



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
ELEKTROENERGEETIKA INSTITUUT

Elektrisüsteemi madalsageduslik võimsuse võnkumine ja sellega arvestamine releekaitstes

Elektroenergeetika õppekava

Energiasüsteemide õppetool

Magistritöö

Õppetooli hoidja	dots	Jako Kilter
Juhendaja	dots	Jako Kilter
Konsultant		Andrus Reinson
Lõpetaja		Marko Tealane

Tallinn 2016

Autorideklaratsioon

Deklareerin, et käesolev lõputöö, mis on minu iseseisva töö tulemus, on esitatud Tallinna Tehnikaülikooli elektroenergeetika instituudile haridusastme lõpudiplomi taotlemiseks elektroenergeetika erialal. Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Lõpetaja (allkiri ja kuupäev) _____

Lõputöö kokkuvõte

<i>Autor:</i> Marko Tealane	<i>Lõputöö liik:</i> Magistritöö
<i>Töö pealkiri:</i> Elektrisüsteemi madalsageduslik võimsuse võnkumine ja sellega arvestamine releekaitstes	
<i>Kuupäev:</i> 27.05.2016	88 lk
<i>Ülikool:</i> Tallinna Tehnikaülikool <i>Teaduskond:</i> Energeetikateaduskond <i>Instituut:</i> Elektroenergeetika instituut <i>Õppetool:</i> Energiasüsteemide õppetool	
<i>Töö juhendaja(d):</i> dotsent Jako Kilter <i>Töö konsultant (konsultandid):</i> Andrus Reinson	
<i>Sisu kirjeldus:</i> <p>Käesoleva lõputöö eesmärgiks on uurida elektrisüsteemi madalsageduslikke võimsuse võnkumisi ja releekaitse toimimist võnkumise olukorras elektrisüsteemi mudelil ning kontrollida Eesti ülekandevõrgu releekaitse häälestust võimsuse võnkumise olukorrale.</p> <p>Töös tutvustatakse elektrisüsteemi kui terviku talitlust, selle erinevaid võimalikke olekuid ja nende talitluste arvutamise võimalusi. Uuritakse elektrisüsteemi stabiilsust, täpsemalt elektrisüsteemi staatilist ja dünaamilist stabiilsust, sest võimsuse madalsageduslikku võnkumist ei ole võimalik kirjeldada ilma elektrisüsteemi dünaamikat mõistmata.</p> <p>Töös keskendutakse täpsemalt madalsageduslike võnkumiste poolt põhjustatud murekohtadel elektrisüsteemi releekaitse juures. Selleks modelleeritakse esmalt elektrisüsteemi madalsageduslikke võnkumisi ja vaadeldakse samal ajal releekaitse toimimist lihtsas elektrisüsteemis. Seejärel modelleeritakse võnkumisi ja vaadeldakse kaitsete toimimisi keerukas võrgus Eesti elektrisüsteemi näitel.</p> <p>Töö tulemusena võib öelda, et kõrgepingevõrkudes tuleb releekaitstes kasutada distantskaitse blokeerimist, et vältida kaitsete liigset rakendumist võimsuse võnkumiste olukordades. Eesti ülekandevõrgu releekaitse häälestus võimsuse madalsageduslike võnkumiste suhtes on väga hea.</p>	
<i>Märksõnad:</i> madalsageduslik võimsuse võnkumine, distantskaitse, staatiline stabiilsus, dünaamiline stabiilsus, näivtakistus	

Summary of the Diploma Work

<i>Author:</i> Marko Tealane	<i>Kind of the work:</i> Master's Thesis
<i>Title:</i> Low frequency power oscillations in a power system and consideration of the phenomena in relay protection	
<i>Date:</i> 27.05.2016	88 pages
<i>University:</i> Tallinn University of Technology <i>Faculty:</i> Faculty of Power Engineering <i>Department:</i> Department of Electrical Power Engineering <i>Chair:</i> Power systems	
<i>Tutor(s) of the work:</i> Associate Professor Jako Kilter <i>Consultant(s):</i> Andrus Reinson	
<i>Abstract:</i> The aim on this thesis is to show the phenomena of low frequency power oscillations in a power system, study the operation of relay protection under oscillating conditions using a power system model and check the tuning of relay protection in Estonian power system. In this thesis the operation of power system and its possible states and the calculation of these states is introduced. Power system stability, specifically static and transient stability is examined, because it is impossible to talk about low frequency oscillations without talking about power system dynamics. This thesis is focused on problems regarding relay protection under power system oscillating conditions. To study this at first a simple power system is modelled and operation of relay protection is examined in the small system under power oscillation conditions. Then power oscillations are modelled in a complex power system using Estonian power system as an example and the effect of power oscillations on relay protection is examined. As a result of this thesis it can be said that in high voltage power systems it is essential to block distance protection during power swings to prevent incorrect operations. Tuning of relay protection for low frequency oscillations in Estonian power system is very good.	
<i>Key words:</i> power swing, distance protection, static stability, transient stability, apparent impedance	

Sisukord

Lõputöö ülesanne.....	6
Eessõna	8
Sissejuhatus.....	9
1. Elektrisüsteemi võimsuse võnkumised	11
1.1. Elektrisüsteem.....	11
1.1.1 Elektrisüsteemi talitus	11
1.1.2 Talitluse arvutused	12
1.2. Elektrisüsteemi stabiilsus.....	13
1.2.1 Staatiline stabiilsus	16
1.2.2 Dünaamiline stabiilsus	21
1.3. Võimsuse võnkumise probleemi olemus	26
1.3.1 Võnkumiste tekke ajaloost	27
2. Võimsuse võnkumise mõju releekaitsele	30
2.1. Distantkaitse tööpõhimõtted.....	30
2.2. Võimsuse võnkumise mõju distantkaitsele.....	32
2.3. Distantkaitse blokeerimine võimsuse võnkumise korral	37
2.4. Sünkronismi kaotus ja releekaitse.....	39
3. Elektrisüsteemi võnkumiste modelleerimine	42
3.1. Võimsuse võnkumise modelleerimine ja kaitsete käitumine lihtsa elektrisüsteemi korral..	42
3.1.1 Ühe ühendusliini väljalülitumine	43
3.1.2 Lühise olukorra modelleerimine summutuseta.....	45
3.1.3 Lühise olukorra modelleerimine summutustegureid arvestades.....	48
3.2. Võimsuse võnkumise modelleerimine ja kaitsete käitumine keeruka süsteemi korral Eesti süsteemi näitel.....	51
3.2.1 Eesti elektrisüsteem.....	51
3.3. Modelleeritavad võrguolukorrad.....	52
3.3.1 Suvine miinimumkoormus ja nulltransiit	54
3.3.2 Suvine miinimumkoormus ja suvine maksimaalne transiit	61
3.3.3 Talvine maksimaalne tarbimine ja nulltransiit	68
3.3.4 Talvine maksimaalne tarbimine ja transiit.....	75
Kokkuvõte	83
Lisad	86

Lõputöö ülesanne

Lõputöö teema:	Elektrisüsteemi võimsuste võnkumine ja sellega arvestamine releekaitstes
Üliõpilane:	Marko Tealane, 144174AAVM
Lõputöö juhendaja:	Dotsent Jako Kilter
Õppetool:	Energiasüsteemide õppetool
Õppetooli hoidja:	Jako Kilter
Lõputöö esitamise tähtaeg:	27.05.2016

Üliõpilane (allkiri)

Juhendaja (allkiri)

Õppetooli juhataja (allkiri)

Teema põhjendus:

Seoses elektri vaba turuga on võrgu ülekandevõimsuse kasutus viimastel aastatel suurenenud, seega viiakse elektrisüsteem lähemale piirsituatsioonile, kus ülekandevõimsust kahe piirkonna vahel enam ei jätku ning võib esineda nende omavahelist võimsuse võnkumist. Sellises olukorras tuleb vältida releekaitse liigrakendumist ja elektrituru edasist piiramist. Teemat tuleb uurida, et täpsemini mõista releekaitse toimimist ja liigse rakendumise vältimist võimsuste võnkumise olukorras.

Töö eesmärk:

Töö eesmärgiks on uurida võimsuste võnkumisi elektrisüsteemis ja selle olukorra arvesse võtmist releekaitstes.

Lahendamisele kuuluvate küsimuste loetelu:

Võimsuste võnkumise olemus elektrisüsteemis;

Stabiilse ja ebastabiilse võnkumise tingimused;

Võimsuste võnkumise olukorra arvestamine releekaitstes;

Lähteandmed:

- Kirjandusest
- Juhendajalt
- Internetist
- Elering AS-lt
- Konsultandilt

Lõputöö konsultandid (vajadusel):

Andrus Reinson – elektrisüsteemi modelleerimine, tarkvara ja releekaitse konsultatsioon

Konsultandi nimi (allkiri, kuupäev)

Eessõna

Lõputöö teema anti välja Elering AS Releekaitse ja automaatika talitluse juhataja Andrus Reinsoni initsiatiivil. Samuti ajendas autorit antud teemaga tegelema tööalane huvi. Magistritöö koostamine ja algandmete kogumine toimus Elering AS-is, kus autor magistritöö kirjutamise ajal ka täiskohaga töötas. Vajalike andmete kogumisega abistasid juhendaja Jako Kilter ning töö konsultant Andrus Reinson. Lõputöö autor tänab lõputöö kirjutamisel suureks abiks olnud juhendajat Jako Kilterit konsultanti Andrus Reinsoni ja kõiki teisi abistajaid.

Lõputöö autori alaline elukoht on Põhja 13-2, Väike – Maarja, Lääne – Virumaa, 46202.

Töökoht Elering AS, Releekaitse ja automaatika talitus, Siirdetalitluse analüütik.

Sissejuhatus

Seoses elektri vaba turuga on võrgu ülekandevõimsuse kasutus piirsituatsioonides viimastel aastatel suurenenud, kus ülekandevõimsust kahe piirkonna vahel enam ei jätku ning võib esineda nende omavahelist võimsuse võnkumist. Võimsuse võnkumise olukord võib kujutada endas ohtu elektrisüsteemi edasisele talitlusele. Antud töö eesmärgiks on esmalt luua teoreetiline ülevaade elektrisüsteemi võimsuse võnkumisprotsessist. Seejärel vaadelda võimsuse võnkumise protsessi elektrisüsteemis releekaitse seisukohalt. Pärast teoreetiliste alustega tutvustamist modelleeritakse esmalt võnkeprotsesse lihtsa elektrisüsteemi korral ning seejärel ka keerukas elektrisüsteemis Eesti näitel ja vaadeldakse paralleelselt ka releekaitset, kus kontrollitakse releekaitse sätete praeguse arvutusmetoodika paikapidavust dünaamilises võrguolukorras. Eesti näitel modelleerimiseks on kasutatud elektrisüsteemi ning releekaitse mudeleid, mis on saadud Elering AS-ilt.

Antud teema on tähtis, kuna võrgu suuremast kasutusest tingituna on madalsageduslike võimsuse võnkumise olukord tõenäoline tekkima. Seejuures tuleb vaadelda, et releekaitse seisukohalt ei tekiks olukorda, kus kaitse liigrakendumise tõttu halvendatakse kogu elektrisüsteemi kui terviku edasist talitlemist.

Käesoleva magistritöö esimeses peatükis kirjeldatakse lühidalt elektrisüsteemi kui terviku talitlemist, selle erinevaid olemusi ning nende võimalikke arvutusi. Tuuakse põhialused elektrisüsteemi staatilisest ja dünaamilisest stabiilsusest ja nende olemustest. Esmalt tutvustatakse teoreetilisi aluseid staatilise stabiilsuse kohta lihtsas elektrisüsteemis, mis koosneb ainult ühest generaatorist, lõpmata võimsast süsteemist ning neid ühendavast võrgust. Seejärel vaadeldakse keerukaid elektrisüsteeme. Staatilise stabiilsuse järel tutvustatakse teoreetilisi aluseid elektrisüsteemi dünaamilise stabiilsuse kohta esmalt lihtsa elektrisüsteemi korral ning seejärel keeruka elektrisüsteemi korral. Samuti näidatakse generaatori ja turbiini võimsuse muutumisi ning tuuakse välja stabiilsed ning ebastabiilseid võnkumisi elektrisüsteemis ning nende tekkepõhjuseid. Peatüki lõpus on näiteid võimsuste võnkumise kohta ajaloost.

Töö teises peatükis tutvustatakse teoreetilisi aluseid releekaitse ja selle käitumise kohta elektrisüsteemi võimsuse võnkumise olukorras. Tuuakse välja, mis on ohud releekaitse liigrakendumise korral võimsuse võnkumise olukorras ning kuidas tekib olukord, kus saab toimuda liigrakendumine. Samuti tutvustatakse võimalusi, kuidas releekaitse liigrakendumist

ära hoida. Peatüki lõpetuseks tuuakse teoreetilised alused releekaitse toimimise kohta sünkronismi kaotuse ja elektrisüsteemi asünkroonse talitluse olukorras.

Töö viimases peatükis modelleeritakse elektrisüsteemi võimsuse võnkumisi võrguarvutustarkvaras PSS/E (*Power system simulator*). Esmalt modelleeritakse lihtsat elektrisüsteemi, kus vaadeldakse nii staatilist stabiilsust kui dünaamilist stabiilsust. Dünaamilise stabiilsuse korral vaadeldakse kahte erinevat olukorda. Esmalt olukorda, kus süsteemis puudub sumbuvus ning seejärel olukorda, kus elektrisüsteemis on sumbuvus. Samuti vaadeldakse elektrisüsteemi kaitsete mõõtetulemusi kasutades tarkvara CAPE (*Computer Aided Protection Engineering*). Tarkvarade ühendamiseks kasutatakse moodulit TS-Link (*Transient stability link*), millega ühendatakse PSS/E dünaamiline võrguarvutus ning CAPE kaitsete modelleerimine. Peatüki teises pooles modelleeritakse keerukat elektrisüsteemi ja selle võnkeprotsesse ja dünaamilist stabiilsust Eesti elektrisüsteemi näitel, et kontrollida Eesti releekaitse häälestust ja sättearvutamise meetoodika paikapidavust võimsuse võnkumise olukorras. Praeguse arvutusmeetoodika järgi arvutatakse releekaitse sätteid kasutades staatilist pingeprofiili, kus võrgupinge on konstantne, ülimööduvaid lühisvoole ja ülimööduvaid lühistakistusi. Töö käigus vaadeldakse arvutatud kaitsetsätetega releede toimimist võrguolukorras, kus pinged muutuvad dünaamiliselt ja kontrollitakse praeguse arvutusmeetoodika sobivust. Modelleeritakse kokku nelja situatsiooni keeruka elektrisüsteemi korral ning iga situatsiooni juures modelleeritakse kahe erineva pikkusega lühiseid. Igal simulatsioonil vaadeldakse lisaks elektrisüsteemi võimsuse võnkumisprotsessidele ka releekaitse mõõtetulemusi kasutades sama tarkvara, mis lihtsa elektrisüsteemi korral.

1. Elektrisüsteemi võimsuse võnkumised

Et oleks võimalik rääkida elektrisüsteemi võimsuse võnkumistest tuleb esmalt tutvustada elektrisüsteemi kui tervikut, selle talitlust ja võimalikke olekuid. Antud peatüki alustuseks tutvustatakse lugejale elektrisüsteemi talitlust ja erinevate talitluste arvutamise viise, seejärel liigutakse edasi elektrisüsteemi stabiilsuse juurde. Viimaks tutvustatakse lugejale elektrisüsteemi võimsuste võnkumise probleemi olemust ja vaadeldakse probleemi teket ajaloolises perspektiivis.

1.1. Elektrisüsteem

Elektrisüsteem koosneb elektrit tootvatest elementidest, elektrit tarbivatest elementidest ning neid ühendavast elektrivõrgust. Elektrisüsteemi töötamist mõjutavad paljud elemendid ning elektrisüsteemi seisund on ajas muutuv. Järgnevalt vaadeldakse elektrisüsteemi talitlust ning selle arvutamise võimalusi.

1.1.1 Elektrisüsteemi talitlus

Elektrisüsteemi talitluse all peetakse silmas elektrisüsteemi seisundi ajas muutumist, mis iseloomustab elektrienergia tootmist, ülekandmist ja tarbimist ning on määratud seisundiparameetritega nagu näiteks pinge, vool, võimsus ja nurgad. Talitlusi liigitatakse normaalseteks, raskendatuteks, avariilisteks ja avariijärgseteks. [1]

Normaaltalitlusel tagatakse tarbijatele toite töökindlus, elektrienergia kvaliteet ning elektrivarustuse ökonoomsus. Raskendatud talitlusel on üks või mitu seisundimuutajat väljunud lubatud piiridest. Avariitalitluses ilmneb ootamatult lühiste korral või tuleneb raskendatud talitlusest. Avariitalitus tuleb võimalikult kiiresti likvideerida. Avariijärgsesse talitlusse satub süsteem pärast avariitalitluse likvideerimist. Avariijärgne talitus on tavaliselt raskendatud talitus, mistõttu avariid kordumise vältimiseks tuleks võimalikult kiiresti taastada normaaltalitlus. [1]

Sõltuvalt seisundiparameetrite muutumise kiirusest ja ulatusest liigitatakse talitlusi järgmiselt: [1]

- Püsitalitus – seisundiparameetrid muutuvad väikestes piirides ja suhteliselt aeglaselt. Siia alla kuuluvad normaal-, kriitilised ja avariijärgsed talitlused. Elektrisüsteem viibib põhilise aja püsitalitluses. Püsitalitluses võib seisundiparameetrid lugeda pikema aja

jooksul konstantseteks, seega räägitakse püsitalitluse analüüsi asemel sageli püsiseisundi analüüsist;

- Siirdetalitlust iseloomustab parameetrite kiire muutumine suurtes piirides. Siirdetalitlust iseloomustavad elektromagnetilised ja elektromehaanilised siirdeprotsessid. Siirdetalitlustest tekivad tavaliselt avariolukordades. Avariitalitluse kestus võrreldes normaal-, kriitilise ja avariijärgse talitlusega on suhteliselt lühike.

1.1.2 Talitluse arvutused

Elektrisüsteemi talitluse arvutamiseks on vaja järgmisi lähteandmeid [1]:

- Koormuse koosseis ja muutused ajas;
- Elektriliinide ehitus ja koormatavus;
- Trafod, nende ehitus ja reguleeritavus;
- Generaatorid ja nende regulaatorid;
- Elektrivõrgu kompenseerimisseadmed ja nende regulaatorid.

Dünaamiliste protsesside arvutamiseks vajatakse enam andmeid kui staatiliste olukordade arvutamiseks. Enamasti on piisava täpsusega teada passiivsete komponentide nagu näiteks liinid ja trafod, andmed. Seevastu koormuse kohta on andmeid vähem. Kasutatakse statistikat ja kogemusi. Olulisimad arvutused on [1]:

- Püsitalitluse arvutamine;
- Lühisvoolude arvutamine;
- Stabiilsuse hindamine;
- Talitluse estimateerimine;
- Koormusjaotuse optimeerimine;
- Kadude minimeerimine.

Püsiseisundi arvutus on üks sagedamini sooritatavaid arvutusi elektrisüsteemi talitluse juhtimisel ja analüüsil. Püsiseisundit arvutatakse nii iseseisvalt kui teiste ülesannete osana. Sellel on oluline koht plaaneerimis – ja projekteerimisarvutustes. [1]

Lühisvoolude arvutamisel selgitatakse välja lühisvoolude maksimaalsed ja minimaalsed väärtused, mis on aluseks seadmete lühistaluvuse ja releekaitse toimimise hindamisel. Arvutustes leitakse lühisvoolu suurim võimalik hetkväärtus. [1]

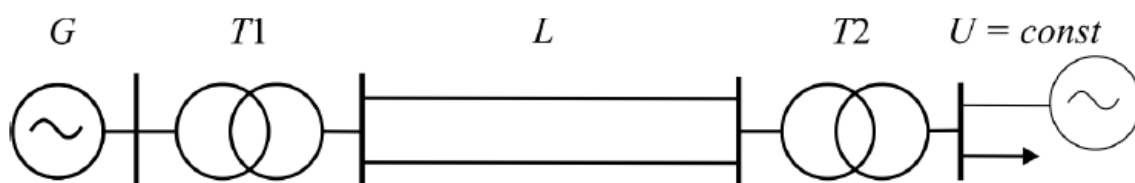
Stabiilsuse all mõistetakse elektrisüsteemi võimet jätkata normaalset tööd pärast talitluse häiringuid. Eristatakse sünkroonset ja pingestabiilsust. Võimalik on ka sageduse mittestabiilsus. Süsteemi võimet jätkata normaalset tööd pärast väikeseid häiringuid nimetatakse staatiliseks stabiilsuseks ning võimet töötada pärast suuri häiringuid dünaamiliseks stabiilsuseks. Elektrisüsteem on äärmiselt ebalineaarne süsteem, mille dünaamikat mõjutavad väga paljud seadmed. Süsteemi stabiilsust ei tohiks vaadata kui ühte probleemi, vaid tema erinevatest aspektidest lähtuvalt. [1] [2]

1.2. Elektrisüsteemi stabiilsus

Elektrisüsteemi võimsuste võnkumisest ei saa rääkida enne, kui on selgitatud elektrisüsteemi stabiilsuse mõistet, sest sisuliselt on võimsuste võnkumise näol tegu elektrisüsteemi stabiilsusega.

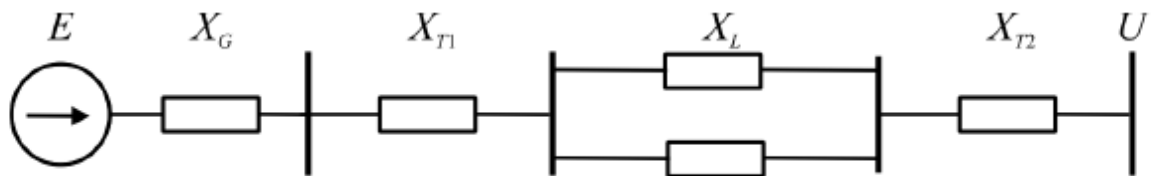
Tutvumist stabiilsuse probleemidega on otstarbekas alustada lihtsast elektrisüsteemist. Sellise süsteemi kohta tehtud tähelepanekuid on võimalik hiljem edasi kanda ka keerukatele süsteemidele.

Kirjanduses [1] on toodud lihtne elektrisüsteem, mida kujutatakse joonisel 1.1. Antud lihtne süsteem koosneb elektrijaamast (ekvivalentsest generaatorist), ülekandeseadmetest ja lõpmata võimsast energiat vastu võtvast elektrisüsteemist. Lõpmata võimsat süsteemi iseloomustab konstante pinge U lattidel, sõltumata üksiku elektrijaama talitlusest.



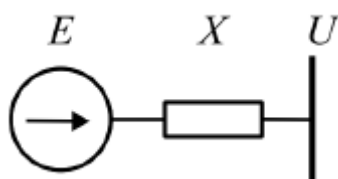
Joonis 1.1. Lihtne elektrisüsteem [1]

Skeemi aktiivtakistused siinkohal ei arvestata, sest nad on võrreldes reaktiivtakistusega tühised. Asendades skeemi elemendid reaktiivtakistustega, saame kogu elektrisüsteemi lihtsustatud aseskeemi joonisel 1.2.



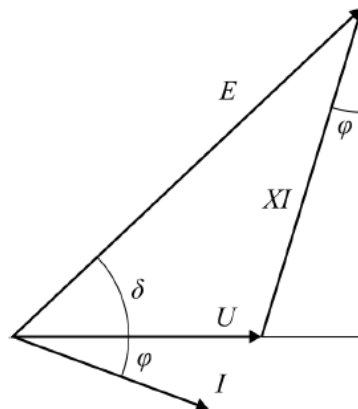
Joonis 1.2. Lihtsustatud elektrisüsteemi aseskeem [1]

Aseskeemi teisendamisel liidetakse takistused omavahel ning kujutatakse summaarset takistust ühe ekvivalentse takistusena. Saadakse lihtsustatud skeem, mis on kujutatud joonisel 1.3.



Joonis 1.3. Lihtsustatud ekvivalentne aseskeem [1]

Koostatakse aseskeemile ja seega lihtsale elektrisüsteemile vastav vektordiagramm, mis on toodud joonisel 1.4.



Joonis 1.4. Aseskeemi vektordiagramm [1]

Vastavalt aseskeemi vektordiagrammile tuletatakse järgnevad seosed:

$$E \sin \delta = XI \cos \varphi$$

$$\frac{EU}{X} \sin \delta = IU \cos \varphi$$

$$P = \frac{EU}{X} \sin\delta \quad (1.1)$$

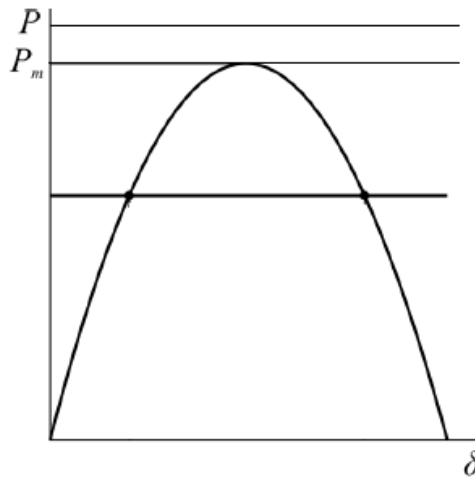
Ekvivalentse generaatori (elektrijaama) võimsuse P muutumisel, mis saavutatakse turbiini klappide avamise või sulgemisega, jääb süsteemi takistus ilmselt muutumatuks. Eelduste kohaselt on muutumatu ka lõpmata võimsa süsteemi latipinge U ning kui puudub automaatne ergutusregulaator, siis ka elektromotoorjõud. Generaatori võimsuse kasvamisega suureneb elektromotoorjõu ja pinge vaheline nurk δ ning vastupidi, kui võimsus kaheneb, siis nurk väheneb. [1]

Võib ette kujutada, et elektromotoorjõu vektor on jäigalt seotud generaatori rootoriga. Rootori mehaanilise nurga muutumisel muutub vastavalt ka vektori E asend ja nurk δ . Nurgal δ on seega nii elektriline kui mehaaniline sisu, millest tuleneb selle nurga eriline koht elektromeaaniliste siirdeprotsesside kirjeldamisel. [1]

Võimsuse sõltuvust nurgast δ nimetatakse nurkkarakteristikuks ning kui generaatori elektromotoorjõud, vastuvõtva süsteemi pinge ja neid ühendav takistus on konstantsed, on nurkkarakteristik valemi 1.1 kohaselt siinusoid, mille amplituudiks on $P_m = \frac{EU}{X}$. [1]

Sellele kõverale turbiini mehaanilise võimsuse kandmisel saadakse generaatorile püsitalitluse tööpunktid, sest generaatori elektriline ja turbiini mehaaniline võimsus peavad olema sama suured. Generaatori maksimaalne võimsus saavutatakse kui nurk $\delta = 90^\circ$. Turbiini mehaaniline võimsus sõltub turbiini läbivast aurust, mitte nurgast δ , siis käsitletakse turbiini mehaanilist võimsust graafikul horisontaalse joonena. Sellisel juhul on kolm olukorda võimalikud, mida on näha joonisel 1.5 [3]:

1. Turbiini mehaaniline võimsus on suurem kui generaatori elektriline võimsus. Sellises olukorras ei ole võimalik generaatori püsitalitus;
2. Turbiini mehaaniline võimsus on võrdne generaatori elektrilise võimsusega. Sellises olukorras on generaatori püsitalitusel ainult üks võimalik tööpunkt;
3. Turbiini mehaaniline võimsus on madalam, kui generaatori maksimaalne elektriline võimsus. Sellisel juhul eksisteerib generaatoril kaks tööpunkti ning selline olukord vastab generaatori normaalsele tööle.



Joonis 1.5. Võimalikud generaatori ja turbiini võimsuste olekud [1]

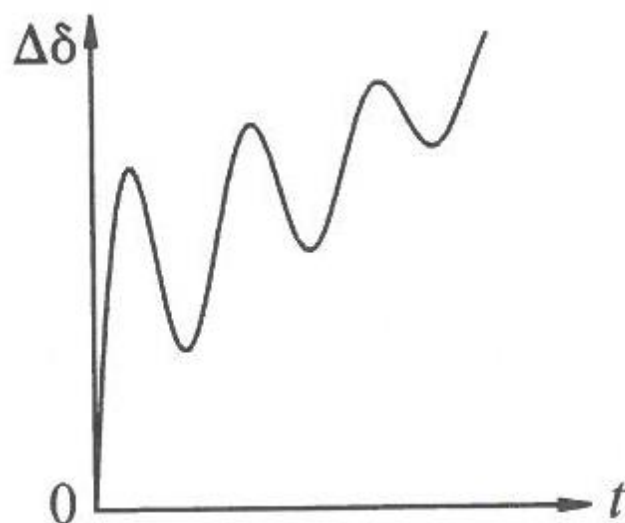
Siit on võimalik teha järeldus, et lihtsas elektrisüsteemis ekvivalentsest generaatorist (elektrijaamast) vastuvõtvasse süsteemi ülekantav võimsus ei saa ületada suurimat väärtust P_m , mis on määratud nii generaatori kui ka ülekandeseadmete parameetritega. [1]

1.2.1 Staatiline stabiilsus

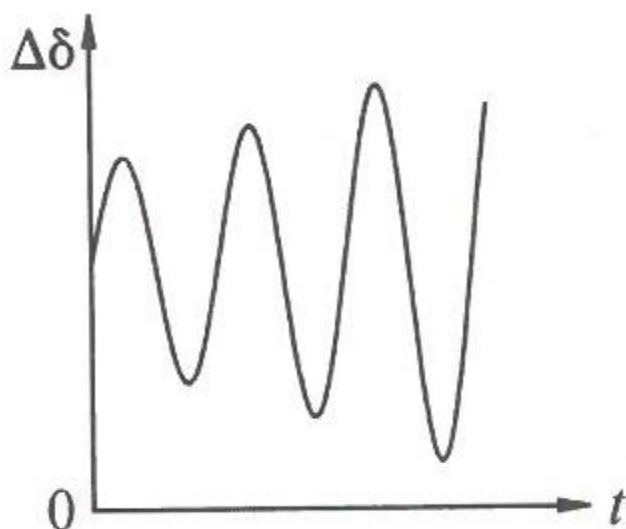
Kirjanduse [2] kohaselt on staatiline stabiilsus elektrisüsteemi võime jätkata sünkroonset tööd pärast väikseid häiringuid. Sellised häiringu toimuvad süsteemis muutuva koormuse ja tootmise tõttu kogu aeg. Häiringuid peetakse piisavalt väikesteks, et süsteemivõrrandeid on võimalik analüüsida lineaarseerida. Ebastabiilsus avaldub kahel kujul:

1. Tekib pidev rootori nurga suurenemine väikese sünkroniseeriva momendi tõttu;
2. Tekivad suureneva amplituudiga rootori võnkumised väikese süsteemi summutusvõime tõttu.

Süsteemi reageerimine väikestele häiringutele sõltub paljudest faktoritest, mille seas on näiteks häiringule eelnev tööolukord ja ülekandevõrgu tugevus. Generaatoril, mis on radiaalselt ühendatud tugeva süsteemi külge, automaatse pingeregulaatori puudumisel tekib ebastabiilsus väikese sünkroniseeriva momendi tõttu. Selle tulemusel tekib ebastabiilsus nurga δ pideva suurenemise tõttu, mida on näha joonisel 1.6. Kui aga generaatoril kasutatakse automaatset pingeregulaatorit, siis staatilise stabiilsuse säilitamine seisneb piisava summutusvõime olemasolus, milleks kasutatakse summutusmähiseid. Kui süsteemis puudub piisav summutusvõime tekib suureneva amplituudiga võnkuv ebastabiilsus, mida illustreerib joonis 1.7. [2]



Joonis 1.6. Mittevõnkuga iseloomuga ebastabiilsus väikeste häiringute korral [2]



Joonis 1.7. Võnkuga iseloomuga ebastabiilsus väikeste häiringute korral [2]

Vastavalt kirjandusele [2] seisneb tänapäeva reaalsete elektrisüsteemide staatilise stabiilsuse probleem laialdaselt süsteemi puudulikus võimes võnkumisi summutada. Probleemideks on järgmist tüüpi võnkumiste tüübid:

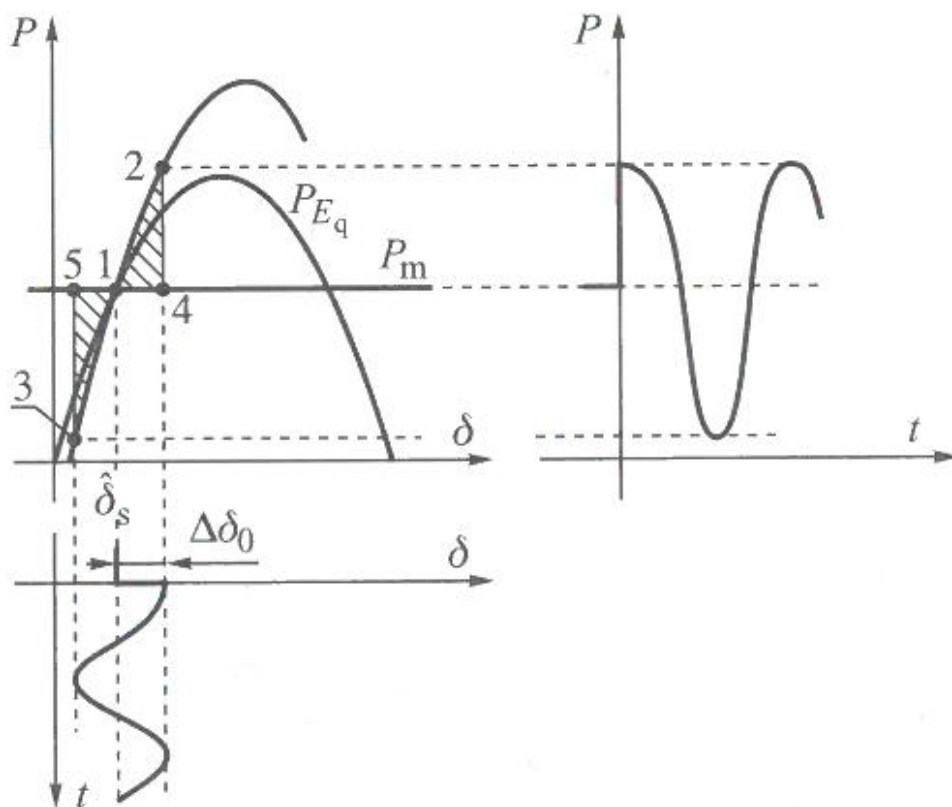
- Lokaalne või masina süsteemi võnkumine. Sellist tüüpi võnkumist seostatakse üksuste võnkumisega ühes elektrijaamas, kus ühe jaama masinad võnguvad vastu tervet ülejäänud süsteemi. Lokaalseks nimetatakse seda sellise võnkumise väikese ulatuse tõttu;
- Alasisesed võnkumised. Sellist tüüpi võnkumist iseloomustab ühes süsteemi osas oleva grupi masinate võnkumine teises süsteemi osas oleva grupi masinate vastu. Tavaliselt on põhjuseks kahe lähedase jaama nõrk omavaheline ühendus;
- Kontrollsüsteemidest tingitud võnkumised. Neid seostatakse halvasti seadistatud ergutite, turbiini kiirusregulaatorite ja muu juhtimisaparatuuriga;
- Väändevõnkumised. Seostatakse turbiin-generaatori võllisüsteemi pöörlevate komponentidega. Tavaliselt selliste võngete tekkepõhjuseks on ergutuse, turbiini regulaatorite juhtimine.

Allika [3] kohaselt indutseerib iga häiring generaatori rootori mähisesse lisavoolu, selleks, et säiliks ühtlane magnetvoo sidestatus ja seega konstantne generaatori elektromotoorjõud. Kuna sünkroonne elektromotoorjõud järgib muutuseid väljast poolt indutseeritud voolule, ei saa enam eeldada, et generaatori elektromotoorjõud oleks konstantne ja seega kõikide rootoris toimivate muutuste käigus peab generaatori väljundvõimsuse nurkkarakteristik järgima mööduvast elektromotoorjõust sõltuvat funktsiooni $P_e = P_{E'}(\delta)$.

Väikesed häiringud tekitatakse eelpool mainitud lihtsas elektrisüsteemis näiteks turbiini mehaanilise võimsuse suurenemisel või elektrisüsteemi ekvivalentse takistuse vähenemisel. Seda illustreerib rootori nurga δ muutus stabiilsest punktist $\widehat{\delta}_s$ mingisugusele uuele väärtusele ($\widehat{\delta}_s + \Delta\delta_0$). Kuigi selline häiring on tehnilisest seisukohast ebatõenäoline, võimaldab sellise häiringu ettekujutus tutvustada ideesid, mis on põhilised mõistmaks teiste reaalsete häiringute toimimise mehhanisme. Et vaadelda häiringu mõju lihtsas süsteemis tuleb lahendada diferentsiaalvõrrandid. Süsteemi diferentsiaalvõrrandite lahendamiseks eeldusteks on:

$$\Delta\delta(t = 0^+) = \Delta\delta_0 \neq 0, \quad \Delta w(t = 0^+) = \Delta\omega_0 = 0$$

Generaatori käitumist sellisele häiringule illustreerib joonis 1.8, kus on välja toodud generaatori sünkroonne nurkkarakteristik kui ka generaatori mööduv nurkkarakteristik. Kuna häiring ei saa lõhkuda rootori ja staatori vahelist magnetvoo sidestatust, siis esmane (häiritud) tööpunkt asub joonisel punktis 2 mööduval nurkkarakteristikul $P_{E'}(\delta)$, mis läbib ka häiringueelset tööpunkti 1.



Joonis 1.8. Generaatori nurkkarakteristik, väljundvõimsus ja nurk häiringu korral [3]

Igasugune liikumine vajab töö tegemist, seega ka rootori nurga liigutamisel stabiilsest punktist $\hat{\delta}_s$ punkti $\hat{\delta}_s + \Delta\delta_0$ teeb häiring tööd rootoril. Ringjoonelisel liikumisel on töö võrdne integraalsummaga jõumomendist ja nurga muutusest. Praegusel juhul jõumoment on võrdne turbiini mehaanilise ja rootori (mööduva) elektrilise võimsuse vahega. Kuna võimsus on võrdne jõumomendi ja nurkkiiruse korrutisega ning eeldades, et $\omega \approx \omega_s$, siis häiringu poolt tehtav tööhulk on [3]:

$$W_{1-2} = \int_{\hat{\delta}_s}^{\hat{\delta}_s + \Delta\delta_0} [P_{E'}(\delta) - P_m] d\delta = S(1 - 2 - 3) \quad (1.2)$$

Kuna rootori kiiruse erinevus $\Delta\omega$ punktis 2 on eelduste kohaselt 0, siis rootori kineetiline energia on võrdne punktis 1 oleva kineetilise energiaga. See tähendab, et häiringu poolt tehtav töö W suurendab süsteemi potentsiaalset energiat esmase tööpunkti 1 suhtes.

See esmane potentsiaalne energia annab tõuke, et liigutada rootorit tagasi tasakaalupunkti 1. Häiritud punktis 2 on mehaaniline pöördemoment väiksem, kui selle vastu töötav elektriline

moment, mille tulemusel tekib rootori aeglustumine sünkroonkiiruse suhtes ja rootori nurk δ hakkab vähenema. Tasakaalupunktis 1 kogu valemist 1.2 saadud potentsiaalne energia on muudetud kineetiliseks energiaks (sünkroonkiiruse suhtes) ja tehtud töö on võrdne [3]:

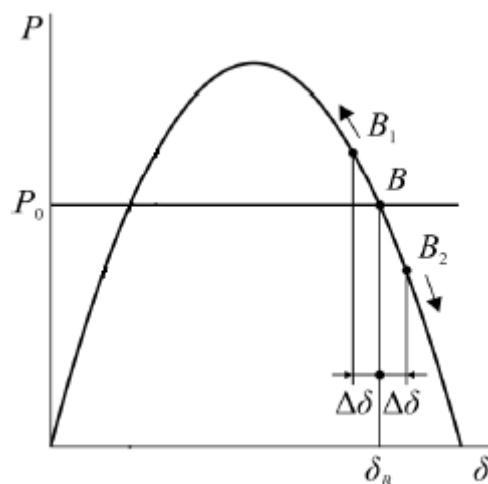
$$E_k = W_{1-2} = \frac{1}{2} M \Delta \omega^2 \quad (1.3)$$

Nüüd kineetiline energia liigutab rootori mööda tasakaalupunkti $\widehat{\delta}_s$, nii et tööpunkt liigub edasi mööda kaart 1-3. Sellel osal karakteristikust on turbiini mehaaniline moment suurem kui selle vastu töötav elektriline moment ja rootorit hakatakse kiirendama. Kiirendamine toimub kuni kiirendava momendi poolt tehtud töö on võrdne eelnevalt aeglustamise poolt tehtud tööga. See juhtub punktis 3.

Selles punktis on jällegi generaatori kiirus võrdne sünkroonkiirusega, kuid tingimuse $P_m > P_E$, tõttu rootori kiirenemine jätkub, suurendades selle kiirust üle sünkroonkiiruse, sellega liigutades tööpunkti tagasi $\widehat{\delta}_s$ poole. Summutuse puudumisel rootor võngub pidevalt punktide 2 ja 3 vahel. Resulteeruv võimsuse võnkumine on toodud joonise 1.8 parempoolsel osal ning nurga võnkumine joonise 1.8 alumisel osal. [3]

Generaatori väljundvõimsuse võnkumine toimub tavaliselt sagedusega alla ühe hertsi. Reaalselt sumbuvad sellised võnkumised kadude ning summutusmähiste tõttu.

Siiani vaadeldi seisundit, kus generaatori tööpunkt asus nurkkarakteristikul karakteristikute tõusval osal. Kirjanduses [1] on kirjeldatud teist olukorda, kus vaadeldakse graafiku langeval osal paiknevat tööpunkti, mis on toodud joonisel 1.9. Kui tööpunkt nihkub punktist B punkti B_1 , siis antakse generaatori poolt välja rohkem energiat kui turbiinilt saadakse. Selline protsess on võimalik ainult rootori kineetilise energia arvelt ning rootorit pidurdatakse. Tulemuseks on nurga δ vähenemine ja tööpunkti edasine nihkumine eemale esmasest tööpunktist B . Ka siis kui tööpunkti nihutatakse punktist B häiringu tulemusel punkti B_2 , ei taastu lähteseisund. Siit võib teha järelduse, et sellisele tööpunktile B vastav seisund on mittestabiilne. Võib tuletada staatilise stabiilsuse matemaatilise kriteeriumi. Kuna stabiilsed tööpunktid asuvad nurkkarakteristiku tõusval osal, siis staatilise stabiilsuse kriteeriumiks võib lugeda $\frac{\Delta P}{\Delta \delta} > 0$ ehk $\frac{dP}{d\delta} > 0$ ehk $\delta < 90^\circ$.



Joonis 1.9. Olukord häiringu korral nurkkarakteristiku langeval osal [1]

Tulemusi on võimalik üldistada ka keerukale elektrisüsteemile, kus nagu lihtsaski süsteemis võib üldjuhul esineda kolm olukorda:

- Tööpunkt on olemas ja stabiilne;
- Tööpunkt on olemas, kuid mittestabiilne;
- Tööpunkt puudub.

Keerukas süsteem erineb lihtsast süsteemist oma seisundite paljususe poolest, mis tähendab, et samasuguse lähteolukorra juures on võimalik arvutuste kaudu leida erinevaid stabiilseid ja ebastabiilseid olekuid.

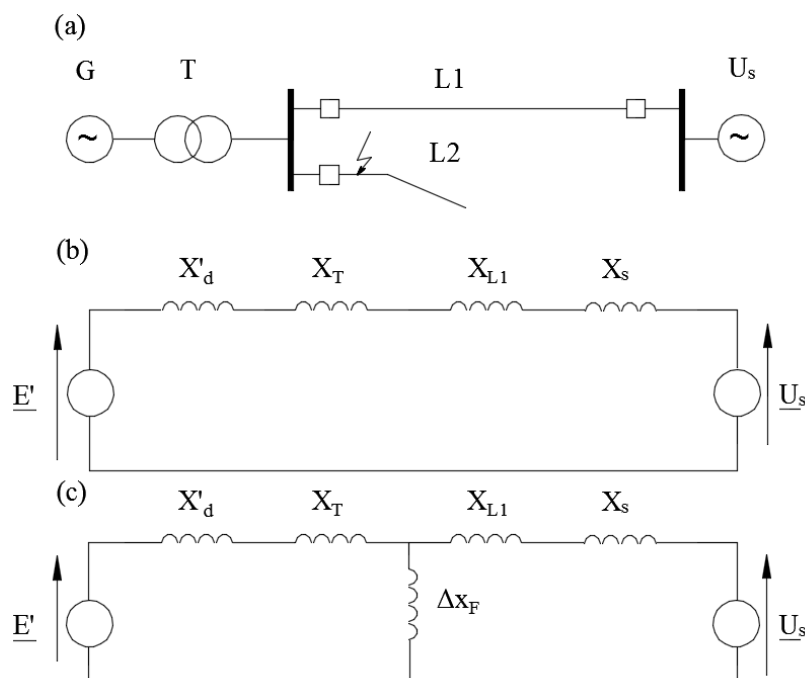
1.2.2 Dünaamiline stabiilsus

Kirjanduse [1] ja [2] on dünaamiline stabiilsus elektrisüsteemi võime säilitada sünkroonset tööd pärast suuri häiringuid. Süsteemi reageering suurtele häiringutele tekitab generaatori rootori nurgas suuri võnkeid, mis on sõltuvad ebalineaarsest nurkkarakteristikust. Dünaamilist stabiilsust seostatakse elektrisüsteemi algse tööpunktiga ja häiringu raskusastmega. Tavaliselt on süsteem pärast häiringut muutunud nii, et häiringule järgnev püsitalitluse seisund erineb häiringueelsest seisundist. Häiringuteks, mis võivad põhjustada dünaamilist ebastabiilsust loetakse lühised, elektrisüsteemi põhielementide kommutatsioonid ja järsud koormustõuked.

Esmalt vaadeldakse dünaamilist stabiilsust lihtsas elektrisüsteemis, kui häiringu mõjul ei muutu resulteeriv elektrisüsteemi takistus. Joonisel 1.10a on toodud aseskeem, mille korral lühise põhjustanud elemendi eemaldamisel skeemist ei muutu ekvivalentne võrgu takistus. Eeldatakse, et liin L1 on kasutuses kuid L2 on ühendatud ainult ühelt poolt, teine pool liinist

on lahti ühendatud, ehk liin on tühijooksul. Kui lühis tekib liinil L2 ja seejärel see eemaldatakse avades võimsuslüliti, siis lühisele eelnev ning sellele järgnev süsteemi ekvivalentne takistus on sama. [3]

Süsteemi ekvivalentne takistust kujutatakse joonisel 1.10b. Generaatorit kujutatakse klassikalise mudeliga, millel on konstantne mööduv elektromotoorjõud E' ja mööduv generaatori takistus X'_d . Süsteemi vaadeldakse kui konstantse pinge allikat ning kujutatud skeemil U_s ning tema ekvivalentne takistus X_s .

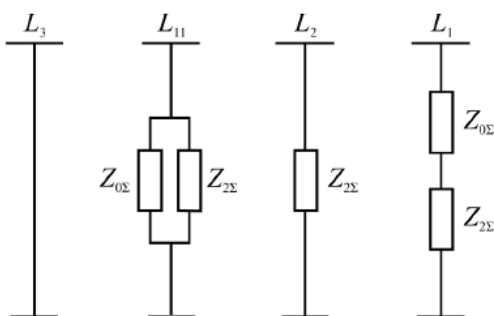


Joonis 1.10. Lihtsa süsteemi põhimõtteskeem (a) ja aseskeemid enne ja pärast lühist (b) ja lühise ajal (c) [3]

Sümmeetriliste komponentide kasutamisega võimaldatakse igat tüüpi lühist esindada pärijärgnevuse skeemil kui lisanduvat takistust Δx_F lühise koha ja neutraali vahel nagu näidatud joonisel 1.10c. [3] Üleminekutakistuse väärtus sõltub lühise tüübist. Joonisel 1.11 on toodud lühise täiendav takistus sõltuvalt lühise liigist.

Mittesümmeetriliste lühiste poolt põhjustatakse talitluses päri-, vastu- ja nulljärgnevuskomponente. On tõestatud, et stabiilsuse kontrollimisel tuleks arvestada ainult mittesümmeetriliste lühisvoolude pärijärgnevuskomponente. Tõepoolest, null- ja vastujärgnevuskomponentide poolt indutseeritakse generaatorites magnetvälju, mis pöörlevad generaatori suhtes vastupidises suunas ja tekitavad seetõttu momente, mis

muudavad märki vastavalt 100 või 200 korda sekundis. On selge, et rootori suure inertsitõttu ei saa sellised momendid tegelikult mõjutada rootori liikumist olenemata nende suurusest ning põhjustada sünkronismist väljalangemist. [1]



Joonis 1.11. Aseskeemi täiendava takistuse sõltuvus lühise liigist [1]

On ilmne, et mida väiksem on täiendav takistus, seda suuremad on lühisvoolud ja nende mõju generaatori rootori liikumisele. Seega saab järeldada, et süsteemi stabiilsusele on kõige ohtlikumad kolmefaasilised ja kõige kergemini talutavad ühefaasilised lühised.

Kirjanduses [1], [2] ja [3] on kirjeldatud meetodikat, mida tuntakse kui pindalade reeglit, millega on võimalik analüüsida kolmefaasilise lühise mõju elektrisüsteemi stabiilsusele. Joonisel 1.12 on näha antud meetodika graafiline kujutus. Lihtsustuste huvides siinkohal süsteemi võnkumiste summutusvõimet ei arvestata ja eeldatakse, et muutused rootori kiiruses on nii väikesed, et need ei põhjusta turbiini kiirusregulaatori rakendumist. Sellisel juhul on võimalik öelda, et turbiini väljundvõimsus on konstantne.

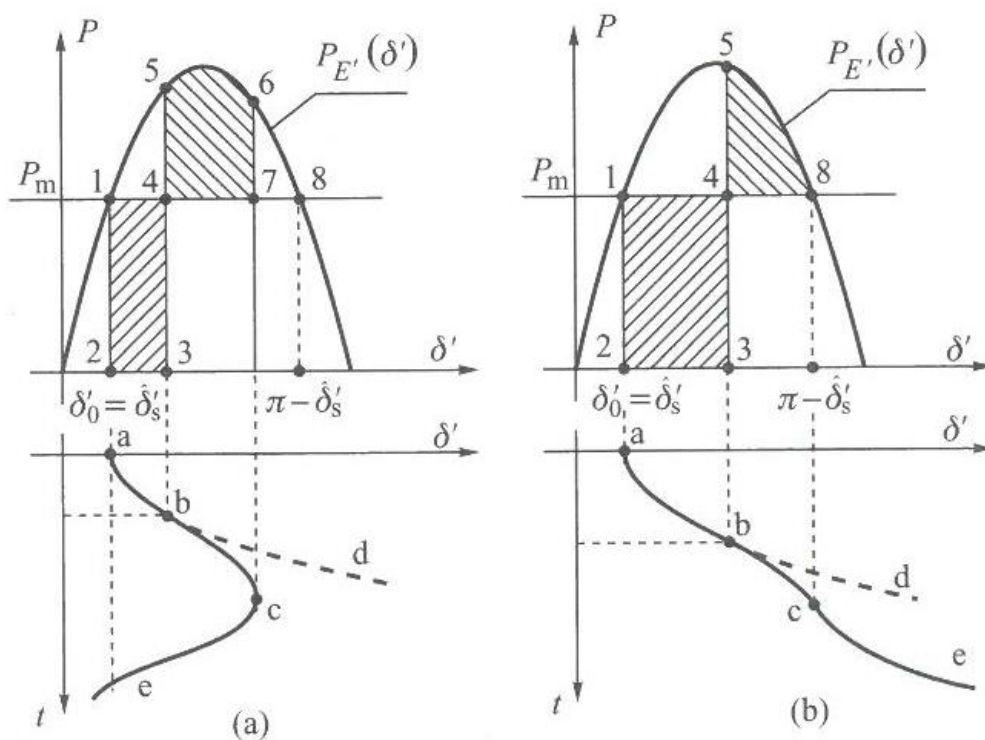
Kolmefaasiliste lühiste korral üleminekutakistus $\Delta x_F = 0$. Seega energia ülekandmine generaatorilt süsteemi on täielikult lühise poolt blokeeritud. Lühise ajal generaatori elektriline võimsus langeb lühisele eelsest väärtuselt nulli, mida joonisel 2.12 kajastatakse joone 1-2 poolt. Generaatori võimsus püsib nullis, kuni lühis eemaldatakse. Selle aja jooksul on rootori kiirenemist ε võimalik leida generaatori võnkumisvõrrandist: [3]

$$\varepsilon = \frac{d^2\delta'}{dt^2} = \frac{P_M}{M} = \text{konst.} \quad (1.4)$$

Võrrandit 1.4 kaks korda integreerides ja võttes arvesse algtingimusi saadakse nurga δ trajektoor, mis vastab joonisel 1.12 parabolile a-b-d: [3]

$$\delta' = \delta'_o + \frac{\varepsilon t^2}{2} \text{ või } \Delta\delta' = \delta' - \delta_0 = \frac{\varepsilon t^2}{2} \quad (1.5)$$

Enne lühise eemaldamist liigub rootori tööpunkt nurkkarakteristikul punktist 2 punkti 3 ja rootorile omistatakse teda kiirendav energia, mis on võrdeline ristküliku 1-2-3-4 pindalaga. Kui võimsuslüliti avanemisega lühis skeemist eemaldatakse siis rootor järgib nurkkarakteristikut $P_{E'}(\delta')$ vastavalt joonisel 1.10 oleva aseskeemi summaarsele takistusele, nii, et tööpunkt hüppab punktist 3 punkti 5. Rootorile rakendatakse nüüd aeglustav moment, mille suurus on proportsionaalne joonega 4-5, ning rootor aeglustub liikudes samal ajal punktist 5 punkti 6. Inertsimomendi tõttu ei saa see juhtuda hetkeliselt ning selle tõttu rootori nurk suureneb endiselt kuni aeglustamiseks tehtud töö hulk saab võrdseks kiirendusel omandatud kineetilise energiaga, teisisõnu kujundite 1-2-3-4 ja 4-5-6-7 pindalad on võrdsed. Punktis 6 saavutab rootor taas sünkroonkiiruse. [3]



Joonis 1.12. Kiirendus- ja pidurduspindalad kolmefaasilise lühise korral [3]

Süsteemi võnkumiste summutusvõime puudumisel tsükkel kordub ja rootor läbib korduvalt punkti 1 tehes seejuures sünkroonseid võnkeid. Antud sünkroonsed võnked toimuvad võrgu sagedusest madalamal sagedusel, jäädes tavaliselt vahemikku 1 – 4 Hz. Generaator ei lange sünkronismist välja ja süsteem tervikuna on stabiilne.

Joonisel 1.12b on kirjeldatud sarnast situatsiooni, kuid palju pikema lühise ajaga. Seega on turbiini poolt saadud kiirendusenergia palju suurem kui joonisel 1.12a. Selle tulemusel rootorit aeglustav töö hulk ei ole enam võimeline tasakaalustama rootori saadud kineetilise energia juurdekasvu ja rootor ei saavuta süsteemiga sünkroonset tööd enne kui nurkkarakteristikul jõutakse punkti 8. Pärast selle punkti läbimist elektriline võimsus $P_E(\delta')$ on väiksem kui turbiini mehaaniline võimsus ning rootorile mõjub uuesti kiirenemisjõud, mis veelgi suurendab nurka δ . Rootor läbib ühe asünkroonkäigu ja langeb ülejäänud süsteemiga sünkronismist välja. [3]

Siit saab teha kaks tähtsat järeldust. Esiteks langeb generaator sünkronismist välja, kui võnkumiste ajal tööpunkt läbib punkti 8 nurkkarakteristikul. See punkt vastab mööduval nurkkarakteristikul tööpunktile, kus rootori nurk on võrdne $\pi - \widehat{\delta'_S}$, kus $\widehat{\delta'_S}$ on stabiilse tööpunkti rootori nurk.

Teiseks on näha, et lühise pikkusel on oluline roll generaatori stabiilsuse tagamisel. See tuleneb valemist 1.5, kus kiirenduspindala on ruutsõltuvuses lühise pikkusest. Seega on kiiretoimelise releekaitse kasutamine üks põhilisi dünaamilise stabiilsuse tõstmise mooduseid.

Rootori nurga δ võnkumised, mis tekitatakse lühisega, tekitavad võnkumisi ka generaatori võimsuses. Süsteemi lihtsustamine üheks ekvivalentseks generaatoriks ning lõpmata võimsaks süsteemiks võimaldab teha palju olulisi järeldusi süsteemi elektromehaanilise dünaamika ja stabiilsuse osas, kuid selline lihtsustus kehtib realses olukorras ainult juhul, kui häiring mõjutab ainult ühte generaatorit ja üldiselt on häiringul väikene mõju kogu süsteemile. Tänapäevased elektrisüsteemid on arenenud ülekandevõrguga erinevate tootmisüksuste vahel, mistõttu ei pruugi olla eelnev tingimus täidetud. Sellistes tingimustes häiring ühe generaatori lähedal mõjutab ka kaugemal olevate generaatorite tööd. [3]

Kirjanduses [3] on kirjeldatud, kuidas võib häiring elektrisüsteemi mõjutada ühel viisil neljast.

- Generaator või generaatorid, mis asuvad häiringule kõige lähemal võivad langeda sünkronismist välja ilma võnkeid tekitamata. Teised generaatorid, mida häiring süsteemis mõjutab, teevad sünkroonseid võnkeid kuni saabub uus sünkroonne tööpunkt;
- Generaator või generaatorid, mis asuvad häiringule kõige lähemal langevad sünkronismist välja pärast sünkroonseid võnkumisi;

- Esmalt langevad sünkronismist välja häiringule kõige lähemal asuvad generaatorid ning seejärel teised generaatorid süsteemis;
- Häiringule kõige lähemal asuvad generaatorid läbivad sünkroonseid võnkumisi stabiilsust kaotamata, kuid üks või rohkem generaatoreid häiringust kaugemal langeb süsteemiga sünkronismist välja.

Seni on kirjeldatud ainult esimest võimalikku stsenaariumit, mida kujutati lihtsa elektrisüsteemi mudeliga. Ülejäänud juhtudel tekib ebastabiilsus kaugemal asuvate generaatorite ja häiringule lähima generaatori omavaheliste vastasmõjude toimetel. Teisel juhul on generaatoril algselt võimalus jätkata sünkroonset tööd, kuid kui ka teiste generaatorite rootorid hakkavad võnkuma, siis olukord halveneb ja generaator, mis on lähim häiringule, langeb sünkronismist välja. Kolmandal juhul langeb kõigepealt häiringule lähim generaator sünkronismist välja ja see omab ülejäänud süsteemis olevatele generaatoritele suurt mõju, mille tagajärjel võivad ka teised generaatorid sünkronismist välja langeda. Neljas juht on tüüpiline olukorras, kus häiringust kaugel olev generaator on süsteemiga nõrgalt ühendatud. [3]

Kahe elemendi asünkroonses töötamise olukorras tekivad suured tsüklilised muutused vooludes ja pingetes. Need suured muutused kajastuvad funktsioonina nende elementide pooluste libisemise kiirusest. Suure amplituudiga voolud ja nimisagedusest erineval sagedusel töötamine võivad põhjustada mähistes liigseid koormusi ning pulseerivaid väändemomente, mis võivad esile kutsuda vigastusi tekitavaid mehaanilisi vibratsioone. Samuti tekib risk kaotada asünkroonses olukorras talitlevas süsteemiosas abiseadmeid, samuti lähedal asuvate süsteemiosade abiseadmeid. [2]

Selleks, et vältida eelpool mainitud ebasoodsaid mõjusid generaatorile ja ülejäänud süsteemile on soovitatav kasutada asünkroonkäigu releesid, mis lülitaksid asünkroonselt talitleva elemendi võrgust välja. Väljalülitamine peaks piirduma lüliti avamisega ja sellega asünkroonselt talitleva seadme eraldamisega võrgust, mitte elemendi täieliku väljalülitamisena. See võimaldab olukorra stabiliseerumisel elementi võrguga taas sünkronismi viia.

1.3. Võimsuse võnkumise probleemi olemus

Hiljutised süsteemi kustumised Ameerika Ühendriikides nagu juhtus septembris 2011 ning augustis 2003 olid võimendatud kaitsereleede poolt, mis lülitasid välja tootmiseseadmeid.

Põhja-Ameerika Elektri Töökindluse Korporatsioon (*North American Electric Reliability Corporation, NERC*) ja Föderaalne Energia Reguleerimise Komisjon (*Federal Energy Regulatory Commission, FERC*) järeldasid, et liigselt konservatiivsed releekaitse sätted ja releekaitse liiga kiire toimimine viis olukorrani, kus miljonid inimesed olid vooluta. Samuti 2003 aasta sündmuse kohta on öeldud, et releekaitse sätted ülekandeliinidele, generaatoritele ja alasageduskaitsetele ei pruukinud olla täiesti õiged ning ei olnud kindlasti omavahel kooskõlas, et vähendada kaskaadsete väljalülitumiste ohtu. [4]

Selliste releekaitse volest tööst põhjustatud süsteemi kustumiste vältimiseks on vajalik vaadata releekaitse toimimist elektrivõrgu dünaamiliselt muutuvate parameetrite korral. Samuti võimaldab dünaamiliselt muutuvate parameetritega võrguolukord vaadelda releekaitse jaoks vajalikke parameetreid, nagu näiteks trafode sisselülitusel tekkiv sisselülitusvool. [4]

1.3.1 Võnkumiste tekke ajaloost

Võnkumiste summutamine elektrisüsteemis selle normaalse töö tagamiseks on olnud alati oluline. Võnkumised generaatorite vahel tekkisid niipea kui vahelduvvoolu generaatorid ühendati omavahel paralleelselt töösse. Need võnkumised ei olnud aga ootamatud, vaid vastupidi, eeldatud. Võnkumisi eeldati generaatorite võimsuse-nurkkarakteristikust. Muutuva koormuse ja paralleelis töötavate generaatorite erinevuste tõttu võnkumised tavaliselt võimendusid. Eriti raske oli olukord hüdrogeneraatoritega, kuna neil oli väga vähe summutust, seega lisati esmalt generaatoritele summutusmähised. [5]

Sellela oli võnkumiste probleem lahendatud kuni 1960-ndate aastateni, mil ühendsüsteemide areng kiirenes, aina rohkem ülekandevõrku ja genereerimist ühendati kokku üheks suureks süsteemiks. Elektrisüsteemide suurenemisega ja nende omavaheliste sidumistega ühendusliinide kaudu võnkumised süsteemis taastusid. Nende taastekkimisel on mitmeid põhjuseid. Kõige tähtsamaks aspektiks siinkohal oli laialdasem arusaam, et kiiretoimeline generaatori pingeregulaator põhjustab negatiivset efekti süsteemi võnkumiste summutusvõimele olukorras, kus generaator läbib suhteliselt suuri nurga muutuseid. [5]

Süsteemi võnkumiste summutamisvõime arvutamiseks tuli muuta süsteemi esitlust palju keerukamaks. Lisaparameetrid, mida vaja, on tavaliselt palju vähem teadaolevad, kui generaatori inerts ja võrgu takistused, mida on tarvis klassikalise mudeli jaoks. Samuti on kogu võrgu summutusvõime tavaliselt väga väike ning koosneb nii positiivsetest kui negatiivsetest elementidest. [5]

On loogiline, et süsteemi stabiilseks töötamiseks on tarvis, et summutus oleks positiivne. Rohkem summutust vähendaks, kuid ei välistaks võnkumiste tekkimist ja nende ulatust. Põhjuseid, miks võnkumised tekivad, on mitmeid ja võnkumiste teke sõltub süsteemist ja selle olekust. [5]

Kui esimesed generaatorid ühendati tööle paralleelselt suhteliselt lähestikku, siis tekkivad võnkumised summutati generaatorite summutusmähiste poolt. Kui võnkumisi esines, siis süsteemi pinges ei esinenud suuri muutuseid. Kõige lihtsamal juhul, kui kaks generaatorit on töös sama võimsusega samal latil, siis võnkumised nende vahel ei tekita praktiliselt mitte mingisugust pingemuutust latil. Seega generaatori pingeregulaator ei rakendu. Sellistel juhtudel, kui generaatori pingeregulaatorit täiustati, ehk teda muudeti tundlikumaks, et tõsta dünaamilist stabiilsust, siis generaatori summutusvõime näiliselt ei langenud. [6]

Kui nüüd kirjeldatud süsteem ühendada sarnaselt ühe ühendusliiniga, siis see liin peaks olema piisavalt tugev, et taluda ühe generaatori väljalülitumist. Samas see võimsus ei pruugi olla väga suur võrreldes süsteemi koguvõimsusega. Nüüd on aga süsteemi vaste ühendusliini võnkumistele hoopis teistsugune, kui üksiku generaatorite grupi korral. Mõlemas ühendusliini otsas olevad süsteemid näevad suurt välist takistust ning selle tõttu summutusmähiste võime võnkumisi väheneb. Samuti muutuvad sellises olukorras generaatorite väljundpinged sõltuvaks nurga muutusest. See põhjustab generaatorite pingeregulaatorite sekkumist, mis omakorda soodustab võnkumiste suurenemist. Selline pinge sõltuvus nurgast on suuresti sõltuv algsest nurkade erinevusest ehk ühendusliini koormatusest. Seega ühendusliinide suurte koormuste juures on tõenäosus võnkumiste tekkeks suurem. Sellised ühendusliinide võimsuse võnkumised on ebasoovitavad, sest nad piiravad võimsusvoogusid. [6]

On üks spetsiifiline juhtum, mis kinnistas ühtsusele arusaama, et elektrisüsteemi võnkumiste summutamisvõimet on vaja suurendada. Selleks oli rida uuringuid USA läänerannikul oleva *Pacific Intertie* stabiilsuse juures. Nendes uuringutes leiti, et kolmefaasiliste lühiste korral ei tekkinud ebastabiilseid võnkumisi generaatorite esimeste võngete korral. Ebastabiilsed võnkumised tekkisid pärast lühise eemaldamist uues võrguolukorras, kus võrgu takistus kahe omavahel ühendatud süsteemi vahel oli suurenenud. See olukord näitas, et elektrisüsteemi võime võnkumisi summutada ei ole oluline ainult püsitalitluse stabiilsuseks vaid ka dünaamiliseks stabiilsuseks. See ajendas generaatoritele elektrisüsteemi stabilisaatoreid (*power system stabilizer, PSS*) paigaldama generaatoritele üle maailma. [6]

Elektrisüsteemi üha suurem laienemine ja liinide suurem koormamine näitab, et tihtipeale elektrisüsteemi stabilisaatori kasutamisest enam tänapäeval ei piisa. Võnkumised võivad siiski tekkida ühendusliinil, kui ta on tugevasti koormatud või ühendusliin on nõrk. [6]

2. Võimsuse võnkumise mõju releekaitsele

Iga kord kui tekib lühis või võrgu konfiguratsiooni muutus häirib see võimsuse tasakaalu elektrisüsteemis ja sellega kaasneb võnkumine masinate vahel. Stabiilsed võnkumised on üleminekud ühest tasakaalupunktist teise, kuid ebastabiilsetel võngetel võivad koormused ületada masinate lubatud piirväärtuseid.

Suurte võimsuste võnkumiste ja asünkroonkäikudega kaasnevad suured muutused pingetes ja vooludes, mis kujutavad suurt ohtu elektrisüsteemile. Sellised muutused võnkumiste korral võivad põhjustada releekaitse valesti toimimist, mis omakorda võib kaasa tuua kaskaadseid väljalülitumisi ja süsteemi kustumist.

Kirjanduse [7] kohaselt ei tohiks voolulised releed süsteemi võimsuste võnkumiste ja asünkroonkäikude tõttu toimida. Seda seetõttu, et sellist tüüpi kaitseid kasutatakse süsteemis tavaliselt madalamal pingel, mis kogu süsteemi stabiilsusele avaldab väikest mõju. Samuti sätestatakse sellised releed toimima koormusvooludest palju suurematele vooludele. Asünkroonses olukorras tekkivate voolude suurus on piisavalt väike, et releede rakendumiseks vajalik aeg ei ole täidetud.

Stabiilsuse küsimus omandab tavaliselt suurema tähenduse kõrgema pingega võrkudes. Võimsuste võnkumise korral madalam pinge ja normaalolukorrast suurem vool näib kui muutuv takistus distantskaitse jaoks.

2.1. Distantskaitse tööpõhimõtted

Kirjanduses [8] on toodud distantskaitse tööpõhimõtte. Distantskaitse mõõttelemendiks on takistusrelee, mis reageerib liini Z , X või R takistusele. Distantskaitset kasutatakse nii faasidevahelise kui ka maalühiskaitseks. Distantskaitse on suhteliselt selektiivne alakaitse, ehk kaitse rakendumine toimub tunnussuuruse (Z , X või R) vähenemisel.

Liini faasitakistused relee paigalduskohast kuni lühisekohani on proportsionaalsed vastava liini osa pikkusega, ehk kaugusega distantskaitse paigalduskohast lühisekohani, seega sõltub takistusrelee toimimine lühisekoha kaugusest relee paigalduskohast. [8]

$$U^{(3)} = I^{(3)} z_0 L \quad (2.1)$$

$$Z^{(3)} = \frac{U^{(3)}}{I^{(3)}} = \frac{I^{(3)} z_0 L}{I^{(3)}} = z_0 L \quad (2.2)$$

kus Z - liini näivtakistus lühisekohani;

z_0 - liini eritakistus;

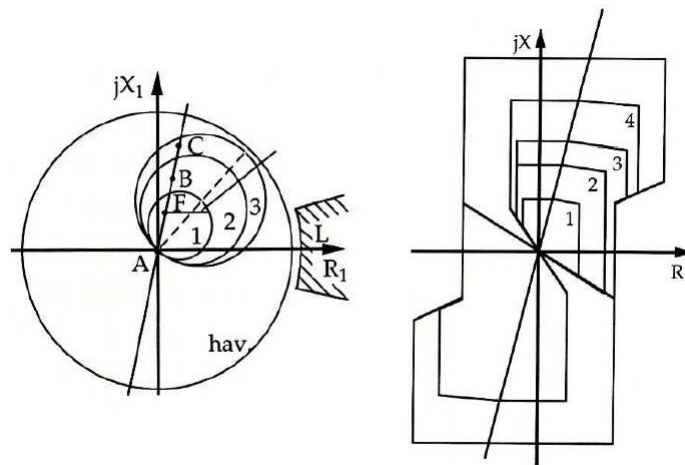
L - lühisekoha kaugus distantskaitse paigalduskohast.

Distantskaitse tagab selektiivsuse mistahes konfiguratsiooniga võrgus ja kaitsetsoonid on stabiilsete lõpp-piiridega, kuid samas on ta kõige keerulisem releekaitse. Distantskaitse kaitsetsoonid on märksa pikemad kui voolukaitsetel. Selektiivsuse tagamiseks kasutatakse distantskaitset tavaliselt suunatud kaitsena ja mitme astmelisena. Samasuunaliste kaitseastmete selektiivsus tagatakse viidetega. [8]

Distantskaitse rakendumise karakteristikuks on [8]:

$$Z_{rak} = f(\varphi) \quad (2.3)$$

Kuna näivtakistus Z on kompleksuurus, siis on takistusrelee rakendustsooni otstarbekas kujutada $R - X$ tasapinnal. Järelikult igat näivtakistust takistusrelee klemmidel ($Z=U/I$) võib kujutada kompleksuurusena $Z = R + jX$. Joonisel 3.1 on toodud distantskaitse erinevad rakendustsoonid. Tavaliselt distantskaitse juures kasutusel olevate astmete viited ja kaitsetsoonid on toodud tabelis 2.1.



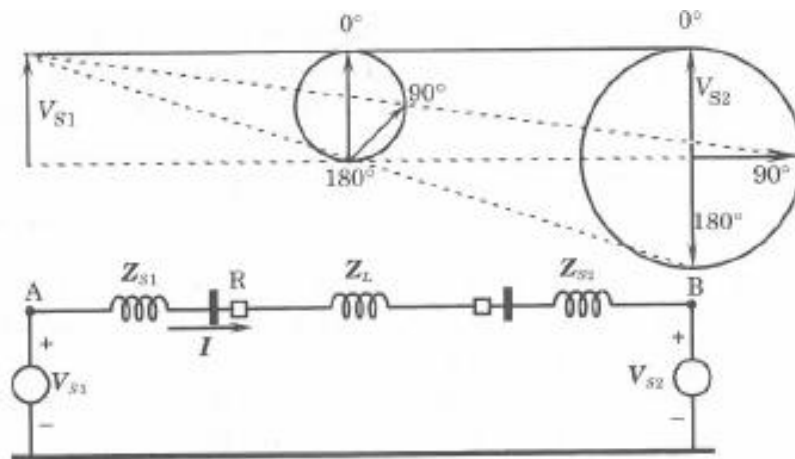
Joonis 2.1. Distantskaitse erinevad rakendustsoonid [8]

Tabel 2.1. Distantskaitse astmete viited ja kaitsetsoonid [8]

Aste	Viide, s	Kaitsetsoon
1	0	85% kaitstavast liinist
2	0,4 (0,25)	120% kaitstavast liinist ja 50-85% järgmisest liinist
3 (4, 5)	>1	Väljastatakse koormustakistusest

2.2. Võimsuse võnkumise mõju distantkaitsele

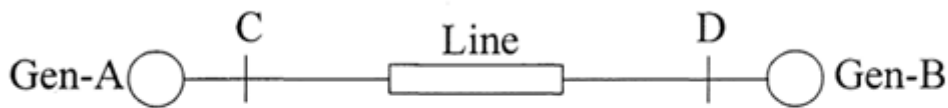
Vaadeldakse süsteemi, mis on toodud joonisel 2.2, kus on kujutatud liini oma takistusega ja kahte generaatorit oma ekvivalentsete takistustega. Joonise ülemisel osal kujutatakse, mis juhtub süsteemis pingetega, kui tekib võnkumiste olukord. Generaatorite ekvivalentseid pingeid esitletakse vektoritena joonise ülemises pooles. Eeldatakse, et teise generaatori pingeline nurk hakkab muutuma võrreldes esimese generaatori pingega. Nurga muutumise käigus joonistab teise generaatori pingevektori ots ringjoone komplekstasandil. Liini keskpunktis olev pingeline muutus joonistab samuti komplekstasandil ringjoone ning kui kahe generaatori pinged erinevad 180° , siis liini keskel on pingeline kõrgis kolmes faasis null. Selline olukord näib releedele kui kolmeefaasiline lühis liini keskel ning liin lülitatakse välja. [9] Kui pingeline on juba nii palju üksteise suhtes muutunud, siis süsteemide eraldamine on õige tegevus, sealjuures on väga tähtis eralduskoht, kus süsteemid omavahel eraldada.



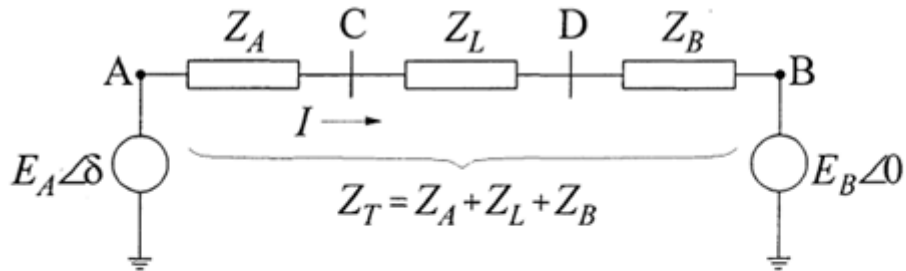
Joonis 2.2. Pingevektori muutumine süsteemi võnkumise korral [9]

Releekaitse probleemi süsteemi võimsuse võnkumise ja asünkroonselt töötamise olukorras on võimalik illustreerida lihtsa, kahest masinast koosneva süsteemiga, mida kujutatakse joonisel 2.3a. [2] Masinaid esindavad konstantse suurusega pinged nende mööduvate takistustega. Vaadeldakse võnkumise ja asünkroonse töö mõju releekaitsele, mis hõlmab pingeid, voolusid ja näivtakistust, mida mõõdab relee asukohas C .

E_A ja E_B on kahe masina pinged, nendest E_B võetakse referentspingeks ja nurk δ kujutab nurka mille võrra E_B jääb maha E_A -st. [2]



(a) Kahe masinaga süsteem



(b) Ekvivalentne skeem

Joonis 2.3. Vaadeldava süsteemi skeem ja ekvivalentne aseskeem [2]

Vool \tilde{I} arvutatakse [2]:

$$\tilde{I} = \frac{E_A \angle \delta - E_B \angle 0}{Z_T} \quad (2.4)$$

Punktis C olev pinge leitakse [2]:

$$\tilde{E}_C = \tilde{E}_A - Z_A \tilde{I} \quad (2.5)$$

Punktis C oleva distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistus arvutatakse [2]:

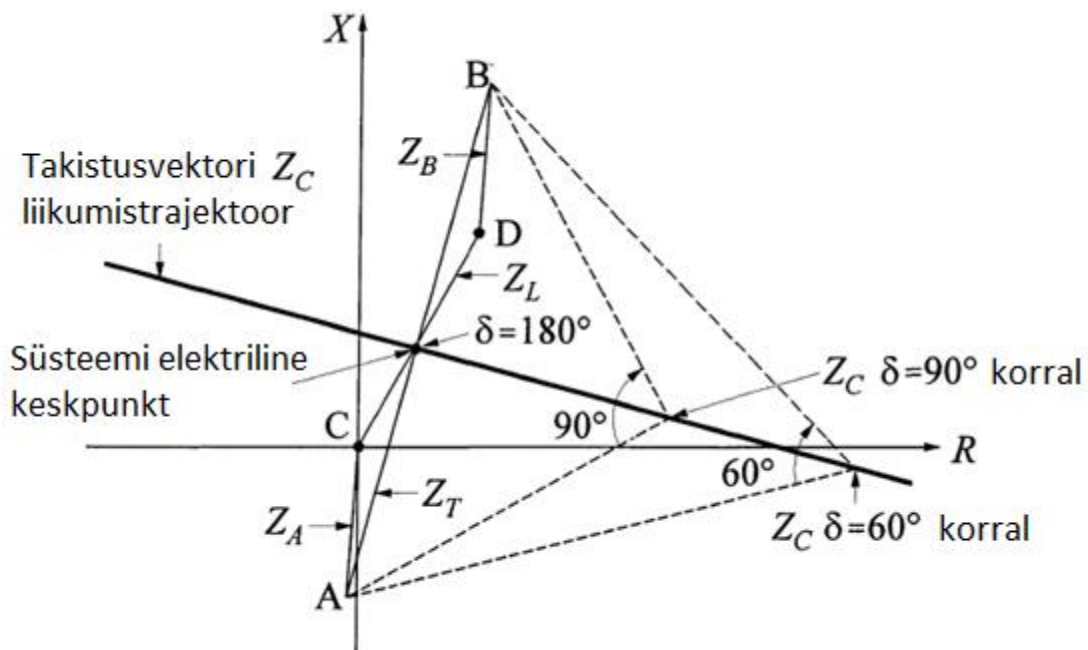
$$\begin{aligned} Z_C &= \frac{\tilde{E}_C}{\tilde{I}} = \frac{\tilde{E}_A - Z_A \tilde{I}}{\tilde{I}} \\ &= -Z_A + Z_T \frac{E_A \angle \delta}{E_A \angle \delta - E_B \angle 0} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Kui $E_A = E_B = 1.0$, siis [2]:

$$\begin{aligned} Z_C &= -Z_A + \frac{Z_T}{1 \angle 0 - 1 \angle -\delta} \\ &= -Z_A + Z_T \frac{1 \angle 0 + 1 \angle -\delta}{(1 \angle 0 - 1 \angle -\delta)(1 \angle 0 + 1 \angle -\delta)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -Z_A + Z_T \frac{1 + \cos\delta + j\sin\delta}{2j\sin\delta} & (2.7) \\
&= -Z_A + Z_T \left[\frac{1}{2} - j \frac{1 + \cos\delta}{2\sin\delta} \right] \\
&= \left(\frac{Z_T}{2} - Z_A \right) - j \left(\frac{Z_T}{2} \cot \frac{\delta}{2} \right)
\end{aligned}$$

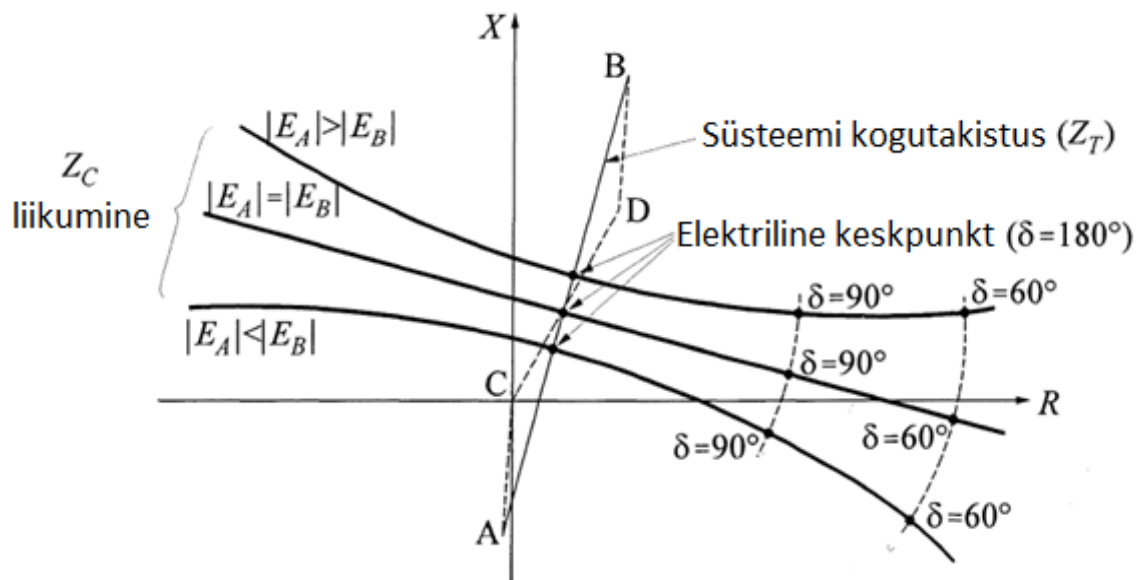
Võnkumise ajal nurk δ muutub. Joonisel 2.4 kujutatakse takistusvektori otspunkti liikumist funktsioonina nurgast δ R-X diagrammil, kui $E_A=E_B$. [2]



Joonis 2.4. Takistusvektori otspunkti liikumine funktsioonina nurgast δ , kui $E_A=E_B$ [2]

Kui pinged E_A ja E_B on võrdsed, siis takistusvektori otspunkt Z_C tekitab R – X tasapinnal liikudes joone, mis on täisnurga all süsteemi summaarse takistusega ja lõikub sellega täpselt sirge AB keskpunktis. Nurk, mis tekib punktist A ja B konkreetse takistusvektori otspunkti tõmmatud sirgete vahele, vastab nurgale δ . [2] Kui nurk $\delta=0$, siis vool \tilde{I} on null ja seega Z_C lõpmata suur. Kui aga nurk $\delta=180^\circ$, siis kogu süsteemi elektrilises keskaigas on pinge väärtus null ning asukohas C paiknev distantskaitse näeb seda kui kolmefaasilist lühist süsteemi kogutakistuse keskpunktis.

Kui E_A ei ole E_B -ga võrdne, siis takistusvektori liikumine moodustab ringi, mille keskpunkt asub süsteemi kogutakistuse AB pikendusel. Kui $E_A > E_B$ satub ringi keskpunkt ülespoole süsteemi kogutakistuse keskpunkti ning kui $E_A < E_B$ on ringi keskpunkt allpool kogu süsteemi takistuse keskpunkti. [2] Joonis 2.5 illustreerib näivtakistuse muutumist erinevate pingete suhete korral.

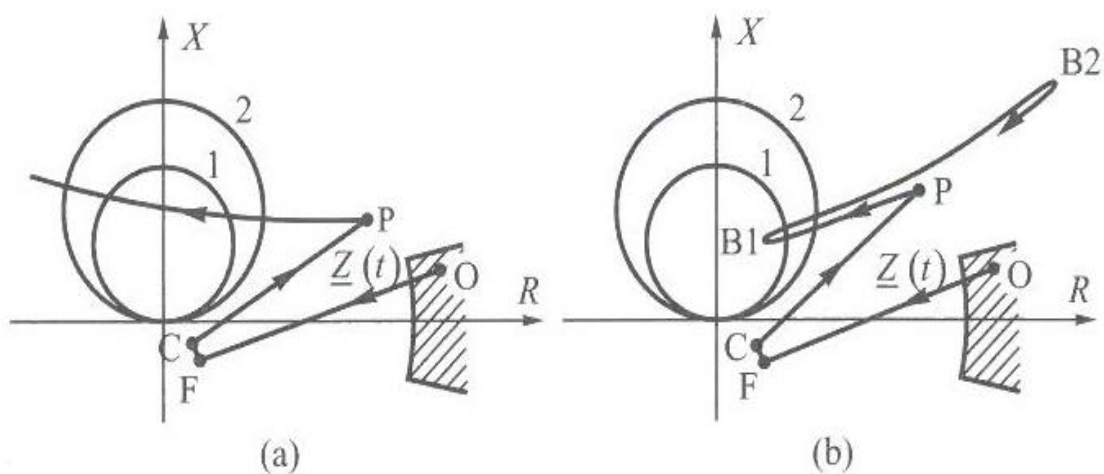


Joonis 2.5. Näivtakistuse trajektoorid pingete E_A ja E_B erinevate suhete korral [2]

Siinkohal täheldatakse, et süsteemi elektriline keskpunkt ei ole fikseeritud, sest masinate takistus ja pingektorite suurused on muutuvad dünaamilistes oludes. Tegelik distantskaitse poolt mõõdetav takistus sõltub rohkematest asjaoludest kui eespool lihtsustatud olukorras. Näiteks mõjutavad mõõdetud takistust generaatorite väljundpinge muutused võnkumiste olukorras ning kõikide süsteemis olevate masinate omavahelised mõjutused. [2]

Kirjanduses [10] on toodud stabiilse ja mittestabiilse võnkumise korral distantskaitse poolt mõõdetud takistuse trajektoori $\underline{Z}(t)$, mida illustreeritakse joonisel 2.6. Võnkumine tekib peale lühist, mis asub selle distantskaitse kaitsmisalast väljaspool. Mõlemal juhtumil alustab trajektoor liikumist punktist O , mis asub koormustsoonis. Kui tekib lühis, siis takistus liigub hetkeliselt punktist O punkti F , mis asub antud juhul kaitsetsoonidest 1 ja 2 väljaspool. Lühise ajal liigub takistus punkti C kuni lühis välja lülitatakse. Pärast lühise väljalülitust hüppab takistus punkti P , mis ei asu algse koormuspunktiga O samas kohas, sest generaatorite pinged muutuvad lühise ajal. Edasi nurga δ muutumise tõttu liigub takistus kaart mööda.

Kui nurk kahe generaatori vahel suureneb, siis mõõdetud takistus väheneb ja takistus võib selle tõttu jõuda kaitse töötamise alasse. Asünkroonkäigu tekkimise korral tekitab takistuse trajektoor terve ringi samal ajal kui nurk δ liigub 360° ulatuses. Sellist trajektoori on näha joonisel 2.6a. Kui tegu on stabiilse võimsuste võnkumisega, mida on näidatud joonisel 2.6b, siis takistuse trajektoor jõuab punkti $B1$ ja seejärel liigub tagasi punkti $B2$ poole kui nurk δ väheneb. Võnkumise sumbumisel liigub punkt $B2$ koormusala poole, kus võnkumise sumbumisel tekib uus tasakaalupunkt.



Joonis 2.6. Takistuse trajektoor ebastabiilse (a) ja stabiilse (b) võimsuse võnkumise korral [10]

Sellisest takistuse liikumisest võnkumiste ajal tuleneb ka oht distantskaitsele. Kui võnkumise ajal satub takistus distantskaitse töösooni, siis kaitse rakendub ning seetõttu toimub liigne väljalülitumine, mis võib veelgi halvendada süsteemi olukorda. Et sellist olukorda vältida tuleb võimsuse võnkumise olukorras distantskaitse blokeerida.

On tehtud mitmeid uuringuid ja raporteid reaalsete elektrisüsteemi häiringute kohta, kus releekaitstes võimsuse võnkumise blokeeringu puudumine või valesti töötamine on tekitanud mittevajalikke liinide väljalülitusi. Enamik nendest juhtudest on lõppenud elektrisüsteemi normaalse töötamise taastumisega pärast häiringuolukorda. Kuid on ka juhtumeid, kus elektrisüsteem viiakse sellise vale töötamise tõttu normaaltalitlusest avariitalitluse ja ekstreemsetel juhtudel lõppenud avariitalitlusest süsteemi osalise või täieliku kustumiseni. Üheks sellise juhtumi näiteks võib tuua olukorra, mis juhtus ESCOMi süsteemis Lõuna Aafrika Vabariigis. [3]

14. septembril 2001 aastal tugeva lumesaju tõttu Drakensbergis tekkis ühel elektriliinil olukord, kus liin lülitati välja distantskaitse kolmanda tsooni poolt. Selle tulemusel tekkis kogu süsteemis suur võnkumine. Kaitsetes polnud kasutusel üheselt määratud võimsuse võnkumise blokeerimise ja asünkroonkäigu kaitsete skeemi. Osades distantskaitsetes olid blokeeringud rakendatud distantskaitse esimesele tsoonile, teistes ainult teisele ja kolmandale tsoonile. Ühtse lähenemise puudumine ja ebaefektiivse võimsuse võnkumise blokeeringu rakendamine tõi kaasa teiste liinide ebavajaliku väljalülituse ja lõpuks süsteemi kustumise. [3]

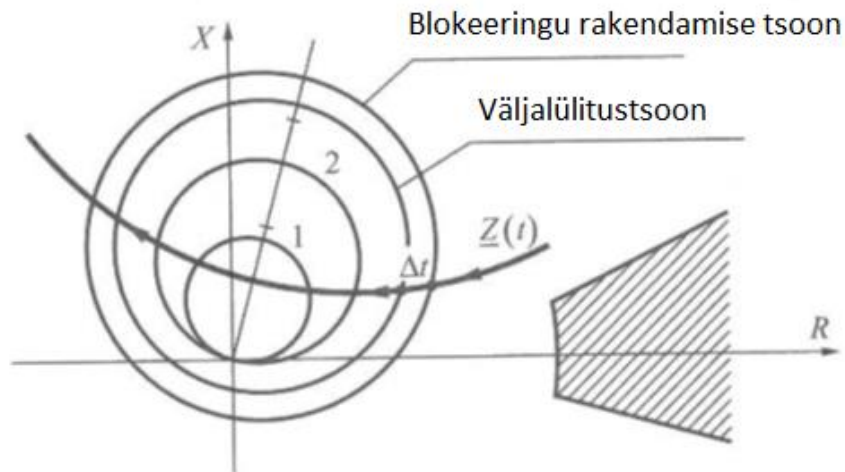
2.3. Distantskaitse blokeerimine võimsuse võnkumise korral

Distantskaitse vääraks rakendamiseks võimsuse võnkumise olukorras kasutatakse spetsiaalsed distantskaitse blokeerimise releed või kasutatakse distantskaitse siseselt blokeerimise funktsioone.

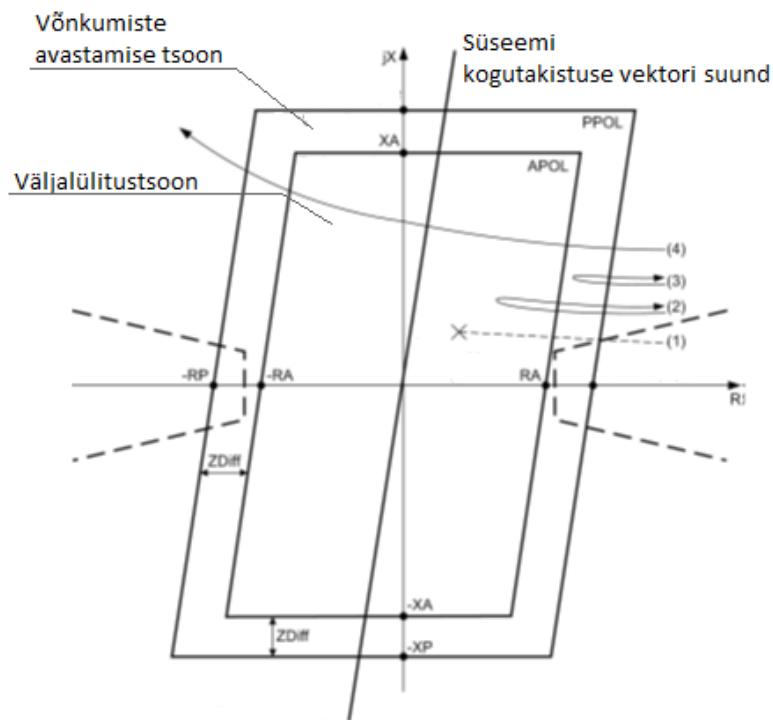
Kirjanduses [3] on toodud meetodika, mille kohaselt on võimalik avastada võimsuse võnkumisi jälgides näivtakistuse muutumist. Võimsuse võnkumiste avastamiseks jälgitakse kiirust, millega näivtakistus läheneb distantskaitse töötsoonile. Pärast lühise tekkimist, näivtakistusega väljaspool distantskaitse töötsooni, läheneb takistus joonisel 2.6 distantskaitse töötsoonile lõpliku kiirusega. Kui aga pärast esimese lühise eemaldamist peaks tekkima teine lühis, mille näivtakistus asub distantskaitse töötsoonis, siis liigub takistusvektor eemal asuvast punktist distantskaitse töötsooni peaaegu koheselt.

Distantskaitse blokeerimiseks võimsuste võnkumise olukorras seatakse lisakarakteristik, mis asub distantskaitse töötsoonist väljaspool. Sellist lisakarakteristikut distantskaitse mho karakteristikuga korral illustreerib joonis 2.7 ja nelinurkse distantskaitse karakteristikuga korral joonis 2.8.

Taimer mõõdab aega, mis kulub takistuse liikumiseks kahe karakteristikuga vahel. Kui lühis on kaitse töötsoonis, siis takistus liigub väga kiiresti blokeerimise ja kaitse karakteristikuga vahelt läbi ning blokeeringut ei teostata. Kui lühis on väljaspool kaitsetsooni, siis lühisele järgneval võimsuse võnkumise näivtakistusel kulub lõplik aeg, et läbida blokeerimise karakteristikuga ja kaitsekarakteristikuga vaheline teepikkus. Selle korral blokeering rakendub ning takistusvektori liikumisel töötsooni kaitse toimimine blokeeritakse. Et vältida kaitse blokeerimist kaugete mittesümmeetriliste lühiste ja ühefaasiliste lülitamiste korral mõõdetakse ka nulljärgnevus- ja vastujärgnevusvoolu. Nulljärgnevus- või vastujärgnevusvoolu olemasolul blokeeringut ei teostata, kuna võimsuse võnkumine on seotud ainult pärijärgnevusega.



Joonis 2.7. Võnkumise blokeeringu ja distantkaitse mho karakteristikud [3]



Joonis 2.8. Võnkumise blokeeringu ja distantkaitse nelinurksed karakteristikud [11]

Kui takistuse muutumise trajektoor on sujuv ja muutumise trajektooril on ootuslik kuju, siis kaitse töö blokeeritakse. Kuid siinjuures on olukordi, kus kaitse blokeeritakse valel põhjusel või vastupidi. Üheks näiteks mittevajalikust kaitserellee blokeerimisest on suure takistusega arenev lühis. Takistuse muutumine lühise ajal võib olla piisavalt väike, et rakendub võimsuse võnkumise blokeering distantkaitsele. Selline olukord on ohtlik elemendile kui ka tervele

elektrisüsteemile, sest areneva lühise korral on siiski tegu lühisega ja kui distantskaitse blokeeritakse, ei lülitata lühist õigeaegselt välja. [10]

2.4. Sünkronismi kaotus ja releekaitse

Allika [9] kohaselt stabiilsete võnkumiste korral süsteemi pinge võnkumine sõltub kahe süsteemi inertsidest ehk nendes süsteemides olevast pöörleva massi hulgast ja nende omavahelisest takistusest. Tavaliselt on võnkumiste sagedus vahemikus 1 – 4 hertsi. Ebastabiilse võnkumise korral aga ei pruugi toimuda võnkumist vaid monotoone kahe süsteemi pingete nurkade erinevuse kasvamine, mis viib pinge kokkukukkumiseni ning releede rakendumiseni. Sellisel juhul probleem seisneb selles, et tavalised distantskaitse ei ole mõeldud asünkroonkäikusid määrama ja seetõttu võivad nad toimida valesti lülitades välja vale liini või toimides vales järjekorras.

Häiringu tõttu toimub süsteemis tarbimise ja tootmise tasakaalupunkti nihkumine. Selle käigus tekitatakse süsteemi osade vahel võnkeprotsessid. Kui süsteemiosade vaheline sidestatus on nõrk tekib kahe süsteemiosa vahel ebastabiilne võnkumine ehk kaks süsteemiosa ei tee enam üksteise vastu sünkroonseid võnkeid, vaid langevad omavahel sünkronismist välja.

Seega on olukordi, kus on eelistatud asünkroonkäikude tõttu väljalülitamise blokeerimist. Näiteks tuleks asünkroonkäikudest distantskaitse blokeerimist teostada kohtades, kus väljalülitumine põhjustab süsteemi eraldamist sellisteks osadeks, kus on suured tootmise ja tarbimise erinevused. Sellised olukorrad esinevad siis, kui kaks süsteemi on omavahel ühenduses üksikute liinidega ja need samad liinid võivad võnkumise korral olla lülid, mis hoiavad süsteemi koos.

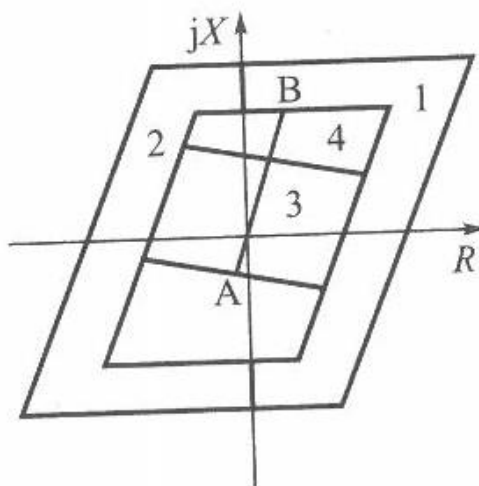
Selliste olukordade tarvis kasutatakse süsteemides spetsiaalseid asünkroonkäigukaitse releesid. Selliste asünkroonkäigukaitse releede rakendamine on keerukas, sõltub süsteemi parameetritest, süsteemioperaatori meetodikatest ja kaitsmisprintsipiidest. Selle tulemusel on asünkroonkäigukaitse releede seadistamisel vähe ühesugust loogikat süsteemioperaatorite seas, kuid kaitse eesmärgid on samad. Nendeks eesmärkideks loetakse [7]:

- Vältida väljalülitumist häiringute korral, millest süsteem on võimeline taastuma, seega ei tohi rele toimida sünkroonsete võimsuse võnkumiste korral;
- Ebastabiilse võnkumise korral on kohustuslik lahutada süsteemid, sest asünkroonse talitluse tekkimise korral ei suuda kogu süsteem tervikuna iseseisvalt taastuda.

Süsteemide lahutamine peaks toimuma punktis, kus tootmise ja tarbimise tasakaal võimaldab lahutatud süsteemiosadel iseseisvalt edasi talitleda kuni süsteemide ühendamiseni ja lahutus peaks toimuma kohas, kus süsteeme on võimalik omavahel kergesti uuesti ühendada. Tavaliselt on need kriteeriumid omavahel vastuolus ja seega tuleb leida kompromiss süsteemi lahutuskoha jaoks.

Asünkroonkaitse releesid ei ole siiani väga laialdast kasutust leidnud, kuid neile pööratakse aina enam tähelepanu, eriti suurte võimsuste ühendamisel kõrgepingevõrkudes. Suuremad generaatorite takistused ja väiksemad inertskonstandid on vähendanud kriitilisi lühiseaegasid, seega stabiilsuse piirid on muutunud kitsamaks ja seega omandab varajane süsteemi eraldamine aina tähtsamat rolli süsteemi ebastabiilsete võnkumiste korral.

Asünkroonkaitse funktsioon on lisatud ka distantskaitsetele. Selle funktsiooni karakteristikut illustreeritakse joonisega 2.9. Joonisel on näha nelinurkkarakteristik $R - X$ tasapinnal, mida kasutatakse võimsuste võnkumise tuvastamiseks ning distantskaitse funktsiooni blokeerimiseks [3], mille toimimise mehhanismi kirjeldati täpsemalt peatükis 1.3.



Joonis 2.9. Asünkroonkäigu kaitse funktsiooni karakteristik [3]

Avastatud võimsuse võnkumist loetakse ebastabiilseks, kui takistuse trajektoor siseneb karakteristikusse ühelt poolt, ületab joone AB, mis tähistab pingete nurga erinevust $\delta=180^\circ$ ja seejärel liigub takistusvektor karakteristiku teiselt poolt välja. Kaitse jagab ulatuse lähedaseks ja kaugeks jagades kogu kaitse ulatuse joonega kaheks. Kui võnkumiste ajal takistuse

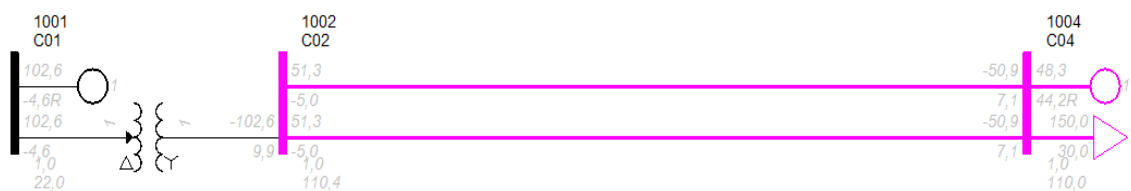
trajektor läbib numbriga neli tähistatud ala, siis loetakse võnkumist kaueks ning kui takistuse trajektor läbib ala kolm loetakse võnkumist lähedaseks. Mõlemal alal on oma asünkroonkäikude loendur ja väljalülitamine toimub ainult ette antud asünkroonkäikude arvu täitumisel. [3] Tavaliselt kasutatakse sellist asünkroonkäikude lugemist süsteemioperaatorite poolt tagavarakaitsena ühe masina või masinagrupi süsteemist välja lülitamiseks.

3. Elektrisüsteemi võnkumiste modelleerimine

Antud peatüki eesmärgiks on modelleerida esmalt elektrisüsteemis madalsageduslikke võimsuse võnkumisi lihtsa süsteemi korral ja vaadelda releekaitse käitumist selles olukorras. Lihtsa süsteemi korral modelleerides näidatakse, et modelleerimistarkvarast saadud tulemused langevad kokku teoorias kirjeldatud situatsioonidega. Seejärel modelleeritakse madalsageduslikke võimsuse võnkumisi keerukas elektrisüsteemis, kasutades selleks Eesti elektrisüsteemi. Võnkumiste modelleerimise käigus vaadeldakse samuti releekaitse käitumist ja sellega kontrollitakse releekaitse häälestust Eesti elektrisüsteemis madalsageduslike võnkumiste korral.

3.1. Võimsuse võnkumise modelleerimine ja kaitsete käitumine lihtsa elektrisüsteemi korral

Esmalt vaadeldakse elektrisüsteemi võnkumise modelleerimiseks peatükis 1.1 kirjeldatud lihtsat elektrisüsteemi, mis koosneb generaatorist, lõpmata võimsast elektrisüsteemist ning neid omavahel ühendavast liinist. Generaatorid on modelleeritud klassikaliste mudelitega, mis sisaldab endas ainult generaatori inertskonstanti, esmalt lihtsustuse mõttes generaatori summutusvõimega ei arvestata. Elektrisüsteemi dünaamiliste protsesside modelleerimiseks kasutatakse võrguarvutustarkvara PSS/E. Elektrisüsteemi releekaitse modelleerimiseks kasutatakse tarkvara CAPE (*Computer aided protection engineering*). Selle tarkvara moodul TS-link ühendab omavahel dünaamika simulatsiooni programmi ning kaitsete töötamised ja võimaldab jälgida kaitsete tööd dünaamilises võrguolukorras. Tarkvarade ühendamise kohta on võimalik lugeda lisas L1.



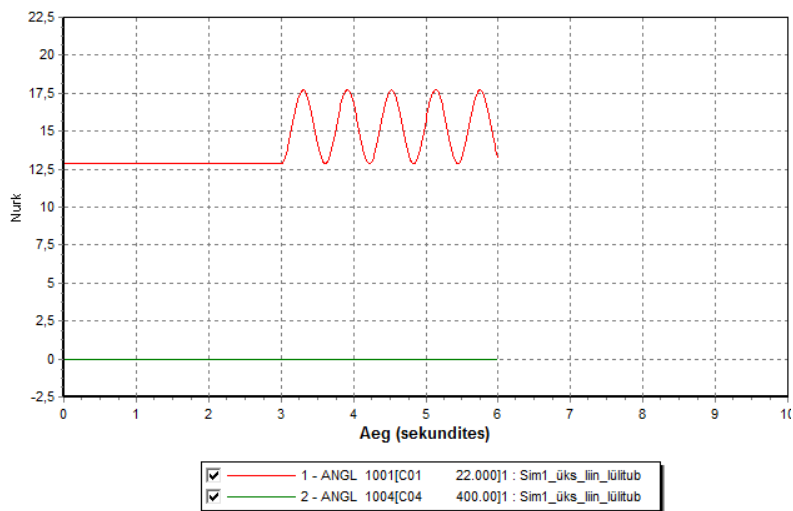
Joonis 3.1. Modelleeritava lihtsa elektrisüsteemi põhimõtteskeem

Vaadeldakse olukorda, kus generaatorit süsteemiga ühendatavatest liinidest üks lülitub lühiseta välja. Modelleerimiseks kasutatakse 150 MVA võimsusega generaatorit,

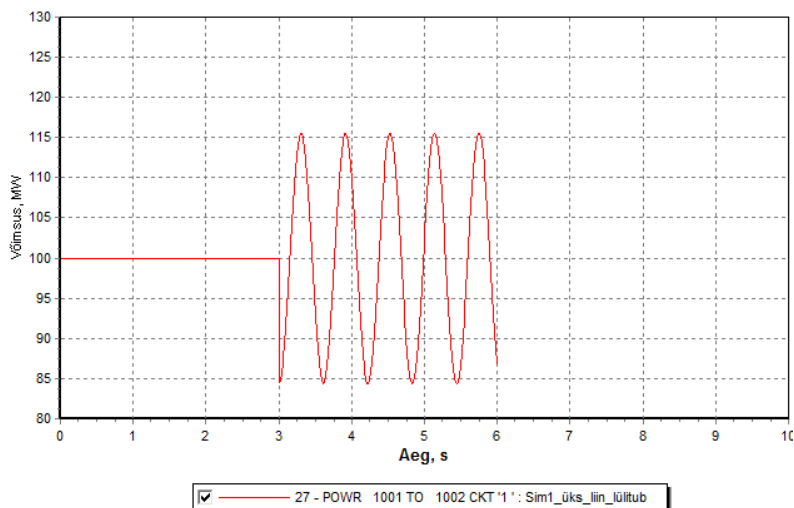
inertskonstandiga $H=4,4 \text{ MW*s/ MVA}$ ning ülimööduva takistusega $X_d'' = 0,2 \text{ } \Omega$. Modelleeritava süsteemi põhimõtteskeem on toodud joonisel 3.1.

3.1.1 Ühe ühendusliini väljalülitamine

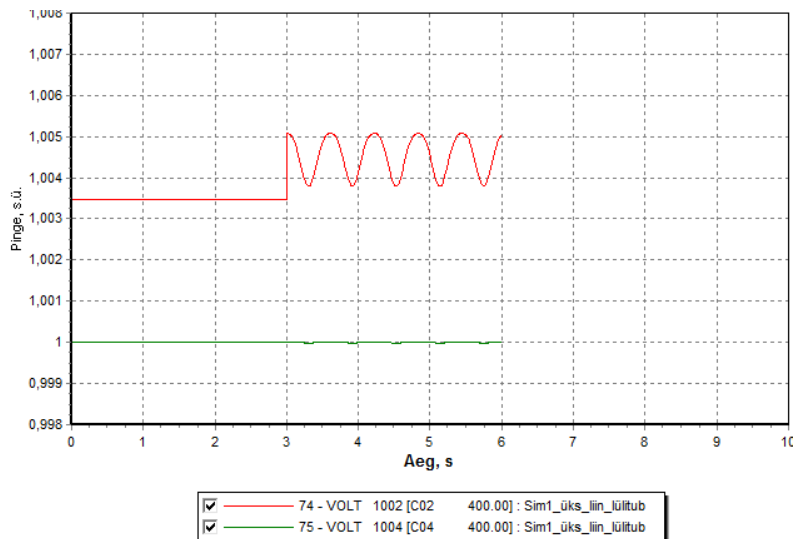
Simulatsiooni kolmandal sekundil lülitub generaatorit süsteemiga ühendavatest paralleellinidest üks ahel välja, mis kutsub esile võnkumise vaadeldava generaatori rootori nurgas ning seega ka generaatori väljundvõimsuses. Simulatsiooni rootori nurga muutus on toodud joonisel 3.2 ning generaatori väljundvõimsuse võnkumine on toodud joonisel 3.3.



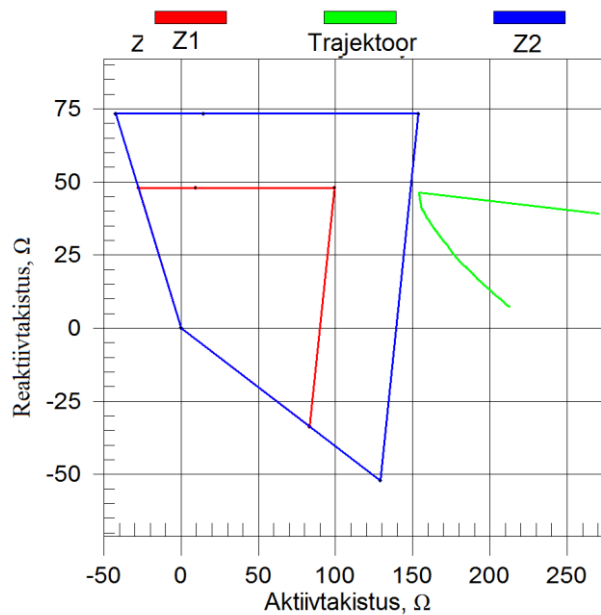
Joonis 3.2. Generaatori nurga võnkumine liini väljalülitumisel



Joonis 3.3. Generaatori väljundvõimsuse võnkumine ühe liini väljalülitumisel



Joonis 3.4. Pinge muutus ühe liini väljalülitumisel



Joonis 3.5. Aktiiv – ja reaktiivtakistuse muutumine pärast liini lülitamise korral

Toodud generaatori nurga muutust vaadeldes on selge, et tekkival nurga võnkumisel ühe liini väljalülitumise olukorras tekkiv võimsuse muutus on samuti väike, sest ka generaatori nurga muutus on väike. Võimsuse võnkumist vaadeldes on tõepoolest näha, et aktiivvõimsuse võnkumine toimub piirides 85 MW kuni 115 MW. Samuti on võimalik näha summutusvõime puudumist süsteemis. Toodud joonistelt on näha, et generaator käitub liini väljalülitumisel

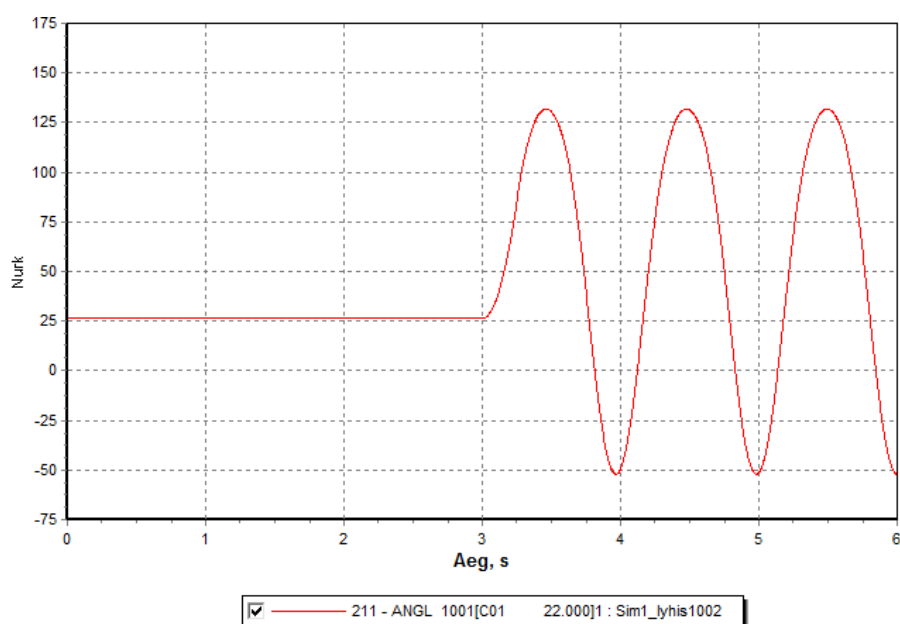
staatilise stabiilsuse teooria kohaselt, mida kirjeldati täpsemalt peatükis 1.1.1. Ühe liini väljalülitumise olukorras toodud pinge muutumine liinide otses on toodud joonisel 3.4.

Punasega on märgitud joonisel pinge muutumine generaatori poolses liini otsas ja rohelisega pinge süsteemi poolses otsas. On näha, et pinge muutumine on väikese ulatusega. Sellest tulenevalt on selge, et ka näivtakistuse muutumine võnkumise ajal on suhteliselt väike, takistuste muutumine töösse jääval liinil ajas on toodud joonisel 3.5.

Kuna pinge ning võimsusvoog läbi liini muutub suhtelistelt väikestes piirides, siis ka kaitse poolt mõõdetav näivtakistus muutub väikeses ulatuses. Joonisel 3.5 tuuakse kaitse poolt mõõdetav näivtakistus.

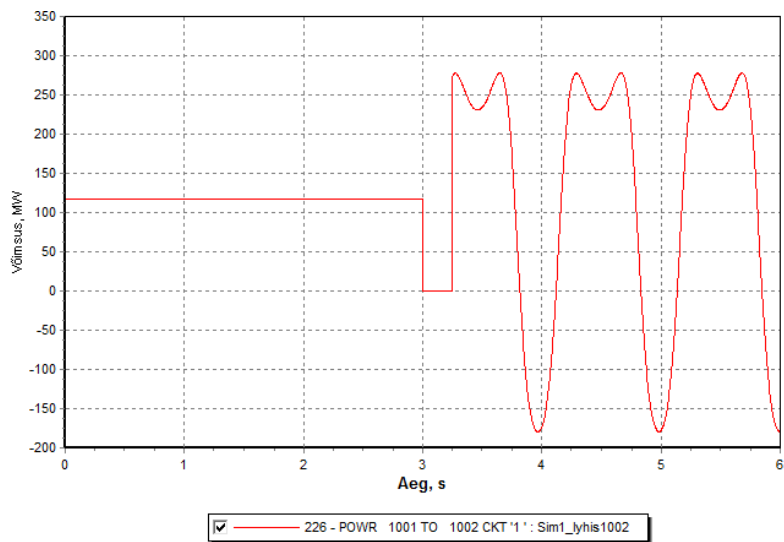
3.1.2 Lühise olukorra modelleerimine summutuseta

Järgnevalt vaadeldakse lihtsa elektrisüsteemi käitumist modelleerimisel, kui generaatori lattide lähedal toimub lühis, kuid peale lühist süsteemi resulteeriv takistus on sama kui lühise eelsel talitlusel. Kasutatakse joonisel 3.1 toodud skeemi ning lühis tekitatakse sõlmes 1002. Lühisena kasutatakse kolmefaasilist lühist, sest vastavalt teooriale on generaatoril sellist lühist kõige raskem taluda ning seetõttu on suureulatuslikud võnkumised tõenäosuslikumad tekkima. Esmalt ei arvestata modelleerimisel generaatori ja süsteemi võnkumiste summutusvõimetega. Generaatori nurga muutus lühise tõttu tuuakse joonisel 3.6.

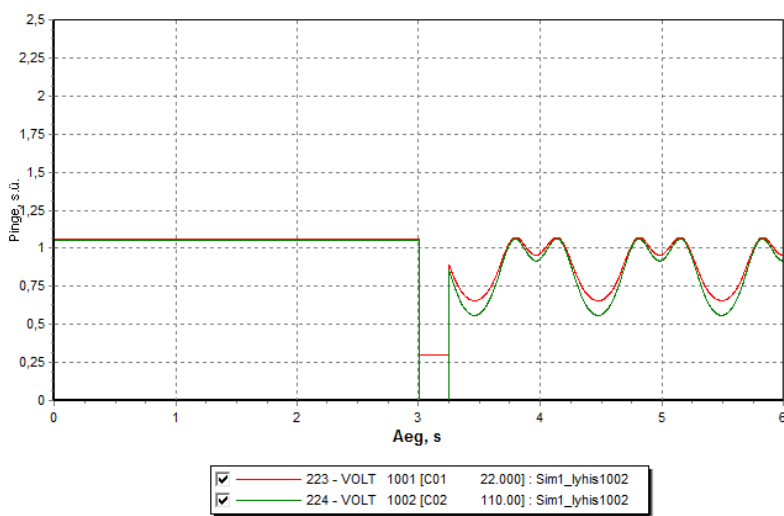


Joonis 3.6. Generaatori nurga võnkumine lühise tõttu

On selgesti näha, et generaatorile lähedase lühise tõttu muutub generaatori nurk ja väljundvõimsus oluliselt suuremates piirides, kui ühe liini väljalülitumise korral. Samuti on joonisel 3.7 näha iseloomulikke alanemisi generaatori väljundvõimsuses kui generaatori nurk ületab 90 kraadi piiri. Pinge kõikumine sõlmes 1001 ja 1002, on toodud joonisel 3.8.



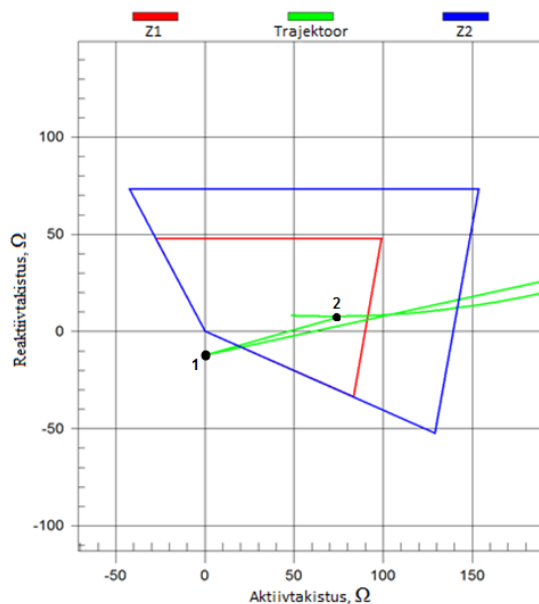
Joonis 3.7. Generaatori võimsuse võnkumine lühise tõttu



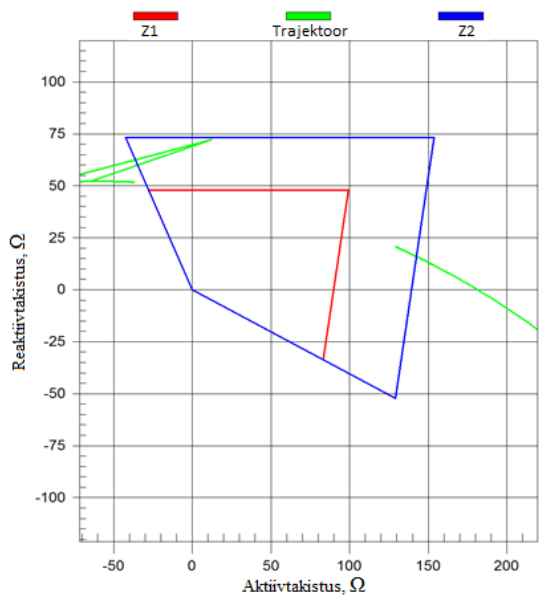
Joonis 3.8. Pinge muutumine sõlmedes 1001 ja 1002

Joonistelt on näha, et lühise korral on ka pinge võnkumine pärast lühise olukorda oluliselt suurem, kui ühe liini välja lülitamise olukorras. Kuna liinides edastatav võimsus ja liini otsades pinge kõigub suurel määral vaadeldakse siinkohal ka võnkumise mõju distantskaitsele.

Jälgitakse distantskaitseid, mis asuvad joonisel 2.1 toodud aseskeemis ühe ühendusliini otstes. Generaatori poolses otsas oleva distantskaitse mõõtmiste tulemus on toodud joonisel 3.9 ning süsteemi poolse distantskaitse mõõdetud tulemused joonisel 3.10.



Joonis 3.9. Generaatori poolses otsas oleva distantskaitse mõõtmistulemused



Joonis 3.10. Süsteemi poolses otsas oleva distantskaitse mõõtetulemused

Joonistel on distantskaitse esimene töötsoon märgitud punase värviga, teine töötsoon sinise värviga ning mõõdetava näivtakistuse trajektoor pärast lühist järgneval võnkumise olukorral märgitud rohelise värviga.

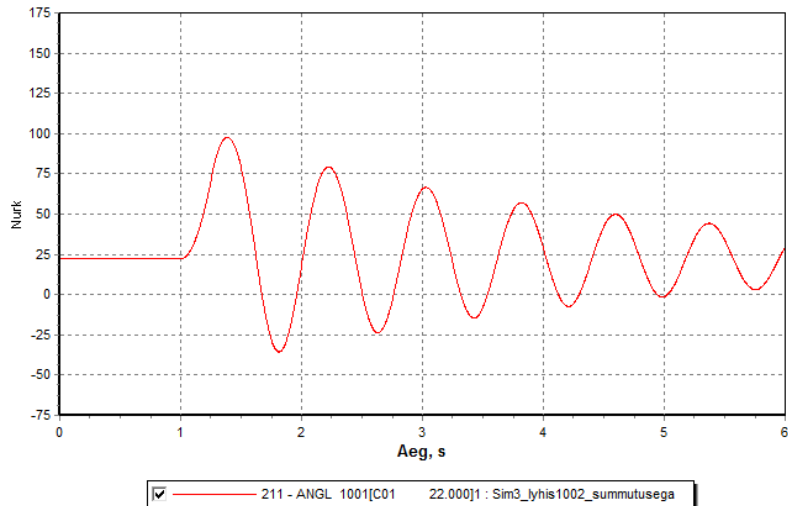
Generaatori poolse distantskaitse mõõtetulemustest joonisel 3.9 on võimalik näha, et vahetult enne lühist asub kaitse poolt mõõdetav näivtakistus väljaspool kaitse töötsoone. Lühise hetkel liigub näivtakistus koheselt üle karakteristiku teisele poole tööala, mida märgib joonisel sirge joon, sest lühis tekitati sõlmes 1002, mis asub vaadeldavast kaitsest generaatori pool. Lühise ajal mõõdetav näivtakistus asub joonisel 3.9 punktiga 1 tähistatud kohal. Pärast lühise eemaldamist skeemist näivtakistus hüppab kaitse töötsooni, mis on joonisel tähistatud punktiga 2 ning hakkab esmalt liikuma kaitse töötsoonis vasakule rootori endiselt suureneva nurga tõttu. Mõne aja pärast näivtakistuse muutus peatub ning muutub vastupidiseks liikudes lõpuks kaitse töötsoonidest paremalt poolt välja kuni järgmise sünkroonse võnkeni, mida iseloomustab kõver joon. Järgneva sünkroonse võnke ajal toimub sama situatsioon uuesti ja kui kaitse poolt mõõdetav näivtakistus asub piisavalt kaua töötsoonis lülitatakse liin välja, kuigi ohtu lühise näol ei ole.

Süsteemi poolse distantskaitse poolt mõõdetavat tulemust vaadates on näha, et lühise korral hüppab ka siin näivtakistus kaitse teise töötsooni ja pärast lühise eemaldamist siseneb samuti kaitse teise töötsooni paremalt. Sama olukord on ka siin, ehk kui kaitse poolt mõõdetav näivtakistus asub piisavalt kaua kaitse töötsoonis tekib olukord, kus liin lülitatakse asjatult välja.

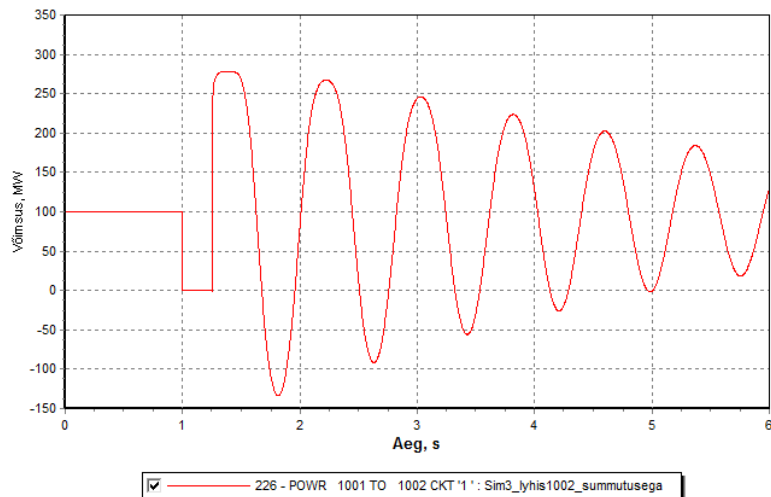
3.1.3 Lühise olukorra modelleerimine summutustegureid arvestades

Eelneval simulatsioonil arvestati ainult generaatori inertsiiga, mille tulemusel tekkisid võnkumised, mis jäid kestma kuni simulatsiooni lõpuni. Reaalselt on generaatoritel ja võrgul olemas ka mingisugune summutustegur. Järgnevalt simuleeritakse eelnevale olukorrale samasugust lühise olukorda, kuid seekord võetakse arvesse summutustegureid. Lühis tehakse ka siinkohal sõlmes 1002 ja lühise kestuseks on 0,25 sekundit.

Lühise tõttu generaatori muutuv nurk on toodud joonisel 3.11. Jooniselt on võimalik näha, et arvestades summutustegurit muutub igal järgneval võnkel nurga muutus võrreldes eelnevaga väiksemaks, kuni lõpuks võnkumine sumbub ning tekib generaatori töös uus tasakaalupunkt. Kuna antud olukorras võrgu ekvivalentne takistus jäi samaks võrreldes lühise eelse võrguolukorraga, siis siinkohal langevad lühisejärgne ja lühise eelse tööpunkt kokku. Võimsuse muutus arvestades summutustegurit tuuakse joonisel 3.12.



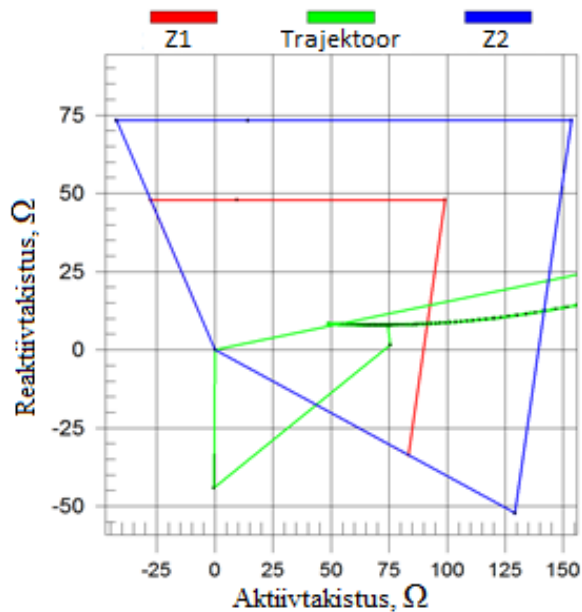
Joonis 3.11. Generaatori nurga muutus summutust arvestades



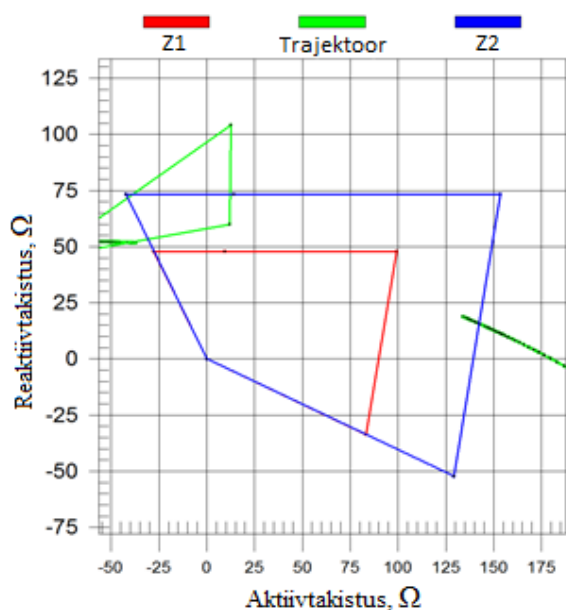
Joonis 3.12. Generaatori väljundvõimsuse muutumine summutustegurit arvesse võttes

Siin on võimalik jooniselt näha, et võimsuse võnkumine summutustegurit arvestades muutub aja jooksul väiksemaks, kuni leitakse uus tööpunkt, mis antud juhul ühtib algse tööpunktiga, kuna võrgu ekvivalentne takistus jäi muutumatuks.

Järgnevalt tuuakse distantSKaitse poolt mõõdetavad tulemused liinide erinevates otsades, kui arvestatakse sumbuVustegureid. Joonisel 3.13 on toodud generaatori poolses otsas oleva distantSKaitse poolt mõõdetud tulemused. Sumbuvustegurita distantSKaitse poolt mõõdetavad näivtakistused on toodud joonistel 3.9 ja 3.10.



Joonis 3.13. Generaatori pool oleva distantskaitse mõõtmistulemused



Joonis 3.14. Distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistus süsteemipoolses liini otsas

Jooniselt on näha, et ka summutustegureid arvesse võttes satub distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus kaitse töösoonidesse, kuid juba järgmisel võnkel ei satu enam mõõdetav näivtakistus kaitse esimesse töösooni ning järgnevate võngete korral enam ka mitte teise töösooni. Vaadeldakse olukorda ka teises liini otsas, kus distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistus on toodud joonisel 3.14.

Ka siin joonisel on näha, et esimesel võnkel siseneb kaitse poolt mõõdetav näivtakistus teise töötsooni, kuid juba teisel võnkel seda enam ei juhtu.

Seega on võimalik teha järeldus, et distantskaitsel oleks tarvilik kasutada võimsuse võnkumise blokeeringu funktsiooni, et vältida rele asjatut rakendumist ning sellega süsteemi olukorra halvendamist.

Järgnevas peatükis uuritakse võimsuste võnkumisi ja nende mõjusid releekaitsele suures süsteemis Eesti elektrisüsteemi näitel.

3.2. Võimsuse võnkumise modelleerimine ja kaitsete käitumine keeruka süsteemi korral Eesti süsteemi näitel

3.2.1 Eesti elektrisüsteem

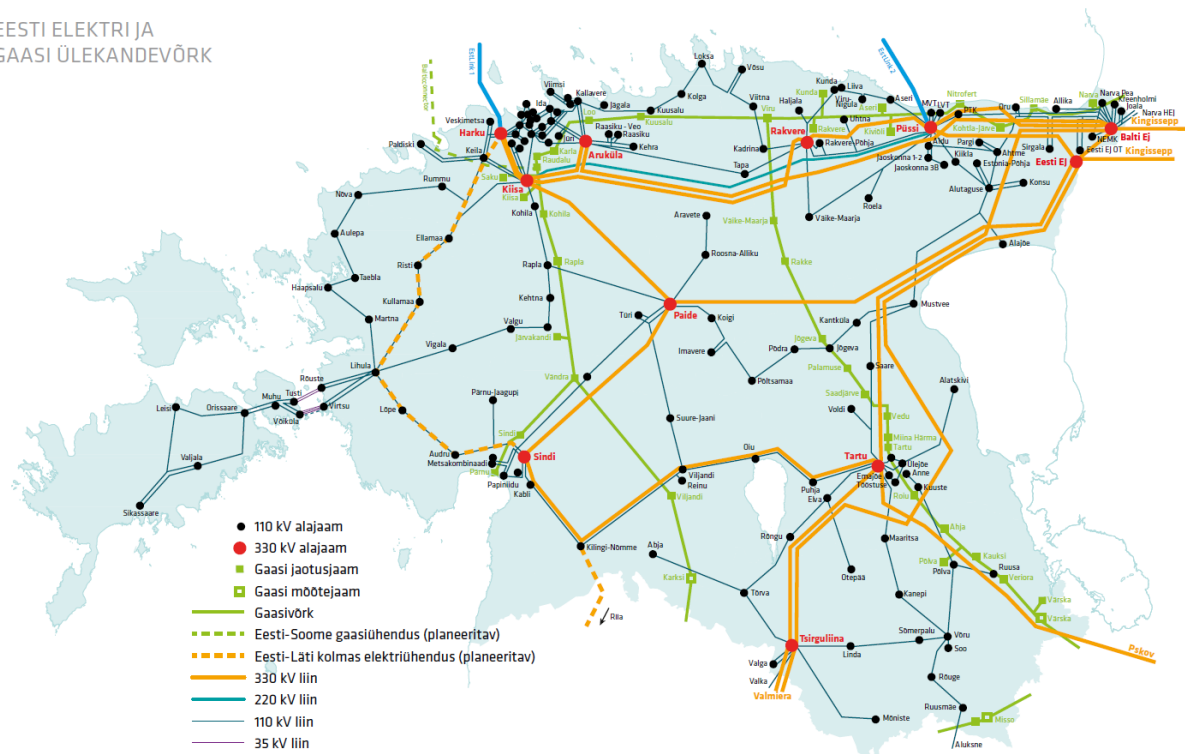
Eesti elektrisüsteem kuulub suurde sünkroonselt töötavasse ühendsüsteemi BRELL, mille moodustavad Eestiga vahelduvvoolu liinidega ühendatud naaberriigid Läti ja Venemaa ning omakorda nende naabrid Leedu ja Valgevene. [13]

Eesti elektrisüsteemil on kokku viis vahelduvvoolu välisühendust ning kaks alalisvooluühendust. Kolm vahelduvvooluühendust on Venemaaga, millest kaks liini lähevad Narvast Kingisseppa ning üks Tartust Pihkvasse ja kaks Lätiga, millest üks on Tartu ja Valmiera vahel ning teine Tsirguliina ja Valmiera vahel. Kaks alalisvooluühendust on Eesti elektrisüsteemil Soomega. Eesti elektrisüsteemi kaart on toodud joonisel 3.15. [13]

Eesti elektrisüsteemi installeeritud tootmiseadmete netovõimsus aastatel 2015/2016 on 2656 MW, millest igal ajahetkel on võimalik kasutada 1700 MW. Suurimad elektrijaamad on Eesti Elektriijaam netovõimsusega 1040 MW, Balti Elektriijaam netovõimsusega 266 MW ja Iru elektrijaam netovõimsusega 173 MW. [14]

Süsteemis elektrisüsteemi võnkumiste modelleerimiseks kasutatakse Eesti elektrivõrgu süsteemioperaatori Elering AS poolt kasutatavat Eesti elektrisüsteemi dünaamika võrgumudelit ning kaitsete analüüsimiseks samuti Elering AS mudelit.

Vastavalt võrgueeskirjale kõrvaldatakse lühis 330 kV elektrivõrgus 0,1 sekundi jooksul, erandkorras võib lühise kõrvaldamise aeg ulatuda 0,37 sekundini. 110 kV ning 220 kV võrgus kõrvaldatakse lühised 0,6 sekundi jooksul, erandjuhul võib kõrvaldamise aeg ulatuda 1 sekundini. [12]



Joonis 3.15. Eesti 110-330kV elektrivõrk [13]

Modelleeritakse erineva pikkusega kolmefaasilisi lühiseid 330kV võrgus erinevates olukordades ning vaadeldakse Eesti elektrisüsteemi ja releekaitse talitlemist lühise olukorras kui ka sellele järgnevas olukorras.

Eesti ülekandevõrgus on 110 kV ja kõrgemal pingetel kasutusel põhikaitsena distants - või diferentsiaalkaitse. 330 kV pingestmel on kõikidel liinidel kasutusel dubleeritud põhikaitse, millest vähemalt üks on distantskaitse.

Võnkumiste modelleerimise üheks eesmärgiks on kontrollida releekaitse sätete arvutusmetoodika sobivust dünaamilisse võrguolukorda, sest praegu kasutatakse Elering AS-is kaitsetsätete arvutamiseks staatilist võrguolukorda.

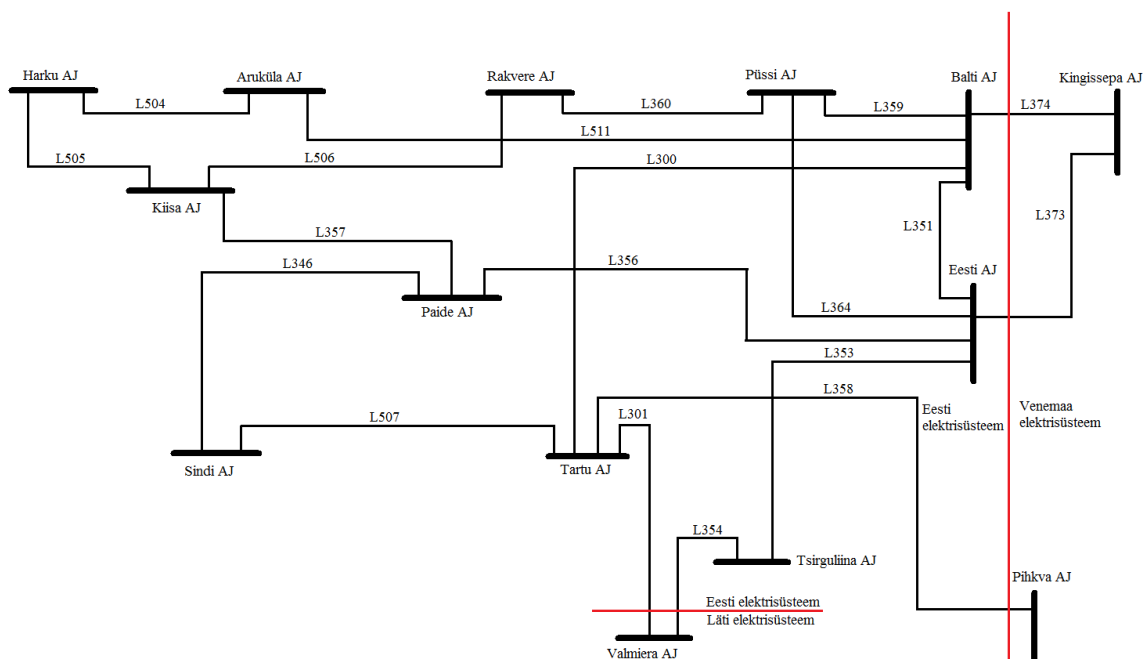
3.3. Modelleeritavad võrguolukorrad

Modelleeritakse kokku nelja stsenaariumi. Iga juhtumi korral modelleeritakse kahe pikkusega lühiseid – 0,25 ja 0,37 sekundit. Lühiseid modelleeritakse Kingissepa alajaamas, sest seal tekkiva lühise korral on kõige tõenäolisem, et Eestit Venemaa süsteemiga ühendavad liinid lülituvad välja ja katkestab ühenduse Eesti suurimate tootmisüksuste ja suure Venemaa

süsteemi vahel, seega seal tekkiva lühise korral on mõjud Eesti tootmisüksustele kõige kriitilisemad. Modelleeritavad stsenaariumid on:

- Suvine miinimumkoormus võrgus ja transiiti läbi Eesti võrgu ei toimu.
- Suvine miinimumkoormus võrgus ja läbi Eesti võrgu toimub transiit.
- Talvine maksimaalne koormus võrgus ja transiiti läbi Eesti võrgu ei toimu.
- Talvine maksimaalne koormus võrgus ja läbi võrgu toimub transiit.

Modelleeritavad stsenaariumid iseloomustavad Eesti elektrisüsteemi piirsituatsioone. Valitud on võrgu suvine minimaalne koormus seetõttu, et väike koormus võrgus võimaldab generaatoritel lühise ajal omandatud kiirendamise energia lihtsamalt võrku anda, samas madala koormuse katmiseks on tarvis vähe masinaid, mis muudab piirkonna summaarse inertsiga madalaks. Talvise maksimaalse koormuse korral on olukord aga suvise miinimumkoormuse olukorraga vastupidine nii võrgu kui generaatorite summaarse inertsiga seisukohast. Samuti arvestatakse suvise miinimumkoormuse juures remontrežiimi, kus üks liin Eesti alajaamast Kingissepa alajaama on välja lülitatud. Talvise olukorra juures seda ei arvestata, sest plaanitud remonttöid tehakse suvisel perioodil.



Joonis 3.16. Eesti 330 kV elektrivõrgu põhimõtteskeem

Võnkumiste olukorras vaadeldakse kaitsete poolt mõõdetavaid näivtakistusi liinidel, mis on Eesti süsteemi välisühendusteks ning Eesti suurimaid tootmisüksuseid ühendaval liinil L351

Eesti – Balti, sest teooria kohaselt on kõige ohtlikumad võnkumised liinidel, mis ühendavad ühte süsteemi teistega või omavahel suuri tootmisüksuseid. Eesti 330 kV elektrivõrgu põhimõtteskeem on toodud joonisel 3.16.

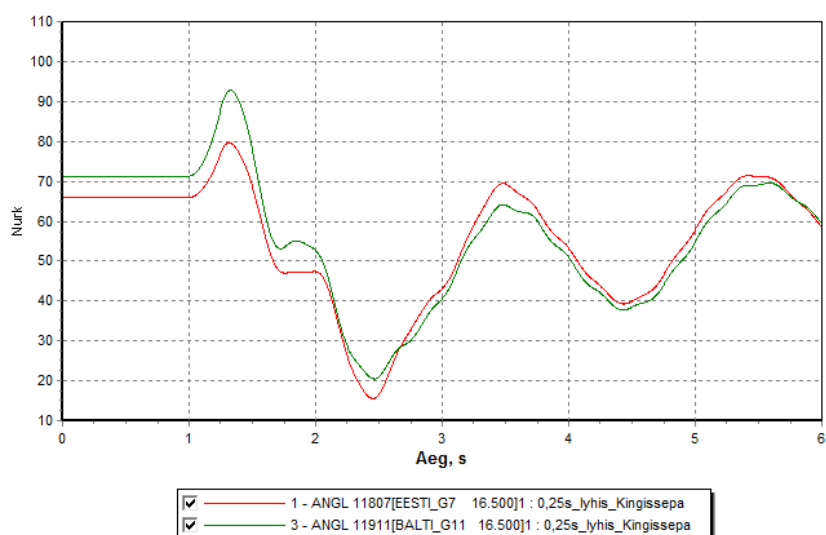
3.3.1 Suvine miinimumkoormus ja nulltransiit

Esmalt simuleeritakse olukorda, kus Eesti elektrisüsteemis on minimaalne suvine koormus, 483 MW [14] ning Eesti elektrijaamades on töös minimaalne tootmisvõimsus – 377 MW [14]. Samal ajal eksporti Lähti ei toimu. Puuduv tootmisvõimsus saadakse läbi Estlink2 alalisvooluühenduse Soomest.

Modelleeritakse kahte lühist pikkustega 0,25 sekundit ja 0,37 sekundit Kingissepa 330 kV alajaamas, kuhu on ühendatud Eestist kaks liini ning vaadeldakse elektrisüsteemi käitumist ning kaitsete reageerimisi. Lühise tulemusel lülitub välja Balti alajaamast Kingissepa väljuv liin. 0,25 sekundit on lühise pikkuseks valitud, sest liinidest üle ulatuvad tsoonid töötavad just selle viitega ning 0,37 sekundit lühiseaeg on valitud vastavalt võrgueeskirjas olevale maksimaalsele lühiseajale 330 kV võrgus.

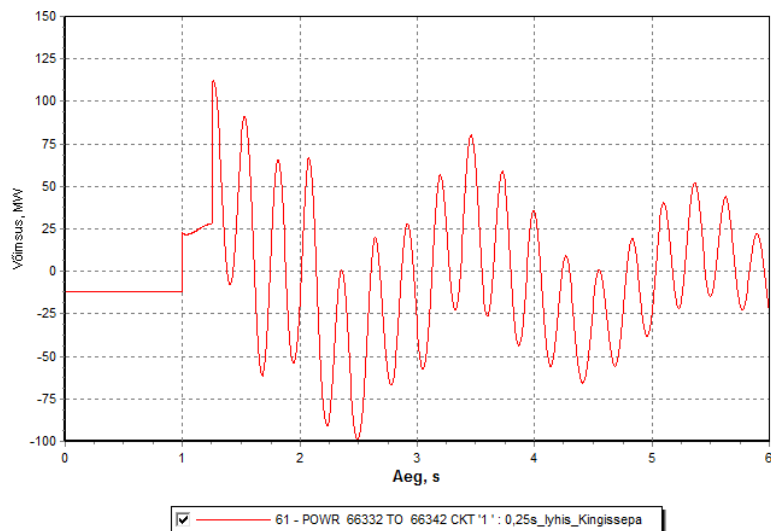
Modelleerimine 0,25 sekundilise lühise korral

Joonisel 3.17 tuuakse Eesti ja Balti elektrijaama generaatorite nurkade muutused kolmefaasilise lühise tõttu ja sellele järgnev olukord. Lühis tekitati esimesel sekundil ning lühise pikkusena kasutati esmalt 0,25 sekundit.



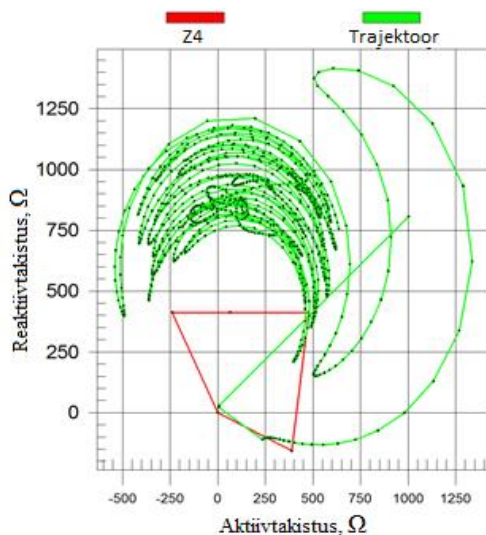
Joonis 3.17. Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurkade muutused 0,25s lühise korral

Jooniselt on näha, et lühise ja liinide väljalülituse tõttu tekib Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurkades erinevus, sest üks generaator jõuab lühise ajal rohkem kiirenda, kuna teekond Kingissepas oleva lühiseni on lühem. Seega pinge generaatori lattidel on madalam ning generaatoril on energiat raskem edasi anda.



Joonis 3.18. Võimsuse võnkumine liinil L351 Eesti - Balti

Selle tulemusel tekib Eesti ja Balti alajaamade vahelisel liinil võimsuse võnkumine pärast lühise väljalülitamist, sest generaatorite kiirused on erinevad. Võimsuse võnkumine liinil L351 Eesti – Balti Eesti alajaama poolt vaadatuna on toodud joonisel 3.18.

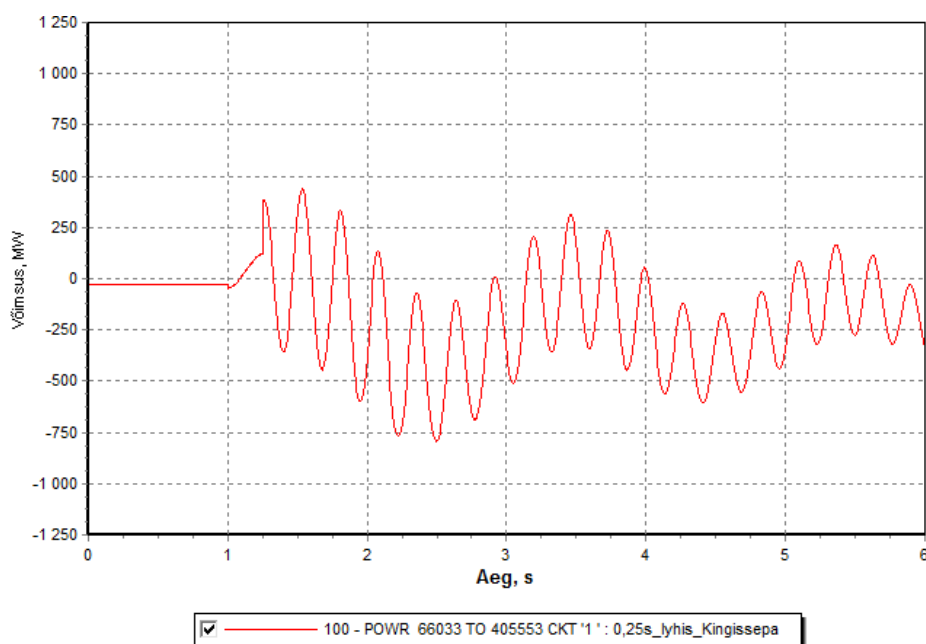


Joonis 3.19. L351 Eesti - Balti distantkaitse mõõtmised Eesti alajaama poolt

Joonisel 3.18 on võimalik näha, et võimsuse võnkumine liinil on 330 kV liini jaoks väga väikene. Siiski vaadeldakse ka distantskaitse mõõtmisi liini L351 Eesti alajaama poolses otsas. Distantskaitse mõõtmine on toodud joonisel 3.19.

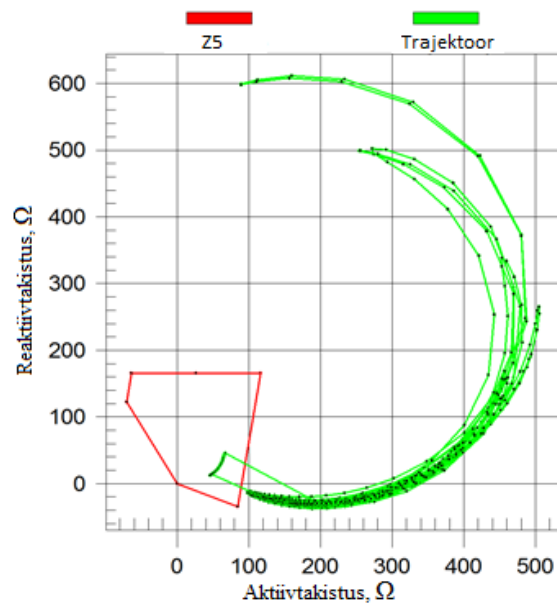
Distantskaitse mõõtmistest on samuti võimalik näha, et mõõdetav takistus liigub ehk toimub võimsuse võnkumine mõõdetaval liinil. Samas on võimalik täheldada, et väikese võimsuse tõttu toimub võimsuse võnkumine kaitse tötsoonidest küllalt kaugel. On näha ühel võnkel mõõdetud takistuse kaitse tötsooni sisenemist, kuid joonisel toodud kaitse neljas tötsoon on väga pika ulatuse ning viitega, seega erilisi meetmeid kaitse ebavajaliku rakendamise takistamiseks ei ole tarvis ette võtta ning ohtu valesi toimimiseks ei ole.

Lühise tagajärjel lülitub välja Eestit Venemaaga ühendavast kolmest liinist kaks ning üks jääb ühendatuks. Järgnevalt vaadeldakse võimsust kolmandal Eestit Venemaaga ühendaval liinil L358 Tartu – Pihkva. Liini L358 Tartu – Pihkva võimsus ajas on toodud joonisel 3.20.



Joonis 3.20. Võimsuse võnkumine liinil L358 Tartu – Pihkva

Joonisel 3.20 toodud võnkumisest on näha, et sellel liinil toimuv võimsuse võnkumine on palju suurema ulatusega, kui seda on võnkumine liinil L351 Eesti – Balti. Samas on jooniselt näha, et maksimaalne võimsus liinil on umbes 750MW piiril, mis on 330 kV liini jaoks koormusvool. Samal liinil distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus on toodud joonisel 3.21.



Joonis 3.21. Distantkaitse poolt mõõdetud näivtakistus liinil L358 Tartu – Pihkva

Joonisel 3.21 on võimalik näha, et võrreldes liinil L351 Eesti – Balti toimuva võnkumisega näeb distantkaitse siinkohal võnkumist väiksema näivtakistuse juures. See tuleneb sellest, et antud liinil võngub võimsus suuremates piirides, kui Eesti – Balti liinil, mis on toodud joonisel 3.18. Kuid ka sellel juhul on näha, et võnkumise korral näivtakistus ei sisene kaitse töötsooni ning liigseks kaitse toimimiseks ohtu ei ole.

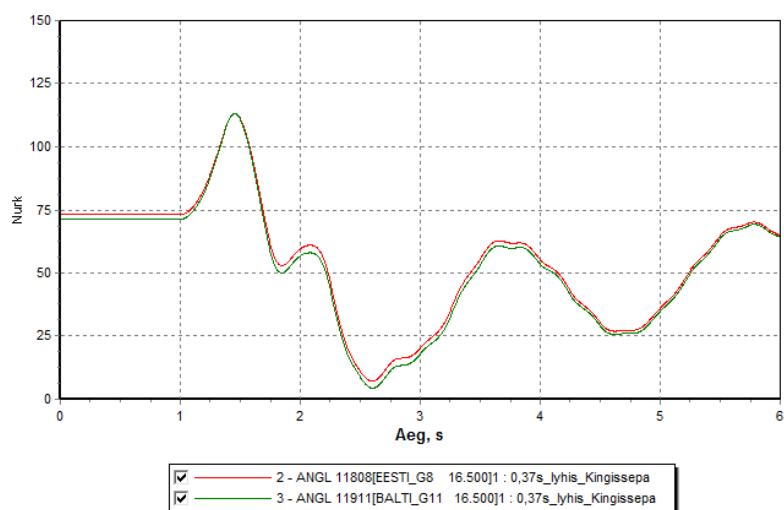
Modelleerimise tulemustest on võimalik järeldada, et suvise miinimumkoormuse ning miinimumtootmise juures ilma eksportimata 0,25 sekundi pikkuse lühise korral tekkivate võimsuse võnkumiste korral kaitsete liigtoimimise ohtu ei ole.

Modelleerimine 0,37 sekundilise lühise korral

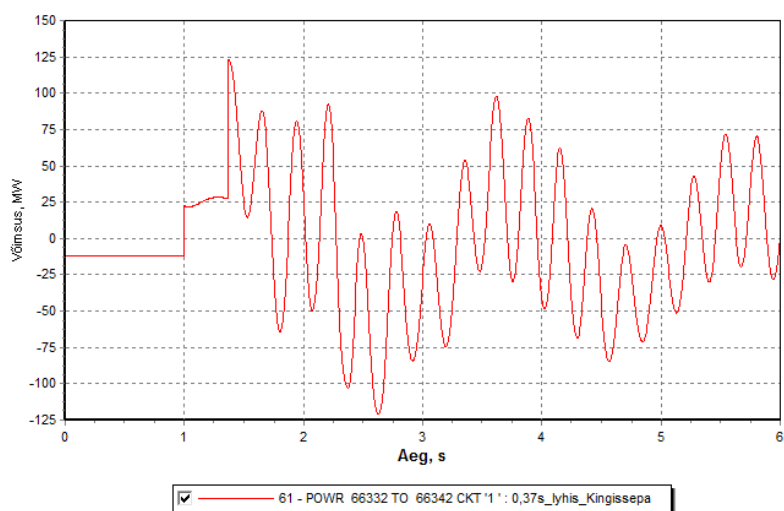
Modelleeritakse samuti kolmefaasilist lühist Kingissepa alajaama lattidel, kuid seekord on lühise pikkuseks 0,37 sekundit, mis on maksimaalne lubatud lühiseaeg 330 kV elektrivõrgus. Lühise tagajärjel Eesti ja Balti elektriyaamade generaatorite nurkade muutused on toodud joonisel 3.22

Joonisel on võimalik näha, et võrreldes 0,25 sekundilise lühisega muutuvad generaatorite nurgad suuremas ulatuses. Lühise korral suureneb nurk ligi 125 kraadini, kuid 0,25 sekundilise lühise korral ei suurenenud nurk üle 100 kraadi. Samas tuleb tähele panna, et Eesti ja Balti elektriyaamade generaatorite nurgad erinevad üksteisest siinkohal vähem kui 0,25 sekundilise lühise puhul, mis tähendab, et võnkumine jaamasid ühendaval liinil ei saa toimuda

väga suure võimsusega. Eesti ja Balti alajaamasid ühendava liini L351 Eesti alajaama poolt vaadates võimsusevoo muutus ajas on toodud joonisel 3.23.



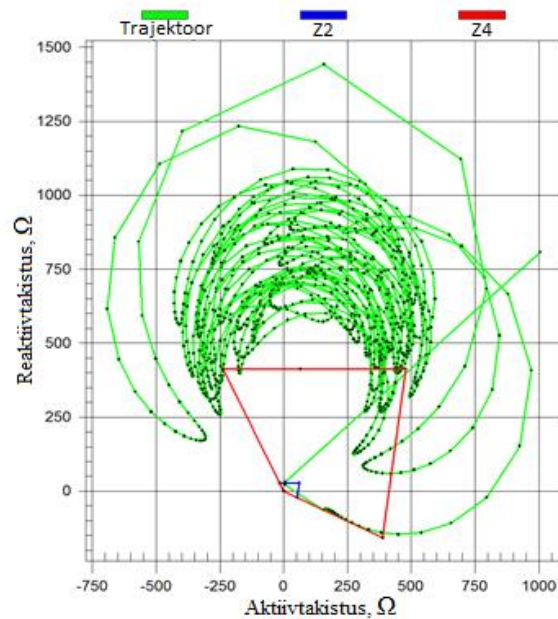
Joonis 3.22. Eesti ja Balti elektrijaamade nurkade muutus 0,37 sekundilise lühise korral



Joonis 3.23. Võimsuse võnkumine liinil L351 Eesti - Balti 0,37 sekundilise lühise korral

Võrreldes joonisel 3.23 toodud võimsuse võnkumist joonisel 3.18 toodud võimsuse võnkumisega samal liinil 0,25 sekundilise lühise korral nähakse, et võnkumise amplituud pikema lühise korral ei ole oluliselt suurem.

Järgnevalt vaadeldakse samal liinil asuva distantskaitse poolt mõõdetavat näivtakistust, mis on toodud joonisel 3.24.

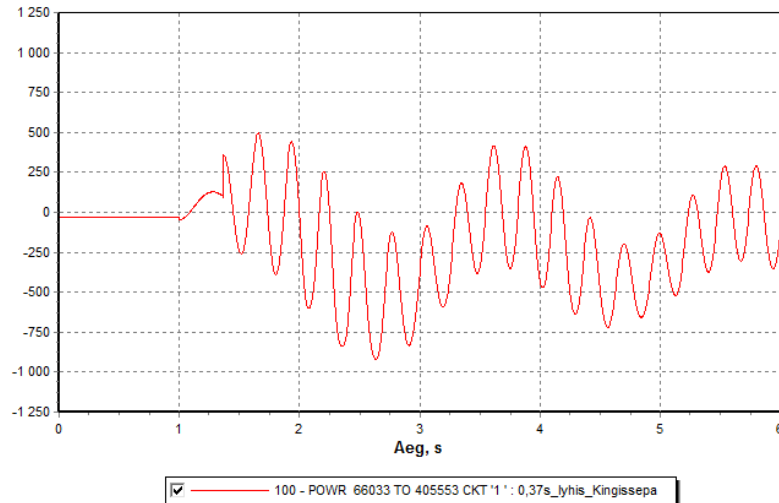


Joonis 3.24. Liin L351 Eesti - Balti Eesti alajaama poolses otsas oleva distantskaitse mõõtetulemused

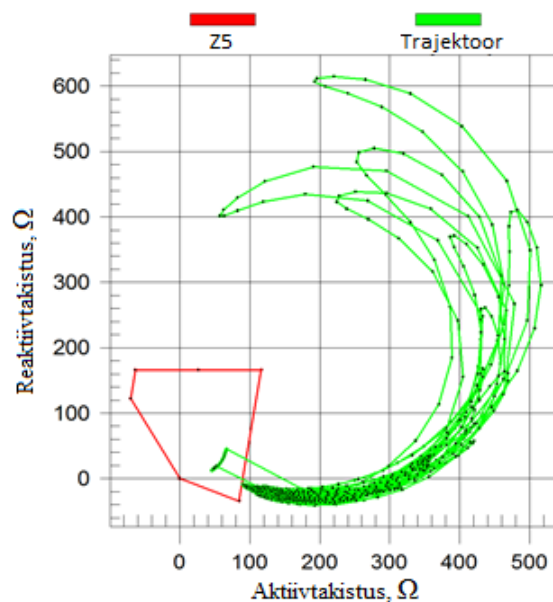
Võrreldes pikema lühise korral distantskaitse poolt mõõdetavat näivtakistust joonisel 3.19 toodud lühema lühiseaja mõõdetud näivtakistusega on näha, et võnkumisel muutuv näivtakistus on liikunud kaitse tsoonile lähemale ning pikema lühiseaja korral on näha rohkem mõõdetud näivtakistusi, mis asuvad kaitse neljandas tsoonis. Joonisel 3.24 on sinise värviga toodud kaitse teine tsoon, mis on võrreldes neljanda tsooniga lühema viitega. On võimalik näha, et distantskaitse teise tsooni võnkumistel mõõdetav näivtakistus ei ulatu, seega erilisi meetmeid kaitse mittevajalikuks toimimiseks ei ole tarvis rakendada ning ohtu liigseks väljalülitumiseks ei ole.

Samuti vaadeldakse pikema lühiseaja korral võimsusvoogu ning distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistust kolmanda Eestit Venemaa süsteemiga ühendaval liinil. Võimsuse võnkumine liinil L358 Tartu – Pihkva on toodud joonisel 3.25.

Võrreldes võimsuse võnkumist pikema ning lühema lühiseaja korral on näha, et pikema lühiseaja korral suureneb võnkumise amplituud. Jooniselt on võimalik lugeda, et pikema lühiseaja korral ulatub maksimaalne võimsusvoog peaaegu 1000MW-ni, kuid ka siinkohal on tegemist 330 kV elektriliini jaoks koormusvooga. Samal liinil oleva distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistus on toodud joonisel 3.26.



Joonis 3.25. Võimsuse võnkumine liinil L358 0,37 sekundilise lühise korral



Joonis 3.26 Liini L358 Tartu – Pihkva Tartu alajaama poolse distantskaitse mõõtetulemused

Joonisel toodud distantskaitse mõõtetulemustest on näha, et võnkumiste käigus mõõdetav näivtakistus ei ulata kaitse tötsooni. Samas võrreldes pikema lühiseaja ning lühema lühiseaja näivtakistuse mõõtetulemusi omavahel on võimalik näha, et võnkumised on nihkunud kaitse tötsoonile lähemale. Kuna võnkumine ka pikema lühiseaja jooksul ei ulatu kaitse tötsooni, ei ole ohtu liigseks väljalülitumiseks.

Modelleerimise tulemustest on võimalik järeldada, et suvise miinimumkoormuse ning nulltransiidi korral ohtu liinide liigseks väljalülitumiseks lühise tõttu tekkivatest võimsuse võnkumistest ei ole ning kaitsetes ei oleks vaja rakendada erimeetmeid võnkumiste arvestamiseks.

3.3.2 Suvine miinimumkoormus ja suvine maksimaalne transiit

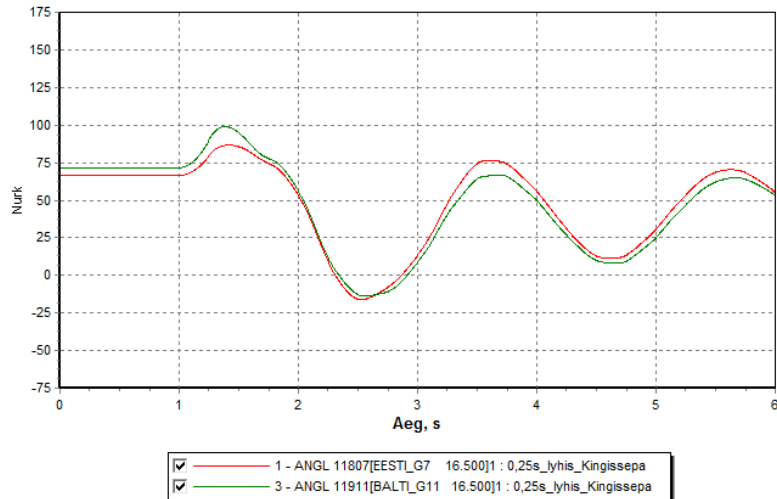
Järgnevalt modelleeritakse olukorda, kus Eestis on sarnaselt eelmisele olukorrale minimaalne koormus ning töös minimaalne tootmisvõimsus, kuid toimub transiit läbi Eesti võrgu. Maksimaalne võimalik eksport läbi Eesti võrgu on 1000 MW, mis on summaarne Eestit Soomega ühendavate alalisvoolu ühenduste võimsus. Esmalt vaadeldakse olukorda, kus läbi Eesti ülekandevõrgu toimub transiit suunal Läti – Soome. Eeldatakse, et eksporditav võimsus tuleb NordBalt alalisvoolu ühendusest, mille võimsus on 700 MW, kuid 700 MW-st eksporditakse 594 MW võimsust, sest tuleb ka katta kohapealne võimsuse defitsiit. Selline olukord on vähetõenäoline, sest eeldatakse, et Läti katab oma tarbimise kohapeal olevatest tootmisallikatest, kuid siiski ühe võimaliku piirsituatsioonina sobilik vaatlemiseks. Samuti vaadeldes eelmise aasta andmeid, siis suvine läbilaskevõime Eesti ning Läti vahel oli enamustel tundidel 500-550MW [15], seega 700MW transiiti on võrgule raskendatud olukord.

Modelleerimine 0,25 sekundilise lühise korral

Halvima olukorra simuleerimiseks modelleeritakse ka siin kolmefaasilist lühist Kingissepa alajaama 330 kV lattidel, mille tagajärjel lülituvad välja nii Eesti kui Balti alajaamast väljuvad liinid. Lühise tagajärjel Eesti ja Balti elektriyaamade generaatorite nurkade muutused on toodud joonisel 3.27.

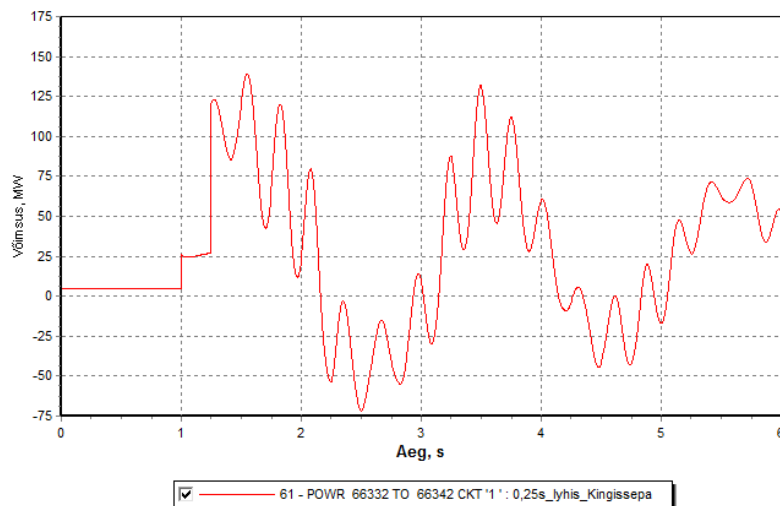
Jooniselt on näha, et transiit mõjutab lühise tõttu generaatorite nurkade muutuseid suuremaks, kui puuduva transiidi korral joonisel 3.17 toodud nurkade muutused. Transiit suurendas elektriliste nurkade suurenemist ligikaudu 10 kraadi võrra. Selline olukord tuleneb sellest, et transiidi tõttu on võrk rohkem koormatud ning lühise ajal on generaatoritel sellest tulenevalt raskem kiirenemisel tekkivat energiat võrku edasi anda. Samas on jooniselt näha, et kahe elektriyaama generaatorite nurkade erinevused ei ole väga suured.

Eesti ja Balti elektriyaama ühendava liini L351 koormuse uurimiseks on toodud antud liini võimsuse muutus ajas joonisel 3.28.



Joonis 3.27. Eesti ja Balti elektrijaama generaatorite nurkade muutus 0,25 sekundilise lühise korral

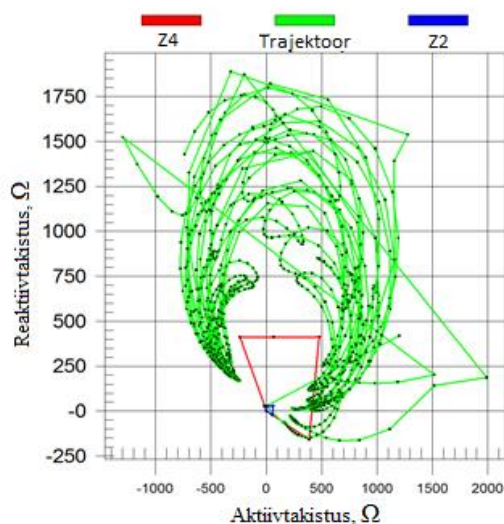
Eesti ja Balti elektrijaamasid ühendava liini võimsuse muutust ajas vaadeldes on võimalik näha, et ka siinkohal ei ole võimsuse võnkumise amplituud 330 kV liini jaoks liialt suur. Võnkumise amplituud küündib kõigest veidi üle 125 MW. Samal liinil Eesti alajaama poolses otsas oleva distantskaitse mõõtetulemused on toodud joonisel 3.29.



Joonis 3.28. Eesti ja Balti alajaamasid ühendava liini L351 võimsuse muutumine ajas

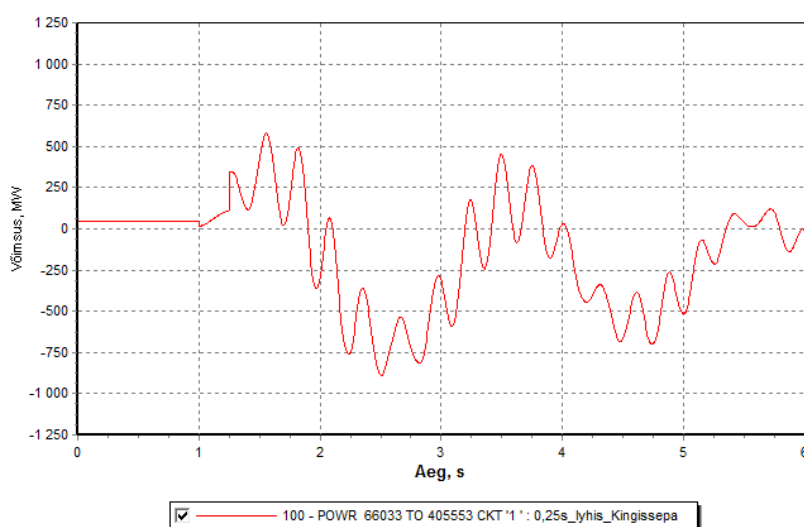
Võrreldes kaitse poolt mõõdetud näivtakistust olukorraga, kus transiit puudub joonisel 3.19, on näha, et transiidi olemasolul satub võnkumise ajal mõõdetud näivtakistus rohkem kaitse töötsooni. Samas tuleb silmas pidada, et joonisel toodud ühele mõõdetud näivtakistuste vahele vastab 5 ms. Samuti on joonisel punasega toodud kaitse neljas töötsoon, mille viide ületab

võnkumise viite, ehk kaitse rakendumiseks peab mõõdetud takistus olema pikalt kaitse töötsoonis. Lähemal vaatlusel selgub, et sügavaima võnke korral on mõõdetav näivtakistus umbes 20 mõõtmise juures, ehk umbes 100 ms, seega siin ohtu kaitse liigseks rakendumiseks ei ole.



Joonis 3.29. Liinil L351 Eesti – Balti Eesti alajaama otsas oleva distantSKaitse mõõtetulemused

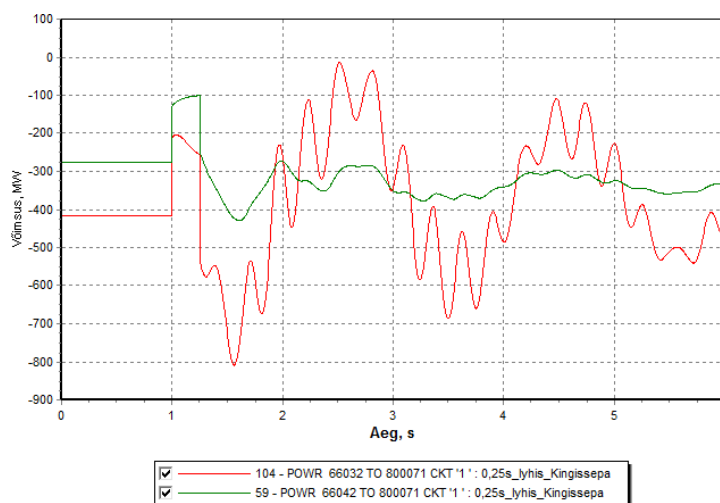
Järgmiseks vaadeldakse võimsuse võnkumist pärast lühise väljalülitust Eesti süsteemi Venemaaga ühendava jääval liinil L358 Tartu – Pihkva. Liinil võimsuse muutus ajas on toodud joonisel 3.30.



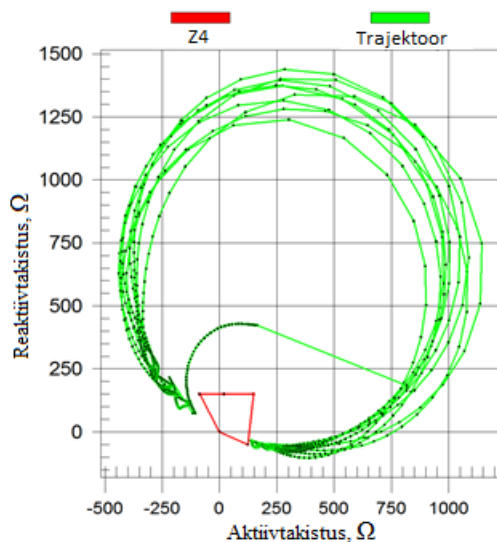
Joonis 3.30. Võimsuse võnkumine liinil L358 Tartu – Pihkva

Jooniselt on näha, et võimsuse võnkumine Eestit Venemaa süsteemiga ühendama jääval liinil on väga sarnane olukorrale, kus transiiti läbi Eesti süsteemi ei toimu, seega kaitse poolt mõõdetavat näivtakistust ei vaadelda.

Transiidi toimumise tõttu Lätist läbi Eesti Soome vaadeldakse ka võimsusi Eestit ja Lätit ühendavatel liinidel. Joonisel 3.31 on toodu võimsused Eestit Läti süsteemiga ühendavatel liinidel. Joonisel 3.31 on toodud punasega võimsuse võnkumine liinil L301 Tartu – Valmiera ning rohelisega võnkumine liinil L354 Tsirguliina – Valmiera. Jooniselt on näha, et rohelisega toodud liinil on palju väiksem punasega toodud liini võnkumisest. Seega vaadeldakse siinkohal ainult Tartu – Valmiera liinil oleva distantskaitse mõõtetulemusi, mis on toodud joonisel 3.32.



Joonis 3.31. Võimsuse võnkumine Eestit Lätiga ühendavatel liinidel

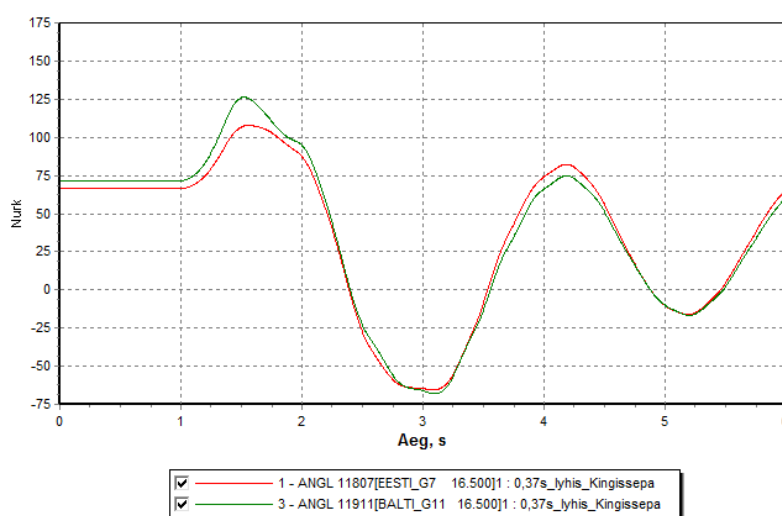


Joonis 3.32. Liinil L301 Tartu – Valmiera oleva distantskaitse mõõtetulemused.

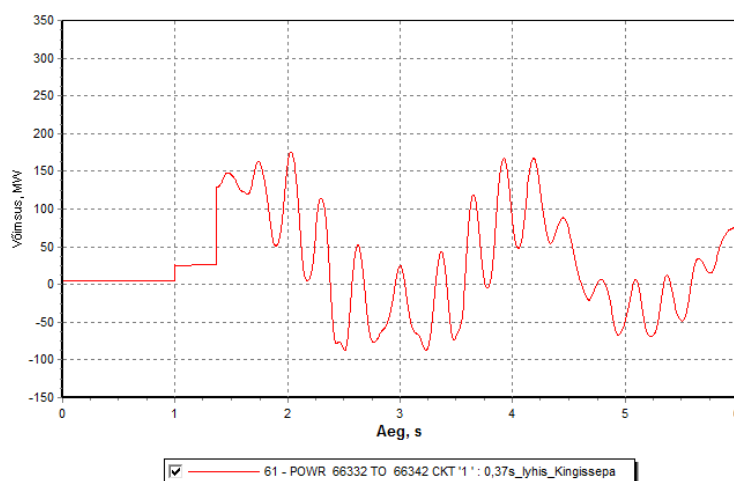
Jooniselt 3.32 on näha, et liinil toimub võimsuse võnkumine, kuid võnkumise tulemusel mõõdetav näivtakistus antud olukorras kaitse töösooni ei sisene. Seega ohtu kaitse valesti toimimiseks ei ole.

Modelleerimine 0,37 sekundilise lühise korral

Modelleeritakse kolmefaasilist lühist pikkusega 0,37 sekundit Kingissepa alajaamas, mille tulemusel lülituvad välja liinid Eesti ja Balti alajaamast. Lühise tulemusel Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurkade muutused on toodud joonisel 3.33.

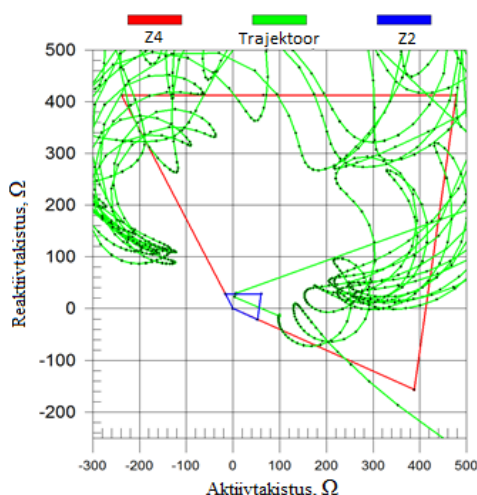


Joonis 3.33. Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurkade muutused 0,37 sekundilise lühise puhul



Joonis 3.34. Võimsuse võnkumine liinil L351 Eesti – Balti 0,37 sekundilise lühise korral

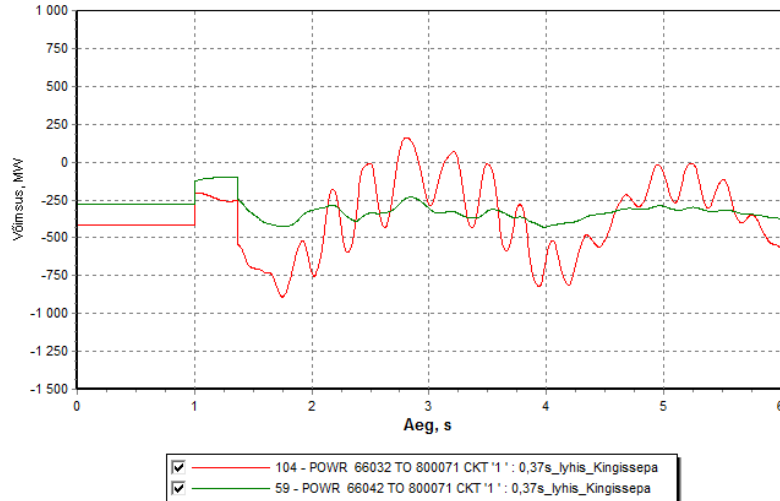
Jooniselt on näha, et generaatorite nurkade muutus on suurem, kui lühema lühiseaja korral. Samuti on transiidi olemasolul generaatorite nurkade muutused suuremad, kui transiidi puudumise korral. Transiidi olemasolul on nurkade võnge oluliselt suurem, kui transiidi puudumise korral. Samuti on näha, et elektrijaamade generaatorite nurkade erinevused ei ole ka siinkohal üksteisest väga palju erinevad. Seega ka ei ole jaamasid ühendaval liinil võimsuse võnkumise amplituud väga suur. Jaamasid ühendava liini L351 võimsuse muutus ajas on toodud joonisel 3.34. Jooniselt on näha, et ka pikema lühise korral ei ole võimsuse võnkumise amplituud väga suur kahte elektrijaama ühendaval liinil. Samal liinil Eesti alajaama poolses otsas oleva distantskaitse mõõtetulemused on toodud joonisel 3.35.



Joonis 3.35. Liinil L351 Eesti – Balti Eesti alajaama poolses otsas oleva distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistus

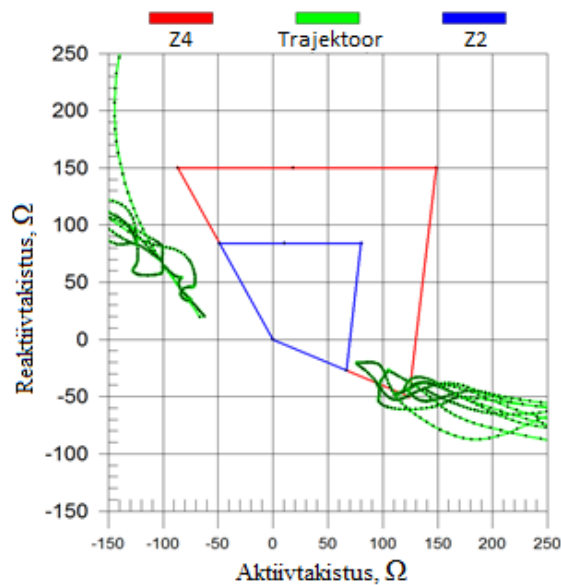
Jooniselt on näha, et pikema lühise korral liigub võnkumisel tekkiv näivtakistus kaitse neljandasse töötsooni. Samas tuleb silmas pidada, et neljanda töötsooni toimeaeg on viis sekundit ning mõõdetava näivtakistuse väljumisel ning uuesti sisenemisel töötsooni toimub taimerit nullimine. See tähendab, et kaitse toimimiseks peab mõõdetav näivtakistus olema töötsoonis viiel sekundil järjest. Joonisel toodud simulatsiooni pikkuseks on viis sekundit, ning on näha, et selle aja jooksul on mõõdetav näivtakistus ka kaitsetsoonist väljas. Ehk antud olukorras kaitse liigselt ei rakendu, kuid oht selleks on olemas. Vaadates kaitse teist töötsooni on näha, et võnkumine sinnani ei ulatu. Teise töötsooni viiteks on 0,25 sekundit, ehk sinna ulatumise korral on tõenäosus kaitse liigseks rakendumiseks kordades suurem.

Järgnevalt vaadatakse Eestit Lätiga ühendavate liinide võimsuse muutuseid ajas. Võimsuste muutumine Tartu – Valmiera ning Tsirguliina – Valmiera liinidel on toodud joonisel 3.36.



Joonis 3.36. Võimsuse võnkumine Eestit Lätiga ühendavatel liinidel 0,37 sekundilise lühise korral

Joonisel 3.36 on punasega toodu Tartu – Valmiera ning rohelisega toodud Tsirguliina – Valmiera liine läbivate võimsuste muutumine. Ka pikema lühiseaja korral on näha, et liinis L354 Tsirguliina – Valmiera võnkumise amplituud on palju madalam kui võnkumise amplituud Tartu – Valmiera liinil. Selle tõttu tuuakse siinkohal ainult liinil Tartu – Valmiera Tartu alajaama poolses otsas oleva distantskaitse mõõtetulemused. Kaitse poolt mõõdetud näivtakistus on toodud joonisel 3.37.



Joonis 3.37. Liinil L301 Tartu – Valmiera Tartu alajaama pool oleva distantskaitse mõõtetulemused

Kaitse mõõtetulemustest on näha, et sarnaselt Eesti ja Balti alajaama ühendava liini mõõtmistega on ka siin võnkumisel mõõdetav näivtakistus liikunud lähemale kaitse töötoonidele. On näha, et võnkumisel mõõdetav näivtakistus siseneb ka kaitse neljandasse töötoonini, kuid ka siinkohal tuleb silmas pidada, et kaitse neljandal töötoonil on väga pikk viiteaeg, mis ületab võnke kiiruse, seega otsest ohtu kaitse liigrakendumiseks ei ole.

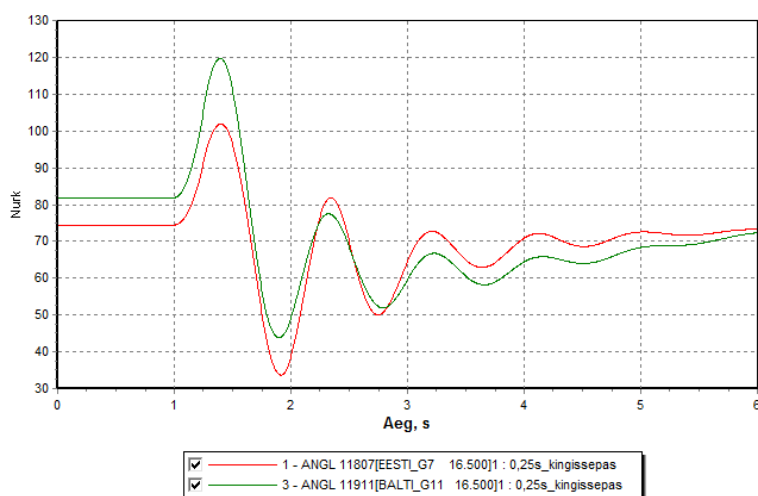
Modelleerimistulemustest on võimalik teha järeldus, et suvise miinimumkoormuse ja – tootmise juures maksimaalse transiidi jooksul läbi Eesti Lätist Soome on oht distantkaitsete liigrakendumiseks pärast lühist toimuval võimsuste võnkumise korral, kuna võnkumiste korral mõõdetav näivtakistus siseneb kaitsete töötoonini suhteliselt sügavale. Kaitsete liigrakendumise ärahoidmiseks on soovitatav kasutada pendelduse blokeeringuid, mis blokeerivad kaitse töö võimsuse võnkumise avastamisel.

3.3.3 Talvine maksimaalne tarbimine ja nulltransiit

Vaadeldakse olukorda, kus Eestis on talvine maksimaalne tarbimine – 1553MW [16] ning kogu võimsus on kaetud kohapealsetest tootmisallikatest. Samal ajal ei toimu läbi Eesti võrgu transiiti. Modelleeritakse samuti kahe pikkusega lühiseid 0,25 ja 0,37s Kingissepa alajaamas, mille tulemusel lülitub välja Balti alajaamast Kingissepa väljuv liin L374.

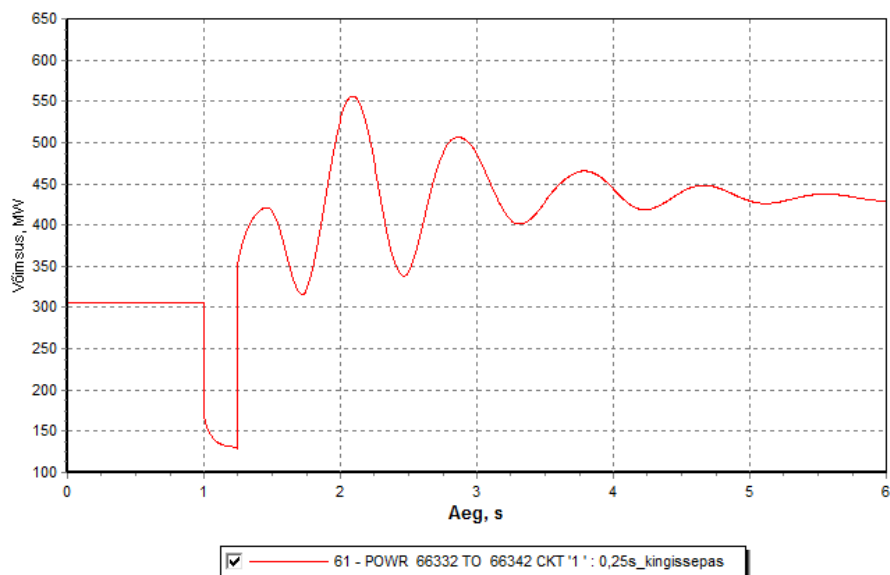
Modelleerimine 0,25 sekundilise lühise korral

Modelleeritakse olukorda, kus kolmeefaasiline lühis asub Kingissepa alajaama lähedal ning lühise tagajärjel lülitub välja liin Balti – Kingissepa. Lühise tulemusel tekkivad rootori nurkade erinevused Eesti ja Balti elektriyaamade generaatorites on toodud joonisel 3.38.

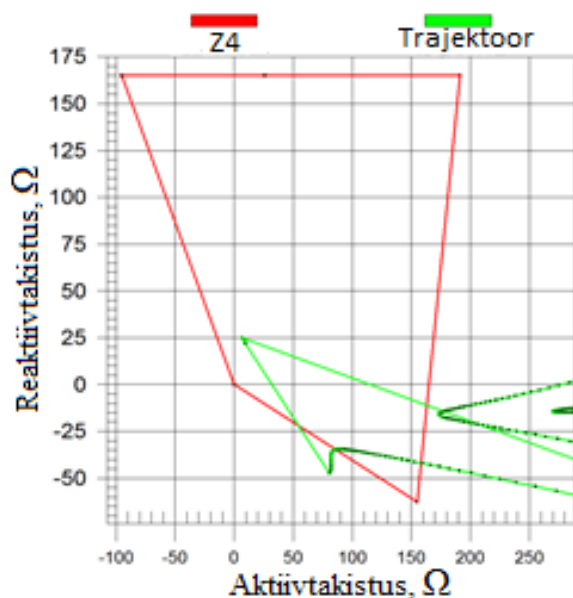


Joonis 3.38. Eesti ja Balti elektriyaamade generaatorite nurkade muutused

Jooniselt on näha, et generaatorite nurkade erinevus suureneb lühise jooksul ning pärast lühise olukorda generaatorid Eesti ja Balti elektrijaamades võnguvad lühikest aega, sumbudes umbes viienda sekundi jooksul. Võnkumise vaatlemiseks on toodud Eesti ja Balti alajaamasid ühendava liini L351 võimsuse muutus ajas joonisel 3.39.



Joonis 3.39. Eesti ja Balti alajaamasid ühendava liini võimsuse muutus ajas



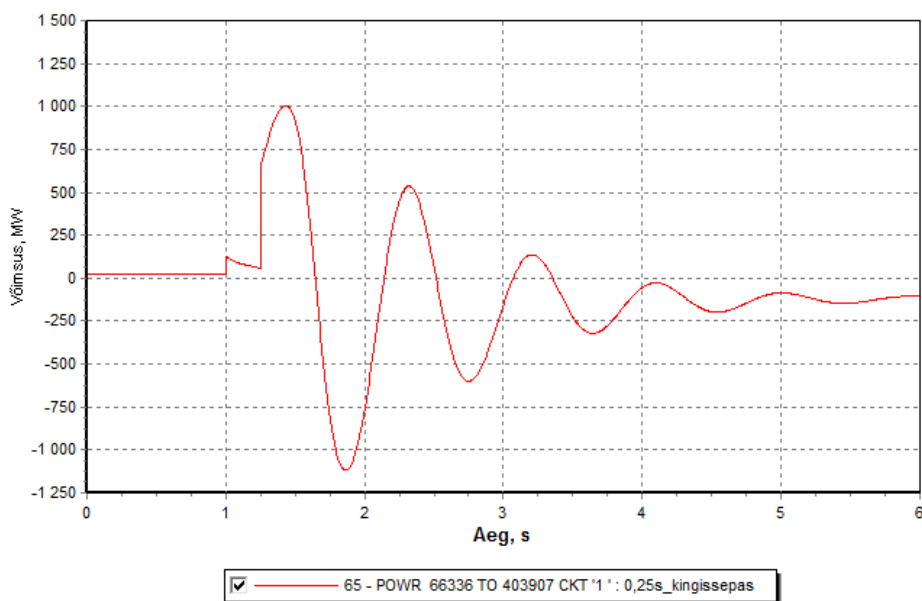
Joonis 3.40 Distantkaitse poolt mõõdetud näivtakistus liinil Eesti – Balti

Joonisel on näha, et jaamade vahelisel liinil toimub võimsuse võnkumine, mis sumbub umbes viiendaks sekundiks. Võimsuse võnkumise tõttu muutub ka liini otstes olevate distantkaitsete

jaoks mõõdetav näivtakistus. Eesti alajaama poolses otsas oleva distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistus on toodud joonisel 3.40.

Jooniselt on näha, et Eesti ja Balti elektrijaamasid ühendaval liinil toimuva võnkumise korral liigub näivtakistuse vektor läbi kaitse neljanda töötsooni vahetult pärast väljalülitumist. Esimesel võnkel näivtakistus enam ei sisene kaitse töötsooni ning edasistel võngetel eemaldub kaitse töötsoonidest veelgi.

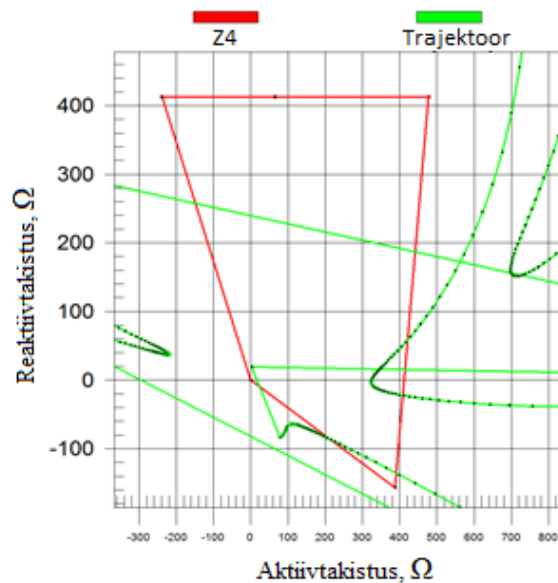
Järgnevalt vaadeldakse, mis toimub võimsusega Eesti elektrijaama ja Kingisseppa ühendaval töösse jääval liinil. Antud liinil võimsuse muutumine ajas on toodud joonisel 3.41.



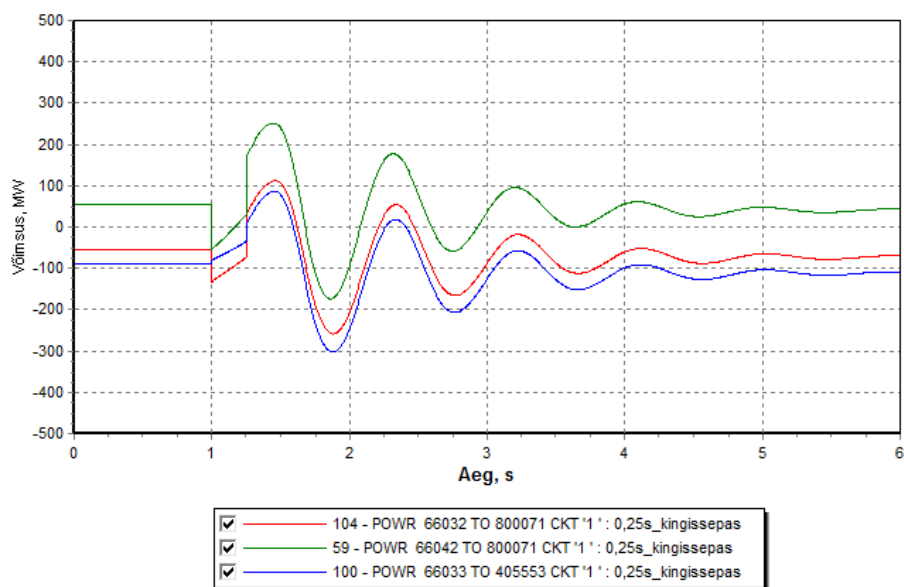
Joonis 3.41. Võimsuse võnkumine liinil L373 Eesti – Kingissepa

Jooniselt on näha, et Eesti elektrijaama Venemaaga ühendaval liinil toimub võimsuse võnkumine suurema amplituudiga, seda eriti esimesel võnkel pärast lühise olukorda, kus võimsus muutub piiridest 1000MW-st -1000MW-ni. Võnkumisel distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus antud liinil on toodud joonisel 3.42.

Samuti on võimalik sellel liinil näha võnkumist. Suurema võnkumiste amplituudi tõttu on näha, et esimese võnke korral siseneb mõõdetav takistus kaitse neljandasse töötsooni. Tuleb aga silmas pidada, et neljandal töötsoonil on äärmiselt pikk viide, mis ületab võnkumise kiiruse ning siinkohal liigseks väljalülituseks ohtu ei ole.



Joonis 3.42. Distantkaitse poolt mõõdetav näivtakistus liinil L373 Eesti – Kingissepa

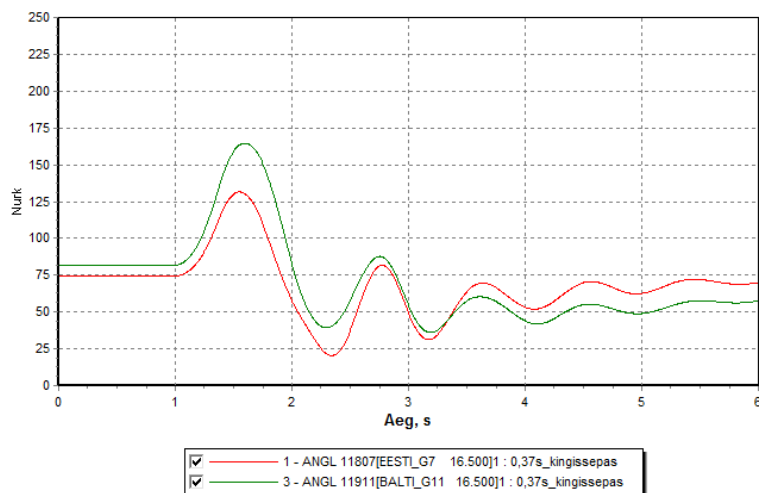


Joonis 3.43. Võimsuse muutumine Eesti teistel välisühendustel

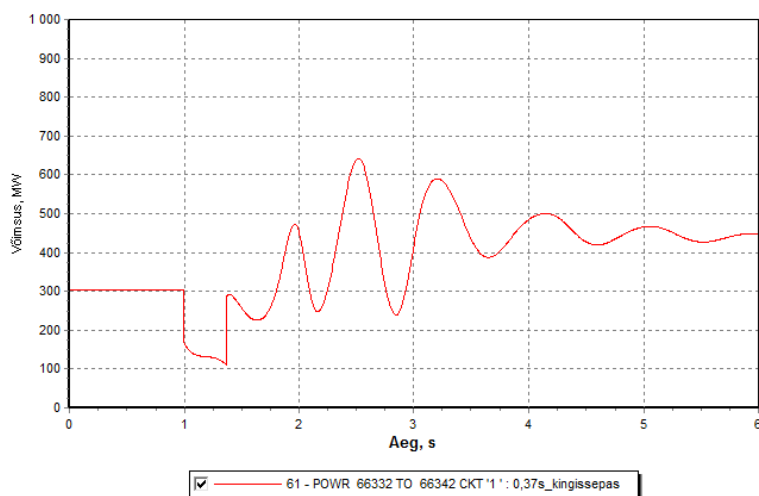
Võimsuse muutumist ajas Eesti teistel välisühendustega Läti ning Pihkvasse kujutab joonis 3.43. Joonisel on punase värviga kujutatud võimsuse muutumine liinil Tsirguliina – Valmiera, rohelisega liinil Tartu – Valmiera ning sinisega Tartu – Pihkva. Jooniselt on näha, et võimsuse võnkumine nendel liinidel sumbub suhteliselt kiiresti ja ei ole ka väga suure ulatusega, seega distantkaitse mõõtetulemusi siinkohal ei vaadelda.

Modelleerimine 0,37 sekundilise lühise korral

Modelleeritakse samasugust olukorda eelnevaga, ainukese erinevusena on lühiseaeg 0,25 sekundi asemel 0,37 sekundit. Pikema lühise tulemusel generaatorite nurkade muutused on toodud joonisel 3.44.



Joonis 3.44. Eesti ja Balti generaatorite nurkade muutused 0,37 sekundilise lühise korral

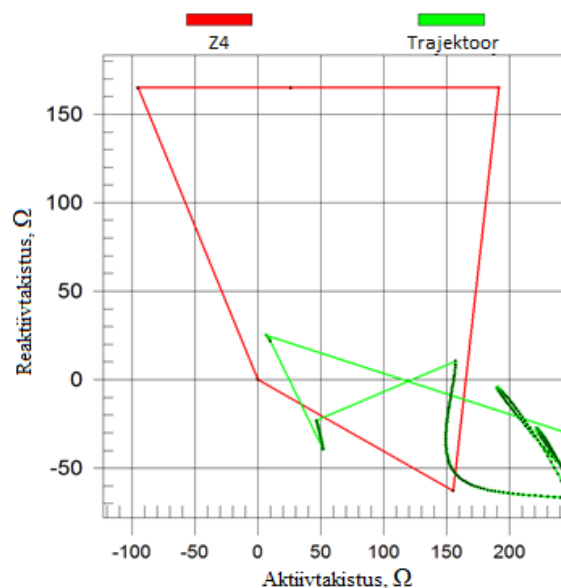


Joonis 3.45. Võimsuse muutus ajas liinil L351 Eesti – Balti

Võrreldes generaatorite nurkade muutuseid joonisel 3.34 toodud lühema lühiseaja nurkade muudatustega on võimalik näha, et pikema lühiseaja korral muutuvad nurgad suuremal määral. Seda eriti Balti elektrijaama generaatori puhul. Samuti tekib ka pikema lühiseaja korral generaatorite nurkade omavaheline võnkumine.

Järgnevalt vaadeldakse võimsuse muutumist ajas Eesti ja Balti alajaamasid ühendaval liinil. Antud liinil võimsuse muutus on toodud joonisel 3.45.

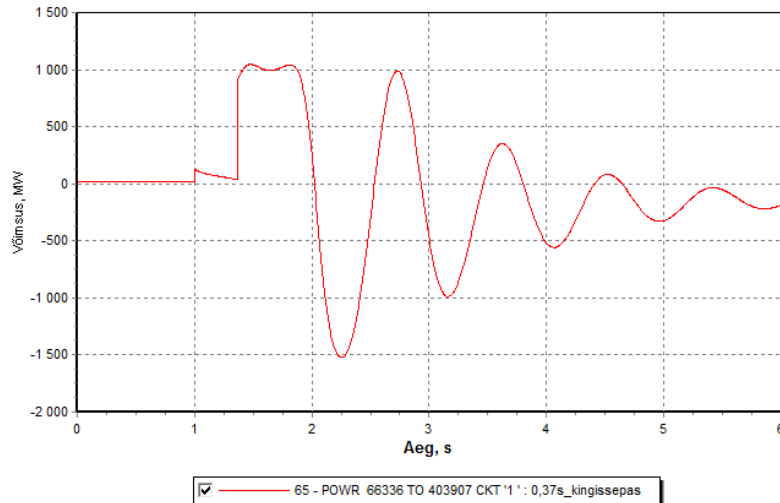
Jooniselt on näha, et võrreldes lühema lühiseajaga on võimsuse võnkumise amplituud liinil suurem, kuid samuti on näha, et toimub kolm suuremat võnget, misjärel võnkumine sumbib. Samal liinil oleva distantskaitse mõõtetulemused on toodud joonisel 3.46.



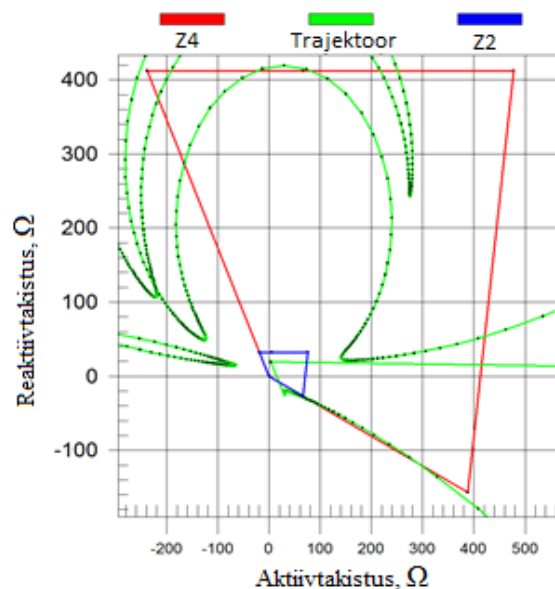
Joonis 3.46. Eesti – Balti liinil oleva distantskaitse mõõtmistulemused 0,37 sekundilise lühise korral

Jooniselt on näha, et võrreldes lühema lühiseajaga liigub esimesel võnkel näivtakistus kaitse töötsoonile lähemale, kuid ka pikema lühiseaja korral kaitse töötsooni mõõdetav näivtakistus ei sisene. Samuti on näha, et näivtakistuse vektori liikumine on aeglasem, kuna mõõtepunktid asuvad tihedamalt koos. Kaitse neljandas töötsoonis on mõõdetav näivtakistus tervelt 0,8 sekundit, kuid töötsooni viiteajaks on viis sekundit, seega kaitse valessti toimimiseks modelleerimise korral ohtu ei ole.

Järgnevalt tuuakse joonisel 3.47 võimsuse võnkumine liinil L373 Eesti – Kingissepa. Jooniselt on näha, et esimese võnke korral ületab generaatorite tööpunkt nurkkarakteristikul amplituudväärtuse, mida iseloomustab lohk võimsuse graafikul. Võrreldes 0,25 sekundilise lühiseajal tekkiva võnkumisega on siinkohal ka teise võnke amplituud 1000MW suurune. Vaadeldakse liinil asuva distantskaitse poolt mõõdetavat näivtakistust, mis on toodud joonisel 3.48.



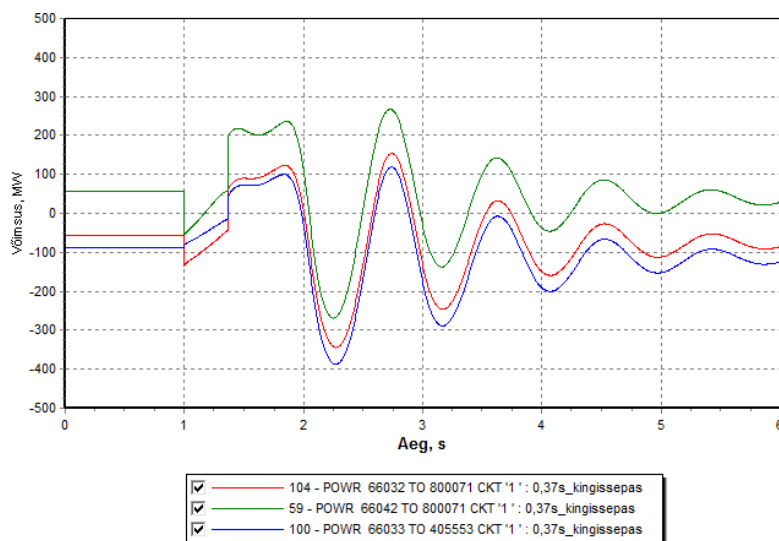
Joonis 3.47. Võimsuse muutumine ajas liinil L373 Eesti – Kingissepa 0,37 sekundilise lühise korral



Joonis 3.48. Liinil L373 Eesti – Kingissepa oleva distantskaitse mõõtetulemused 0,37 sekundilise lühise korral

Võrreldes lühema lühiseaja korral mõõdetava näivtakistusega, mis on toodud joonisel 3.42, on näha, et pikema lühise korral siseneb kaitse poolt mõõdetav näivtakistus kaks korda kaitse neljandasse töötsooni. Esimese võnke ajal on mõõdetav näivtakistus kaitse töötsoonis 0,2 sekundit. Samuti on näha, et esimesel võnkel läheneb mõõdetav näivtakistus kaitse teisele töötsoonile, kuid kaitse teise töötsooni mõõdetav näivtakistus ei sisene.

Järgnevalt vaadeldakse võimsuste muutumisi ajas teistel Eesti välisühendustel, mis tuuakse joonisel 3.49.



Joonis 3.49. Võimsuste muutus ajas Eesti teistel välisühendustel 0,37 sekundilise lühise korral

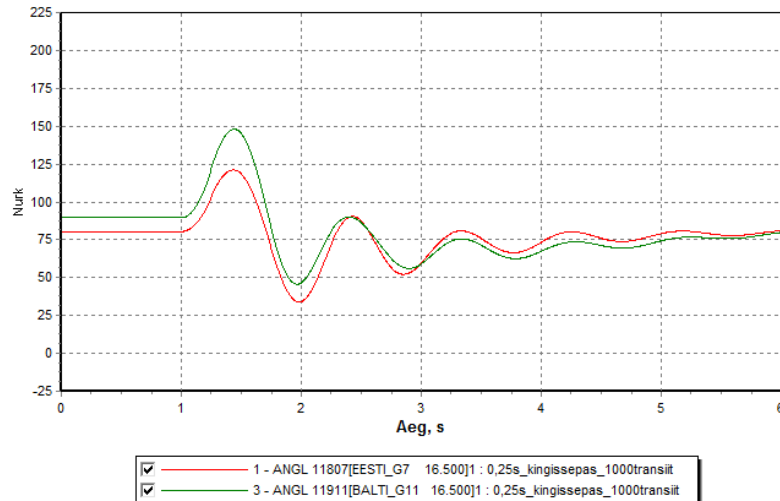
Joonisel on punase värviga kujutatud võimsuse muutumine liinil Tsirguliina – Valmiera, rohelisega liinil Tartu – Valmiera ning sinisega Tartu – Pihkva. Jooniselt on näha, et võimsuse võnkumine nendel liinidel sumbub suhteliselt kiiresti, kuid võrreldes lühema lühiseajaga on võnkumiste amplituud suurem. Kaitsete poolt mõõdetavaid näivtakistusi siinkohal ei vaadelda.

3.3.4 Talvine maksimaalne tarbimine ja transiit

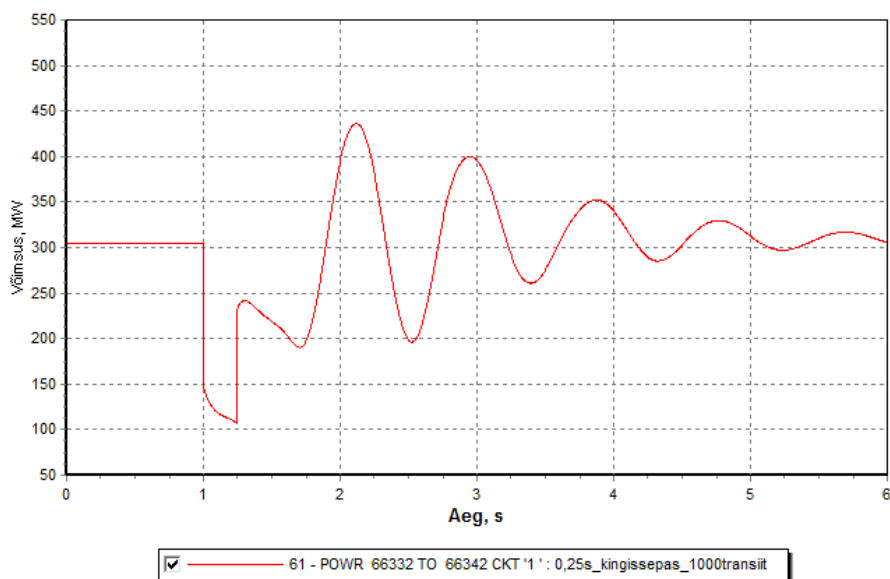
Modelleeritakse olukorda, mis on sarnane eelnevaga, kuid siinkohal toimub transiit läbi Eesti suunal Lähti 1000MW ulatuses [15], mis on Eestit Soomega ühendavate alalisvoolu ühendusliinide maksimaalne koguvõimsus. Eestis on maksimaalne tarbimisvõimsus, mis on kaetud kohapealsete allikate poolt. Modelleeritakse samuti kahe pikkusega lühiseid 0,25 ja 0,37s Kingissepa alajaamas, mille tulemusel lülitub välja Balti alajaamast Kingissepa väljuv liin L374.

Modelleerimine 0,25 sekundilise lühise korral

Modelleeritakse 0,25 sekundi pikkust kolmefaasilist lühist Kingissepa alajaama lattidel, mille tulemusel lülitub välja liin Balti – Kingissepa. Lühise tulemusel generaatorite muutuvad nurgad on toodud joonisel 3.50.



Joonis 3.50. Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurkade muutused 0,25 sekundilise lühise korral

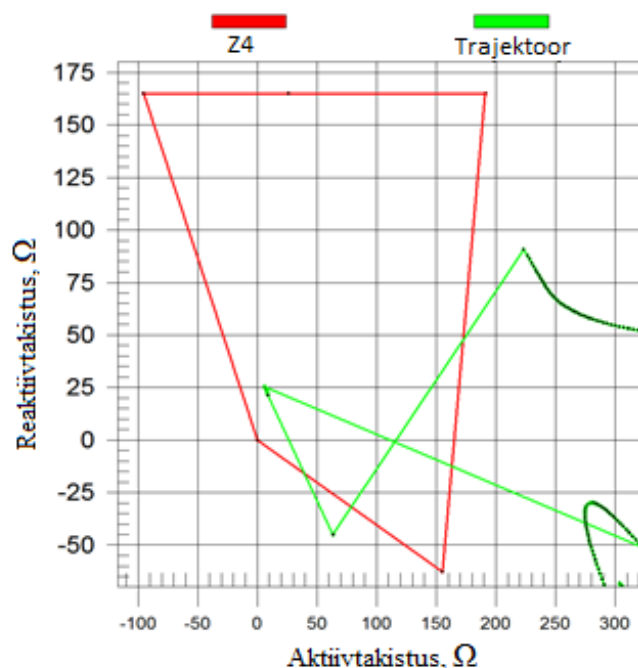


Joonis 3.51. Võimsuse muutus ajas liinil L351 Eesti – Balti

Võrreldes generaatorite nurkade muutuseid olukorraga, kus transiiti läbi Eesti ei toimunud on võimalik näha, et generaatorite nurgad muutuvad transiidi korral rohkem, kui transiidita olukorras. Transiidi olukorras on 0,25 sekundilise lühise korral generaatorite nurkade muutused võrreldavad 0,37 sekundilise lühisega transiidi puudumise korral. Selline tulemus on ka loogiline, kuna transiidi tõttu on võrk rohkem koormatud ning generaatoritel on kiirenemisel tekkivat energiat raskem võrku ära anda. Järgnevalt vaadeldakse võimsuse

võnkumist ning distantskaitse mõõtetulemusi Eesti ja Balti elektriyaama ühendaval liinil. Võimsuse muutumine ajas on toodud joonisel 3.51.

Võrreldes võimsuse võnkumist Eesti ja Balti elektriyaama ühendaval liinil transiidi puuduva olukorraga on näha, et vaadeldava liini koormatus väga transiidist ei sõltu. Samuti on võimalik näha, et võnkumiste amplituud on transiidi korral madalam. Samal liinil Eesti alajaama pool oleva distantskaitse mõõtmistulemused on toodud joonisel 3.52.

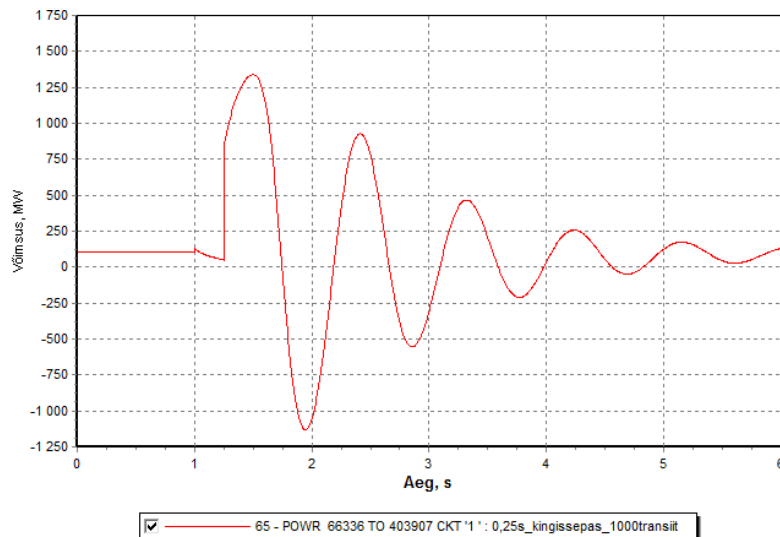


Joonis 3.52. Eesti alajaama poolses otsas oleva distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus 0,25 sekundilise lühise korral

Jooniselt on näha, et võimsuse võnkumisel mõõdetav näivtakistus ei sisene mitte ühtegi kaitse tötsooni. Seega siinkohal ohtu vaadeldava liini liigseks väljalülitumiseks ei ole.

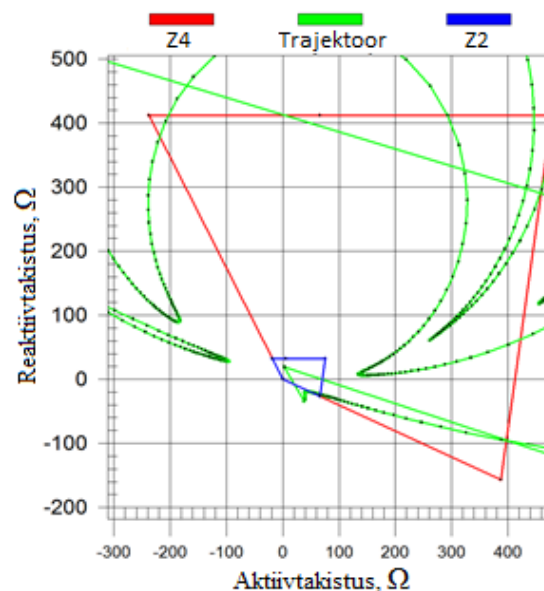
Järgnevalt vaadeldakse võimsuse muutumist liinil L373 Eesti – Kingissepa, mis on toodud joonisel 3.53.

Jooniselt on näha, et võrreldes Eesti ja Balti alajaamu ühendava liiniga toimub antud liinil võnkumine palju suuremas ulatuses. Võrreldes olukorraga, kus transiiti ei toimu, on näha, et transiidi olemasolu suurendab esimese võnke amplituudi umbes 250MW võrra. See tähendab, et antud liinil oleva kaitse poolt mõõdetav näivtakistus on väiksem. Liinil oleva distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus on toodud joonisel 3.54.



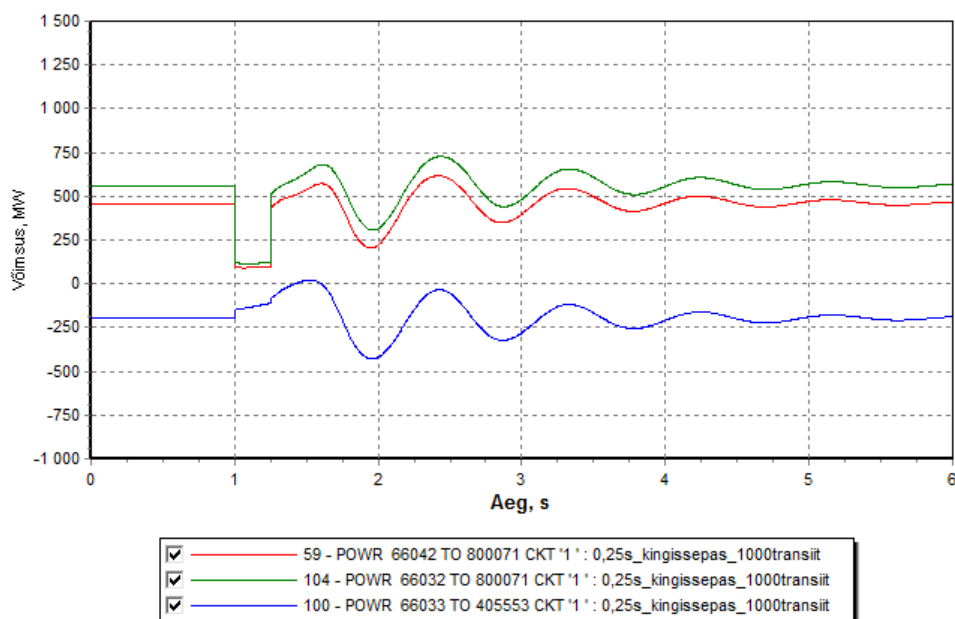
Joonis 3.53. Võimsuse võnkumine liinil Eesti – Kingissepa 0,25 sekundilise lühise korral

Distsantskaitse mõõtetulemustest on näha, et transiidi korral satub distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus ka teisel võnkul kaitse neljandasse töötsooni. Transiidi olemasolul on mõõtetulemus võrreldav 0,37 sekundi pikkuse lühisega transiidi puudumise korral, kuid kaitse teise töötsooni võnkumisel mõõdetav näivtakistus ei sisene. Samuti on näha, et ka pärast lühise väljalülitamist liigub mõõdetav näivtakistus läbi kaitse töötsooni. Esimesel võnkul asub mõõdetav näivtakistus kaitse töötsoonis 0,4 sekundit, mis ei ole kaitse rakendumiseks piisavalt pikk aeg.



Joonis 3.54. Liinil L373 Eesti – Kingissepa oleva distantskaitse mõõtmistulemused 0,25 sekundilise lühise korral

Järgnevalt tuuakse joonisel 3.55 Eesti teiste välisühenduste võimsuste muutused ajas.



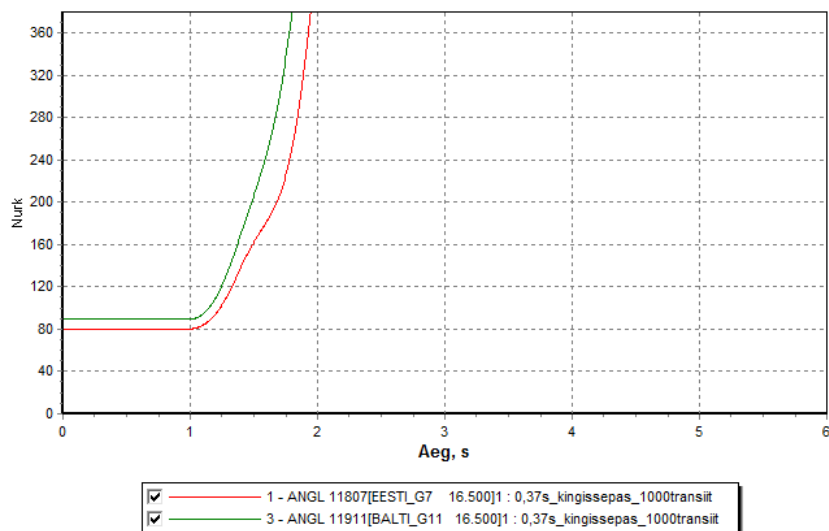
Joonis 3.55. Eesti välisühendustel võimsuse muutumine 0,25 sekundilise lühise korral

Joonisel on punasega toodud võimsus liinil Tsirguliina – Valmiera, rohelisega võimsus liinil Tartu – Valmiera ning sinisega võimsus liinil Tartu – Pihkva. On näha, et võimsuse võnkumiste amplituud nendel liinidel jääb madalaks ning võnkumine sumbub kiiresti, seega ei vaadelda distantskaitsete mõõtmistulemusi antud liinidel.

Modelleerimine 0,37 sekundilise lühise korral

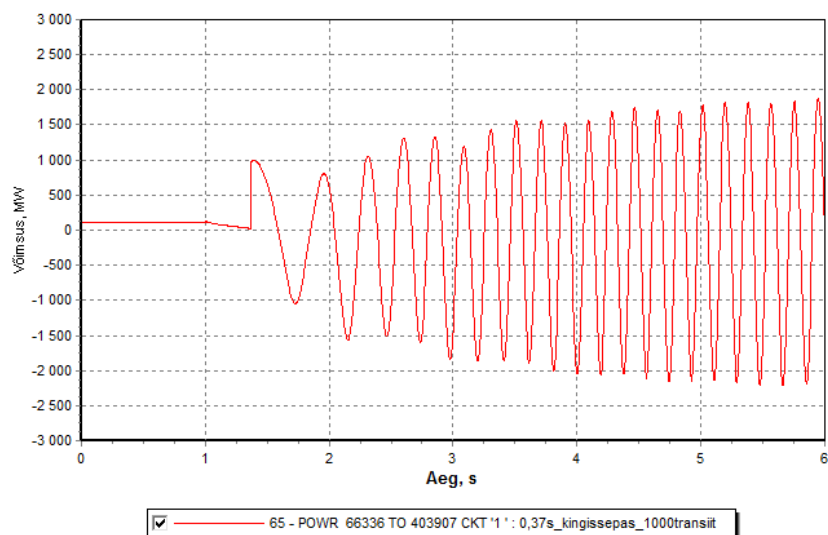
Modelleeritakse 0,37 sekundi pikkust kolmefaasilist lühist Kingissepa alajaamas, mille tulemusel lülitub välja liin Balti – Kingissepa. Lühise tulemusel generaatorite nurkade muutused Eesti ja Balti elektrijaamas on toodud joonisel 3.56.

Jooniselt on näha, et transiidi korral 0,37 sekundilise lühise korral pärast lühist Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurgad kasvavad pidurdamatult ehk võrreldes naabersüsteemidega tekib asünkroonkäik, mis tuleneb sellest, et pikemal lühisel saadud kiirendusenergia on suurem, kui pärast lühist generaatorite poolt võrku antav energia. Samuti on generaatorite nurkade muutumisest võimalik näha, et omavahelist võnkumist generaatorite vahel sisuliselt ei toimu. Vaadeldakse ka võimsuse muutumist ajas liinil Eesti – Kingissepa, mis on toodud joonisel 3.57.



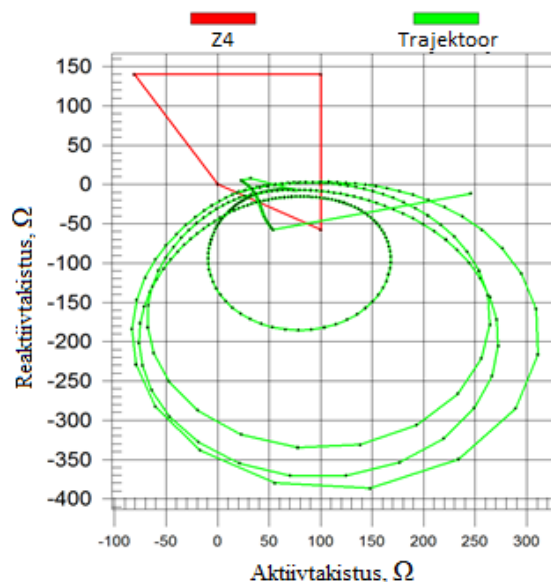
Joonis 3.56. Eesti ja Balti elektrijaamade generaatorite nurkade muutused 0,37 sekundilise lühise korral

Jooniselt on võimalik näha, et võimsuse võnkumine tekkiva asünkroonkäigu puhul on väga suure amplituudiga ning ajas kiirelt suunda muutev. Lisaks suurele ning kiiresti võnkuvale võimsusele kaasnevad asünkroonkäiguga ka suures ulatuses pinge muutumised, mis kokkuvõttes põhjustavad elektrisüsteemi seadmetele ohtu. Seega tuleb süsteemi asünkroonkäigu eest kaitsta.



Joonis 3.57. Võimsuse muutumine ajas liinil Eesti – Kingissepa 0,37 sekundilise lühise korral

Asünkroonkäigu ennetamiseks kasutatakse elektrisüsteemis asünkroonkäiku tuvastavaid releesid, mis peaksid reageerima, kui on oht kahe ala vahel asünkroonkäigu tekkeks. Siinkohal on võimalik kasutada asünkroonkäigu kaitseks tagavarana distantskaitset. Distantskaitse mõõtmised asünkroonkäigu korral liinil Eesti – Tsirguliina on toodud joonisel 3.58.



Joonis 3.58. Distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus asünkroonkäigu korral

Jooniselt on näha, et asünkroonkäigu korral moodustavad distantskaitse poolt mõõdetud näivtakistused ringjooni. Üks mõõdetavatest takistustest koosnev ringjoon tähistab antud liinil, kus kaitse asub, ühte asünkroonkäiku. Seda fenomeni ära kasutades on võimalik kasutada distantskaitset asünkroonkäigu kaitsena. Üheks võimaluseks on, et distantskaitse loeb asünkroonkäigu tsikleid ning sätte väärtusena ette antud tsüklite täitumisel lülitatakse liin välja. Teiseks võimaluseks on mõõdetava näivtakistuse mõõtmine ning mõõtes takistusvektori sisenemist ühelt poolt karakteristikut ning väljumist teiselt poolt karakteristikut fikseeritakse asünkroonkäigu teke ja liin lülitatakse välja. Täpsemalt on distantskaitsega asünkroonkäigu tuvastamine kirjeldatud punktis 3.3. Sellist funktsiooni Eesti 330 kV võrgus kasutusel ei ole, vaid kasutatakse spetsiaalseid asünkroonkäiku ennetavaid seadmeid, mille töötamist antud töös ei vaadeldud ning mille töötamise täpsem uurimine võiks olla autori edasiseks teemaks doktoriõppes.

Modelleerimistulemustest võib järeldada, et kaitsete häälestus Eesti elektrisüsteemis võnkumistele on hea ja praegune kaitsesätete arvutusmetoodika kehtib ka dunaamilises

võrguolukorras. Selgub, et Eesti süsteemis võimsuste võnkumisel otsest ohtu liinide liigseks väljalülituseks ei ole, sest võnkumistel siseneb vaadeldavatel liinidel kaitsete poolt mõõdetav näivtakistus kõige pikema viiteajaga kaitsetsooni. Samas tuleb tõdeda, et teatud võrgu konfiguratsiooni korral on võimsuse võnkumise olukorras mõõdetav näivtakistus lähedal kaitse kiirele väljalülitustsoonile ning liigse väljalülitamise riskide maandamiseks tuleb kasutada distantskaitsetes võimsuse võnkumise blokeeringut.

Kokkuvõte

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli uurida elektrisüsteemi võimsuse võnkumisi ja releekaitse toimimist võimsuse võnkumise olukorras elektrisüsteemi mudelil ning sellega kontrollida Eesti ülekandevõrgu releekaitse häälestust võimsuse võnkumise olukorrale.

Töö alustuseks tutvustati lugejale lühidalt elektrisüsteemi kui terviku talitlust, selle võimalikke olekuid ja nende arvutamise võimalusi. Seejärel, et oleks võimalik rääkida võimsuse võnkumistest elektrisüsteemis, anti ülevaade generaatori võimsusest ja elektrilise nurga δ mõistest. Pärast seda liiguti edasi elektrisüsteemi stabiilsuse juurde, kus alustati lihtsast elektrisüsteemist. Toodi teoreetilised alused staatilise ja dünaamilise stabiilsuse kohta. Samuti tutvustati lugejale pindalade reeglit, selle rakendatavust ja pindalade reegli järgi elektrisüsteemi stabiilsuse määramist. Peatüki lõpetuseks toodi reaalseid näiteid võimsuse madalsageduslike võnkumiste ohtlikkusest elektrisüsteemis

Järgnevas anti esmalt ülevaade lugejale elektrisüsteemi releekaitsest. Seejärel liiguti täpsemalt releekaitse murekohtadele elektrisüsteemi madalsageduslike võimsuse võnkumiste olukorras, milleks on distantskaitse liigrakendumine. Pärast murekohtade tutvustamist toodi võimalus antud ohtu neutraliseerida, mis kujutab endast funktsiooni distantskaitse blokeerimiseks näivtakistuse liikumiskiiruse järgi.

Lõputöö edasises osas teostati madalsageduslike võimsuse võnkumiste modelleerimist elektrisüsteemis. Alustati lihtsast elektrisüsteemist, kus modelleeriti kokku kolme situatsiooni – ühe ühendusliini väljalülitust, lühist generaatorite summutuseta ja lühist koos generaatorite summutusega. Lihtsa elektrisüsteemi võimsuse võnkumiste modelleerimisest oli näha, et võnkumise korral sattus distantskaitse poolt mõõdetav näivtakistus kaitse töötsooni ning oht liigrakendumiseks on reaalne. Seejärel modelleeriti keerukat elektrisüsteemi Eesti näitel, et vaadelda probleemi tõsidust ja releekaitse häälestust ning sätete arvutusmetoodika paikapidavust. Praeguse arvutusmetoodika järgi arvutatakse releekaitse sätteid staatilise pingeprofiiliga, kus võrgupinge on konstantne, kasutades sätete arvutamiseks ülিমööduvaid lühisvoolusid ja ülिमööduvaid lühistakistusi. Kokku modelleeriti nelja erinevat võrgu piirsituatsiooni, modelleerimistulemused tuuakse koondatult tabelis 5.1. Modelleeritavad situatsioonid olid:

- suvine minimaalne tarbimine ning transiit läbi Eesti võrgu puudub,
- suvine minimaalne tarbimine ning transiit läbi Eesti võrgu on suvine maksimaalne,

- talvine maksimaalne tarbimine ning transiit läbi Eesti võrgu puudub,
- talvine maksimaalne tarbimine ning transiit läbi Eesti võrgu on talvine maksimaalne.

Tabel 5.1 Modelleerimistulemused

Modelleeritav olukord	Lühiseaeg	Tulemused
Suvine miinimumkoormus ja nulltransiit läbi võrgu	0,25 sekundit	Võimsuse esimesel võnkel satub liinil Eesti – Balti mõõdetav näivtakistus kaitse neljandasse töötsooni.
	0,37 sekundit	Liinil Eesti – Balti satub mõõdetav näivtakistus korduvalt kaitse neljandasse töötsooni
Suvine miinimumkoormus ja maksimaalne transiit läbi võrgu	0,25 sekundit	Liinil Eesti – Balti satub mõõdetav näivtakistus korduvalt kaitse neljandasse töötsooni
	0,37 sekundit	Liinil Eesti – Balti ning Tartu – Pihkva satub mõõdetav näivtakistus korduvalt kaitse neljandasse töötsooni
Talvine maksimaalne koormus ja nulltransiit läbi võrgu	0,25 sekundit	Liinil Eesti – Kingissepa satub mõõdetav näivtakistus esimesel võnkel kaitse neljandasse töötsooni
	0,37 sekundit	Liinil Eesti – Kingissepa satub mõõdetav näivtakistus mitmel võnkel kaitse neljandasse töötsooni, liinil Eesti – Balti esimesel võnkel
Talvine maksimaalne koormus ja maksimaalne transiit läbi võrgu	0,25 sekundit	Liinil Eesti – Kingissepa satub mõõdetav näivtakistus kahel esimesel võnkel kaitse neljandasse töötsooni
	0,37 sekundit	Tekib asünkroonkäik Eesti ja naabersüsteemide vahel

Töö tulemusena võib öelda, et kõrgepingevõrkudes tuleb releekaitstes kasutada distantskaitse blokeerimist, et vältida kaitsete liigset rakendumist võimsuse võnkumiste olukordades. Eesti ülekandevõrgu releekaitse häälestus võimsuse madalsageduslike võnkumiste suhtes on hea ja praegune releekaitse sätete arvutusmetoodika kehtib ka dünaamilise võrguolukorra juures.

Lisaks leiti, et talvise maksimaalkoormuse ning maksimaalse transiidi toimumisel läbi võrgu tekib 0,37 sekundilise lühise korral Eesti ning naaberriikide vahel asünkroonkäik, mille korral peaksid rakenduma asünkroonkäiku ennetavad releed. Asünkroonkäigukaitse releede talitlust käesolevas töös ei uuritud ning see võiks olla autori edasiseks uurimisallikaks. Samuti vajaks uurimist võimsuse võnkumine olukorras, kus Eesti on desünkroniseeritud Venemaa süsteemist.

Kirjandus

- [1] M. Meldorf ja J. Kilter, *Elektrisüsteemi stabiilsus*, Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2011.
- [2] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, California: McGraw-Hill Inc., 1994.
- [3] J. Machowski, J. W. Bialek ja J. R. Bumby, *Power System Dynamics, Stability and Control*, Sussex: John Wiley&Sons Ltd., 2008.
- [4] E. I. INC, „CAPE Transient Stability Link,“ Ann Arbor, 2013, p. 54.
- [5] J. Paseraba, P. Kundar, J. Sanches-Gasca ja E. Larsen, „Small signal stability and Power System Oscillations,“ %1 *The electric power engineering handbook*, Auburn, Alabama, CRC press IEEE Press, 1998, pp. 11-20 - 11-33.
- [6] CIGRE task force, *CIGRE Technical brochure no. 111*, CIGRE, 1996.
- [7] L. J. Blackburn ja T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, CRC Press, 2014.
- [8] H. Tammoja, *Releekaitse loengukonspekt*, Tallinn, 2013.
- [9] P. M. Anderson, *Power system protection*, New York: IEEE Press, 1999.
- [10] S. H. Horowitz ja A. G. Phadke, *Power System Relaying*, John Wiley and Sons, 2014.
- [11] S. AG, *Siprotec Distance Protection 7SA6*, 2009.
- [12] Vabariigi Valitsus, „Võrgueeskiri,“ 19 02 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <https://www.riigiteataja.ee/akt/12831412>. [Kasutatud 18 04 2016].
- [13] Elering AS, „Eesti elektrisüsteem,“ [Võrgumaterjal]. Available: <http://elering.ee/elektrisusteem/>. [Kasutatud 18 04 2016].
- [14] Elering AS, *Tootmispiisavuse aruanne*, Tallinn, 2015.
- [15] NordPool, „NordPool UMM,“ NordPool, 2016. [Võrgumaterjal]. Available: <http://umm.nordpoolspot.com/>. [Kasutatud 28 04 2016].
- [16] Elering AS, *Varustuskindluse aruanne*, Tallinn, 2016.

Lisad

L1 CAPE TS-link (*Computer aided protection engineering Transient Stability link*) tutvustus

CAPE ja dünaamiliste arvutuste võrguprogrammi ühendamine võimaldab uurida lühiste mõjul mitmete releede toimimise mõju süsteemi stabiilsusele. Simuleeritavat lühist käsitletakse kui järsku süsteemi häiringut, sarnaselt liini väljalülitumisele, lüliti avanemisele või tarbimise või tootmise muutumisele. Selle tulemusel tekivad ajas muutuvad pinged ja voolud. CAPE kasutab pingeprofiili mitmetel järjestikkustel ajahetkedel, mis saadakse dünaamikaprogrammist. [4]

Mõlemad nii püsiolukord kui dünaamiline olukord kasutavad sümmeetriliste komponentide meetodit simuleerimaks kolmefaasilist süsteemi, aga ainult pärijärgnevus muutub dünaamiliselt. Andmete vahetamist dünaamilise simulatsiooni programmi ja CAPE vahel teostab moodul CAPE TS-link. [4]

CAPE TS-lingi põhilised omadused on [4]:

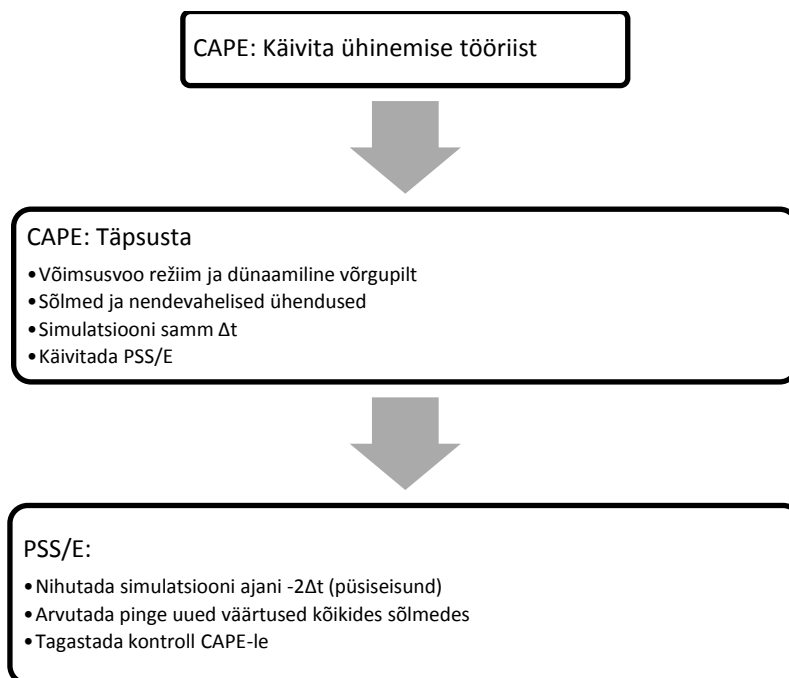
- Kasutada elektrisüsteemi modelleeritud kaitsesüsteeme koos tuhandete releedega, millele insenerid on arvutanud vastavad sätted ning need ka omavahel kooskõlastanud
- Kasutada dünaamilist võrgumudelit, mida uuritakse süsteemi stabiilsuse analüüsiks
- Modelleerida kaitsete ning dünaamika mudeleid koos, et oleks võimalik jälgida releede toimimisi ja leida kaskaadseid rikkekohti. Releede reageerimist simuleeritakse, mitte ei estimeerita
- Pakkuda platvormi erikaitselahenduste arendamiseks ja testimiseks, samuti laiseire kaitse ning kontrolli algoritmidele

Lihtsustatult dünaamikaprogrammi ja CAPE ühendamine toimub suletud ringi kontuuris, kus [4]:

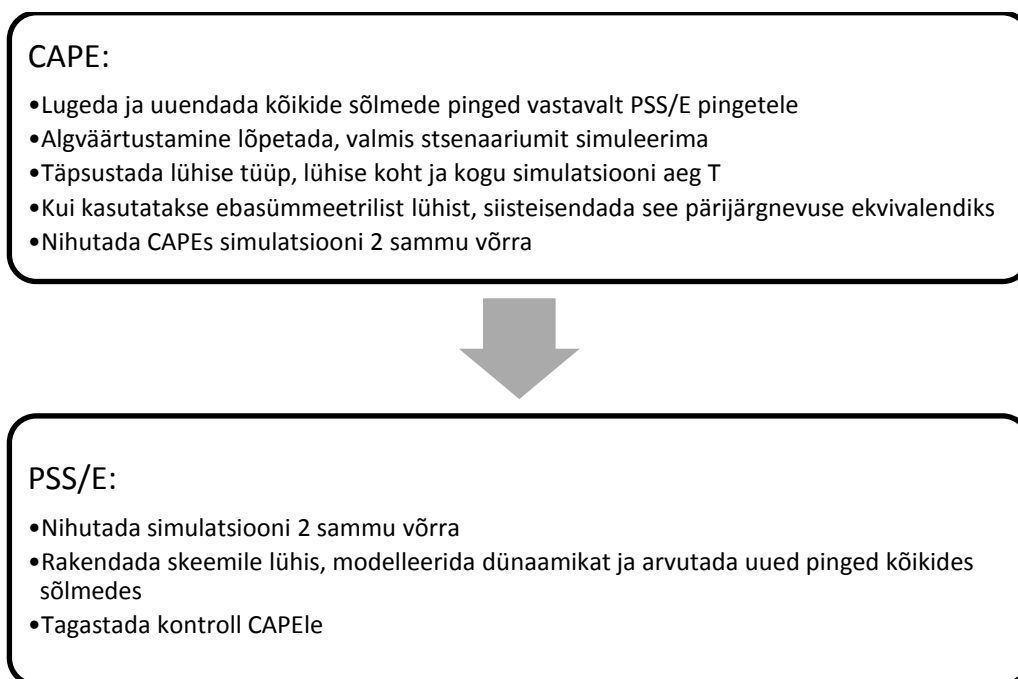
1. Dünaamikaprogrammiga simuleeritakse juhtumi teket, kus arvutatakse esmane pingeprofiil kõikides võrgu sõlmedes. Algväärtustamine simulatsiooni alustamiseks toimub teatud algsete tingimuste ja võrgu topoloogia baasil.
2. Releekaitse simulatsiooni programm võtab eelnevalt arvutatud pinged kõikides sõlmedes ja selle põhjal otsustab releede toimimist elektrivõrgus. Releekaitse toimeaeg määrab, millal järgmine võimsuslüliti avatakse ja sellega muudetakse võrgu topoloogiat. Võimsuslüliti avanemisel edastatakse see tagasi dünaamikaprogrammile.

3. Dünaamikaprogramm muudab enda võrgu konfiguratsiooni eelneva info põhjal (avab võimsuslülitit), modelleerib generaatorite dünaamikat, arvutab uue pingeprofiili, mis seejärel edastakse uuesti releekaitse simulatsiooniprogrammile.

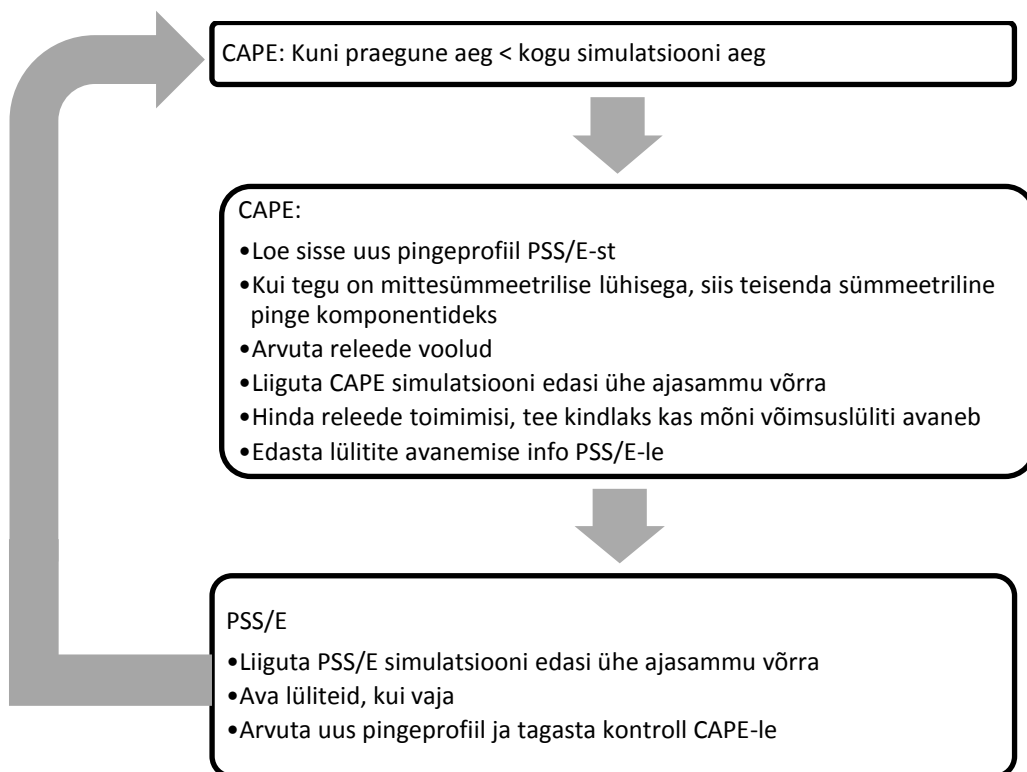
Järgneval diagrammil on toodud andmevahetus lihtsustatult kahe programmi vahel. [4]



Algväärtustamise lõpus mõlema CAPE ja PSS/E võrgud on omavahel sidustatud. Järgnevalt simulatsioon liigub häiringu tekitamise faasi, mis on kujutatud järgneval diagrammil. [4]



Pärast häiringu tekitamist liigub simulatsioon järgneva algoritmi järgi. [4]



See algoritm on võimeline toimima mitmel erineval viisil [4]:

- Jälgimiseta, toimuvata võrgumuudatustega kuni saavutatakse simulatsiooni lõppaeg.
- Kasutaja kontrolli all nii, et kasutaja ise määrab järgmise ajapunkti simulatsioonis
- Kasutaja kontrolli all nii, et simulatsiooni viiakse edasi kuni järgmise võrgumuudatuseni