seni kirjeldatud liigpingetele esineb kaabelliine sisaldavas elektrivõrgus ka teisi tähelepanu nõudvaid nähtusi. Nendeks on näiteks voolu lainekuju nullpunkti mitteläbimine (*zero-missing phenomenon*), mahtuvusliku iseloomuga voolu katkestamine (*leading current interruption*) ja kaabli tühjakslaadumine (*discharge*). Mainitud nähtuste esinemine kaabelvõrgus sõltub süsteemi konkreetsest konfiguratsioonist ja süsteemis paiknevate seadmete koosmõjust (näiteks võimsuslülitid, reaktorid) [15].

Eespool kirjeldatud nähtuste ja nendega kaasnevate liigpingete analüüsimine kaabelvõrkudes on võrdlemisi keeruline. Ühest küljest on nende tekkeks tarvis süsteemi konkreetsele konfiguratsioonile vastavaid soodsaid tingimusi ja iseloomulike seadmete olemasolu, näiteks vastavad kompenseerimiseadmed, koormusolukorrad, võimsuslülitite talitlemine, rikete asukohad, süsteemi resonantssagedus ja liigpinge sumbumise tase võrgus [8]. Teisest küljest võivad soodsate tingimuste kokkulangemisel liigpingetest põhjustatud tagajärjed elektrisüsteemi stabiilsusel, olla tõsised. Järgnevalt kirjeldatakse lähemalt eespool mainitud süsteemis tekkivaid olukordi ja

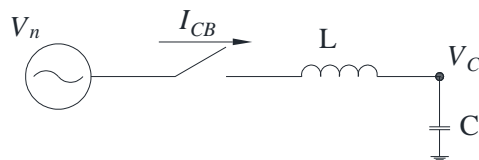


nähtusi, mida tuleks lisaks tavapärastele riketele ja lühistele kaaluda kaabelliinide ja ülekandevõrgu vaheliste mõjude analüüsimisel.

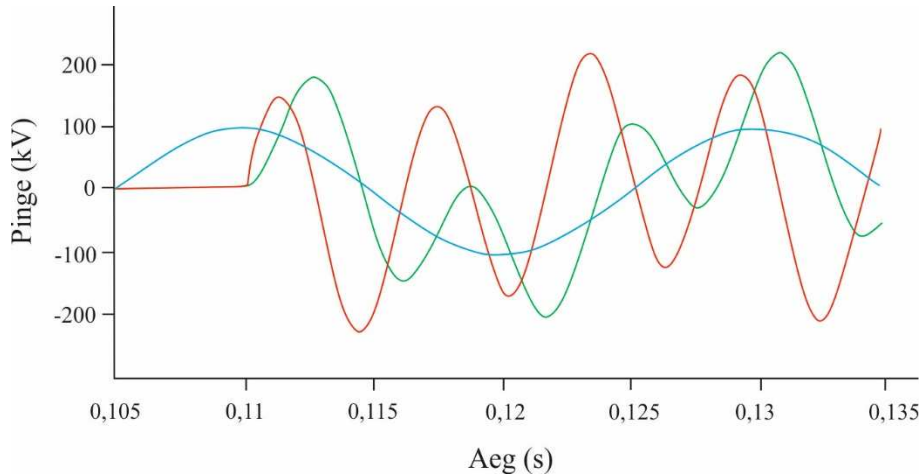
## 2.1. Liinide lülitamised

Liinide sisse- ja väljalülitamisega kaasnevad siirdeliigpinged sõltuvad mitmetest asjaoludest. Nendeks on liini parameetrid, elektrivõrgu konfiguratsioon, lähedal paiknevate seadmete vastastikmõju aga ka lülitamistoimingu ajahetk. Viimasel juhul määrab lülitamise hetkel võimsuslülitil klemmidel olev pinge väärtus kaabelliini sisselülitamisega kaasneva liigpingelaine kuju ja ulatuse.

Käsitledes kaabelliinide lülitamisi, võib kaabelliine vaadelda kui LC vooluahelaid (joonis 2.1), kus rööbiti paiknevad induktiivsus ja mahtuvus on läbi võimsuslülitil ühendatud pingevallika klemmidele [10].



Joonis 2.1. LC vooluahel



Joonis 2.2. LC vooluahela pinge ja voolu lainekuju süsteemipinge tippväärtuse juures:

*sinine* –  $V_n$ ; *roheline* –  $V_C$ ; *punane* –  $I_{CB}$  [10]

Kaabelliini lülitamisel laeb selle mahtvuslik komponent end induktiivsuse arvelt, mistõttu tekib energia võnkumine mahtuvuse ja induktiivsuse vahel. Mõne aja möödudes saavutab mahtvuslik komponent süsteemipingega võrdse väärtuse, kuid selleks hetkeks on induktiivse komponendi vool jõudnud oma tippväärtuseni (joonis 2.2) [10]. Energiajäävusest tulenevalt

ei saa induktiivse komponendi vool koheselt nullväärtuseni jõuda. Ajal, mil voolu väärtus läheneb nullile, mahtvusliku komponendi pinge väärtus aga üha kasvab ning võib ületada süsteemipinge väärtuse. Hetkel, mil voolu väärtus läbib nullpunkti on mahtvuslik komponent saavutanud oma pinge tippväärtuse ning mahtuvus hakkab tühjaks laaduma.

Mahtvusliku ja induktiivse komponendi pinge võngub resonantssagedusel, mis erineb süsteemipinge võnkesagedusest. Võnkesageduste erinevuste tõttu saavutavad mahtvusliku komponendi pinge ja süsteemipinge võrdväärse amplituudi erinevatel ajahetkedel (joonis 2.2). Mahtvusliku komponendi pinge ulatus erineb aga igal resonantstsüklil, kuna pinge algväärtus mahtvusliku elemendi klemmidel on pidevalt muutuv [10]. Tuginedes kirjeldatule, on liini lülitamise ajahetk ja võimsuslülitite klemmipinge väärtus, protsessiga kaasneva liigpingelaine kujunemisel määrav.

Mahtvusliku komponendi pinge väärtuse esialgne kasv on võrdeline süsteemipinge ja mahtvusliku komponendi pinge vahelise erinevusega, liini lülitamise ajahetkel. Kui süsteemipinge väärtus võimsuslülitite klemmidel on lülitamise hetkel null, puudub erinevus süsteemipinge ja mahtvusliku komponendi pinge vahel. Sellisel juhul on lülitamisest tingitud liigpinge minimaalne või ei teki seda üldse [1]. Vastupidine on aga olukord, kus liini lülitamine leiab aset süsteemipinge tippväärtuse juures. Sellisel juhul on lülitamisega kaasnev liigpingelaine oma maksimaalse väärtuse juures [1].

Kaabelliinide lülitamisprotsesside juures tuleb täiendavalt tähelepanu osutada elektrisüsteemis paralleelselt paiknevate kaabelliinide lülitamistoimingutele. Sisuliselt võib paralleelsete kaabelliinide lülitamist käsitleda kui paralleelsete kondensaatorite lülitamist, lähtuvalt kaabelliinide mahtvuslikust iseloomust. Olukorras, kus kahest paralleelsest kaabelliinist on üks juba pingestatud, kandub selle mahtvuses talletatud energia üle teise kaabelliini, viimase sisselülitamise hetkel. Sellises situatsioonis on voolutõuke amplituudi väärtus ja resonantssagedus tavapärasest kõrgemad, sõltudes ühtlasi kaabelliini pikkusest ja elektrisüsteemi lühisvõimsusest [1]. Kaabelliinide sisselülitusvool on küll mõnevõrra väiksem kui kondensaatoritel, kuna mahtvuslik komponent jaguneb kogu kaabelliini pikkusele (liinil hajutatud parameeter). Siiski on kirjeldatud nähtuse vaatlemine oluline, kuna tavapärasest kõrgem sisselülitusvoolu väärtus võib ületada seadme tootja poolt kehtestatud maksimaalselt lubatud väärtusi [1]. Viimane toob endaga kaasa kõrgeenenud ohu lülitusseadmete ebaefektiivseks talitluseks ja nende kahjustumisteks.

Lisaks kaabelliinide sisselülitamisele vajab iseloomustamist ka nende väljalülitamine. Kaabelliinide väljalülitamisel talletub neisse energia, mis mõne aja möödudes süsteemis hajub. Tulevalt kaabelliinide mahtvuslikust komponendist võib see aega võtta mitmed sekundeid [10]. Kaabelliinide väljalülitamisel saab võrdusi tõmmata jäälegi kondensaatoritega, kus voolu ja pingega vahe on  $90^\circ$ , mistõttu on kondensaatori väljalülitamisel see täielikult laetud. Kondensaatori tühjakslaadumine toimub mõne aja möödudes läbi aktiivtakistuse. Kaabelliini väljalülitamisel on selles laadunud pingega väärtus väiksem ning tühjakslaadumine toimub mõnevõrra kiiremini, kuna kaabli aktiivtakistus on kondensaatoriga võrreldes suurem [10]. Tulevalt kaabelliini laadunud pingega ja aktiivtakistuse väärtuste vahelisest seosest, võib eeldada, et kaabelliinide väljalülitamine ei kujune elektrivõrkudes probleemiks. Ettevaatlik tuleks aga olla kaabelliini taassisselülitamisel. Viimane ei tohiks toimuda koheselt peale kaabelliini väljalülitamist, mil mahtvuslikus komponendis talletatud energia pole veel liinis täielikult tühjaks laadunud (peatükk 2.3) [10].

## **2.2. Elektrisüsteemi saarestumine**

Elektrisüsteemi saarestumiseks (*islanding*) nimetatakse olukorda, kus seni terviku moodustanud elektrisüsteem jaguneb rikke või häiringu tulemusena süsteemiosadeks ehk saarteks. Selliseid tagajärgi võivad endaga kaasa tuua näiteks mõne strateegiliselt olulise ülekandeliini väljalülitamine. Elektrisüsteemis saarestumisel läbi kaabelliini, on üks kaabelliini otspunktidest kogu ülejäänud süsteemi suhtes avatud olekus. Eraldades seeläbi kogu ülejäänud elektrisüsteemist mingi osa koos kaabelliiniga [8].

Süsteemi saarestumisega kaasnevad mõjud sõltuvad süsteemi komponentidest ja nende parameetritest. Nendeks on näiteks süsteemi pingega, toiteallika näivtakistus, kaabelliini laadimiseloomu ja reaktiivvõimuse kompenseerimiseks liinile ühendatud reaktorite induktiivsus. Süsteemi saarestumine toob kaasa liigpingelaine, mis sisaldab nii oma- kui ka resonantssageduslikku komponenti. Kaks sageduskomponenti võivad omavahel liituda, mistõttu on ilma vastavate simulatsioonideta tekkivat liigpinget rakse hinnata [8]. Süsteemi saarestumisega kaasnevate mõjude hindamisel on oluline eraldunud süsteemiosa analüüsimine erinevate lühisvõimsuse tasemete ja elektrivõrgu konfiguratsioonide juures, kuna saarestumisega kaasnev liigpinge on eraldunud süsteemiosa lühisvõimsuse tasemele tundlik. Saarestumise analüüsimine ja selle mõjude hindamine, algab seega esmalt kõige raskema ja enam mõju avaldava elektrivõrgu konfiguratsiooni välja selgitamisega.

Oluliseks tähelepanekuks saarestumise analüüsil on generaatorite kaasamise modelleerimismudelitesse, mis tagavad liigpinge võnkumise eraldunud süsteemiosas [8]. Sõltuvalt elektrivõrgu

konfiguratsioonist võib elektrisüsteemi saarestumise endaga kaasa tuua ka latirike, kus rikke eemaldamiseks tuleb elektrisüsteemi osad teineteisest eralda. Kui eraldatud süsteemiosas on generaatorid, siis kaasneb saarestumisega püsiv ajutine liigpinge. Ajutine liigpinge põhjustab aga lisastressi nii seadmete kui ka liinide isolatsioonile. Kusjuures mida pikema kaabelliiniga on tegemist, seda suurem on eeldatav püsivalt võnkuv liigpinge [6]. Tähelepanu nõuavad ka generaatorite ergastuse juhtimisseadmed (*AVR – Automatic Voltage Regulator, PSS – Power System Stabiliser, UEL – Under-excitation Limiter*), mis võivad põhjustada pikaajalise liigpinge eraldunud süsteemiosas, mõjutades seega ka elektrisüsteemi seadmete ja kaabelliinide isolatsioonitugevuse hinnangut [8].

Tõenäolisemalt võib elektrisüsteemi saarestumine ette tulla pika (mere)kaabelliini kaudu elektrisüsteemiga ühenduses oleva tuuleelektrijaamade eraldumisel kogu ülejäänud elektrisüsteemist.

### **2.3. Tühjakslaadumine**

Eelnevalt on juba juttu olnud kaabelliinide mahtuvuslikust iseloomust, seetõttu tuleks tähelepanu pöörata ka kaabelliinide energiast tühjakslaadumisele. Kaabelliinide tühjakslaadumine on eelkõige oluline kaabelliinile paigaldatud põikreaktorite korral, kuna liini eraldamisel ülejäänud elektrivõrgust toimub tühjakslaadumine just läbi reaktorite. Sellisel juhul määrab tühjakslaadumise protsessi kestvuse reaktori hüvetegur  $Q$  (*Quality factor*). Ülikõrgpinge põikreaktorite hüvetegur on suurusjärgus 500 ning kaabelliini tühjakslaadumine võtab ligikaudu 8 minutit [15]. Kui kaabelliin võrgust eraldamise järel mõne minuti jooksul vooluahelasse taasühendatakse, siis kaabelliinis säilinud teatav jääklaeng. Viimase suurus sõltub kahe lülitustoimingu vahelisest ajaperioodist. Juhul kui kaabelliini jääkpinge on süsteemipingele vastasmärgiline, tekib kaabelliini taassisselülitamisel liigpingeimpulss. Liigpinge kujuneb ohtlikuks, kui selle väärtus ületada lülitusimpulsi taluvuspinge (*SIWV*) väärtust [15].

Enamast ei rakendata kaabelliinidel automaatset taassisselülitust, kuna kaabelliinide rikked on reeglina püsivad. Erandite korral tuleb aga meeles pidada kaabelliinide jääkpinget ja kõrgema väärtusega liigpingeimpulsi tekkimise tõenäosust. Süsteemioperaatorid peavad arvestama, et enne liini taassisselülitust tuleks oodata vähemalt 10 minutit või kindluse mõttes isegi kauem [15].

Kõik kaabelliinid ei vaja aga mahtuvusliku komponendi kompenseerimist, mistõttu ei paigaldata ka vastavaid põikreaktoreid. Sellisel juhul toimub kaabelliini tühjakslaadumine läbi pingetrafode ja võtab aega kõigest millisekundeid [15]. Siinkohal tuleb aga tähelepanu pöörata

asjaolule, et induktiivsete pingetrafode laadumisvõime (*discharge capability*) peab olema piisav [15]. Peale kaabelliini laengu hajutamist, võtab pingetrafodel omakorda aega laadumisest tuleneva soojusenergia hajutamine. Viimane võib aga kesta kuni mitmeid tunde [15]. Kui kaabelliini tühjaks laadumine on tundide jooksul vajalik mitmeid kordi, siis tuleb arvestada ka induktiivsete pingetrafode mitmekordselt kõrgema laadumisvõimega [15].

#### **2.4. Koormuse vähenemine**

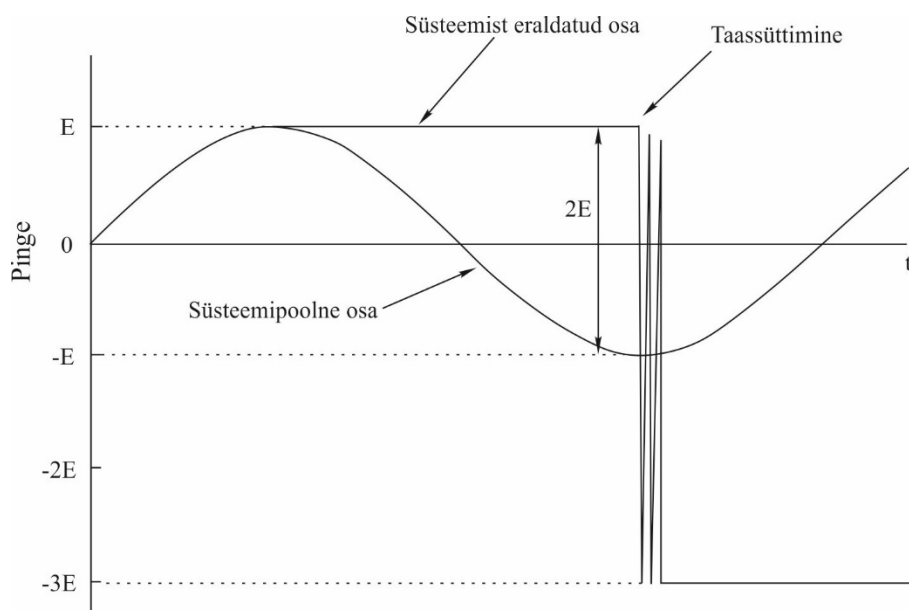
Koormuse vähenemise all mõistetakse olukorda, kus generaatori koormus järsult langeb või kaob täielikult. Koormuse vähenemine siirdeprotsessina ei ole otseselt tingitud kaabelliinidest, kuid sellega kaasnev liigpinge süsteemis kandub edasi kaabelliinidesse.

Koormuse järsul vähenemisel saab generaatori klemmpinge võrdseks induktiivse elektromotoorjõuga, millega kaasneb süsteemipinge tõus [16]. Kui aga koormuse järsk langus leiab aset näiteks kolmefaasilise maaühendusrikke tagajärjel, siis generaatori automaatne pingeregulaator (AVR) tõstab rikke tagajärjel ilmnunud pingelanguse kompenseerimiseks süsteemipinge väärtust [16]. Need on sagedasemad nähtused, kus koormuse vähenemisega süsteemis kaasneb tavapärasest kõrgem süsteemipinge. Lisaks avaldab generaatori koormuse järsk vähenemine mõju ka resonantsliigpingete tekkeks, kuna koormusest tingitud takistuse vähenemisel võib kaabli mahtuvusliku komponendi ning generaatori ja trafo induktiivse komponendi vahel tekkida resonantsnähtus [16].

#### **2.5. Mahtuvusliku iseloomuga vool**

Mahtuvusliku iseloomuga vooluahela katkestamisel tuleb sõltuvalt katkestamise ajahetkest, arvestada võimaliku tavapärasemast kõrgema liigpingeimpulsi tekkimisega. Taoliste anormaalitalitluslike nähtuste juures tuleb lisaks liinide taluvusele silmas pidada ka kogu ülejäänud elektrisüsteemi kui tervikut, kus tähelepanu nõuavad ka teised lülitustoimingutega seotud elemendid (nt võimsuslülitid, voolutrafad jne).

Mahtuvusliku voolu katkestamisel on määrav lülituse toimumise ajahetk. Voolu katkestamisel nullväärtuse juures, on ahela pinge aga tippväärtusega, kuna teatavasti edastab voolu lainekuju pinge oma  $90^\circ$  võrra. Peale katkestust on võimsuslülitiga eraldatud süsteemipoolse ahela pinge võrdne süsteemipinge väärtusega. Samas kui süsteemist eraldatud ahela pinge püsib muutumatu vastavalt tippväärtusele  $E$  (joonis 2.3). Kui süsteemipinge jõuab väärtusele  $-E$ , on möödunud poolperiood ning sellises punktis on oht tõsiste tagajärgedega elektrikaare taassüttimisele. Süsteemipoolse ja eraldatud elektrialhela pinge väärtuste erinevus on maksimaalne  $2E$  ning kaare taassüttimisel võib tekkiv liigpinge ulatuda kuni väärtuseni  $-3E$  (joonis 2.3) [3].



Joonis 2.3. Mahtvusliku voolu lülitamisel kaare taassüütimise ja liigpinge tekkimine [3]

Sellises situatsioonis elektrikaare pidev taassüütimine ja kustumine toob kaasa tõsiseid liigpingeimpulsse, mis ohustavad elektriseadmete talitlust ja isolatsiooni vastupidavust. Võimalike probleemide vältimiseks on oluline hinnata elektriahelasse paigaldatavate seadmete mahtvusliku voolu katkestamisvõimet (*leading current interruption capability*). Viimane on standardiseeritud vastavalt pingestmete.

Mahtvusliku vooluahela katkestamisest tulenevate tagajärgede analüüsimine on eelkõige tarvilik elektrivõrkudes, mis sisaldavad kompenseerimata pikki ülikõrgepinge kaabelliine [3]. Sellistele kriteeriumitele vastab näiteks 400 kV nimipingega kaabelliin (mahtuvuse tüüpiliseks väärtuseks on  $0,2 \mu\text{F}/\text{km}$ ) maksimaalse pikkusega 26 km, kus puuduvad mahtvuslikku komponenti kompenseerivad reaktorid [3]. Reeglina on aga kümnetesse kilomeetritesse ulatuvad kaabelliinid varustatud mahtuvust kompenseerivate põikreaktoritega. Kui kompenseerimistase on piisavalt kõrge, siis sellistel puhkudel ei kujune mahtvusliku voolu katkestamine murettekitavaks nähtuseks [3].

## 2.6. Voolu nullpunkti puudumine

Nullpunkti puudumine on selline nähtus, kus voolu lainekuju ei läbi mitme võnketsükli jooksul nullväärtust. Selline olukord võib tekkida pikkade kaabelliide ja põikreaktorite üheaegsel siselülitamisel, tingimusel, et kaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimistase on enam kui 50% [10].

Nullpunkti puudumise nähtus on ohtlik eelkõige lülitusseadmetele. Kui voolu väärtus ei läbi nullpunkti, pole ilma lüliti kahjustuseta võimalik võimsuslüliti kontakte avada. Siinjuures on

muidugi erandiks spetsiaalse tehnilise lahendusega voolu väärtuse nullpunkti jõudmiseta ja DC voolu katkestamist võimaldavad lülitid [10].

Voolu lainekuju nullpunkti mitteläbimine võib kesta mitmeid sekundeid, mistõttu ohustab see lisaks võimsuslülititele ka elektrivõrgu teisi elemente. Nullpunkti mitteläbimisel pole kaabelliini rikke kohene katkestamine võimalik [10] ning sellel võivad olla tõsised tagajärjed.

Kaabelliini mahtvusliku komponendi kompenseerimiseks põikreaktori vooluahelasse lülitamisel, sisaldab seda läbiv vool nii AC komponenti kui ka sumbuva iseloomuga DC komponenti. DC komponendi sumbumine leiab aset mõne aja möödudes, sõltuvalt kaabelliini ja reaktori takistuse väärtusele. DC komponendi esialgse väärtuse määrab aga klemmipinge väärtus lülitamise ajahetkel. Kui reaktori lülitamise hetkel on pinge lainekuju saavutanud nullväärtuse, on reaktorit läbiva voolu DC komponent oma maksimaalväärtuse juures. Põikreaktori voolu AC komponent ja kaabelliini mahtvuslik laadumisvoolu on teineteise suhtes vastasfaasides, teineteist peaaegu kompenseerides. Võimsuslülitit läbiv vool kujuneb AC ja DC komponentide summana, kus sumbuv DC komponent võib eelneva põhjal saada domineerivaks. Kaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimisel enam kui 50% ulatuses, on DC komponent AC komponendist suurem. Voolu lainekuju ei läbi nullpunkti enne, kui voolu DC komponent on sõltuvalt vooluahela takistuse väärtusest täielikult sumbunud. Selle saavutamine võib aga võtta mitmeid sekundeid [8]. Kaabelliini reaktiivvõimsuse kompenseerimisel 100% ulatuses on põikreaktori voolu AC komponendi ja kaabelliini laadumisvoolu summa võrdne nulliga (voolud kompenseerivad teineteist täielikult) ning ahelas kulgeb vool koosneb vaid DC komponendist.

### 3. Kaabelliinide modelleerimispõhimõtted

#### 3.1. Kaabli ehitus ja elektrilised parameetrid

Kaabli ehitus on võrdlemisi keerukas, kuna sisaldab mitmeid juhtivaid-, isoleer- ja pooljuhtkihte. Ühesoonelise kaabli ehitust kajastab joonis 3.1. Kaabli kihid on vastavalt oma funktsioonidele valmistatud erinevatest materjalidest ning omavad erinevat paksust, mistõttu on ka iga kihi elektrilised parameetrid erinevad. Tulemuste täpsuse seisukohalt on oluline kõikide kihtide arvestamine ning nende parameetrite võimalikult detailne käsitlemine modelleerimismudeli koostamisel. Kaablikihtide parameetrite hankimine võib osutuda aga keeruliseks ülesandeks, kus kõige paremat informatsiooni omavad kaablite tootjad, kes paraku aga kaabli spetsifikatsioonides kõiki andmeid ei avalikusta. Ühtlasi on ilmnenu [2], et teatud analüüside teostamiseks pole tootja poolt esitatud nominaalväärtused piisavad tulemuste täpsuse tagamiseks või erinevad kaabli tegelikud parameetrid spetsifikatsioonis toodutest sellisel määral, mis mõjutab suuresti modelleerimistulemusi.



*Joonis 3.1. Ühesoonelise kaabli kihid: juht; pooljuhtlint (niiskustõke); juhi ekraan (sisemine pooljuhtkiht); isolatsioon; isolatsiooni ekraan (väline pooljuhtkiht); pooljuhtlint (niiskustõke); ekraan; pooljuhtlint (niiskustõke) ja kest [17]*

#### **Juht ehk kaablisoon**

Kaabli soon on enamasti valmistatud vasest või alumiiniumist ning selle eesmärgiks on kanda elektrivoolu. Soone suurus on määratud läbiva voolu väärtusega, millele vastab proportsionaalne soone ristlõige [10].



Eespool toodud kirjeldustest selgub, et kaabli mudeli koostamine on andmemahukas, sisaldades lihtsustusi ja korrekture, mis on vajalikud kaabli mudeli koostamiseks. Osa nendest lihtsustustest on modelleerimistarkvarad võimelised tarkvarasiseselt modelleerimisprotsessi käigus teostama. Mõningad arvutuslikud korrektureid tuleb mudeli koostajal aga eraldiseisvalt teha. Selleks, et koostatav kaablimudel vastaks võimalikult täpselt reaalsele kaablile, on oluline läheteandmete hulk ja nende täpsus. Tabelisse 3.1 on koondatud kaabli kõigi kihtide parameetrid, mis on vajalikud tervikliku kaablimudeli koostamiseks.

*Tabel 3.1. Kaabli kihtide parameetrid*

\* Tähelepanu tuleb pöörata, et tegemist on suhteliste suurustega:  $\mu/\mu_0$  ja  $\varepsilon/\varepsilon_0$

### **3.2. Kaabli mudeli sisendparameetrid PSCAD tarkvaras**

Eespool kirjeldatust selgub, et kaabelliinide modelleerimisel on tarvis arvestada kõigi kaablikihtide parameetrite ja omadustega. See teeb aga mudeli koostamise võrdlemisi keeruliseks

Pideva tootearenduse tulemusena leiavad aga kasutust uued materjalid, mis erinevad senistest nii koostises olevate ühendite kui ka nende osakaalu poolest. Modelleerimistulemuste täpsuse huvides võivad kasutatavate materjalide elektrilised omadused kujuneda võrdlemisi oluliseks informatsiooniks. Paraku on konkurentsi tõttu sellised andmed enamasti konfidentsiaalsed.

Lisaks kaablile on liini modelleerimiseks vajalik ka informatsioon ümbritseva keskkonna (maapinna) kohta ning juhul kui kaabel paigaldatakse torru, siis ka viimase parameetrid.

### 3.3. Modelleerimismudelid

Kaablite ja ülekandeliinide modelleerimiseks on välja töötatud mitmeid meetodeid, millest mõned põhinevad juba 30-40 aastat tagasi tõestatud arusaamadel [1]. Liini, nii õhu- kui ka kaabelliini, on võimalik modelleerida rakendades lihtsaimaid *Kirchhoff*'i seadusi. Küll aga on sellisel juhul tegemist konkreetsele sagedusele vastava lainetakistuse leidmisega. Selline olukord vastab ainult süsteemi konkreetsele püsiseisundile, kus jääb arvestamata maakaabli ekraanis kulgev elektrivool. Modelleerimismudelite valik varieerub lihtsamatest *PI*-mudelitest kuni keerulisemate mudeliteni.

Kaabelliinide parameetrid on oma iseloomult hajutatud ja mittelineaarsed sageduse suurenemisel [1]. Seega jäävad lihtsamate *PI*-mudelite rakendamisel saadud modelleerimistulemused tihetele ebatäpseteks. Kaabli parameetrite hajuvat iseloomu ja sagedusest sõltuvaid tunnusjooni võtavad arvesse sageduspõhised (*FD*) modelleerimismudelid. Viimased osutuvad sobilikuks just siirdeprotsesside modelleerimisel, kuid ei pruugi aga igas olukorras sobida modelleerimiseks kõigi süsteemi konfiguratsioonide korral. Lähtuvalt analüüsitavatest siirdenähtusest, võivad modelleerimisel teinekord piisava täpsusega võrdväärseid tulemusi anda ka lihtsamate mudelite rakendamine [1]. Seetõttu võib, sõltuvalt analüüsitavast siirdenähtusest, lihtsama mudeli rakendamine kujuneda otstarbekamaks.

Üldiselt on rakenduses olevate modelleerimismudelite õigsust ja vastavust mõõdetud pigem õhuliinidest koosneva süsteemi modelleerimisel, mitte aga kaabelliinidega süsteemi korral [1].

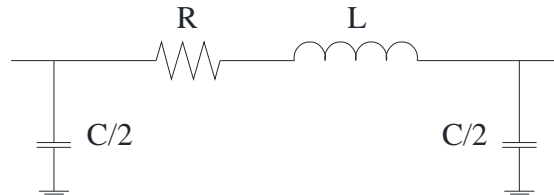
Kaabelliinide modelleerimiseks sobivaimad ja enam rakendust leidvad mudelid jagatakse üldjoontes kahte kategooriasse [10]:

- Koondatud parameetritega mudelid – klassikaline ja täpsustatud *PI*-mudelid
- Hajutatud parameetritega mudelid ehk kulglaine mudelid – *Bergeron* ja sageduspõhised (*FD*) mudelid.

Järgnevalt kirjeldatakse täpsemalt nende mudelite rakendamist kaabelliinide modelleerimisel.

### Klassikaline $PI$ -mudel

Kaabelliinide modelleerimisel on kõige lihtsamaks modelleerimismudeliks klassikaline  $PI$ -mudel, mis arvestab kaabli näivtakistust, aktiivtakistust, mahtuvust ja juhtivust (viimane jäetakse tihti peale arvestamata), modelleerides neid koondatud parameetritena kogu kaabli pikkuses. Kaabelliini klassikaline  $PI$ -mudelit kujutab joonis 3.3.



Joonis 3.3. Kaabelliini klassikaline  $PI$ -mudel [10]

Klassikaline  $PI$ -mudeli rakendamine tuleb kõne alla vaid lühikeste liinide korral, kuna kaabli pikkusega kasvab ka mudelis parameetrite lihtsustusest tulenev viga märkimisväärselt. Seetõttu osutuvad modelleerimistulemused ebatäpseteks. Vea määra teatav vähenemine on võimalik, kui jagada klassikaline  $PI$ -jaotis mitmeteks väiksemateks  $PI$ -alajaotisteks [10]. Selline lähenemine ei ole aga otstarbekas ega taga ka keerulisemate protsesside analüüsimiseks piisavat täpsust.

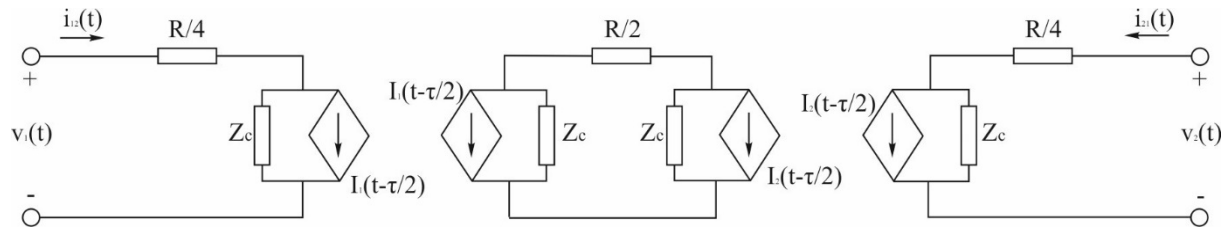
Klassikaliste  $PI$ -mudelite juures on probleemiks ka asjaolu, et nad ei taga piisavalt täpset sagedusulatust ehk sagedusspektrit. Kõrgemate sageduste juures võivad modelleerimistulemused viidata resonantssagedustele, mis aga ei pruugi vasta süsteemi tegelikule olukorrale [10]. Seega ei ole klassikalise  $PI$ -mudeli rakendamine siirdeprotsesside modelleerimisel otstarbekas. Klassikalise  $PI$ -mudeli rakendamine piirdub enamasti lihtsamate arvutuste ja matemaatiliste abiarvutuste teostamisega [10].

### Täpsustatud $PI$ -mudel

Klassikalise mudeli edasiarendus on täpsustatud  $PI$ -mudel. See mudel arvestab täiendavalt ka näivtakistuse ja juhtivuse kulgevast iseloomu. Täpsustatud mudeli korral on klassikalise  $PI$ -mudeli näivtakistust ( $Z$ ) ja juhtivust ( $Y$ ) läbi diferentsiaalvõrrandite mitmekordistatud, iseloomustamiseks laine kulgemist liinis. Täpsustatud mudel tagab piisava täpsuse konkreetses sageduspiirkonnas (*frequency domain*) modelleerimisel. Täpsustatud  $PI$ -mudelit kasutatakse enamasti mõne teise modelleerimismudeli tulemuste kontrollimiseks ja kinnitamiseks [10].

## Bergeron'i mudel

Bergeron'i mudel on püsisageduslik mudel ja põhineb kulglaine teoorial. Mudel käsitleb kadudeta kaabelliini, kus aktiivtakistus on mudelisse sisestatud koondparameetrina. Tavaliselt jagatakse mudel kaheks jaotiseks (võib jagada ka enamateks, kuid muutus tulemustes on määramatult tähtsusega). Koondtakistus on sisestatud igasse jaotisesse vastavalt,  $1/4$  iga jaotise lõpu ja  $1/2$  jaotise keskele (joonis 3.4). Kuna Bergeron'i mudel on püsisageduslik, siis sobib ka see vaid ühel kindlal sagedusel modelleerimiseks (nt püsiseisundil) [10].



Joonis 3.4. Kaabelliini Bergeron'i mudel [10]

## Sageduspõhised mudelid

Sageduspõhistes (*FD*) mudelites kasutatakse laine levimise ja juhtivuse matrikseid. Seega on võimalik arvestada ja sageduspõhiseid parameetreid, laine juhtivustakistus ja levimiskonstanti. Seega on *FD*-mudeli eespool kirjeldatud mudelitest oluliselt täpsemad. *FD*-mudelites tehakse kõik arvutused küll sageduspiirkonna põhiselt, kuid seejärel konverteeritakse need ümber ajapõhisteks. Selleks kasutatakse vastavaid transformatsioone, näiteks *Fourier*'i- või *Z*-transformatsiooni. Mitmed uurimistööd [2], [10], [24], [25] kinnitavad, et *FD*-mudelid on kaabelliinide modelleerimisel kõige sobivamad ning annavad täpsemaid tulemusi.

## **4. Kaabelliinide paigalduslikud tegurid ja komponendid**

Kaabelliinide modelleerimisel on tuleks silmas pidada kogu kaabelliini süsteemi, mistõttu tuleb mudeli koostamisel arvesse võtta ka liini paigaldusest tulenevaid omapärasid. Järgnevates ala-peatükkides käsitletakse kaabelliinile, kui süsteemile iseloomulikke tegureid. Kuna liini paigaldusest tulenevad omapärad mõjutavad modelleerimistulemusi ning seda just siirdeprotsesside seisukohalt, siis vajavad need kaabelliini mudeli koostamisel erilist tähelepanu. Käesolev peatükk käsitleb kaabelliini ehitusest tulenevaid iseärasusi, näiteks kaabelliini sektsioneerimine ja ekraani ristühenduspunktide põhimõtteid.

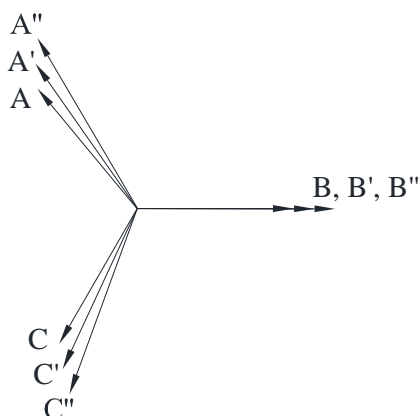
### **4.1. Ekraani voolud ja ekraanide elektriline sidumine**

Kaabelliini talitlusel tekitab kaabli soones kulgev elektrivool magnetvälja, mis loob galvaanilise ühenduse kaabli soone ja ekraanikihi või teiste lähedal asuvate juhtivate osadega (näiteks maapinnas paiknevad torustikud vms). Juhtivate osade vahelise suletud ahela olemasolul indutseeritakse viimastesse elektrivool. Kaabli ekraanis tekkivad pöörivoolud koosnevad tavaolukorras kahest komponendist, milleks on mahtuvuslik vool ja indutseeritud vool [26].

Mahtuvuslik vool tuleneb kaabli soone ja juhtiva ekraanikihi vahelisest sidestusest. Seega eksisteerib kaabli soone koormamisel ehk koormusvoolu olemasolul igal juhul kaabli ekraanis mahtuvuslik vool. Indutseeritud vool tekib kaabli ekraanis aga siis, kui on olemas indutseeritud pinge ja kaabli ekraan on ühenduses maaga rohkem kui ühest punktist ehk teisisõnu, kui indutseeritud voolu kulgemiseks on tagatud suletud ahel [26]. Tähelepanu tuleb pöörata asjaolule, et mitme maaühenduspunkti olemasolu liinis ei pruugi olla tahtlik ja võib tekkida ka isolatsiooni riketest, näiteks kaabli kestad või ekraani ühenduspunktid. Indutseeritud pinget tekitavad aga kõrvalekalded süsteemi ideaalsest tasakaalust (näiteks juhtide paigutus üksteise suhtes). Seega sõltub indutseeritud pinge väärtus lisaks koormusvoolu suurusjärgust ja süsteemi sagedusest, ka liini paigaldusviisist ja sektsioonide pikkustest aga teatud määral ka kaabelliini kogupikkusest [26].

Kaabelliinides esinevad energiakaod sõltuvad otseselt ekraani pöörivooludest, suured pöörivoolud põhjustavad suuri kadusid [26]. Läbi ekraani suletud ahelas ringlev vool põhjustab lisaks kadudele ka kaabli temperatuuri tõusu [27], mistõttu väheneb lubatav kestevool liinis. Seeläbi väheneb ka liini elektrienergia edastusvõimsus ehk liini koormatavus ja liini efektiivsus. Kõigele lisaks vähendavad pöörivoolud kaabelliini eluiga, võivad viia kaabli isolatsiooni või kesta läbilöögist põhjustatud riketeni ning suurendada ohtu liini hooldustööde läbiviimisel [26].

Ühesoonelistest kaablitest koosneva liini ühele soonele lubatavat koormatavust on võimalik mõnevõrra suurendada, rakendades selleks kaablite võrdkülgset kolmnurkpaigaldust tasapinnalise paigalduse asemel [27]. Võrdkülgse kolmnurkpaigaldusega on kaablite ekraani indutseeritud pingete vektorid võrdsed. Tasapinnalise või mittevõrdkülgse kolmnurkpaigalduse korral on äärmistesse kaabli ekraanidesse indutseeritud pingete väärtused keskmisest kaablist kõrgemad ja lisaks ei ole indutseeritud pingete faasinurgad enam võrdselt  $120^\circ$  (joonis 4.1) [28].



Joonis 4.1. Indutseeritud pingete vektordiagramm:  $A, B, C$  – võrdkülgne kolmnurkpaigaldus;  $A', B', C'$  – kolmnurkpaigaldus;  $A'', B'', C''$  – tasapinnaline paigaldus [28]

Vähendades või täielikult elimineerides voolud kaabli ekraanis, on võimalik suurendada liini efektiivsust. Selleks tuleb katkestada läbi ekraani tekkiv pidev elektri ahel. Ekraani ahela katkestamiseks kasutatakse spetsiaalseid kaabelliini ekraanide ühendusmeetodeid (*bonding methods*). Kaabelliini ekraani ahela katkestamisega saavutatakse küll ekraani voolu väärtuste vähenemine, kuid paraku toimub see ekraani pinge väärtuse tõusu arvelt [27].

Optimaalse lahenduse tagamiseks sõltuvalt liini iseärasustest, on välja töötatud mitmeid kaabelliini ekraanide ühendusmeetodeid. Järgnevalt kirjeldatakse peamiselt rakenduses olevaid meetodeid lähemalt.

### Ühest otsast ühendamine

Kõige lihtsamaks meetodiks on ekraanide ühest otsast ühendamine (*Single-end Bonding*), kus kaabelliini ekraanid maandatakse ainult ühest otpunktist kogu kaabelliini trassi ulatuses. Sellise konfiguratsiooni korral puudub pidev vooluahel kaabli ekraani indutseeritud voolu kulgemiseks. Seetõttu, on voolu väärtus kaabelliini ekraanis null. Samas aga indutseeritakse kõrvuti asetsevate faasisuhtide ekraanide ning ekraani ja maa vahel pinge. Ekraani indutseeritud pinge on väärtuselt proportsionaalne kaabli pikkuse ja koormusvooluga kaabli soones [29]. Indutsee-

Tavapärasemast suuremate liigpingeväärtustega tuleb arvestada juba liini planeerimisetappides. Kõrgema pingeastmega süsteemides tuleb kaaluda spetsiaalsete ekraani pingepiirikute (SVL – *Sheath Voltage Limiter*) paigaldamist. Rikked kaabli kesta või ekraani pingepiirikutes ja ühenduskohtade isolatsioonis võivad põhjustada ülemäära kõrgeid voole ja kadusid kaabli ekraanis, tuues endaga kaasa kaabelliini võimaliku ülekuumenemise. Mainitud asjaolusid tuleb silmas pidada pinget piiravate seadmete valikul ning kaabelsüsteemi seirel ja hooldusel [27].

### **4.3. Kaabelliini saatemaandus**

Saatemaanduseks (*GCC*) nimetatakse kaabelliini kaevisesse jõukaablitega paralleelselt ning vahetusse lähedusse paigaldatavat, kogu trassi ulatuses pidevat juhti. Saatemaanduse eesmärk on tagada pidev juhtiv ühendus maandussüsteemi ja liini otspunktide vahel [27]. Saatemaandust kasutatakse kaabelliinidel, kus kaabli ekraanid on ühest otsast ühendatud või ristühendatud.

Saatemaandus asetseb liini jõukaablitega paralleelselt ja on liini otspunktides koos kaabli ekraanidega ühendatud maanduspaigaldisega. Moodustades ühtse terviku, mida on tarvis käsitleda kui neljast juhust koosnevat süsteemi.

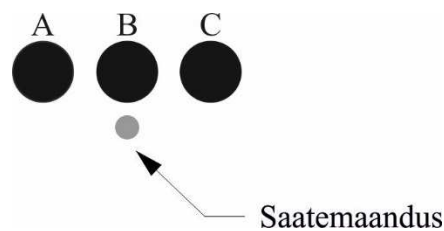
Saatemaanduse lisamine on oluline eelkõige ohutuse seisukohalt, kus paljas maandusjuht loob täiendava ahela maaühendusvoolu kulgemiseks. Võimalikes rikkeolukordades vähendab see potentsiaali väärtust liini mõlemas otspunktis ja suurendab seeläbi süsteemi ohutust. Kaabelliini konfiguratsioonil, kus liini ekraanid on ühendatud vaid ühest otspunktist, on saatemaanduse olemasolu määrav ka ekraani pingete vähendamise seisukohast. Mainitud konfiguratsioonil on ühesooneliste kaablite ekraanidesse indutseeritud pinge väärtus maksimaalne ja kaablitrassis paralleelselt jõukaablitega kulgev saatemaandus vähendab liini ekraanidesse indutseeritud pinge väärtust [27].

Tihti paigaldatakse kaabelliiniga samas trassis lisaks jõukaablitele ka side- ja juhtimiskaabel. Selliste kõrvaliste juhtide korral on oluline, et nendesse indutseeritud pinge väärtused oleksid minimaalsed. Kaabelliinides, kus planeerimise ja paigaldamise etapis on liini transponeerimine hoolikalt läbi mõeldud ja sellele vastavalt ka teostatud, ei osutu kõrvalistesse juhtidesse indutseeritud pinged märkimisväärseks probleemiks ja liinid talitlevad enamasti tasakaalustatud süsteemina. Kaabelliini ekraanide mõlemast otsast maandamise korral, kus liini ekraanid on samaaegselt kogu trassi ulatuses pidevad (puuduvad vahepealsed ekraanikihi katkestused maanduspunktides), on liini varjestus tänu ekraanikihtidele tagatud ja liinitrassis paralleelselt kulgevatele kõrvalistele juhtidele indutseeritud pinge väärtus on minimeeritud [27].

Kaabelsüsteemi konfiguratsioonil, kus kaabli ekraanide ristühenduspunktid on täiendavalt maandatud, ei talitle kaabli ekraanid aga enam vajaliku varjestusena. Vähendamaks või täielikult elimineerimaks paralleelsetesse juhtidesse indutseeritud pingeid, rakendatakse sellisel juhul kaabelliini transponeerimist [27], kus kõik liinisüsteemi kuuluvad kaablid transponeeritakse kogu trassi ulatuses. Puhtalt füüsilistest tingimustest tulenevalt, ei tehta kaabelliini transponeerimist suureristlõikeliste liinide korral, kui just ei ole selleks sobivaid ja soodsaid tingimusi tagatud muhvide ühenduskohtades [27]. Külla aga tehakse liini ristlõikest hoolimata saatemaandusjuhi transponeerimine liini faasijuhtide suhtes.

Olukorras, kus trassis on enam kui kolmest ühesoonelisest kaablist koosnev liin, näiteks kahe või enama liini paigaldamisel ühte kaevisesse, on tasakaalustatud süsteemi saavutamine keerulisem. Seda isegi liinide transponeerimise korral, kuna liinid on enamasti erinevalt koormatud ning mida rohkem on juhte, seda keerulisem on saavutada juhtide teineteise suhtes võrdset paiknemist kogu trassi pikkuses.

Vastavalt eespool mainitule on lisaks liinisüsteemi kaablite transponeerimisele oluline ka saatemaanduse paiknemine teiste juhtide suhtes. Nii jõukaablite kui ka teiste juhtide transponeerimine mitmefaasilises süsteemis on oluline, et saavutada võimalikult tasakaalustatud pingete ja vooludega süsteemi. Seega mängib kaabelsüsteemis olulist rolli juhtide geomeetiline paiknemine trassis. Kaablite tasapinnalise paigalduse korral, kus kaablite vahel on tagatud piisav vahemik, peaks saatemaandusjuht asetsema jõukaablite vahel nagu näidatud joonisel 4.6. Juhul kui jõukaablid puutuvad trassis teineteisega kokku või asetsevad kolmnurkpaigalduses, tuleks saatemaandus paigaldada vahetult jõukaablite kõrvale pikki trassi. Iga paigaldusviisi korral on aga oluline saatemaandusjuhi transponeerimine. Liinisektsioonide olemasolul tuleks seda teha iga sektsiooni keskel, vastasel korral aga kogu liinitrassi keskel [27].



*Joonis 4.6. Juhtide geomeetiline paiknemine tasapinnalisel paigaldusel kaablitrassis*

#### **4.4. Visangu pikkus**

Tasakaalustatud süsteemi saavutamiseks on oluline, et kaabelliini sektsioonideks jagamisel on sektsioonid ehk liini visangud võimalikult võrdsete pikkustega. Kaabelliini ristühenduste sekt-



sioonide vahelised vahemaad tekitavad nende erinevate pikkuste korral süsteemi vahelist asümmeetriat [1]. Visangute pikkused määravad ära kaabelliini ühenduskohad ja nende teostamise piirangud. Süsteemi asümmeetria suurendab omakorda ekraanis kulgeva voolu väärtust ja tõstab ekraani indutseeritud pingeid [1]. Vältimaks asümmeetria tekkimist nii palju kui vähegi võimalik, on oluline saavutada võrdsed vahemaad ekraanide ristühenduspunktide vahel [10]. Praktilises elus on seda aga paraku keeruline tagada. Mida enam on kaabelliinis transponeerimistsükleid ning mida väiksem on nendevaheline vahemaa, seda enam läheneb süsteem sümmeetrilisele olukorrale [2]. Teisest küljest on liini ehituskulude ja -aja kokkuhoiul eesmärgiks ekraani ühenduspunktide kahandamine võimalikult vähesele arvule. Ühenduspunktide vahelised pikkused määravad ekraani indutseeritud pinge väärtuse. Samuti ilmnevad teatud piirangud visangute teostamisele ka muudest tingimustest, näiteks kaabli pikkusest trumlil [3].

Iga kaabelliini paigaldustingimused on erinevad tulenevalt looduslikest oludest ja tehnilisest olukorrast. Seega on ka ühenduskohtade vahemaade pikkuste kohta leida väga varieeruvaid andmeid. Sõltuvalt liinide kogupikkusest, on kaabelliinide keskmisteks visangu pikkusteks 1,8-1,9 km [3]. Leidub aga ka paigaldatud liine, kus vingute pikkused on suurusjärgus 0,7 ja 0,8 km [21] ja isegi alla selle (näiteks Tallinna kaabelvõrgus). Praktikas on etteantud visangu pikkustest, kaabelliini paigaldamisel võrdlemisi raske kinni pidada.

#### **4.5. Abikomponendid**

Kaabelliin paigaldamisel tuleb rakendada mitmed abikomponente ehk abijuhte. Nendest on ekraanide ristühendamise teostamiseks ja maanduspaigaldisega sidumiseks vajalikud juhid. Juhid, nende pikkused ja ristlõiked varieeruvad liinide, sõltuvalt ühenduspunktide kaugusest ning kaabli ristlõigetest. Kaabli ristühendamisel kaabli kaevises spetsiaalsetes transpositsioonikilpides (*linkbox*), ei kujune abijuhtide pikkused oluliselt pikaks. Kui ristühendamine teostatakse aga kaabelliini vahetus läheduses maapinnale paigaldatavas kilbis, võivad abijuhtide pikkused kujuneda arvestatavateks. Abijuhtide tegelikku pikkust on aga raske määrata, sest tihti puudub töös olevate liinide projektdokumentatsioonis vastav informatsioon. Modelleerimisel laialt levinud lähenemiseks on võtta abijuhtide pikkuseks 10 m ning juhtme induktiivsuseks 1  $\mu\text{H/m}$  [2], [3].

Lisaks abijuhtide parameetritele kuuluvad abikomponentide modelleerimise alla ka maandusühendused ning maandustakistuse suurused. Siingi on laialt levinud väärtusteks kaabelliini mudelis liini otspunktides 1  $\Omega$  (alajaama maanduspaigaldis) ja ristühenduspunktides maanduse olemasolul 0,5  $\Omega$  [3].

## 5. Kaabelvõrgu modelleerimine

### 5.1. Modelleeritava elektrisüsteemi osa määramine

Analüüsimeks kaabelvõrgu mõjusid ülekandevõrgu talitluse ei piisa ainuüksi kaabelliinidele mudeli koostamisest. Selleks, et hinnata kaabelvõrgu mõjusid ülekandevõrgu seisukohast, tuleb modelleerimismudelisse kaasata kogu huviorbiidis olev ülekandevõrk. Seega koosneb modelleerimismudel mitmetest elektrivõrgu komponentidest, mis peaksid vastama võimalikult täpselt elektrivõrgu tegelikkusele. Ülekandevõrgud võivad aga olla väga mahukad ja kaugemale ulatuvad. Elektrisüsteemi osa korrektsel määramisel on modelleerimisel saadavatele tulemustele suur mõju. Maksimaalse täpsuse saavutamiseks, lähtutakse võrgu mudeli koostamisel ja arvutuste tegemisel, võimalikult laiast elektrisüsteemi ulatusest. Selline lähenemine suurendab küll modelleerimise täpsust, kuid teisest küljest vähendab mudeli efektiivsust, kuna modelleerimisprotsessi ajakulg on otseses seoses mudeli sõlmede arvust. Rääkimata mudeli koostamiseks ja parameetrite hankimiseks kuluvast ajast.

Ülemäära kaugemale ulatava elektrivõrgu kaasamine mudelisse pole alati otstarbekas ja vajalik. Siirdeprotsessidest tingitud nähtused on elektrisüsteemis sumbuva iseloomuga, mistõttu ei avalda need elektrivõrgu kaugemates punktides mõju. Modelleerimismudeli koostamiseks sobiva elektrisüsteemi osa määratlemine on olulise tähtsusega. Lähtuvalt modelleeritavate siirdeprotsesside iseloomust ja elektrivõrgu konfiguratsioonist, tuleb objektiivselt hinnata mudelisse kaasatava võrguosa ulatust ja vajalikku detailsust. Mudeli koostamisel võetakse aluseks sarnase pingestmega võrguosa elemendid (pingeaste, millele kaabelliin lülitatakse) [1].

Modelleerimismudeli elektrisüsteemi osa ulatus mõjutab siirdenähtuste tagajärjelt tekkiva pingepulsi väärtust tulenevalt süsteemi elementidel (seadmed ja liinid) aset leidvatest impulsslaine peegeldumistest ja murdumistest [10]. Modelleerimismudeli elektrisüsteemi osa määramiseks tuleb vaadelda tekkivate liigpingelainete väärtusi ning hinnata nende levikut ja sumbujust ülekandevõrgus. Lihtsaimaks nähtuseks, mida vaadelda on kaabelliini lülitused. Analüüsi teostamisel tuleks aluseks võtta hetk, mil ilmnev pingepulss on oma tippväärtuse juures ning sealjuures erinevate laine levimiskiiruste juures vaadelda selle leviku ulatuse kaugust elektrivõrgus [1].

Laine levimise kiiruse seisukohast saab analüüsida erinevaid stsenaariume. Kõige raksemaks juhtumiks peetakse laine levimiskiiruse võrdumisel valguskiirusega. Tegemist on aga ilmselge liialdusega, kuna reaalselt on laine kiirus kaabelliinis pool sellest ajast [1]. Seega teeb selline lähenemine simulatsiooniprotsessi äärmiselt aega nõudvaks. Laine levimiskiiruse määramisel

võib kasutada teadaolevaid keskmisi väärtusi, milleks on 181  $\mu$ s kaabelliinides ja 230  $\mu$ s õhu-  
liinides [1].

Kaabelliinide analüüsimisel, ülejäänud elektrivõrku ekvivalenteerimisel liini sõlmpunktidesse, on tegemist jämeda lihtsustusega, mille tulemuseks on ebapiisava täpsusega modelleerimistulemused. Siirdeprotsessidega kaasnev ajutine liigpinge (*TOV*) on otseselt seotud süsteemi lühisvõimsusega, mida väiksem on süsteemi lühisvõimsus, seda kõrgem on liigpinge tippväärtus (joonis 5.1) [1]. Ühtlasi sõltub ka resonantsliigpinge süsteemi lühisvõimsusest, mida madalam on lühisvõimsus, seda madalam on ka resonantssagedus [1]. Lisaks mainitule suurendab ekvivalenteeritud võrgu rakendamise pinget väärtust lattidel, mistõttu on ka kaabli sisselülitusvoolu amplituud kõrgem [1].

#### *Joonis 5.1. Pingetippväärtus kaabelliini lülitamisel erinevate lühisvõimsuste juures [1]*

Modelleeritava võrguosa määramine on seega võrdlemise keeruline ülesanne, kus tuleb arvestada mitmeid asjaolusid ning hinnata modelleerimistulemuste täpsuse ja mudeli koostamise keerukuse vahelist seost. Ülemäära suure elektrivõrgu osa kaasamine mudelisse ei ole kindlasti otstarbekas ja alati ei mõjuta see modelleerimisel saadavaid tulemusi positiivses suunas.

#### **Elektrivõrgu ekvivalenteerimine**

Elektrivõrgu ekvivalenteerimisel on selle takistus piirjoone sõlmpunkti märgatavalt väiksem kui reaalsuses neile sõlmedele ühendatud liinide näivtakistus. Seetõttu on ka liigpingelaine peegeldusel selle ulatus tegelikkusest suurem [10]. Viimane võib viia eksitavate tulemusteni. Selle vältimiseks on oluline, et ekvivalenteeritud elektrivõrk asuks analüüsitava kaabelliinist teataval kaugusel. Ekvivalenteeritud võrgu kaugus on oluline ka sageduskarakteristiku tundlikkuse seisukohalt [10].

## 6. Tallinna kaabelliinide analüüs

Eespool peatükkides toodud kirjelduste põhjal on ilmselge, et kaabelliinid erinevad nii keerulise ehituse kui ka talitluse poolest tavapäraest õhuliinidest. Kaabelvõrgu talitluse juures mängivad rolli mitmed detailid. Näiteks liini paigalduse viis, kaabli erinevate kihtide olemasolu ja nende parameetrid aga ka ümbritseva elektrivõrgu iseloom ja erinevate seadmete vastastikmõju. Siirdeolukordades saab määravaks tekkiv liigpinge, liigpingelaine levimine ja selle kandumine kaabli ekraanikihti ning peegeldumised kaabelliini ühenduspunktides. Kaabelliinide keerulisus ja detailide rohkus ning nende õhuliinidest erinev käitumine, nii normaaltalitusel kui ka siirdeolukordades, teeb oluliseks kaabelliinide analüüsimise ja nende mõjude hindamise elektrivõrgu seisukohast.

Käesolev peatükk kajastab uurimistöö raames koostatud modelleerimismudelite põhjal läbi viidud simulatsioonitulemuste analüüsi, andmaks ülevaadet ja hinnanguid Tallinna kaabelvõrgu talitlusele. Analüüsi tulemuste põhjal saab võimalikuks esmaste hinnangute andmine uute kaabelliinide planeerimisega kaasnevatele asjaoludele ja aset leidvatele muutustele Eesti elektrisüsteemis kaabelvõrkude osakaalu suurenemisel.

Kogu Eesti ülekandesüsteemis on suurima kaabelliinide osakaaluga Tallinna linnasisene elektrivõrk. Eesti ülekandevõrguhalduri tuleviku perspektiivid näevad ette mitmete olemasolevate õhuliinide asendamise kaabelliinidega, mistõttu hakkab Tallinna ülekandevõrk tulevikus suuresti koosnema ainult kaabelliinidest. Sellest tuleneval on käesoleva uurimistöö raames põhjalikult vaadeldud Tallinna elektrivõrku ja analüüsitud sellesse nii praegu kuuluvaid, kui ka tulevikus planeeritavaid kaabelliine.

Hindamaks kogu kaabelvõrgu üldist mõju ülekandevõrgule, tuleb esmalt teada võrku kuuluvate kaabelliinide talituslikke eripärasid ja sellega kaasnevaid mõjusid. Analüüsi läbiviimiseks on täiendavalt üldisele Tallinna ülekandevõrgu mudelile koostatud eraldiseisvad modelleerimismudelid Tallinna ülekandevõrku kuuluvatele kaabelliinidele. Kaabelliinid on koormatud ligilähedaselt vastavalt võrgu perspektiivsele koormusmudelile aastaks 2020 arvestades talviseid koormusi (tippkoormus). Tabelis 6.1 on toodud järgnevates alapeatükkides analüüsimisele tulevad kaabelliinid koos koormustega. Vastavate liinide valik on tehtud peatükis 5.2 toodud tabeli 5.1 põhjal, kus lähtutud on nii liini pikkustest, ekraani ristühenduspunktide olemasolust ja nende arvust ning liini ristlõikest. Olemasolevatele liinidele lisaks on analüüsimisele valitud

## 7. Kokkuvõtte ja edasised tegevused

Kõrgepinge kaabelliinide rajamine on tänapäeval väga aktuaalne ning kogub üha enam populaarsust. Teisest küljest puuduvad vajalikud tehnilised teadmised ja kogemus nende kasutuselevõtuga kaasnevast ning nende modelleerimisest. Kaabelliinid erinevad nii oma ehituselt kui ka dünaamiliselt käitumiselt traditsioonilistest õhuliinidest, mistõttu on oluline koguda uusi teadmisi HV kaabelliinide talitlemisest elektrisüsteemis ning iseäralikest nähtustest teiste elektrisüsteemi komponentidega koos talitlemisel.

Kuna kaabelliinide erinevad suuresti õhuliinidest, siis on ka nende talitus siirdenähtuste tekkimisel elektrivõrgus erinev. Käesolevas uurimistöös on välja toodud olulisemad nähtused, mida kaabelvõrkude juures tuleks eraldi silmas pidada.

Siirdeprotsesside uurimiseks kaabelvõrgus ja adekvaatsete tulemuste saamiseks on tarvis koostada täpne vaadeldava võrguosa mudel. Kaabelliinide mudelite koostamisel on oluline, et mudel vastaks nii täpselt kui võimalik reaalse kaabelliini käitumisele võrgus. Sealjuures tuleks aga silmas pidada optimaalseimat lahendust, mis väldiks mudeli üleliigset keerukust ja tagaks simulatsiooniprotsesside efektiivsuse ehk minimaalse ajakulu simulatsiooniprotsessi läbiviimisel.

Hindamaks kogu kaabelvõrgu üldist mõju ülekandevõrgule on esmalt analüüsitud võrku kuuluvate kaabelliinide talituslikke eripärasid ja sellega kaasnevaid mõjusid. Analüüsi läbiviimiseks on täiendavalt üldisele Tallinna ülekandevõrgu mudelile koostatud eraldiseisvad modelleerimismudelid Tallinna ülekandevõrku kuuluvatele kaabelliinidele.

Kaabelliinide analüüsimisel nõuavad erilist tähelepanu nende ekraanikihi modelleerimine ja ekraani ühendusmeetodite teostamine. Valitud ühendusmeetodist sõltuvad liini ekraanikihti indutseeritud voolu ja pinge väärtused. Peamisteks ekraanikihi ühendusmeetoditeks on ühest otsast ühendamine, kahest otsast ühendamine ja ristühendamine. Nendest viimast rakendatakse ka valdavas osas Tallinna kaabelliinides. Lihtsaimaks meetodiks on ekraanide ühest otsast ühendamine. Sellisel juhul kaabli ekraanis voolu ei esine, kuid ekraani indutseeritud pinge on kõrgeima väärtusega. Kahest otsast ühendamisest vähendatakse küll ekraani indutseeritud pinge väärtust, kuid läbi maahenduse luuakse täiendav ahel ekraanis ringlevatele pöörivooludele. Ristühendamine on kahe meetodi kesktee, kus ekraanis ringlevaid voole ega ka indutseeritud pingeid ei elimineerita, kuid vähendatakse mõlema väärtusi piisavalt madalale tasemele. Ekraanide ristühendamine teeb kaabelliini ehituse aga keeruliseks ja seega ka liini modelleerimise. Ristühendamisest saadav positiivne mõju nõuab võimalikult sümmeetrilist kaabelliini süsteemi

ja võrdseid seksioonide pikkusi liinil. Reaalsetes looduslikes oludes on ideaaltingimuste saavutamine peaaegu võimatu.

Käesolevas uurimistöös on analüüsitud Tallinna elektrivõrgu kaabelliinide talitlust sõltuvalt ekraani ühendusmeetodist. Selleks on võrreldud ekraanide kahest otsast ühendamisel ja ristühendamisel saadud erinevusi. Vaadeldud on liinis tekkivat pingekadu ning voolu ja pinget väärtusi nii liini soones, kui ka ekraanikihis.

Kaabli ekraani indutseeritud voolu pinget väärtused sõltuvad eelkõige liini koormatavusest ehk kaabli soone voolust. Teatavat mõju omab ka kaabelliini pikkus, kus pikema liini korral on indutseeritud voolu ja pinget väärtused suuremad. Suur mõju on aga kaabelliini ekraani ühendusmeetodil, kus ristühendusmeetodi rakendamine aitab vähendada ekraani indutseeritud voolu ja pinget väärtusi.

Kahest otsast ühendatud ekraanide korral väheneb indutseeritud vool lineaarselt liini otspunktis lõpp-punkti. Samas kui kaabli ekraani indutseeritud pinget ei järgi nii korrapäraselt muudatust, kuna see sõltub suuresti liini paigutusest ja kaablite omavahelistest kaugustest. Liini ekraanide ristühendamisel joonistub välja selle mõju ekraani indutseeritud voolule, mis erinevalt kahest otsast ühendatud ekraanide meetodile ei ole enam lineaarselt vähenev. Ekraanide ristühendamisel väheneb indutseeritud vool ja pinget igas kolmandas ristühenduspunktis. Viimane tuleneb asjaolust, kus igas seksioonis on kaabli ekraan teiste suhtes erinevas positsioonis ning iga kolme seksiooni järel saavutatakse kolme kaabli suhtes võrdne paigutus. Kaabelliini ekraanide ristühendamine rohkemates ristühenduspunktides ning lühemate seksioonide tagant annab efektiivsemaid tulemusi ekraani indutseeritud voolude ja pingete alandamisele. Lisaks omab kaabelliini ristühendamine teatavat mõju ka liinis tekkiva pingelangu vähendamisel, kuna ekraanis ringlevate voolude vähendamisega tõuseb ka liini efektiivsus.

Ristühendamisest saadav positiivne mõju nõuab võimalikult sümmeetrilist kaabelliini süsteemi ning võrdseid seksioonide pikkusi liinil. Võrdsete pikkustega kaabelliini visangute saavutamiseks ühtlustab ekraani indutseeritud voolu ja pinget väärtusi seksioonide vahel ning iga kolme seksiooni järel moodustub sümmeetriliselt talitlev süsteem. Reaalsetes looduslikes oludes on ideaaltingimuste saavutamine peaaegu võimatu. Kaabelliini sümmeetriat rikub aga ka saatemaanduse kaasamine liini paigaldamisel. Saatemaanduse eesmärk on tagada pidev juhtiv ühendus maandussüsteemi ja liini otspunktide vahel. Saatemaanduse lisamine on oluline eelkõige

kaitse seisukohalt, kus paljas maandusjuht loob täiendava ahela maahendusvoolu kulgemiseks. Võimalikes rikkeolukordades vähendab see potentsiaali väärtust liini mõlemas otspunktis ning suurendab seeläbi süsteemi ohutust.

Erilisemat tähelepanu nõuavad liinid, mis koosnevad nii õhuliini juhtmetest kui ka kaablitest, kus ühelt liinitüübilt teisele üleminekul liini takistus muutub. Viimane mõjutab liigpingelaine leviku kulgu ja ulatust. Kombineeritud liinide puhul äratavad tähelepanu ka pikseliigpinged, mis õhuliinidelt levivad kaabelliinidesse. Lisaks kaablile võivad tekkivad liigpingeimpulsid avaldada mõju ka ristühenduspunktile ja nendes tehtud ühendustele.

Eesti elektrivõrgus planeeritavate kaabelliinide seisukohast tuleks määrata sobiv kaabelliini ekraaniühendusmeetod. Ristühendusmeetodit rakendatakse üldiselt pikemate kaabelliinide korral, kus kaabli ekraani indutseeritud pinge väärtus tõuseb üle lubatava piirmäära. Tallinna kaabelliinid on aga võrdlemisi lühikesed ja võiks eeldada, et ristühendusmeetodi rakendamine pole otseselt vajalik. Suures osas Tallinna kaabelliinides on aga rakendatud ekraanide ristühendusmeetodit. Ristühendusmeetodi rakendamine toob kaasa kõrgemad liini paigalduskulud ning ühtlasi on ka liini ehitus keerulisem ja aeganõudvam. Sellest tulenevalt tuleks analüüsida ristühendusmeetodi vajalikkust ja mõistlikkust Eesti kaabelvõrgu seisukohast.



## Kirjandus

- [1] F. da Silva. Analysis and Simulation of Electromagnetic Transients in HVAC Cable Transmission Grids. PhD Thesis, Aalborg University, 2011.
- [2] U. Gudmundsdóttir. Modelling of Long High Voltage AC Cables in Transmission Systems. PhD Thesis, Aalborg University, 2010.
- [3] T. Ohno. Dynamic Study on the 400 kV 60 km Kyndbyværket – Asnæsværket Line. PhD Thesis, Aalborg University, 2012.
- [4] D. Abey, G. Samson- Analysis of Transients in Wind Parks: Modeling of System Components and Experimental Verification. MSc Thesis, Chalmers University of Technology, 2008.
- [5] T. Abdulahović. Analysis of High-Frequency Electrical Transients in Offshore Wind Parks. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, 2011.
- [6] Tokyo Electric Power Company (TEPCO). Assessment of the Technical Issues relating to significant amounts of EHV Underground Cable in the All-island Electricity Transmission System. Public Report, Nov 2009
- [7] D.T.A. Kho, M.D. Greenwood, K.S. Smith. Analysis of Switching Over-voltages in a Three-ended 400 kV Cable System. 44<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009. Glasgow, 1-4 Sept 2009, pp. 1-5.
- [8] CIGRE Working Group C4.502. Power System Technical Performance Issues Related to the Application of Long HVAC Cables. October 2013
- [9] E.C. Bascom, V.D. Antonello. Underground Power Cable Considerations: Alternatives to Overhead. 47<sup>th</sup> Minnesota Power Systems Conference (MIPSYCON), 2011. Minnesota, 1-3 Nov 2011, pp. 1-10.
- [10] F. da Silva, C.L. Bak. Electromagnetic Transients in Power Cables. Springer, 2013.
- [11] M.Z. Daud. Transient Behaviour Modelling of Underground High Voltage Cable Systems. University of Wollongong, 2009.
- [12] J.C. Das. Transients in Electrical Systems. Analysis, Recognition, and Mitigation. McGraw Hill, 2010.
- [13] IEC 60071-2 Insulation co-ordination – Part 2: Application guide, 1996.

- [14] IEC 60071-4 Insulation co-ordination – Part 4: computational guide of insulation co-ordination and modelling of electrical networks, 2004.
- [15] A. Ametani, N. Nagaoka, Y. Baba, T. Ohno. Power System Transients. Theory and Applications. CRC Press, 2014.
- [16] T. Karasaki, T. Goto, A. Ametani. An Abnormal Overvoltage due to Load Rejection on EHV Underground Transmission Lines. IPST International Conference on Power Systems Transients 1995. Lisbon, 3-7 Sept 1995, pp 93-97.
- [17] NKTcables. Product information AXALJ-CL 64/110(123)kV 1x1600/60EQV
- [18] C.H. Chien, R.W.G. Bucknall. Harmonic Calculation of Proximity Effect on Impedance Characteristics in Subsea Power Transmission Cables. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.24, No.4, July 2009, pp. 2150-2158.
- [19] IEC 60287-1-1 Electric cables – Calculation of the current rating – Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, 2006.
- [20] U.R. Patel, P. Triverio. A Comprehensive Study on the Influence of Proximity Effects on Electromagnetic Transients in Power Cables. International Conference on Power Systems Transients IPST2015. Croatia, 15-18 June 2015, pp. 1-7.
- [21] R. Benato, A. Paolucci. EHV AC Undergrounding Electrical Power. Performance and Planning. Springer, 2010.
- [22] Manitoba HVDC Research Center. PSCAD Help System.
- [23] CIGRE Working Group 21.19. Technical Issues Regarding the Integration of HVAC Underground Cable Systems in the Network. 2002.
- [24] A. Morched, B. Gustavsen, M. Tartibi. A Universal Model for Accurate Calculation of Electromagnetic Transients on Overhead Lines and Underground Cables. IEEE Transactions on Power Delivery, 14 July 1999, pp. 1032–1038.
- [25] N. Watson, J. Arrilaga. Power Systems Electromagnetic Transients Simulation. IET Power and Energy Series, No.39, 2003.
- [26] X. Chen, K. Wu, Y. Cheng, L. Yan. Sheath Circulating Current Calculation and measurements of Underground Power Cables. 7<sup>th</sup> International Conference on Power Insulated Cables JICABLE'07. Versailles, 24-28 June 2007, pp 1-4.

- [27] IEEE 575 Guide for Bonding Shields and Sheaths of Single-Conductor Power Cables Rated 5 kV through 500 kV, 2014.
- [28] H. Halperin, K.W. Miller. Reduction of Sheath Losses in Single-Conductor Cables. Winter Convention of the A.I.E.E. New York, 28 Jan-1 Feb 1929, pp. 399-414.
- [29] XLPE Land Cable System. User's Guide. Rev 5. ABB, 2010.
- [30] C.C. Erven, K.G. Ringler. Development of Improved Sheath Crossbonding Joint Protectors for Self Contained Underground Cables. Canadian Electrical Association, 1986.
- [31] Elering AS. Eesti Elektrisüsteemi Normaalskeem. 21.01.2014.