



TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL
INSENERITEADUSKOND
Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

**ÜHE EESTI JAOTUSVÕRGU
PIIRKONNAALAJAAMA TOITEVÕIMALUSTE
UURIMINE JA AVARIITOITESKEEMI
KOOSTAMINE PÄIKESEELEKTRIJAAAMADE
LISANDUMISE RAAMISTIKUS**

**ANALYSING THE POWER SUPPLY POSSIBILITIES OF A
REGIONAL SUBSTATION IN THE ESTONIAN
DISTRIBUTION GRID AND CREATING ITS EMERGENCY
POWER SUPPLY SCHEME WITHIN THE FRAMEWORK OF
THE ADDITION OF SOLAR POWER STATIONS**
BAKALAUREUSETÖÖ

Üliõpilane: Elis Vedom

Üliõpilaskood: 213720EAAB

Juhendajad: Jako Kilter, professor
Maanus Roosmann, Elektrilevi OÜ
juhtimiskeskuse peaspetsialist

Tallinn 2024

AUTORIDEKLARATSIOON

Olen koostanud lõputöö iseseisvalt.

Lõputöö alusel ei ole varem kutse- või teaduskraadi või inseneridiplomit taotletud.

Kõik töö koostamisel kasutatud teiste autorite tööd, olulised seisukohad, kirjandusallikatest ja mujalt pärinevad andmed on viidatud.

“13” mai 2024

Autor: Elis Vedom

Töö vastab bakalaureusetöö esitatud nõuetele

“13” mai 2024

Juhendajad: Jako Kilter

Maanus Roosmann

Kaitsmisele lubatud

“.....”20... .

Kaitsmiskomisjoni esimees

/ nimi ja allkiri /

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja lõputöö üldsusele kättesaadavaks tegemiseks¹

Mina, Elis Vedom,

1. Annan Tallinna Tehnikaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda loodud teose „Ühe eesti jaotusvõrgu piirkonnaalajaama toitevõimaluste uurimine ja avariitoiteskeemi koostamine päikeseelektrijaamade lisandumise raamistikus“,

mille juhendaja on Jako Kilter ja Maanus Roosmann

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

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

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

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

13. mai 2024

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

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE

Autor: Elis Vedom

Lõputöö liik: Bakalaureusetöö

Töö pealkiri: Ühe eesti jaotusvõrgu piirkonnaalajaama toitevõimaluste uurimine ja avariitoiteskeemi koostamine päikeseelektrijaamade lisandumise raamistikus

Kuupäev:
13.05.2024

70 lk

Ülikool: Tallinna Tehnikaülikool

Teaduskond: Inseneriteaduskond

Instituut: Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

Töö juhendajad: Professor Jako Kilter, Elektrilevi OÜ juhtimiskeskuse peaspetsialist
Maanus Roosmann

Sisu kirjeldus:

Katkematu ja kvaliteetne elektrienergia on tähtis nii tavainimestele, tööstusele kui ka elutähtsatele teenustele. Elektrisüsteemi keskseks osaks on alajaamad, mis varustavad tarbijaid elektrienergiaga. Antud lõputöös leiti optimaalseim avariitoiteskeem ühe Eesti jaotusvõrgu piirkonnaalajaama jaoks. Lõputöö on kasulik Elektrilevi OÜ juhtimiskeskusele piirkonnaalajaama erinevate toiterežiimide juhtimisel. Lõputöö raames kasutati simulatsioonitarkvarasid Trimble NISi ja *PowerWorld Simulator*-it (PWS), et analüüsida tootmisüksuste mõju võrgu pingele juhtimisele. Sellest tulenevalt on lõputöö raames kasutusel ka PWS tarkvara, et teada saada, kuidas P(Q) juhtimisrežiim mõjutab elektrivõrgu pinget. Lõputöö käigus modelleeriti Trimble NIS tarkvaras vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvad fiidrid nii tootmisüksusteta kui ka tootmisüksustega. Samuti modelleeriti kõik teoreetilised võimalikud ümbertoited, mille põhjal valiti kõige optimaalsemad. Kui NIS tarkvaras, tuli ise valida väljundvõimsus tootmisüksustele, et saavutada soovitud pinget, siis PWS tarkvaras toimus see automaatselt. Mõlemate tarkvarade piiramiste tulemused ühtisid. Avariitoiteskeemide koostamisel tuleb arvestada fiidritele ühendatud tootmisüksustega, sest sõltuvalt väljundaktiivvõimsuse suurusest põhjustavad need väljakutseid fiidri pinget juhtimisel. Tulemused näitasid, et tootmisüksuste asukoht ja tootmisvõimsus on kriitilised pinget reguleerimise tegurid. Analüüsi käigus selgus, et tootmisüksustel on märkimisväärne mõju toiteliini talitlusele, mille tõttu on oluline nendega arvestada nii pinget juhtimisel kui ka erinevate toiteskeemide rakendamisel.

Märksõnad: avariitoiteskeem, NIS, päikeseelektrijaam, PWS, bakalaureusetöö.

ABSTRACT

Author: Elis Vedom *Type of the work:* Bachelor Thesis

Title: Analysing the Power Supply Possibilities of a Regional Substation in the Estonian Distribution Grid and Creating Its Emergency Power Supply Scheme within the Framework of the Addition of Solar Power Stations

Date: 13.05.2024

70 pages

University: Tallinn University of Technology

School: School of Engineering

Department: Department of Electrical Power Engineering and Mechatronics

Supervisors of the thesis: Professor Jako Kilter, Elektrilevi OÜ control center head specialist Maanus Roosmann

Abstract:

Uninterrupted and high-quality electricity is important to ordinary people, the industry, and vital services. The central part of the electricity system consists of substations that supply consumers with electricity. The thesis is useful for the control center of Elektrilevi OÜ in controlling the different power supply modes of the regional substation. In this thesis, the most optimal emergency power supply scheme was found for a regional substation in the Estonian distribution network. Simulation software, PowerWorld Simulator (PWS) and Trimble NIS, were used to analyse the impact of generating plants on the power grid's voltage control. The outgoing feeders of the regional substation were modelled in Trimble NIS with and without generating plants. All theoretically possible refeedings were also modelled, where the most optimal ones were selected. In the NIS software, the output power for the generating plants were chosen manually, whereas in PWS it was done automatically. The results of both software limitations were consistent. When preparing emergency power supply schemes, generating plants connected to the feeder must be taken into account, because depending on the size of the output active power, they cause challenges in controlling the feeder voltage. The results showed that the location and capacity of generating plants are critical factors in voltage regulation. During the analysis, it became clear that the generating plants have a significant impact on the operation of the feeder. Therefore, it is important to take them into account when controlling the voltage and implementing different emergency power supply schemes.

Keywords: emergency power supply scheme, NIS, solar power station, PWS, Bachelor Thesis.

Elektroenergeetika ja mehhatroonika instituut

LÕPUTÖÖ ÜLESANNE

Üliõpilane: Elis Vedom, 213720EAAB
Õppekava, peeriala: EAAB, Elektroenergeetika
Juhendajad: Professor Jako Kilter
Maanus Roosmann, juhtimiskeskuse peaspetsialist
Elektrilevi OÜ, maanus.roosmann@elektrilevi.ee

Lõputöö teema:

Ühe Eesti jaotusvõrgu piirkonnaalajaama toitevõimaluste uurimine ja avariitoiteskeemi koostamine päikeseelektrijaamade lisandumise raamistikus

Analysing the Power Supply Possibilities of a Regional Substation in the Estonian Distribution Grid and Creating Its Emergency Power Supply Scheme within the Framework of the Addition of Solar Power Stations

Lõputöö põhieesmärgid:

1. Missugused on kõige optimaalsemad avariitoiteskeemid vaadeldava võrgu piirkonna puhul?
2. Mis mõju avaldavad tootmisüksused üldisele võrgu talitlusele?
3. Kui suures ulatuses mõjutab tootmisüksuste pingajuhtimise võime vaadeldava piirkonnaalajaama avariitoiteskeemi koostamist ja võrgu talitlust avariitoiteskeemide korral?
4. Mis on erinevused Trimble NIS ja *PowerWorld Simulator* tarkvaradega teostavate arvutuste vahel?

Lõputöö etapid ja ajakava:

Nr	Ülesande kirjeldus	Tähtaeg
1.	Kirjanduse läbitöötamine	Jaanuar
2.	Lähteandmete kogumine	Veebruar
3.	Tehniline modelleerimine	Veebruar - aprill
4.	Teoreetilise osa kirjutamine	Veebruar - märts
5.	Tulemuste analüüs	Aprill
6.	Järelduste kirjutamine	Aprill
7.	Kokkuvõtte koostamine	Aprill

8.	Töö esimene versioon valmis ja juhendajale läbilugemiseks saatmine	25. aprill
9.	Paranduste sisseviimine	Mai
10.	Juhendajale teiseks läbilugemiseks saatmine	5. mai
11.	Töö lõplik versioon valmis	13. mai

Töö keel: eesti keel **Lõputöö esitamise tähtaeg:** "13" mai 2024. a

Üliõpilane: "15"november 2023 a
/allkiri/

Juhendaja: "15" november 2023 a
/allkiri/

Juhendaja: "15" november 2023 a
/allkiri/

Programmijuht: "15" november 2023 a
/allkiri/

SISUKORD

LÕPUTÖÖ LÜHIKOKKUVÕTE	4
ABSTRACT	5
EESSÕNA	10
Lühendite ja tähiste loetelu	11
1. SISSEJUHATUS	12
2. ELEKTRIVÕRGU JUHTIMISE PÕHIMÕTTED	14
2.1 Elektrivõrk.....	14
2.2 Tootmisüksused	15
2.3 Tootmisüksuste reaktiivvõimsuse juhtimisrežiimid	18
2.4 Avariitoiteskeem	22
2.5 Elektrivõrgu juhtimissüsteemid	23
3. ELEKTRIVÕRGU MODELLEERIMINE	25
3.1 Uurimismeetod	25
3.2 Arvutusmeetodid	26
3.3 Elektriliinid	28
3.4 Trafod.....	29
3.5 Koormused	31
3.6 Võrgu terviklik skeem	34
4. TULEMUSTE ANALÜÜS	35
4.1 Tootmisüksusteta fiidrite tulemused	35
4.2 Tootmisüksusteta ümbertoidete tulemused.....	39
4.3 Tootmisüksustega fiidrite tulemused	40
4.4 Tootmisüksustega ümbertoidete tulemused	44
4.5 P(Q) juhtimisrežiimi rakendamine	47
4.6 Vaadeldava piirkonnaalajaama avariitoiteskeem.....	48
4.7 Modelleerimise järeldused	50
KOKKUVÕTE	52
SUMMARY	54
KASUTATUD KIRJANDUS	56
LISAD	59
Lisa 1 PWS Modelleerimise mudelid tootmisüksusteta.....	60

Lisa 2 PWS Modelleerimise mudelid tootmisüksustega	64
Lisa 3 Avariitoiteskeemi tingmärgid.....	68
Lisa 4 Piirkonnaalajaama tootmisüksusteta avariitoiteskeem	69
Lisa 5 Piirkonnaalajaama tootmisüksustega avariitoiteskeem	70

EESSÕNA

Käesolev lõputöö teema on valminud koostöös Elektrilevi OÜ ja Tallinna Tehnikaülikooliga. Varasemalt on lõputöodes käsitletud päikeseelektrijaamade valdkonda, kuid avariitoiteskeemi kaasates päikeseelektrijaamu ei ole varasemalt lõputööna koostatud. Eelkõige tänan oma lõputöö juhendajat Jako Kilterit, kes abistas töö struktuuri ja eesmärgi sõnastamisega. Samuti tänan Elektrilevi OÜ juhtimiskeskuse peaspetsialisti Maanus Roosmanni, kes nõustas lõputöö jooksul tehniliste keerukate küsimustega. Lisaks tänan Elektrilevi OÜ industriaaltehnoloogia arhitekti Marko Kiiska, kes pidevalt oli lõputöö käigus abiks kiireloomulistel küsimustel.

Lõputöö autori meiliaadress: elis.vedom@elektrilevi.ee

Lühendite ja tähiste loetelu

ADMS - *Advanced Distribution Management System*

AJ - Alajaam

KP - Keskpinge

LP - Lahutuspunkt

MP - Madalpinge

PAJ - Piirkonnaalajaam

PEJ - Päikeseelektrijaam

PWS - *PowerWorld Simulator*

RK - Releekaitse

U_{\min} - Minimaalne pinge

VT - Voolutrafo

1. SISSEJUHATUS

Katkematu ja kvaliteetne elektrienergia on olulisel kohal nii tavainimesele, tööstusele kui ka elutähtsatele teenustele. Elektrisüsteemi oluliseks osaks on alajaamad, mille kaudu varustatakse tarbijaid elektrienergiaga. Olulisel kohal on nii piirkonna- ehk toitealajaamade töökindlus kui ka avariitoiteskeemide tundmine, sest võimalikud tõrked võivad tekitada väljakutseid tarbijate elektrienergiaga varustamisel. Varustuskindluse seisukohalt on oluline, et elektritarbijatel oleks olemas alternatiivne toitevõimalus, mille kaudu on rikete korral võimalik ümberlülitusi teostada. Selle tõttu on kasutusel piirkonnaalajaamade avariitoiteskeemid.

Kõik elektrivõrguga ühendatud tarvitid vajavad normaaltalitluseks kindlas vahemikus toitepinget [1]. Olukorras, kus elektrivõrgus on palju tootmisüksusi on pinge tõus eriti nendel hetkedel, kus üksustel on maksimaalne tootmisvõimsus. Jaotusvõrkudes kasutatakse pinge reguleerimiseks peamiselt automaatsete astmeregulaatoritega trafosid. Samuti kasutatakse ära elektrivõrguga liitunud tootmisüksuste pinge juhtimise võimalusi. Eesmärgiks on võrgu pinge hoidmine lubatud piiride ja vältida sobilike pingetasemete ületamist. [1]. Selle tõttu on avariiskeemide koostamisel suur rõhk tootmisüksustel ning nende pinge juhtimise karakteristikutel. Elektrilevi OÜ-s on võrgu talitluse arvutusel ja analüüsimisel kasutusel Trimble NIS tarkvara. NIS võimaldab tootmisüksuste ja pinge juhtimise seisukohalt käsitleda üksust ainult konstantse väljundvõimsusega, mille tõttu ei ole võimalik tarkvaraga teostada otsest tootmisüksuste mõju hinnangut pingemuutimise raamistikus. Sellest tulenevalt on lõputöö raames kasutusel ka *PowerWorld Simulator (PWS)* tarkvara, et teada saada, milline on mõju päikeseelektrijaamade lisandumisel vaadeldava võrgu pinge juhtimisele vaadeldava avariitoiteskeemi korral.

Vastavalt allikale [2] tootis Eesti 2023. aastal esimest korda rohkem elektrienergiat taastuvatest energiaallikatest, kui fossiilsetest kütustest, mis näitab jätkuvat huvi taastuvenergia vastu. Tootmisüksuste lisandumise tõttu on võrgu pinge oluline avariitoiteskeemide koostamisel, kus tuleb tagada võrgu toide lubatud piirides pingega nii plaanilistel kui ka avariilistel töödel. Lähiaastatel rekonstrueeritakse lõputöös vaadeldav piirkonnaalajaam. Plaanilise töö käigus jääb kogu ühetrafolise toitealajaama piirkond trafo toideteta. Piirkonnaalajaama avariitoiteskeem on kasutusel olukorras, kus toitealajaama väljuvad fiidrid tuleb viia üle jaotusvõrgu toitele. Käesolev teema pakub huvi lõputöö tegijale ja sarnast tööd ei ole varasemalt Tallinna Tehnikaülikoolis teostatud.

Lõputöö teooriaosa esimene peatükk „Elektrivõrgu juhtimise põhimõte“ annab ülevaate elektrivõrgu struktuurist. Järgnevad peatükid käsitlevad tootmisüksuseid, kus kirjeldatakse, mis on hajatootmine ning mis on selle mõju pingele. Lisaks antakse ülevaade ka tootmisüksuste reaktiivvõimsuse juhtimisrežiimidest. Eelviimases peatükis käsitletakse avariitoiteskeemi, kus tuuakse välja avariitoiteskeemide tähtsus ning nende lugemisjuhised. Teooria lõpeb elektrivõrgu juhtimisrežiimide ülevaatega, milles tutvustatakse lõputöös kasutatavaid tarkvarasid. „Elektrivõrgu modelleerimise“ peatükis kirjeldatakse NIS ja PWS tarkvarades kasutatavaid arvutusmeetodeid. Peatükis tuuakse samuti välja elektriliinide, trafode ning koormuste parameetrid. Viimases peatükis „Tulemuste analüüs“ kirjeldatakse uurimismeetodit ning võrreldakse omavahel kahe tarkvara tulemusi. Peatükk lõpeb piirkonnaalajaama avariitoiteskeemi analüüsiga.

Lõputöös on esitatud järgmine hüpotees:

- Avariitoiteskeemide koostamisel tuleb arvestada fiidri ühendatud tootmisüksustega, sest sõltuvalt väljundaktiivvõimsuse suurusel põhjustavad need väljakutseid fiidri pinge juhtimisel.

Võtmesõnad: avariitoiteskeem, NIS, päikeseelektrijaam, PWS, bakalaureusetöö

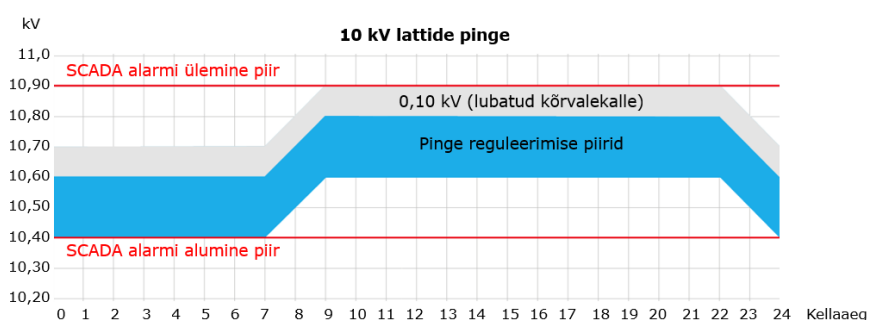
2. ELEKTRIVÕRGU JUHTIMISE PÕHIMÕTTED

Elektritarbijaid tuleb varustada kvaliteetse, katkematu elektrienergiaga. Eesti elektrivõrgu väljakutseteks on tänapäeval võrgu vananemine, tarbimise kasv ja hajatootmisallikate (näiteks päikeseelektrijaamade ja akupankade) liitumine. Elektrivõrgu juhtimisel tuleb arvestada tänase infrastruktuuriga ja uute tootmisüksuste lisandumisega ehk tuleb vältida elektrivõrgu ülekoormamist.

Elektrilevi OÜ 2023. aasta arengukavas [3] on öeldud, et viimastel aastakümnetel keskenduti elektrivõrgu töökindlusele ja energiakadude vähendamisele. Seoses pideva võrgu arendamisega tekib vajadus suurendada elektrivõrgu läbilaskevõimet, et toetada tarbimise ja tootmise kasvu. Läbilaskevõimsus näitab kui palju koormust saab edastada läbi võrguelemendi (trafod, liinid, tootmisüksused). Kui elektrivõrgul on kõrge läbilaskevõime, siis võrk suudab tulla toime koormuste järsu suurenemisega.

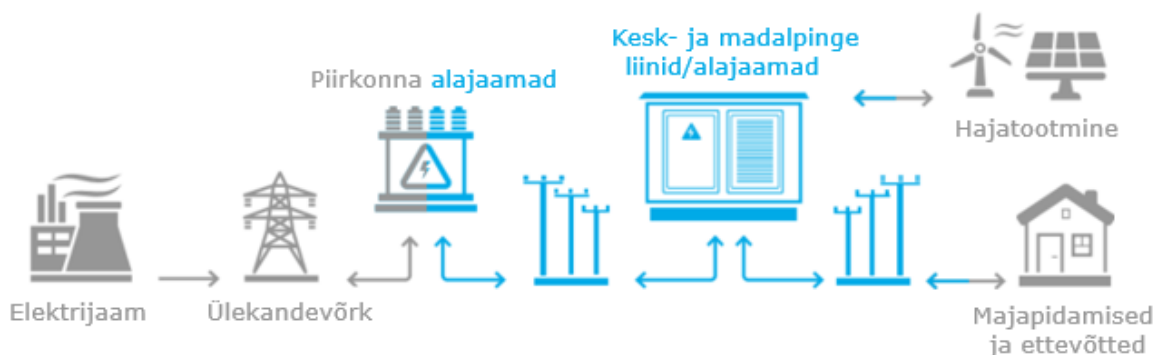
2.1 Elektrivõrk

Elektrienergia toodetakse elektrijaamades, kus tõstetakse pinget. Kõrgepingeliinide kaudu jõuab elektrienergia edasi jaotusalajaamadesse, kus viiakse pinge veel madalamale tasemele, et muuta elekter ohutumaks tavatarbijale. Jaotusalajaamad toimetavad elektrienergia tarbijate lähedusse. Jaotusalajaamades viiakse pinge veel madalamale tasemele, et muuta elekter ohutumaks tavatarbijale. Edasi jõuab elektrienergia lõplikult tarbijateni läbi kohaliku võrguettevõtte. Elektrivõrgu nimipingeks on pinge, mille jaoks on võrk projekteeritud ning sellel on enda talitlusomadused. Vastavalt allikale [4], (35 – 110 kV) piirkonnaalajaamades, kus on koormuse all reguleeritavad (10 – 110 kV) trafod, tuleb hoida (6 – 35 kV) lattide pinge vastavalt etteantud graafikutele. 10 kV lattide pinge graafik on esitatud joonisel 2.1.



Joonis 2.1 10 kV lattide lubatud pinge vahemikud [4]

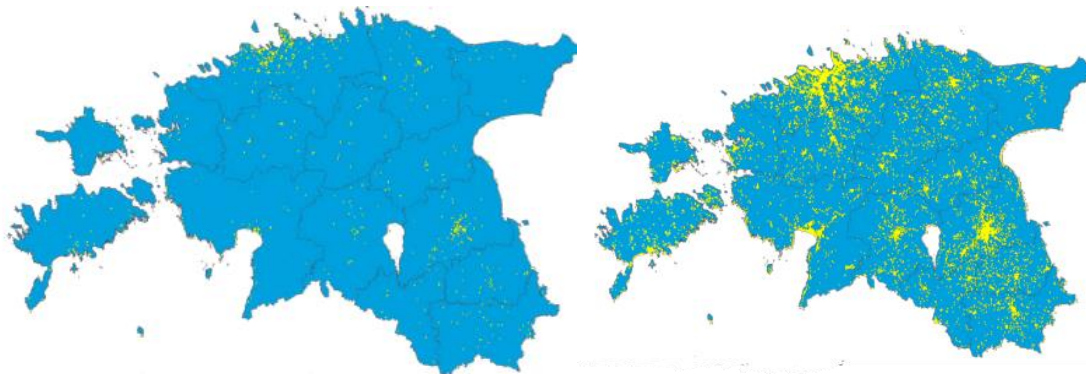
Elektrivõrk koosneb põhi- ja jaotusvõrgust. Eesti põhivõrk [5] vastutab 110 ja 330 kV võrgu ehk kõrgepingevõrgu eest. Eesti põhivõrk kuulub ettevõttele Elering AS. Põhivõrk koosneb 5 400 km-st elektriliinidest ja umbes 150-st piirkonnaalajaamast. Kõrgepingevõrgu eesmärgiks on elektrienergia ülekanne tarbijate lähedusse. Eesti jaotusvõrku [3] haldavad erinevad jaotusvõrguettevõtted, millest suurimaks on Elektrilevi OÜ. Elektrilevi OÜ katab oma kesk- ja madalpingevõrguga 95% Eesti elektrivõrgust, mis koosneb 63 000 km ulatuses elektriliinidest ning 25 300-st alajaamast. Jaotusvõrk koosneb järgmistest pingeklassidest: 0,4 kV, 6 kV, 10 kV, 15 kV, 20 kV ja 35 kV. Jaotusvõrgu ülesandeks on transportida elektrienergia põhivõrgu liitumispunktidest lõpptarbijateni. Joonisel 2.2 on sinise värviga kujutatud Elektrilevi OÜ vastutusalad.



Joonis 2.2 Jaotusvõrgu asend elektrisüsteemis [3]

2.2 Tootmisüksused

Viimastel aastatel on järsult kasvanud elektritarbijate huvi tootmisüksuste paigaldamise vastu. Tootmisüksused paigaldatakse, kas omatarbeks ja/või elektrienergia võrku müümiseks. Suured elektrijaamad rajavad üldiselt tootmisüksusi, et toodetud elektrienergia müüa võrku. Vastavalt allikale [3] oli 2016. aastal Elektrilevi OÜ võrguga ühendatud hajatootmisseadmeid suurusjärgus 35 MW. 2024. aasta märtsi lõpuks on tootmisüksuseid kokku 793 MW, mis on umbes 23-kordne kasv. Hajatootmise korral ei paikne tootmisüksused järjest üksteise kõrval (vaata joonis 2.3 paremat joonist) ning koormus ei ole jaotatud võrdselt üle terve elektrivõrgu. Pikkade vahemaade tõttu esineb võrgus kadusid, mistõttu hajatootmine vähendab elektrivõrgu koormust. Selline tootmine vähendab elektrivõrgu ülekande- ja jaotuskadusid, sest elektrienergia toodetakse tarbija läheduses. Samuti tagab parema varustuskindluse hajapiirkonna tarbijale.

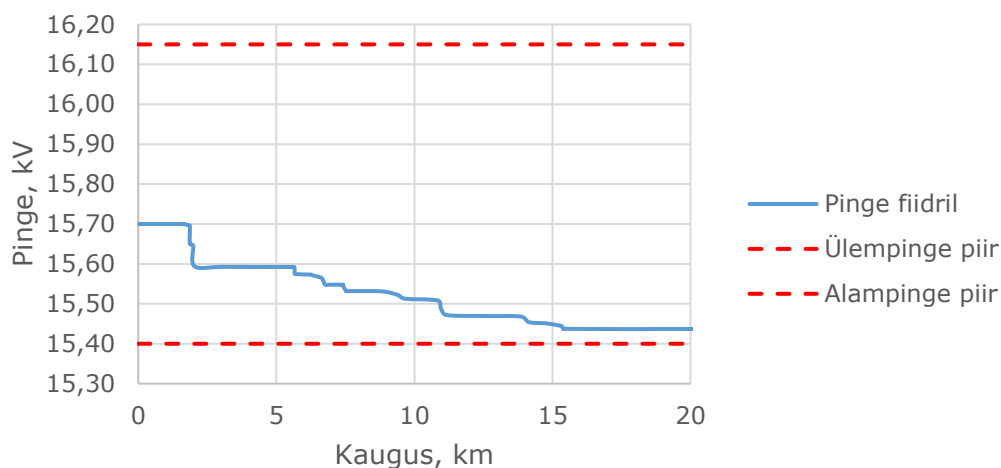


Joonis 2.3 Hajatootmisseedmete paiknemine jaotusvõrgus aastal 2018 (vasakul) ja aastal 2022 (paremal) [3]

Hajaenergeetika üksuste, näiteks salvestustehnoloogia, päikese- ja tuuleenergia, lisandumine elektrivõrku, muudab elektrivõrgu algset struktuuri nii praegu kui ka tulevikus. Traditsiooniliselt on elektrivõrgu ülesehitus olnud tarbimissuunaline ehk tootmine on olnud suuremahulistes elektrijaamades, mis asuvad tarbijatest kaugel. Elektrienergiat transporditi seejärel kõrge- ja keskpingeliinide kaudu tarbijatele lähemale ning sealt edasi madalpinge liinide kaudu tarbijateni.

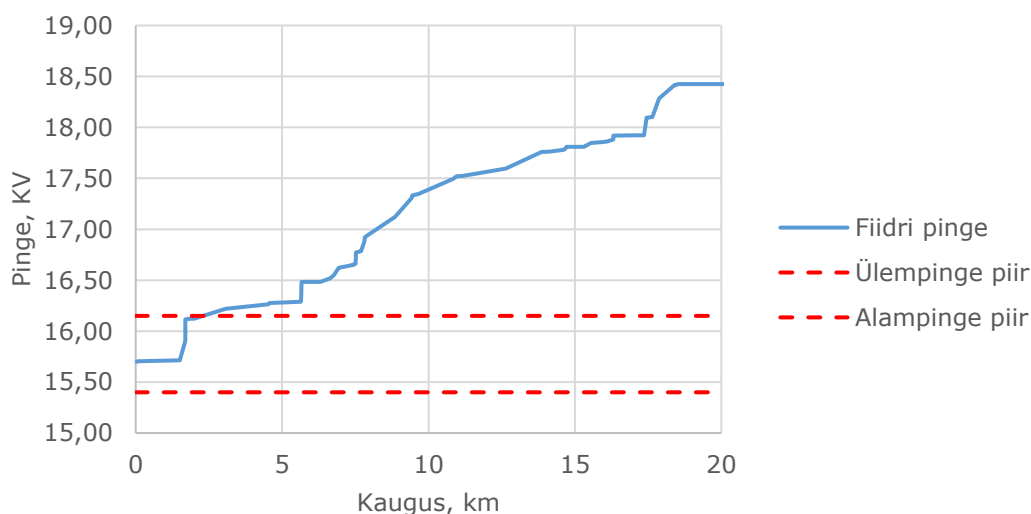
Tänapäeval toodetakse teatud hulk elektrienergiat nii kodumajapidamiste kui ka tööstuste poolt, mis mõjutab oluliselt elektrivõrgu koormust. Kui varasemalt oli võimsusvoog ühesuunaline ehk elektrivõrgust tarbijani, siis hajatootmise korral on võimsusvoog kahesuunaline ehk tootmisüksusest elektrivõrku või tootmisüksusest tarbimiskohta. Kui liitumispunkti taha ühendatud hajatootmisüksus ei suuda katta ära kohalikku elektritarbimist, siis vajalik elektrienergia saadakse elektrivõrgust. Ületootmise olukorras edastatakse toodetud elektrienergia võrku.

Tootmisüksused tõstavad pinget elektrivõrgus. Juhul, kui tootmisüksus asub piirkonnaalajaama fiidri lõpus, siis seal on ka kõrgem pinge võrreldes olukorraga, kus tootmisüksus puudub. Fiider ehk toiteliin on alajaamast väljuv elektriliin koos sellega seotud taristuga. Sellise kõrgema pinge optimeerimiseks on võimalik alandada pinget fiidri alguses, arvestades teiste fiidrite konfiguratsiooniga. Sellise juhtumi tagajärjel võib tekkida olukord, kus ühe toiteliini lõpus on pinged liiga kõrged ja teise toiteliini lõpus hoopis liiga madalad. Joonis 2.4 illustreerib alajaama väljuva fiidri pinget olukorras, kus tootmisüksused ei tooda. Jooniselt on näha, et pinge on lubatud piirides terve fiidri ulatuses. Samuti on märgata, et toiteliinil ei toimu järsk pingelang, vaid pinge langeb järk-järgult fiidri ulatuses.



Joonis 2.4 Alajaama väljuva toiteliini pinge (tootmisüksustega) öösel

Joonisel 2.5 on graafiliselt kujutatud piirkonnaalajaama väljuva toiteliini pinget päikesepaistelisel ilmal kogu fiidri ulatuses. Jooniselt on näha, et hajatootmine mõjutab märkismisväärselt toiteliini pingetaset. Samuti on märgata, et sellel toiteliinil on pinge lubatud piirides vaid fiidri alguses. Pinge muutused on tingitud elektrisüsteemi läbivatest muutuvatest aktiiv- ja reaktiivvõimsustest. Kui näiteks toota päikeseenergiast elektrienergiat, siis elektrienergia tootmine sõltub päikesekiirguse intensiivsusest, mis varieerub päeva ja aastaegade lõikes. Selle tõttu on päikesekiirgus igal ajahetkel erinev, mis toob kaasa koormuse kõikumisi ja see omakorda põhjustab pingekõikumisi. Samuti vähendab hajatootmine traditsiooniliste pinge reguleerimismeetodite efektiivsust, sest pinged on väga muutlikud üle terve fiidri. Sellised muutused elektrivõrgus nõuavad tootmisüksuse pidevat jälgimist ja kiiret reageerimist, et tagada lubatud piiride vaheline pinge.



Joonis 2.5 Alajaama väljuva toiteliini pinge (tootmisüksustega) päikesepaistelisel ilmal

2.3 Tootmisüksuste reaktiivvõimsuse juhtimisrežiimid

Reaktiivvõimsus tekitab elektromagnetvälja, mis on vajalik mitmete elektriseadmete tööks, näiteks trafode, mootorite ja generaatorite jaoks. Selle tõttu on mingil määral vaja edastada elektrivõrgus reaktiivvõimsust. Reaktiivenergia suurendab energiakadusid ja pingelangu, mille tõttu toodetakse see jaotusvõrgus vahetult reaktiivvõimsuse tarbija läheduses. [1]

Allika [6] järgi on esile toodud aktiiv- ja reaktiivvõimsuse olulisus elektrivõrgus järgmiselt:

- Kui süsteemis toodetakse rohkem aktiivvõimsust, kui on vajalik, siis süsteemi sagedus tõuseb. Olukorras, kus süsteemis tarbitakse rohkem aktiivvõimsust, kui on vaja, sagedus langeb;
- Kui võrguosas toodetakse reaktiivvõimsust (mahtuvuslik), siis pinge tõuseb. Olukorras, kus võrguosas tarbitakse rohkem reaktiivvõimsust kui toodetakse (induktiivne), pinge langeb.

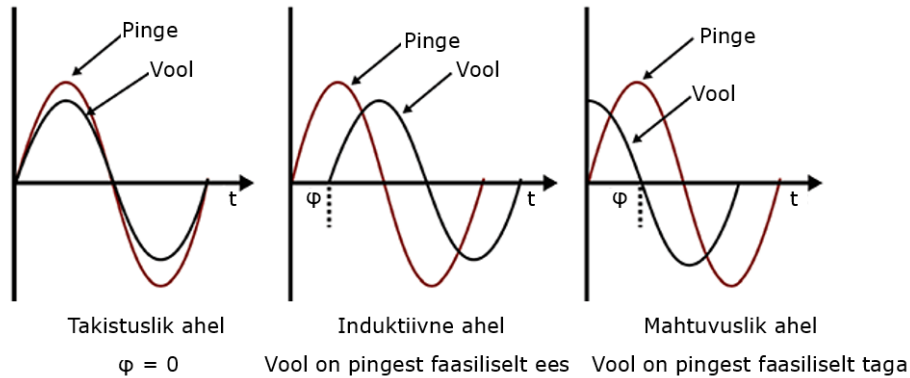
Selleks, et juhtida pinget liitumispunkti juures on tootmisüksustel juhtimisrežiimid. Liitumispunktiks on võrdluspunkt elektrisüsteemis, kuhu on ühendatud kasutaja elektripaigaldis, allikas [7]. Reaktiivenergiat juhitakse, et tagada elektritarvititele tavapäraseks tööks lubatud nimipinget. Toitepinge peab kõigil tarbijatel olema võimalikult nimipinge lähedane [1]. Kui nimipinge ületab pikaajaliselt lubatud piire, siis põhjustab see seadmete riknemist või seadme väljavahetamist. Vastavalt standardile EVS-EN 50549-1 [7] on tootmisüksustel järgnevad juhtimisrežiimid:

- $\cos \varphi$ sätteväärtuse režiim;
- $\cos \varphi (P)$;
- Q sätteväärtuse režiim;
- $Q(P)$;
- $Q(U)$.

Lisaks on standardis EVS-EN 50549-1 [7] toodud välja, et tehases tulnud tootmisüksus peab olema varustatud kõikide ülaltoodud režiimidega. Korruga saab kasutusel olla ainult üks juhtimisrežiim, mille määrab võrguettevõtte. Režiim valitakse vastavalt võrgu vajadusele, mistõttu ei ole tootmismoodulil kasutusel üks kindel režiim oma kasutusaja vältel.

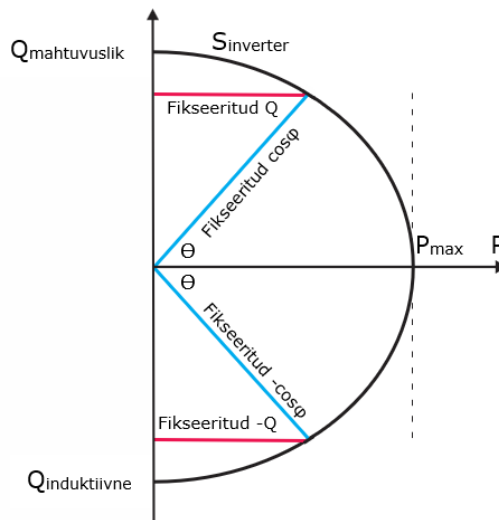
Tootmisüksuste reaktiivvõimsuse juhtimisrežiimid reguleerivad pinget võimsusteguri abil, mis on näidatud joonisel 2.6. Takistusliku ahela puhul on võimsusteguriks üks ehk

inverter ei tooda ega tarbi reaktiivenergiat. Pinge alandamiseks toodetakse reaktiivenergiat ehk tekitatakse mahtuvuslik ahel. Kui on vaja pinget tõsta, siis tarbitakse reaktiivenergiat tekitades induktiivse ahela.



Joonis 2.6 Pinge ja voolu sõltuvus võimsustegurist [8]

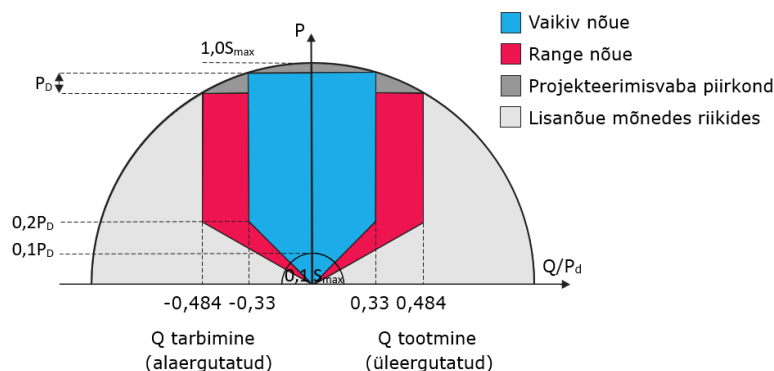
$\cos \varphi$ sätteväärtuse režiimil on inverteril, kas konstantne mahtuvuslik või induktiivne võimsustegur. Inverter ei tooda ega tarbi reaktiivenergiat kui võimsusteguri väärtuseks on üks. Vastupidises olukorras (võimsustegur on alla ühe) ja olenevalt sihtväärtusest inverter toodab või tarbib reaktiivenergiat. Inverteri reaktiivvõimsus $\cos \varphi$ sätteväärtuse režiimil on kujutatud sinise joonega joonisel 2.7. $\cos \varphi$ (P) juhtimisrežiimil muutub võimsustegur vastavalt aktiivvõimsuse tootmisele.



Joonis 2.7 Fotogalvaanilise inverteri reaktiivvõimsuse võime kõver [9]

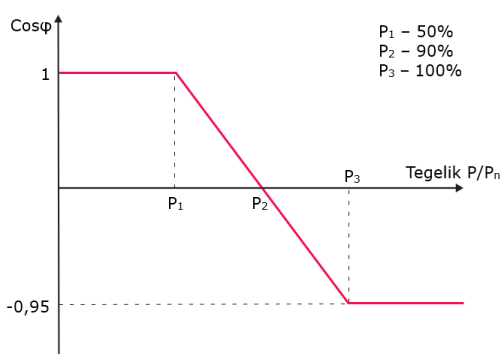
Q sätteväärtuserežiim töötab konstantse reaktiivvõimsusega, mis muutub vastavalt hetkväljundvõimsusele. Näiteks öösel kui päike ei paista puudub päikesepaneelide inverteritel toodetav aktiiv- ja reaktiivvõimsus. Tootmisüksuse reaktiivvõimsuse väljund on määratud võrguettevõtte poolt. Joonisel 2.8 on illustreeritud reaktiivvõimsuse

reguleerimise ulatus, mis sõltub aktiivvõimsusest nimipingel. Võimsustegur muutub automaatselt vastavalt toodetud aktiivvõimsusele - selle kaudu saavutatakse soovitud reaktiivvõimsuse väärtus. Inverteri reaktiivvõimsus Q sätteväärtuse režiimil on kujutatud punase joonega joonisel 2.7.



Joonis 2.8 Reaktiivvõimsuse võime nimipingel [7]

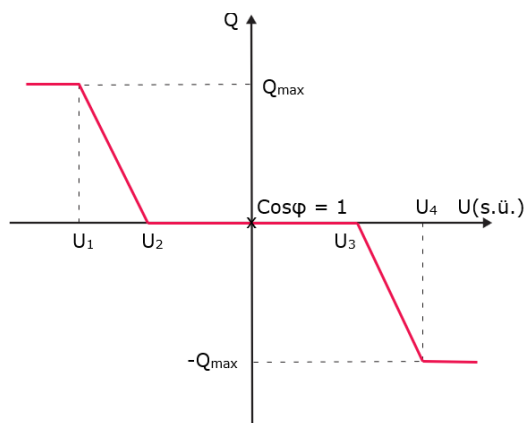
$Q(P)$ režiimil reguleeritakse reaktiivvõimsust sõltuvalt aktiivvõimsuse väljundist. Jooniselt 2.9 on näha, et kui inverteri aktiivvõimsus on 50% selle maksimaalsest võimsusest on võimsusteguriks maksimaalselt üks. Olukorras, kus aktiivvõimsus on alla väärtuse P_1 , siis inverter ei tooda ega tarbi reaktiivvõimsust. Kui aktiivvõimsus on vahemikus $P_1 - P_2$ toodab inverter mahtvuslikku reaktiivvõimsust, mis on kasulik pingehoidmisel kindla väärtuse juures. Reaktiivvõimsuse genereerimine on suurem punktis P_1 , kui punktis P_2 . Aktiivvõimsuse paiknemine vahemikus $P_2 - P_3$ tähendab, et võimsustegur on vastupidise märgiga kui vahemikus $P_1 - P_2$ ehk inverter tarbib induktiivset reaktiivvõimsust. Praktikas on maksimaalseks nii-öelda negatiivseks võimsusteguriks -0.95 .



Joonis 2.9 $Q(P)$ juhtimisrežiim [9]

$Q(U)$ juhtimisrežiimi puhul toimub reaktiivvõimsuse reguleerimine sõltuvalt liitumispunkti pingest ja see on näidatud joonisel 2.10. Igale pinge väärtusele määratakse sellele vastav reaktiivvõimsuse väärtus. Q_{max} on maksimaalne reaktiivvõimsuse kogus, mida tootmisüksus saab, kas toota või tarbida. Süsteem

hakkab tarbima reaktiivvõimsust, kui pinge on suurem väärtusest U_3 . Süsteem toodab reaktiivvõimsust kui pinge on alla U_2 väärtuse.



Joonis 2.10 Tüüpilise $Q(U)$ juhtimise skeem [9]

Vastavalt elektrisüsteemi toimimise võrgueeskirjale [10] jagunevad tootmisüksused järgmistesse kategooriatesse:

- A-tüüpi;
 - Liitumispunkti pinge < 110 kV;
 - Maksimaalne tootmisvõimsus < 0,5 MW.
- B-tüüpi;
 - Liitumispunkti pinge < 110 kV;
 - $0,5 \text{ MW} \leq$ maksimaalne tootmisvõimsus < 5 MW.
- C-tüüpi ;
 - Liitumispunkti pinge < 110 kV;
 - $5 \text{ MW} \leq$ maksimaalne tootmisvõimsus < 15 MW.
- D-tüüpi;
 - Liitumispunkti pinge $\geq 110 \text{ kV}$ või tootmisvõimsus $\geq 15 \text{ MW}$.

Eestis on tootmisüksuste liitumispunktides vaikimisi võimsusteguri väärtuseks üks. Sõltuvalt võrgu tingimustest ja vajadusest valitakse üks järgmistest juhtimisrežiimidest jaotusvõrgus: $\cos \varphi$ sätteväärtuse režiim, Q sätteväärtuse režiim, $\cos \varphi$ (P) juhtimisrežiim või $Q(U)$ juhtimisrežiim. A- ja B-tüüpi tootmisüksused liituvad enamasti jaotusvõrguga. Suurtarbijatel, näiteks suurtööstustel, tuleb kooskõlastada liitumine ka põhivõrguga sõltumata tootmisüksuse tüübist. C- ja D-tüüpi tootmisüksustel on võimalus valida, kas liituda põhi- või jaotusvõrguga.

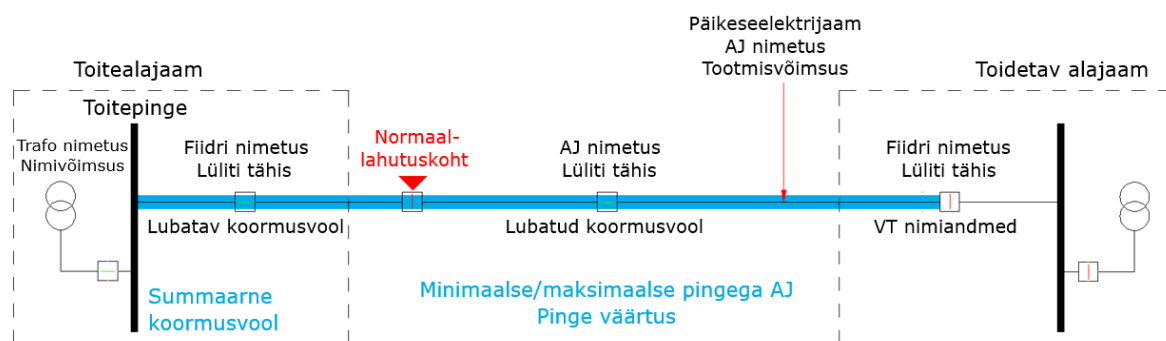
Jaotusvõrgus juhitakse stootmisüksuseid alates B-tüübist ehk A-tüüpi tootmisüksuseid võrguteenusejuhtija ei juhi. Kuna A-tüüpi tootmisüksuseid on palju võrgus, siis see muudab iga üksuse juhtimise keeruliseks ja ressursimahukaks. Üksused on iseloomult

väikese võimsusega, kuid nende kõigi summaarne mõju on suurem võrgule, kui B-, C- ja D-tootmisüksuste puhul. Kuigi kõik tootmisüksused on varustatud juhtimisrežiimidega, puudub A-tüüpi tootmisüksustel vajalik juhtimissüsteem. A-tüüpi tootmisüksuste varustamine juhtimisrežiimidega kaasneb märkimisväärse kulu tootmisüksuse omanikule.

Vastavalt allikale [11] on alates 2024. aastast liitunud A-tootmisüksustel vaikumisi $Q(U)$ juhtimisrežiim (vt joonis 2.10). Suuremate läbilaskevõimete puhul kehtib nõue $Q = 0$ (ehk $\cos \varphi = 1$). Juhtimisrežiimid on integreeritud inverteritesse ehk juhtimisprotsess toimub automaatselt, ilma võrguteenusejuhtijata. Joonisel 2.10 on näidatud, et kõrge pinge puhul toodetakse võrguosas rohkem reaktiivvõimsust kui on vaja ehk on vaja reaktiivenergiat tarbida. Madala pinge puhul on vaja reaktiivvõimsust toota, sest võrguosas tarbitakse rohkem reaktiivvõimsust kui toodetakse.

2.4 Avariitoiteskeem

Avariitoiteskeemiks on elektriskeem, mille eesmärk on näidata piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite optimaalseimat toitevõimalust läbi teiste piirkonnaalajaamade toiteliinide. Eelnevalt mainitud toiteliinideks on keskpingeliinid, mille tõttu avariitoiteskeemid teostatakse samuti keskpingel. Skeemil on kujutatud kõik koormus piiravad seadmed koos nende vajalike andmetega. Nendeks seadmeteks on releekaitse (RK) poolt lubatud voolude väärtused ja voolutrafode (VT) nimiandmed ning koormust piirav väärtus valitakse sõltuvalt väiksemast väärtusest. Avariitoiteskeemi lugemisjuhisis on kujutatud joonisel 2.11, kus on sinise värviga tõstetud esile ühe piirkonnaalajaama väljuva fiidri reservtoidet. Ühe konkreetse võrguelemendi kohta esitatud andmed kehtivad kõigile võrgus olevatele sarnase funktsiooniga elementidele.



Joonis 2.11 Avariitoiteskeemi lugemisjuhisis

Kui varasemalt keskenduti avariitoiteskeemide koostamisel üldiselt ühetrafolestele toitealajaamadele, siis on tänapäeval olulisel kohal ka kahe trafoga toitealajaamad. See tuleneb vajadusest lülitada välja teatud tööde jaoks üks 110 kV sektsioon või trafo. Samuti on takistuseks piirkonnaalajaamad, kus on kahe erineva võimsusega trafod ning olukord, kus üks trafodest töötab piirilähedase koormusega. Samuti on see tingitud ka hajatootmisallikate lisandumisest, sest need töötavad muutliku võimsusega ja avaldavad märkimisväärset mõju võrgu pingele.

Avariitoiteskeemi teostati alguses tuginedes vaid tarbimisandmetele. Tänapäeval on elektrivõrgus palju tootmisüksusi, mille tõttu on arvutuste maht ja keerukus suurenenud. Täpsema ülevaate jaoks teostatakse arvutused nii tarbimise kohta kui ka juhul, kus tootmisüksused toodavad elektrienergiat. Kuigi Elektrilevi OÜ-l on andmed maksimaalse tootmisvõimsuse kohta, ei ole hetkelise tootmisvõimsuse info tihti kättesaadav. Vaadeldava piirkonnaalajaama avariitoiteskeem on vajalik materjal võrguteenusejuhtijatele, mis võimaldab kiiremini likvideerida piirkonnaalajaama või fiidrite rikkeid. Avarii- või plaaniliste tööde käigus teevad võrguteenusejuhtijad vajalike ümberlülitamisi elektrivõrgus antud avariitoiteskeemi järgi.

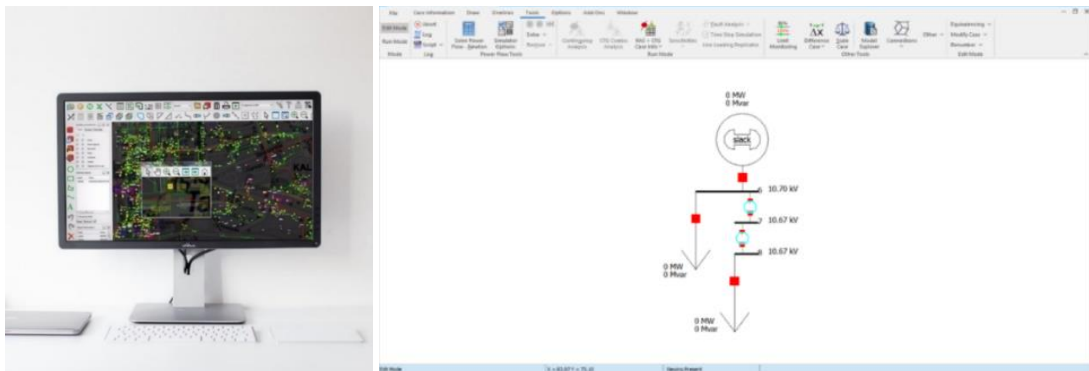
2.5 Elektrivõrgu juhtimissüsteemid

Trimble NIS on Elektrilevi OÜ-s kasutusel võimsusvoogude arvutamisel. *PowerWorld Simulator* tarkvara on kasutatud samuti võimsusvoogude arvutamisel, aga tarkvaras rakendatakse P(Q) juhtimisrežiimi. Schneider Electricu EcoStruxure™ ADMS kasutatakse lõputöös avariitoiteskeemi koostamisel ja lähteandmete kogumiseks.

Trimble NIS (NIS) [12] on tarkvaralahendus, mida kasutatakse jaotusvõrgu planeerimiseks, ehitamiseks, käitamiseks ja hooldamiseks kogu võrgu elukaare jooksul. Tarkvaralahendusse on kujutatud kogu Eesti jaotusvõrk, seda nii geograafilise kui ka ühejooneskeemina. Aja jooksul on sisestatud tarkvarasse kõigi võrguelementide kohta vajalikud elektrilised ja tehnilised parameetrid ning kõik hooldustegevused. NIS süsteemis on võimalik teostada uute liitumistega seoses arvutusi ja samuti on võimalik planeerida hooldustegevusi. Joonisel 2.12 on näidatud Trimble NIS-i ekraanipilti.

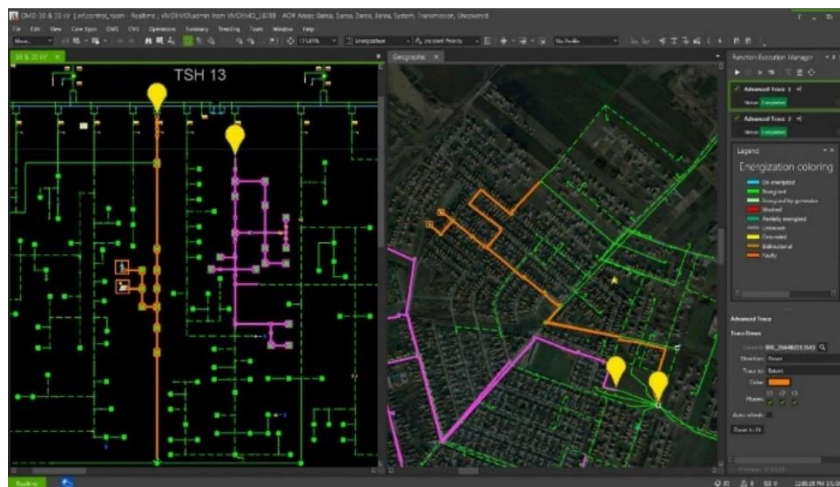
PowerWorld Simulator (PWS) [13] on interaktiivne elektrisüsteemi simuleerimise tarkvara. Seda kasutatakse elektrivõrgu erinevate režiimide simuleerimiseks mitmest minutist kuni mitme päevani. Tarkvara lahendab mudeleid kuni 250 000 sõlmega, aga

tarkvara tudengiversioonis on maksimaalseks sõlmede arvuks kolmteist. Joonisel 2.12 saab näha ka *PowerWorld Simulatori* ekraanipilti.



Joonis 2.12 Trimble NIS-i [12] (vasakul) ja *PowerWorld Simulatori* (paremal) ekraanipildid

Jaotusvõrkudes kasutatakse *Schneider Electric EcoStruxure™ ADMS-i* [14], et jälgida elektrivõrku reaalajas, mille kaudu saab omakorda operatiivoleku võrgust. Samuti saab tarkvaralahenduse kaudu elektrivõrku näiteks juhtida, analüüsida ja optimeerida, simuleerida topoloogiat ning arvutusi. Lisaks on ADMS-il olemas topoloogia, mis põhineb võrgumudelil ehk võrguparameetritel. Joonisel 2.13 on näidatud ADMS-i ekraanipilti.



Joonis 2.13 *Schneider Electric ADMS* ekraanipilt [14]

3. ELEKTRIVÕRGU MODELLEERIMINE

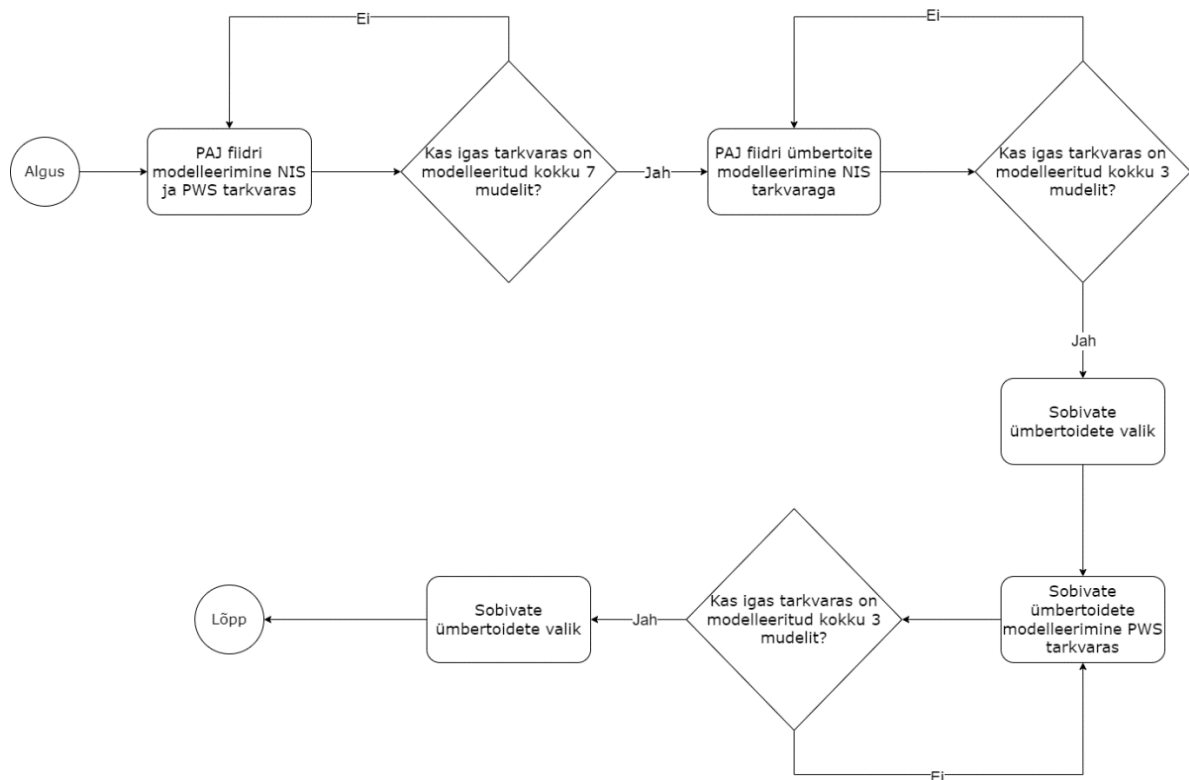
Elektrivõrgu modelleerimise peatükis tutvustatakse uurimismeetodit, kus kirjeldatakse nii modelleerimisprotsessi kui ka töö käiku. Peatükis tuuakse välja kahe tarkvara (NIS ja PWS) kasutatavad arvutusmeetodid. Samuti kirjeldatakse arvutusmeetodite põhimõtet ning tuuakse välja jaotusvõrkude eripära koos selle lihtsustustega. Peatükis antakse ülevaade ka modelleerimise parameetritest ehk elektriliinidest, trafodest, koormustest ja nende valikust.

3.1 Uurimismeetod

Töö tulemusteni jõutakse alustades lähteinformatsiooni kogumisest ja selle alusel koostatakse avariitoiteskeem. Avariitoiteskeemil on kujutatud ADMS-st saadud antud piirkonna normaalskeemi ja skeemi osi, mis teoreetilised võimaldavad suunata piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite toite üle teistele naabruses olevatele piirkonnaalajaamadele. Sellele järgneb optimaalseima reservtoite leidmine kõikidele toitealajaama väljuvatele toiteliinidele. Avariiskeemi koostamisel kasutatakse CAD tarkvara *CADMATIC DRAW*. Samuti lisatakse avariitoiteskeemile piiravate objektide ja tootmisüksuste andmed, mis saadakse Elektrilevi OÜ andmebaasidest. NIS ja PWS tarkvara abil modelleeritakse järgnevad olukorrad:

- olukord 1: minimaalne tarbimine ja maksimaalne tootmine;
- olukord 2: maksimaalne tarbimine ja minimaalne tootmine.

Töö modelleerimise protsess on näidatud joonisel 3.1. NIS ja PWS tarkvaradega modelleeritakse kõik toitealajaama väljuvate fiidrid koos koormustega nii tootmisüksusteta kui ka tootmisüksustega. NIS tarkvara abil modelleeritakse kõik teoreetiliselt võimalikud ümbertoited ning valitakse kõige optimaalsem ümbertoide kõikide fiidrite jaoks. PWS tarkvaraga modelleeritakse ainult optimaalseimad ümbertoited. Samuti modelleeritakse vastavalt vajadusele ka tootmisüksustele P(Q) juhtimisrežiim. Selle käigus analüüsitakse, kuidas juhtimisrežiimide rakendamine mõjutab pingeid ning alandab kõrgeid pingeid. Viimasena võrreldakse kahe tarkvara tulemusi ning tehakse järeldused.



Joonis 3.1 Töö modelleerimise protsess PWS ja NIS tarkvarades

3.2 Arvutusmeetodid

Allika [15] järgi kasutab Trimble NIS järgmisi meetodeid: Newton-Raphsoni, Gauss-Seideli ja radiaalvõrgu meetodit. NIS tarkvara puhul võib kasutada kõiki arvutusmeetodeid radiaalvõrgu jaoks, aga silmusvõrgu arvutusel on kasutusel, kas Gauss-Seideli või Newton-Raphsoni meetod. *PowerWorld Simulator* kasutab järgmisi meetodeid: (algebraalistel suurustel põhinev) Newton-Raphson, (trigonomeetrilistel suurustel põhinev) Newton-Raphson, Gauss-Seidel, lõhestatud, DC mudel ja ROBUST meetodit. Vaikimisi on kasutusel (algebraalistel suurustel põhinev) Newton-Raphsoni meetod [16].

Allika [17] järgi saadakse Newton-Raphsoni meetodiga mittelineaarsest võrrandisüsteemist lineaarne võrrandisüsteem arendades Taylori rida. Iteratiivsed tulemused on kiired kui algväärtus on lähedal lahendusele ja sama kehtib vastupidi. Meetod on kasutusel suuremahulistel elektrisüsteemidel. Newton-Raphsoni algebraalistel suurustel põhinevas variandis on kasutusel kompleksarvude algebraalne kuju ja Newton-Raphsoni trigonomeetrilistel suurustel põhinevas variandis on kasutusel kompleksarvud trigonomeetrilisel kujul. Newton-Raphsoni eelised on järgmised [18]:

- Väga kiire koonduvus;
- Võrgu mõõtmetest sõltumatu koonduvuskiirus;
- Suhteliselt väike mälu mahu vajadus;
- Kiirem lahenduskiirus kui Gauss-Seideli meetodil
- Hea ühilduvus optimeerimisarvutustega;
- Võimalik arvestada negatiivsete järjestikjuhtivustega.

Gauss-Seideli meetodil antakse pingele väärtusele esialgne hinnang, et saada konkreetse muutuja arvutatud väärtus, allikas [17]. Iga sõlmepinge väärtus viiakse vastavusse eelmise iteratsiooni käigus saadud pingele väärtusega. Protsess kordub kuni kõik pinged jäävad etteantud täpsuspiiri. Gauss-Seideli eelised on järgmised:

- Väike mälu mahu vajadus;
- Väikese arvutuse maht ühel iteratsioonil;
- Koonduvus- ja lahendikiirus ei sõltu pingele algväärtusest;
- Lihtne algoritm;
- Võimalik jälgida mittekondumise põhjuseid ja probleemseid võrguosi. [16]

Lõhestatud meetod on lihtsustatud versioon Newton-Raphsoni meetodist. Selle meetodi puhul lahendatakse aktiiv- ja reaktiivvõimsused eraldi ning jakobiaani maatriksi elemendid saadakse sõlmjuhtivusmaatriksist, allikas [17]. Jakobiaani maatriksi lihtsustamiseks kasutatakse algväärtusi, sest lõhestatud meetod nõuab rohkem iteratsiooni kui Newton-Raphsoni meetod.

Radiaalsete jaotusvõrkude püsitalitluse arvutustel on ilma modifikatsioonideta Newton-Raphsoni või Gaussi-Seideli meetodid ebaefektiivsed. Eelnevaid meetodeid kasutatakse näiteks optimaalseima lahutuspunkti leidmiseks. Newton-Raphsoni ja Gauss-Seideli meetodi asemel on kasutusel lihtne kahekäiguline iteratsiooniprotsess ehk radiaalvõrgu meetod. Alustades arvutust fiidri lõpust leitakse võimsuskao ja -võid. Alustades arvutust toitealaajaama lattidest arvutatakse pinged sõlmedes. Toitealaajaama lattidel loetakse pingele teadaolevaks. [19]

Jaotusvõrgus on üldiselt hargnevad radiaalvõrgud või avatuna talitlevad silmusvõrgud. Jaotusvõrgus on suures koguses võrguelemente ja tihtipeale on informatsioon nende kohta ebatäpne või puudulik. Selle tõttu puudub vajadus täpseteks arvutusteks ja jaotusvõrgu arvutamisel on kasutusel järgnevad lihtsustused [20]:

- liinide ja trafode põikjuhtivustega ei arvestata;
- pingelangu ristikomponenti ei arvestata;
- pinged sõlmedes arvutatakse pingekao järgi;

- võimsus- ning pingekaod arvutatakse nimipinge järgi;
- harude võimsusvoogude arvutamisel ei arvestata võimsuskadudega;
- kaabelliini puhul ei arvestata induktiivtakistustega;
- ei ole vajalik arvutada kõikide sõlmede pinged, oluline on kontrollida ainult ekstreemsete ning tähtsamate sõlmede pinged.

Nimipinge asemel võib pinge algühendina kasutada mõne varasema seisundi arvutustulemust. Arvutus koondub tavaliselt kahe kuni viie iteratsiooniga. Lisaks ei saa sõlmede koormuseid täpselt määrata, sest koormused on juhusliku iseloomuga. Püsiseisundi arvutuste koormustel teostatakse tehniliste kitsenduste täiendav kontroll. Need koormused peavad jääma alla prognoosi usaldusintervallide ülempiiride ning vajadusel ka alla alampinge piiride. Kadude arvutusel on kasutusel keskväärtused. [19]

3.3 Elektriliinid

Joonisel 3.1 on kujutatud õhu- ja kaabelliini aseskeemid. Antud lõputöös on tegemist lühikeste keskpingeliinidega, mille tõttu piisab koondparameetritega aseskeemidest. PWS tarkvara tudengiversioon võimaldab modelleerida maksimaalselt 13 sõlme. Selle tõttu on antud lõputöös modelleeritud liinid, millel on suurim takistus ehk väiksem läbilaskevõime.



Joonis 3.2 Õhuliini ja kaabelliini koondparameetritega aseskeemid [20]

Aktiivjuhtivustega arvestatakse alates 330 kV võrgust, sest need on seotud koroonakadudega, mistõttu ei pea lõputöös nendega arvestama. Mahtuvusjuhtivustega ei arvestata, kui õhuliin on pingega $U_n \leq 35 \text{ kV}$, sest madalamatel pingetel on selle osatähtsus tunduvalt väiksem. Kaabelliinide puhul ei ole vajalik arvestada induktiivtakistustega, kui kehtib tingimus $U_n \leq 10 \text{ kV}$, sest sellistel pingetel on faasidevahelised kaugused väiksemad võrreldes õhuliinidega. Samuti ei arvestata kaabelliinidel aktiivjuhtivust, sest see on osaliselt tingitud õhu ionisatsioonist juhtme pinnal, mis puudub kaabelliinil. [20]

Vastavalt allikale [20] arvutatakse vajalikud parameetrid järgmiselt:

Liini induktiivtakistus arvutatakse järgmiselt:

$$X = 0,144 \log \frac{D_k}{r_j} + 0,0157 \frac{\Omega}{\text{km}}, \quad (3.1)$$

kus D_k – faasidevaheline keskmine geomeetriline kaugus, mm,
 r_j – faasijuhtme raadius, mm.

Liini mahtvusjuhtivus arvutatakse järgmiselt:

$$b = \frac{7,56 \cdot 10^{-6} \text{ S}}{\log \frac{D_k}{r_j} \text{ km}}, \quad (3.2)$$

Allikas [21] on antud kaablite mahtvusjuhtivus faradites kilomeetri kohta ning järgmise valemi abil teisendatakse mahtvusjuhtivus oomideks kilomeetri kohta:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}, \quad (3.3)$$

kus f – Sagedus, Hz,
 C – Mahtvusjuhtivus, Ω/km .

Analüüsitava võrgu liinide nimetused koos parameetritega on näha tabelis 3.1. Esimeses kolmes reas on kajastatud õhuliinid AS-25, AS-35 ja AS-50. Ülejäänute liinide puhul on tegemist kaabelliinidega.

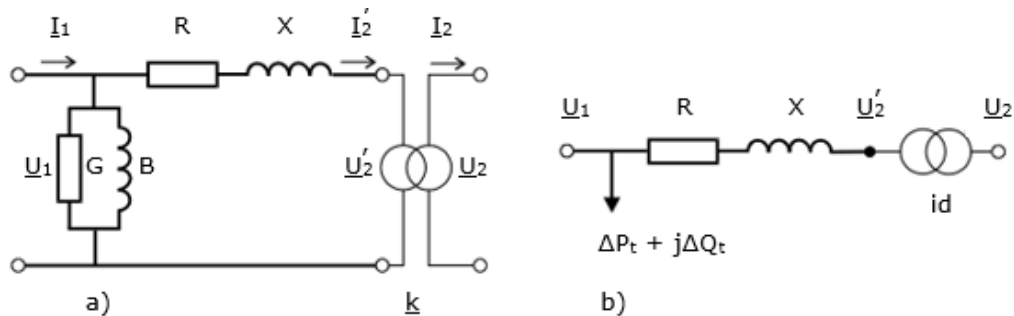
Tabel 3.1 Analüüsitava võrgu liinide parameetrid [22] [23] [21]

Liini nimetus	Aktiivjuhtivus	Induktiivtakistus	Mahtvusjuhtivus
	Ω/km	Ω/km	Ω/km
AS-25	1,3800	0,3970	-
AS-35	0,8500	0,3870	-
AS-50	0,6500	0,3750	-
AXAL-TT PRO.3x50	0,6410	-	0,0398
AHXAMK-W.3x70	0,4430	-	0,0354
AHXAMK-W.3x95	0,3200	-	0,0303
AHXAMK-W.3x120	0,2530	-	0,0289
AHXAMK-W.3x240	0,1250	-	0,0220

3.4 Trafod

Trafo aseskeem koos lihtsustatud aseskeemiga on kujutatud joonisel 3.2. Siin peatükis teostatud arvutuste näited on ainult ühe piirkonnaalajaama trafo kohta, kuid valemid on ühised kõikidel trafodel. Lõputöös on arvutused tehtud ülempinge poolel. Kui

soovitakse arvutusi teostada alampinge poolel, tuleb valemis vajalikult komponendid asendada vastavate alampinge andmetega. Trafode lähteandmed on saadud Elektrilevi OÜ sisemistest tehnilistest andmetest.



Joonis 3.3 a) trafo aseseem ja b) trafo lihtsustatud aseseem [20]

Vastavalt allikale [20] arvutatakse vajalikud trafo parameetrid järgmiselt:

Trafo aktiivtakistuse ehk trafo mähiste summaarse aktiivtakistuse (115 kV poolel) arvutamine:

$$r_{115} = \frac{\Delta P_l \cdot U_n^2}{S_n^2} = \frac{0,0472 \cdot 115^2}{6,3^2} = 15,727 \, \Omega, \quad (3.4)$$

kus ΔP_l – lühiskadu, W,
 U_n – Nimipinge ülempingel, kV,
 S_n – nimivõimsus, MVA.

Trafo reaktiivtakistuse ehk trafo primaarpoolele teisendatud puisteinduktiivsuse arvutamine:

$$x_{115} = \frac{U_{l\%} \cdot U_n^2}{S_n^2} = \frac{0,105 \cdot 115^2}{6,3^2} = 220,417 \, \Omega, \quad (3.5)$$

kus $U_{l\%}$ – Lühispinge protsentides nimipingest, %,
 U_n – Nimipinge ülempingel, kV,
 S_n – nimivõimsus, MVA.

Trafo aktiivjuhtivus ehk tühijooksukadu arvutatakse järgmiselt:

$$g_{115} = \frac{\Delta P_t}{U_n^2} = \frac{0,0125 \cdot 10^6}{115^2} = 0,945 \, S, \quad (3.6)$$

kus ΔP_t – Tühijooksukadu, kW,
 U_n – Nimipinge ülempingel, kV.

Reaktiivjuhtivus ehk trafo magneetimisreaktiivvõimsus arvutatakse järgmiselt:

$$b_{115} = \frac{I_{t\%} \cdot S_n}{100U_n^2} = \frac{0,0091 \cdot 6,3 \cdot 10^6}{100 \cdot 115^2} = 4,335 \text{ S}, \quad (3.7)$$

kus $I_{t\%}$ - Tühijooksuvõime protsentides nimivoolust,

S_n - nimivõimsus, MVA,

U_n - Nimipinge ülempingel, kV.

3.5 Koormused

Koormus on vaadeldava võrguosa tarbimise ja tootmise summa. Koormuste andmed on võetud ADMS süsteemist, mis kuvab valitud perioodi mõõtmisi. Tavaliselt koostatakse piirkonnaalajaama avariitoiteskeemid plaaniliste tööde jaoks, keskendudes kitsale ajaperioodile. Olukorras, kus vaadeldaval toiteliinil puuduvad tootmisüksused või neid on minimaalselt, valitakse koormuseks perioodi maksimaalne tarbimise väärtus. Kui piirkonnaalajaama on võimalik ümber toita tippkoormustega, siis see on võimalik ka selle perioodi minimaalsete tarbimis koormustega. Juhul kui ADMS-is puuduvad alajaama kohta vajalikud mõõtmised, tuleb pärida arvesti andmed Elektrilevi OÜ andmebaasist. Lõputöös kasutatavad koormused olukorras 1 on näidatud tabelis 3.2. Tabelis on toodud välja keskpinge (KP) ja madalpinge (MP) alajaamad, sealhulgas need, mis sisaldavad tootmisüksust. Olukorras 2 kasutatavad koormused on näidatud tabelis 3.3, kus tootmisüksused ei tooda.

Tabel 3.2 Fiidrite koormused olukorras 1

Alajaam	Fiider	Fiidri koormus	KP/MP alajaamade nimed fiidril	KP/MP alajaamade tarbimine ilma tootmiseta	
				kW	kVAr
Toidetav AJ	Fiider 1	37,2	AJ1	1,1	-3,5
	Fiider 2	128,3	PEJ1	116,7	-123,8
			AJ3	42,4	-0,5
			LP2	27,5	-
			AJ4	24,0	6,8
	Fiider 3	145,2	PEJ2	91,6	-68,3
			AJ5	53,2	-18,5
	Fiider 4	69,0	AJ4	36,7	-0,5
			PEJ3 + PEJ4 + PEJ5	0	-1,9
			PEJ6	0,4	-4,1
PEJ7			17,1	-0,4	
			PEJ8	22,6	5,2

Tabel 3.2 Fiidrite koormused olukorras 1 (jätk)

Alajaam	Fiider	Fiidri koormus	KP/MP alajaamade nimed fiidril	KP/MP alajaamade tarbimine ilma tootmiseta	
				kW	kVAr
PAJ1	Fiider 5	41,6	PEJ9	9,10	3,0
PAJ2	Fiider 7	40,7	AJ4	1,5	0,5
PAJ3	Fiider 8	275,0	AJ8	226,0	-6,2
			LP7	40,9	-33,4
			AJ7	190,2	35,0
			LP4	0	0

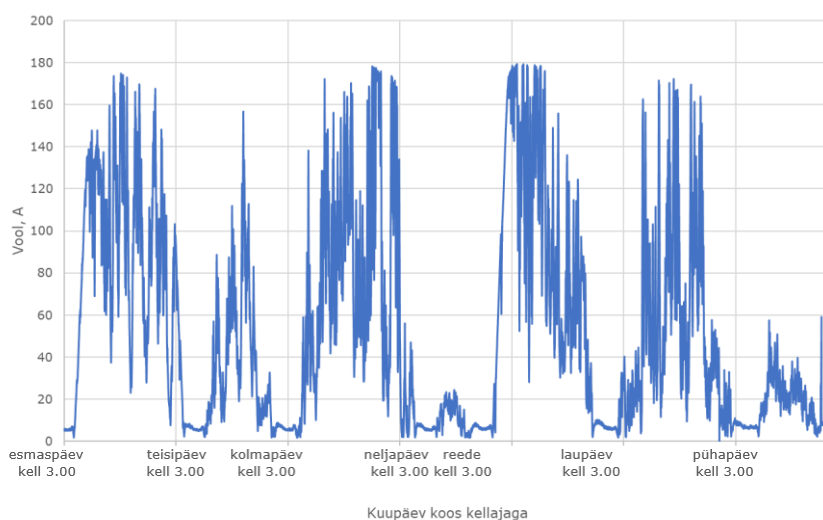
Tabel 3.3 Fiidrite koormused olukorras 2

Alajaam	Fiider	Fiidri koormus	KP/MP alajaamade nimed fiidril	KP/MP alajaamade tarbimine ilma tootmiseta	
				kW	kVAr
Toidetav AJ	Fiider 1	46,3	AJ1	38,9	7,3
	Fiider 2	145,6	PEJ1	132,5	-118,6
			AJ3	65,4	-14,7
			LP2	31,2	-18,8
			AJ4	27,3	7,9
	Fiider 3	220,0	PEJ2	137,0	-53,0
			AJ5	59,0	10,0
	Fiider 4	95,8	AJ4	92,2	-51,0
			PEJ3 + PEJ4 + PEJ5	0	0
			PEJ6	0,70	-4,0
PEJ7			16,4	5,4	
PEJ8	31,8	8,1			
PAJ1	Fiider 5	64,0	PEJ9	14,5	4,8
PAJ2	Fiider 7	46,1	AJ4	1,7	-3,7
PAJ3	Fiider 8	344,0	AJ8	335,0	-17,0
			LP7	55,5	-28,6
			AJ7	200,0	54,2
			LP4	0	0

Kui fiidril on suur hulk tootmisüksusi, siis kuvatakse suurima tootmisüksuse ajagraafik koos fiidri koormusega. Sellisel juhul keskendutakse kitsamale ajaperioodile. Valitakse ajahetk, millal tootmisüksus ei tarbi ega tooda reaktiivenergiat võrku ja selle põhjal määratakse fiidri koormus.

Joonisel 3.4 on kujutatud analüüsitava toidetava piirkonnaalajaama ühe toiteliini koormus, kus on rohkelt tootmisüksusi. Koormuse suured kõikumised peegeldavad öist ja päevast koormuse muutust, mis on tingitud päikese intensiivsuse muutusega päeval ajal. Samuti on näha, et mõnedel kindlatel päevadel on koormus ka väiksem, mis võib olla tingitud sellest, et osad tööstusettevõtted töötavad perioodide kaupa või

päikesekiirgus ei ole nii intensiivne, näiteks joonisel 3.4 neljapäeval, kui pilvisus vähendas päikese intensiivsust.



Joonis 3.4 Toidetava piirkonnaalajaama toiteliini koormus koos suuremahuliste tootmisüksustega

Tabelis 3.4 on esitatud andmed iga fiidri alajaamade tootmisüksuste kohta, sealhulgas iga fiidri maksimaalne tootmisvõimsus. Ekspert hinnangu alusel võetakse arvutustes arvesse tootmisüksuseid maksimaalse tootmisvõimsusega alates 100 kW. Alates sellest võimsusest on nende mõju pingele märgatav. Tabelist on näha, et kõige rohkem tootmisüksusi on toidetava PAJ neljandal fiidril, kus nende koguvõimsus ulatub umbes 5 MW-ni. Samuti on tootmisüksused paigutatud fiidri algusesse. See tekitab probleeme ümbertoitmisel, kuna tootmisüksus fiidri alguses mõjutab oluliselt fiidri pinget.

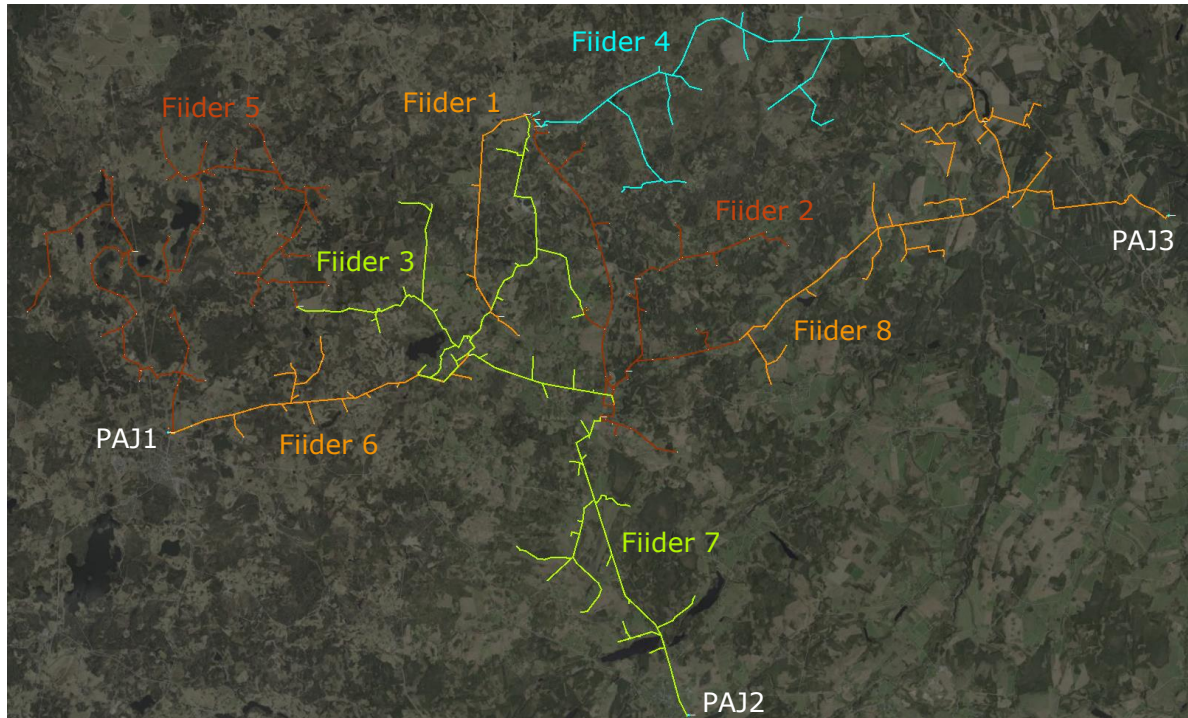
Tabel 3.4 Fiidrite tootmisüksuste andmed

Alajaam	Fiider	KP/MP alajaamad nimetused	Maksimaalne tootmisvõimsus	Maksimaalne tootmisvõimsus fiidril kokku
			kW	kW
Toidetav AJ	Fiider 1	-	-	31,50
	Fiider 2	PEJ1	837,80	1021,50
	Fiider 3	PEJ2	113,00	234,60
	Fiider 4	AJ4	781,20	4865,60
		PEJ3	737,80	
		PEJ4	477,40	
		PEJ5	1258,60	
		PEJ6	737,800	
	PEJ7	737,8		
	PEJ8	100,0		
PAJ1	Fiider 5	PEJ9	100,00	120,00
PAJ2	Fiider 7	PEJ12	473,00	541,00
PAJ3	Fiider 8	-	-	182,00

3.6 Võrgu terviklik skeem

Analüüsitava piirkonnaalajaama on võimalik toita läbi kahe erineva 110 kV toiteliini, mis saavad omakorda toite kahelt 330 kV toitepingega piirkonnaalajaamast. Edasi väljuvad piirkonnaalajaamast 10 kV toiteliinid, mille kaudu toimub elektrienergia jaotamine elektritarbijatele. Antud piirkonnaalajaama väljuvatel toiteliinidel on 6,0 MW mahus tootmisüksusi, millest 384,60 kW moodustavad A-tüüpi tootmisüksused.

Vaadeldava piirkonnaalajaama alampinge osa on võimalik üle viia teistele naabruses olevatele kolmele piirkonnaalajaamadele, mis on näidatud joonisel 3.5. Joonisel on erinevate värvidega kujutatud piirkonnaalajaamade väljuvad fiidrid. Esimeseks toitevõimaluseks on 110/10 kV PAJ1. Selle piirkonnaalajaama kaudu on võimalik viia vaadeldava piirkonnaalajaama esimene ja kolmas toiteliin viienda või kuuenda fiidri toitele. 110/10 kV PAJ2 kaudu on võimalik viia kolmas fiider reservtoitele läbi seitsmenda fiidri. 110/10 kV PAJ3 kaudu saab teist toiteliini viia reservtoitele läbi kaheksanda toiteliini. PAJ1 ja PAJ2 saavad toite kahelt 330 kV toitepingega toitealajaamast. PAJ3 talitleb pingega 35/10 kV. See saab toite 110/35 kV toitealajaamast, mis omakorda saab toite 330 kV toitealajaamast.

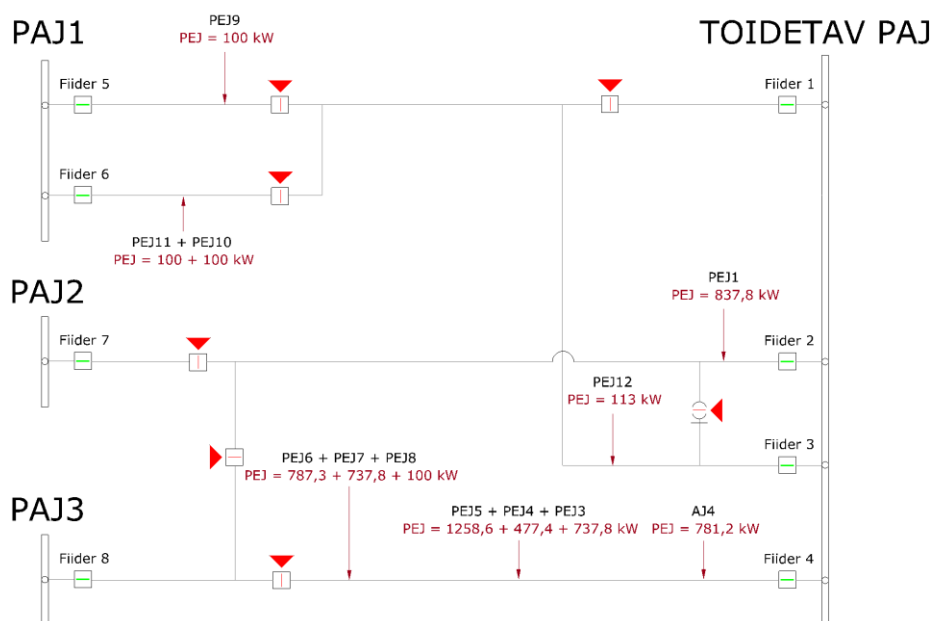


Joonis 3.5 Vaadeldava võrgu ülevaade

4.TULEMUSTE ANALÜÜS

Peatükis võrreldakse nii PWS ja NIS tarkvara kui ka nende tulemusi. PWS võimaldab kasutada P(Q) juhtimisrežiimi, mis on kajastatud alapeatükis 4.5. Lisaks antakse ülevaade ka optimaalsetest avariitoiteskeemidest. Tarkvaras PWS modelleeritud tulemused on kajastatud selles peatükis joonistena. PWS mudelid on näidatud lisas 1 ja alampeatükis 4.7 on esitatud tulemuste järeldused. Joonisel 4.1 on kujutatud vaadeldava toitealajaama piirkonna lihtsustatud skeemi. Fiidri pinget mõjutavad arvutustes järgmised tegurid:

- Tootmine, tarbimine (aktiiv- ja reaktiivvõimsus);
- Liini parameetrid;
- Trafo tehnilised parameetrid.



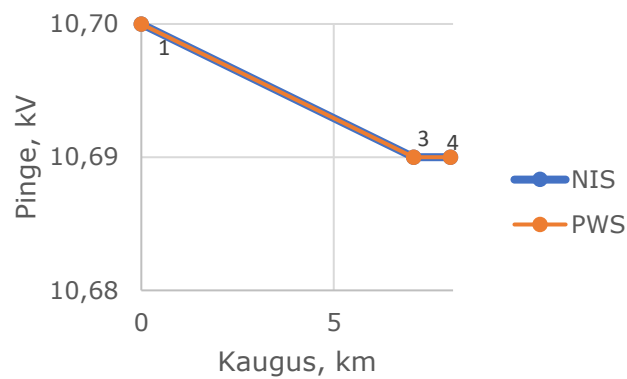
Joonis 4.1 Vaadeldava piirkonnaalajaama lihtsustatud skeem

4.1 Tootmisüksusteta fiidrite tulemused

Joonistelt 4.2 kuni 4.8, on näha, et kõik pinged jäävad fiidri ulatuses lubatud piiridesse olukorras, kus tootmisüksused ei tooda elektrienergiat. Pinge lubatud piirid on näidatud joonisel 2.1. Kõikide toiteliinide koormused on väikesed jäädes vahemikku 46,30 - 344,00 kW ja elektriliinid lühikesed, jäädes 0,080 - 9,60 km vahele, mistõttu puudub suur pingelang. Kõige suurem pingelang on kaheksandal fiidril, kus pinge langeb 0,08 kV võrra PWS tarkvaras. Kaheksandal toiteliinil on kasutusel palju ja erinevaid

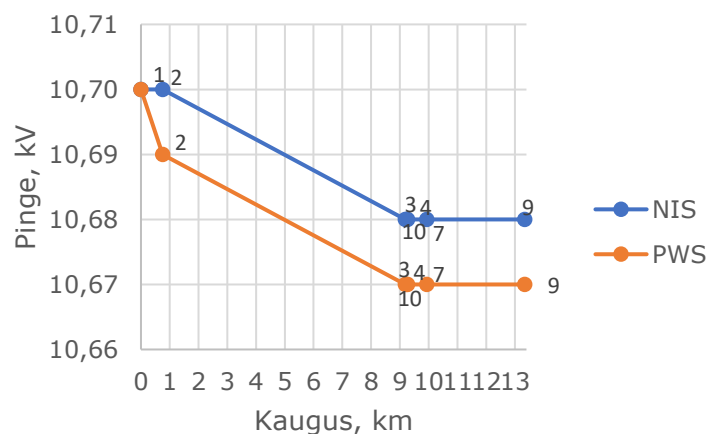
elektriline ning PWS mudelis on valitud kõige väiksema ristlõikega elektriliin, et näha, kuidas süsteem, saab hakkama halvim stsenaariumiga. PWS tarkvaraga modelleeritud fiidrite pinged on kõikide toiteliinide puhul madalamad kui NIS tarkvaraga saadud pinged, sest PWS tarkvaras on liinid sõlmede kitsenduste tõttu kokku võetud ja modelleerimisel on valitud väiksema ristlõikega elektriliin. Fiidrite pinged langevad järkjärgult ilma suurte pingelangusteta ja pinged jäävad stabiilseks üle terve süsteemi.

Esimese fiidri PWS mudel on esitatud lisa 1, joonisel L1.1. Joonisel 4.2 on kujutatud toidetava piirkonnaalajaama toiteliini tulemused nii NIS kui ka PWS tarkvaraga. Jooniselt on märgata, et kahe tarkvara tulemused ühtivad. Kõige suurem pingelang (0,01 kV) on sõlmes kolm, mis asub sõlmest üks 6,66 km kaugusel. Nende sõlmede vaheline kaugus on kõige suurem antud toiteliini puhul. Sõlmede kolm ja neli kauguseks on 0,96 km.



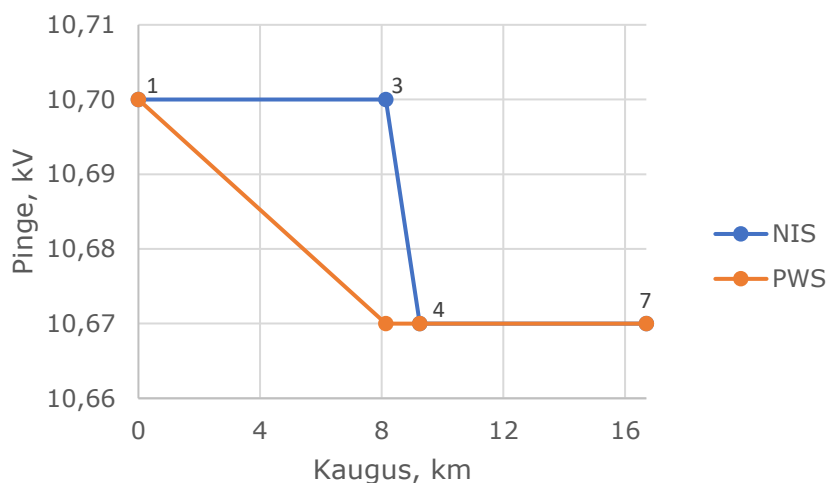
Joonis 4.2 Esimese fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga

Teise toiteliini PWS mudel on esitatud lisa 1, joonisel L1.2. Fiidri kaks tulemused on kujutatud joonisel 4.3. Pingelang sõlmes kolm on põhjustatud pikast elektriliinist. Samuti on näha, et peale pingelangu on pinge stabiilne mõlema tarkvara puhul.



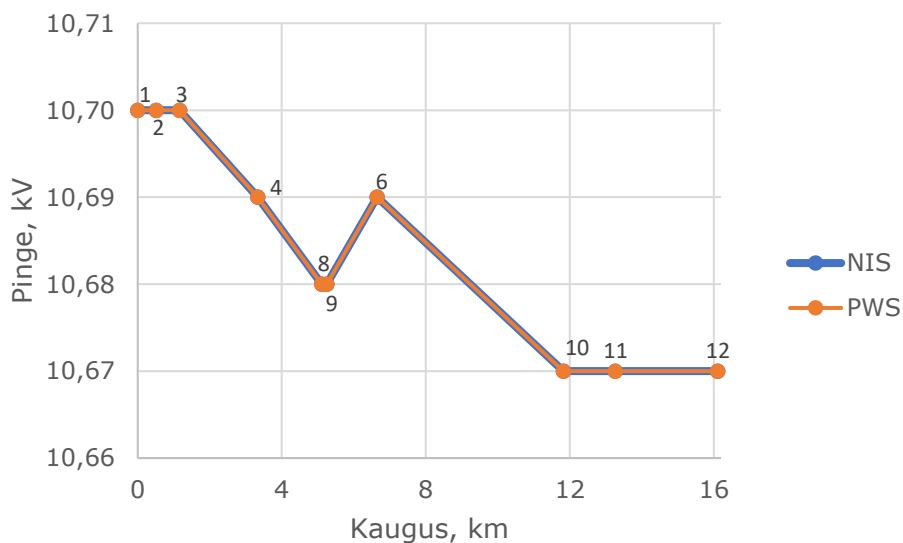
Joonis 4.3 Teise fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga

Kolmanda fiidri PWS mudel on esitatud lisas 1, joonisel L1.3. Joonisel 4.4 on näha kolmanda fiidri tulemusi kahe tarkvaraga. Selle fiidri puhul on tarkvara tulemuste suurimaks erinevuseks 0,03 kV, mis tuleneb näiteks parameetrite erinevustest või mõõtevigadest. NIS mudelis toimub pingelang peale kolmandat sõlme ja PWS mudelis toimub pingelang peale esimest sõlme. PWS mudelis toimub pingelangus varem, sest seal on elektriliinide valikul valitud kõige väiksema ristlõikega liin.



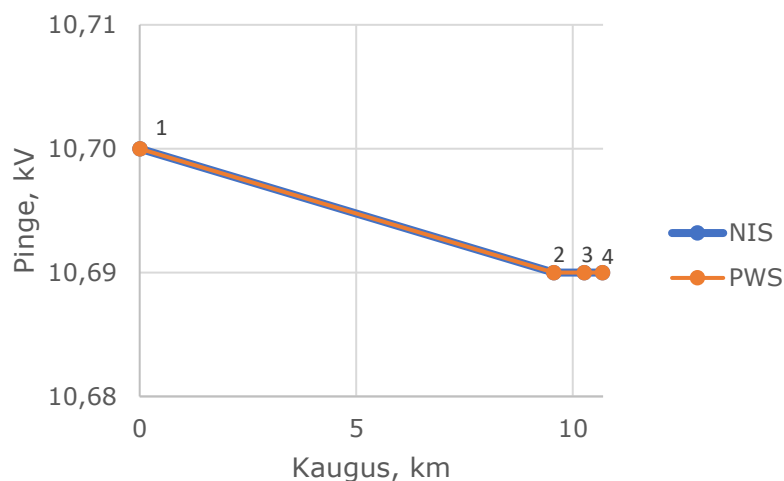
Joonis 4.4 Kolmanda fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga

Neljanda fiidri PWS mudel on esitatud lisas 1, joonisel L1.4. Joonisel 4.5 on esitatud neljanda fiidri tulemused kahe tarkvaraga. Selle toiteliini puhul ühtivad NIS ja PWS mudeli tulemused. Sõlmes kuus toimub pingetõus, mis on põhjustatud kaabelliinist. Kaabelliin hakkab käituma nagu kondensaatorpatarei, tootes reaktiivenergiat, mis omakorda tõstab pinget. Peale kümndat sõlme jääb pinge stabiilseks.

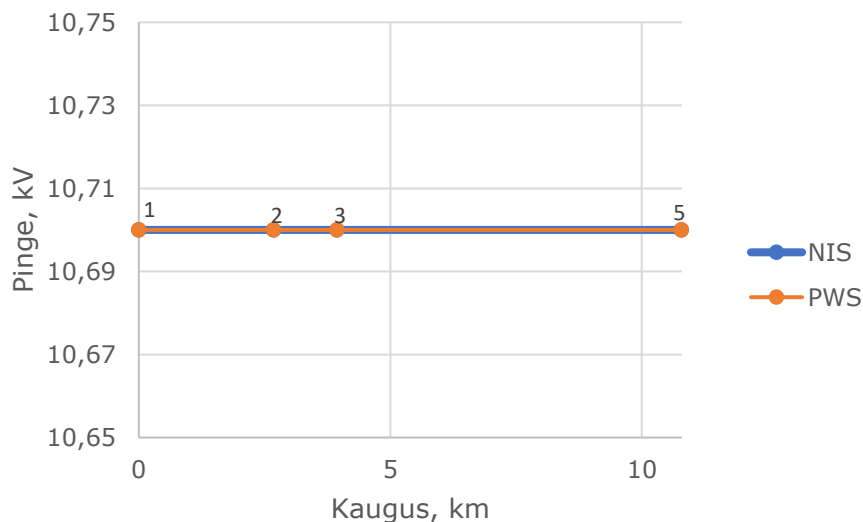


Joonis 4.5 Neljanda fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga

Viienda fiidri PWS mudel on esitatud lisa 1, joonisel L1.5. Joonisel 4.6 on näidatud viienda fiidri tulemused kasutades nii NIS kui ka PWS tarkvara. Seitsmenda fiidri PWS mudel on esitatud lisa 2, joonisel L1.6. Joonisel 4.6 on graafiliselt esitatud seitsmenda fiidri tulemused samuti mõlema tarkvaraga. Mõlematel juhtudel ühtivad kahe tarkvara tulemused. Mõlematel fiidritel on väikesed koormused, mille tõttu puuduvad suured pingelangud või pinge on püsivalt 10,70 kV.

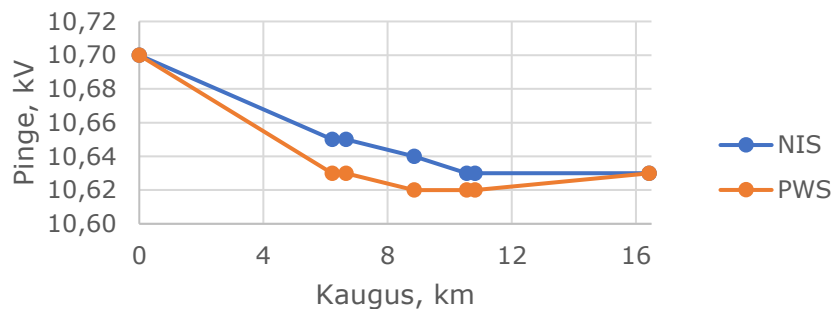


Joonis 4.6 Viienda fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga



Joonis 4.7 Seitsmenda fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga

Joonisel 4.8 on näidatud kaheksanda fiidri tulemused nii NIS kui ka PWS tarkvaradega. Kaheksanda fiidri PWS mudel on esitatud lisa 2, joonisel L1.7. Jooniselt 4.8 on märgata, et PWS tarkvaraga modelleerimisel jäävad pinged madalamaks kui NIS tarkvara puhul. Samuti on näha, et pinge langeb fiidri ulatuses ja pingete erinevused tarkvarade vahel on põhjustatud sisendparameetrite väikeste erinevuste tõttu. Toiteliinil on suurim pingelang sõlmes kaks, mis on põhjustatud pikast elektriliinist.

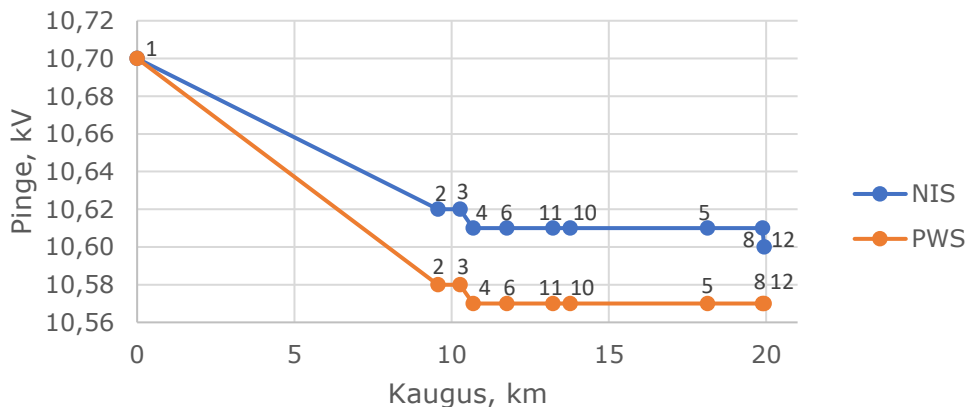


Joonis 4.8 Kaheksanda fiidri tulemused tootmisüksusteta mõlema tarkvaraga

4.2 Tootmisüksusteta ümbertoidete tulemused

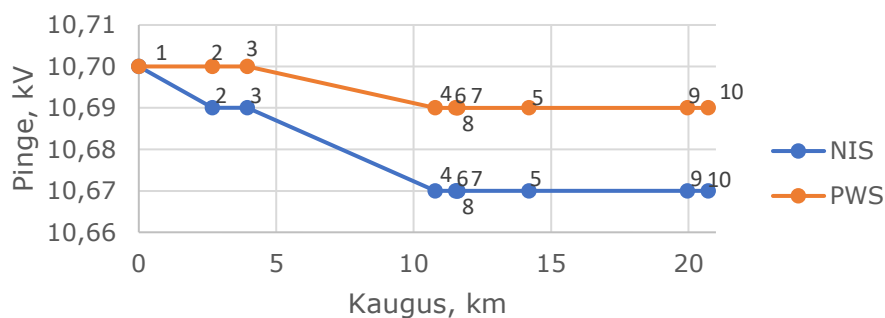
Joonistelt 4.9 kuni 4.11 on näha, et pinge langeb kogu fiidri ulatuses, mis on põhjustatud elektrienergia muundumisest soojuseks elektriliini läbides. Kõikide ümbertoidete puhul on pinge stabiilne üle terve piirkonna. Samuti on pinge kõige kõrgem toitealajaama fiidri alguses. Pinge reguleeritakse kõige kõrgemaks toiteliini alguses, et kompenseerida elektrienergia ülekandekadusid. Lõputöös teostatud ümbertoidetel ei ole murekohti olukorras, kus tootmisüksused ei tooda.

Toiteliini üks ja kolm ümbertoite PWS mudeli skeem on nähtaval lisa 1, joonisel L1.8. Joonisel 4.9 on näidatud esimese ja kolmanda ümbertoite tulemused NIS ja PWS tarkvaraga. Nende kahe toiteliini ümbertoitel on näha, et kõrgeim pinge on toiteliini alguses ja madalaim pinge on toiteliini lõpus. Suurimaks tarkvarade tulemuste vaheliseks pinge erinevuseks on 0,04 kV, mis võib olla põhjustatud tarkvarade arvutusmeetodite erinevustest.



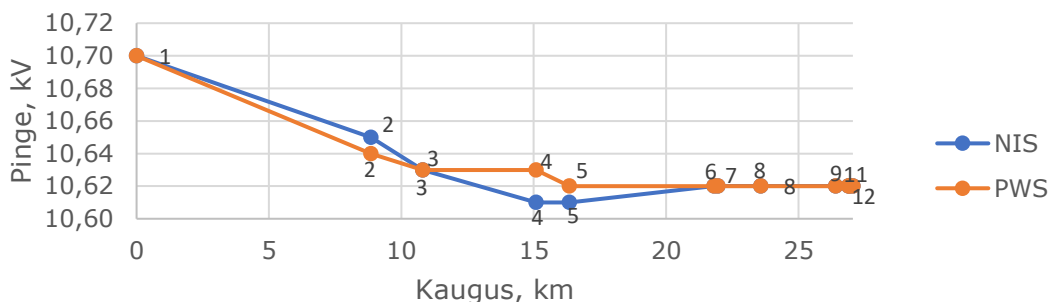
Joonis 4.9 Esimese ja kolmanda toiteliini ümbertoite tulemused mõlemas tarkvaras tootmisüksusteta

Toiteliini kaks ümbertoite PWS mudeli skeem on nähtaval lisas 1, joonisel L1.9. Joonisel 4.11 on graafiliselt esitatud teise toiteliini ümbertoite tulemused kahe tarkvaraga. Selle fiidri ümbertoitel on märgata, et nii NIS kui ka PWS mudelis püsib pinge stabiilsena alates neljandast sõlmest. Sellel ümbertoitel on tarkvarade tulemuste suurimaks erinevuseks 0,02 kV, mis on minimaalne erinevus.



Joonis 4.10 Teise toiteliini ümbertoite tulemused mõlemas tarkvaras tootmisüksusteta

Neljanda toiteliini ümbertoite PWS mudeli skeem on nähtaval lisas 1, joonisel L1.9. Joonisel 4.11 on näidatud neljanda toiteliini ümbertoite tulemused kahe tarkvaraga. Neljanda fiidri toitel on suurim pingelang sõlmes kaks, mis on põhjustatud pika elektriliini tagajärjel. Pinged on mudelite puhul erinevad teisel, neljandal ja viiendal sõlmel, mis võib tuleneda sisendparameetrite erinevusest kahe tarkvara vahel. Jooniselt 4.11 on näha, et pinged jäävad lubatud piiridesse ja puudub suur pingelang.



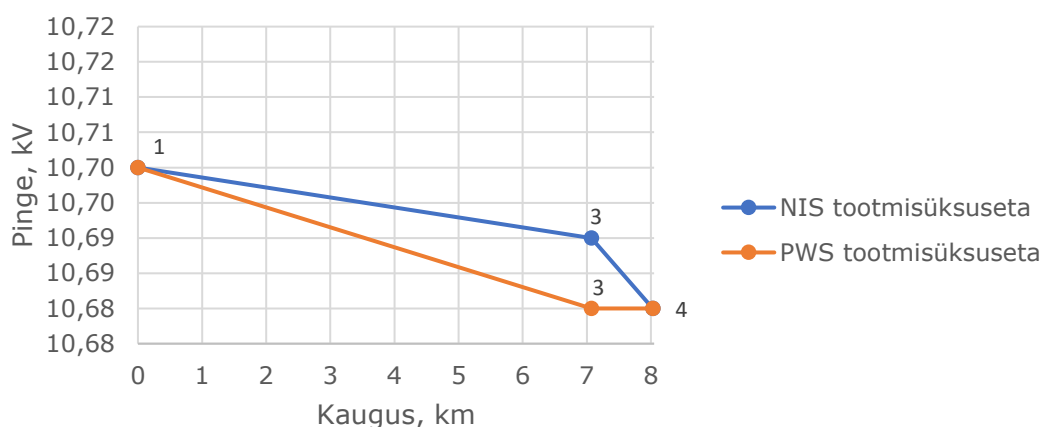
Joonis 4.11 Neljanda toiteliini ümbertoite tulemused mõlemas tarkvaras tootmisüksusteta

4.3 Tootmisüksustega fiidrite tulemused

Joonistel 4.13 kuni 4.18 on näidatud piirkonnaalajaamade väljuvate fiidrite tulemused tootmisüksustega nii NIS kui ka PWS mudelis. Kui fiidril on tootmisüksused, siis need talitlevad oma maksimaalse tootmisvõimsusega. Joonistelt on näha, et pinged on lubatud piirides terve fiidri ulatuses, välja arvatud neljanda fiidri puhul (vt joonis 4.14).

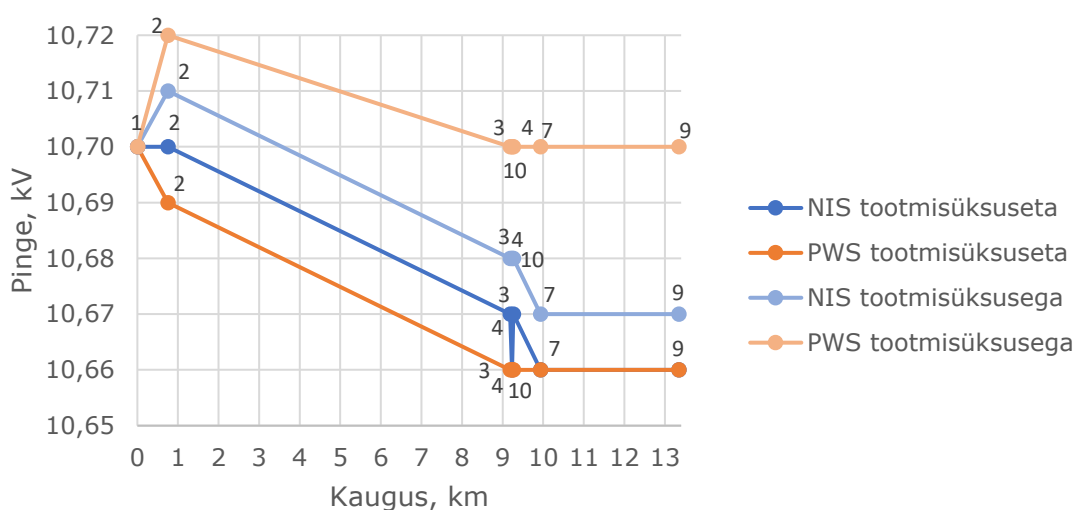
Samuti on märgata, et tootmisüksus tõstab enim pinget selles sõlmes, kuhu üksus on lisatud ja/või sõlme ümbruses.

Esimese fiidri PWS mudel on nähtaval lisas 2, joonisel L2.1. Joonisel 4.12 on näidatud esimese fiidri tulemusi tootmisüksustega. Esimesel toiteliinil puuduvad tootmisüksused ja tarkvarade tulemuste suurimaks erinevuseks on 0,01 kV.



Joonis 4.12 Esimese fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

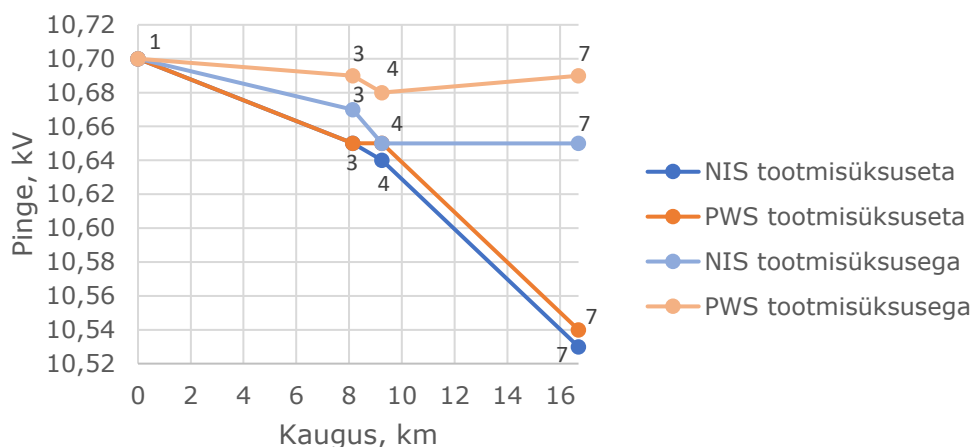
Teise fiidri PWS mudel on välja toodud lisas 2, joonisel L2.2. Joonisel 4.12 on näidatud teise fiidri tulemused tootmisüksustega. Sellel toiteliinil on üks tootmisüksus maksimaalse tootmisvõimsusega 837,8 kW. Jooniselt 4.13 on näha, et tootmisüksus tõstab pinget sõlmes kaks 0,01 kV võrra NIS tarkvaras ja 0,03 kV võrra PWS tarkvaras. Kuigi tootmisüksus tõstab pinget teises kuni üheksandas sõlmes, jäävad pinged endiselt lubatud piiridesse ja suurimaks tarkvarade tulemuste erinevuseks on 0,08 kV.



Joonis 4.13 Teise fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

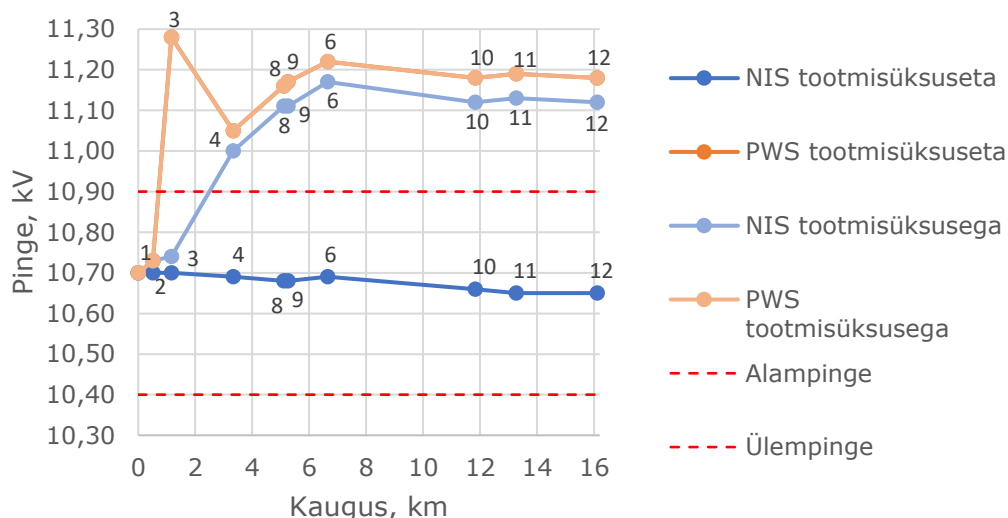
Kolmanda fiidri PWS mudel on välja toodud lisas 2, joonisel L2.3. Joonisel 4.14 on esitatud kolmanda fiidri tulemused tootmisüksustega. Sellel fiidril on üks tootmisüksus,

mille maksimaalseks tootmisvõimsuseks on 113 kW. Jooniselt 4.14 on näha, et pinged on lubatud piirides. Antud mudelid ei ühti omavahel täielikult, aga mudelite tulemuste erinevused on väikesed ja suurimaks pingete erinevuseks on 0,03 kV. Jooniselt 4.13 on näha, et tootmisüksusega jääb pinge stabiilseks peale neljandat sõlme mõlema tarkvara puhul. Selle põhjuseks on võimsusvoo suund – üks võimsusvoog liigub kolmandast neljandasse sõlme ja teine seitsmendast neljandasse.



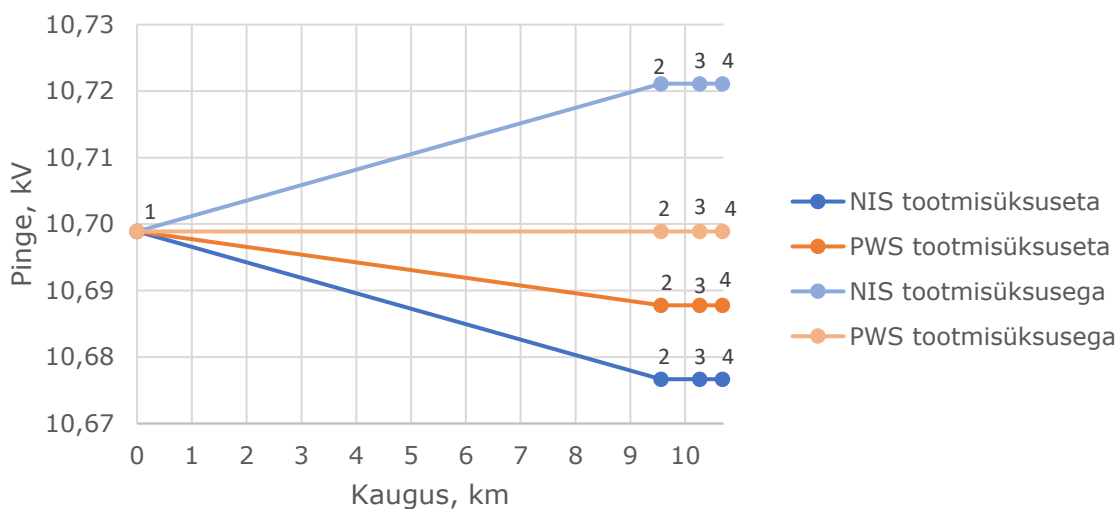
Joonis 4.14 Kolmanda fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

Neljanda toiteliini PWS mudel on lisas 2, joonisel L2.4. Joonisel 4.15 on kujutatud neljanda fiidri tulemusi tootmisüksustega. Jooniselt 4.15 on näha, et pinged ei ole lubatud piirides olukorras, kus kõik tootmisüksused töötavad oma maksimaalse tootmisvõimsusega. Samuti on märgata, et PWS tarkvaras on kõrgemad pinged. See võib tuleneda selletõttu, et PWS tarkvaras ei olnud võimalik kujutada tervet fiidrit, mille tõttu jääbki pinge kõrgem.



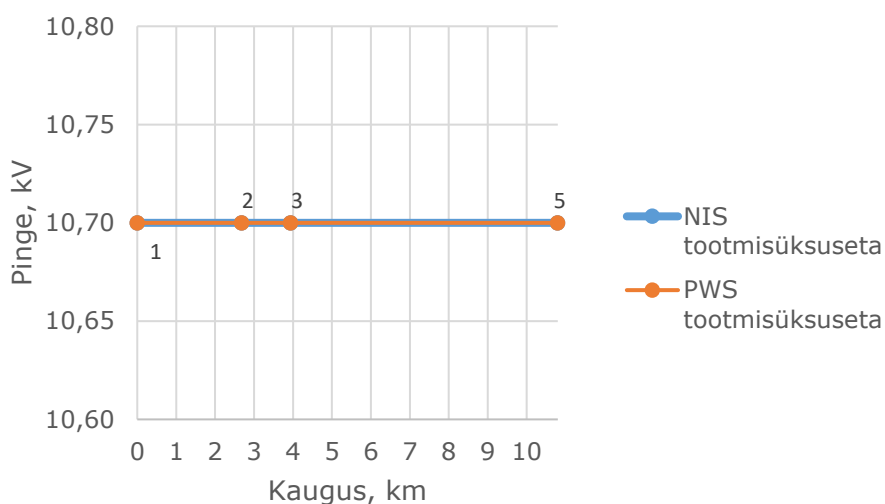
Joonis 4.15 Neljanda fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

Viienda toiteliini PWS mudel on näidatud lisas 2, joonisel L2.5. Joonisel 4.16 on näidatud viienda fiidri tulemusi tootmisüksustega. Sellel toiteliinil on üks tootmisüksus maksimaalse tootmisvõimsusega 100 kW. Jooniselt on näha, et pinged on lubatud piirides ja jäävad stabiilseks peale teist sõlme.



Joonis 4.16 Viienda fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

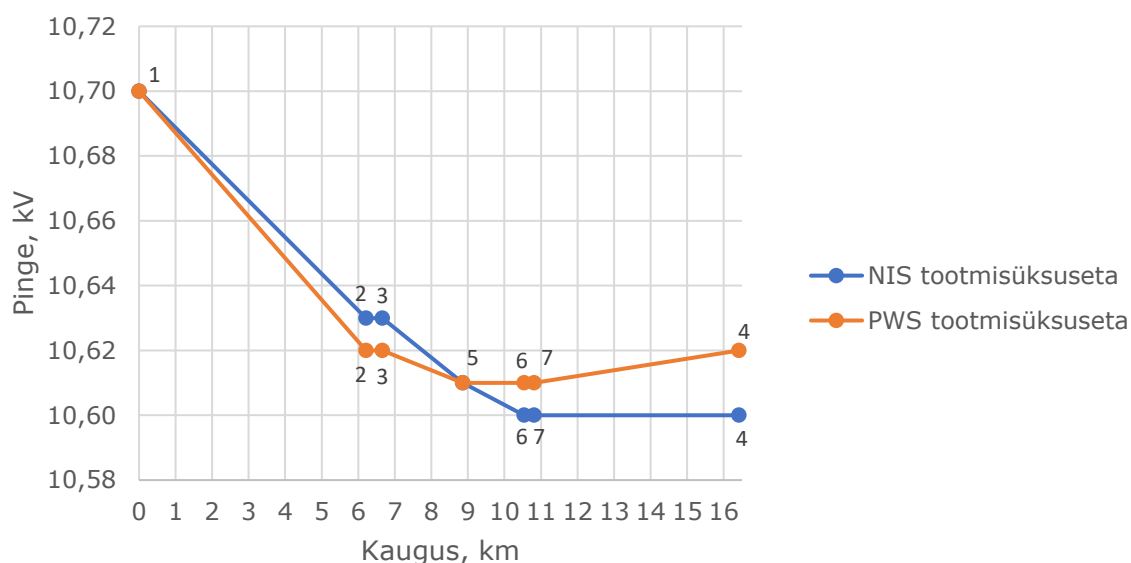
Seitsmenda toiteliini PWS mudel on lisas 2, joonisel L2.6. Joonisel 4.17 on näidatud seitsmenda fiidri mõlema tarkvara tulemused. Seitsmendal toiteliinil ei ole ühtegi tootmisüksust, mis oleks üle 100 kW. Jooniselt 4.17 on näha, et pinge on stabiilselt 10,70 kV terve toiteliini ulatuses.



Joonis 4.17 Seitsmenda fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

Kaheksanda toiteliini PWS mudel on lisas 2, joonisel L2.7. Joonisel 4.18 on esitatud kaheksanda fiidri tulemused tootmisüksustega. Antud fiidril ei ole ühtegi tootmisüksust, mis mõjutaks märkimisväärselt pinget. Kahe tarkvara tulemused on samad sõlmedes

üks ja viis. Pingete erinevused võivad tuleneda sellest, et PWS mudelis on kujutatud ainult osa toiteliinist.

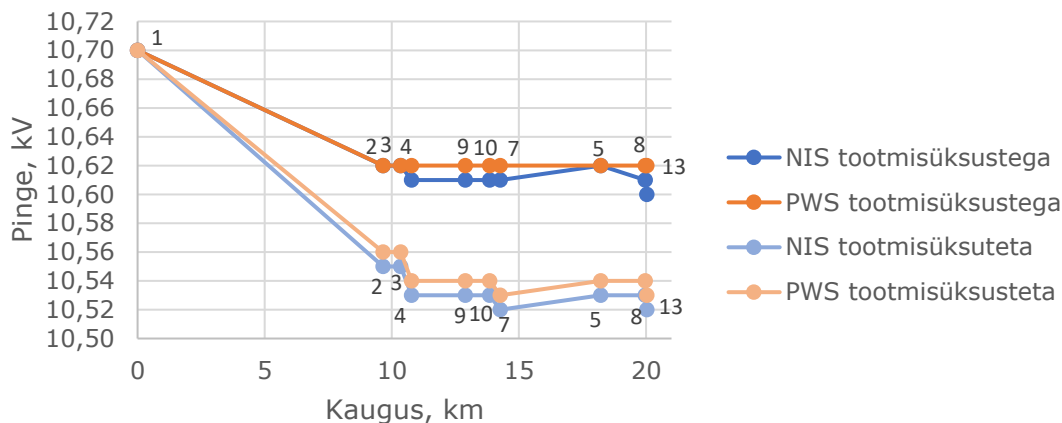


Joonis 4.18 Kaheksanda fiidri tulemused tootmisüksustega mõlema tarkvaraga

4.4 Tootmisüksustega ümbertoidete tulemused

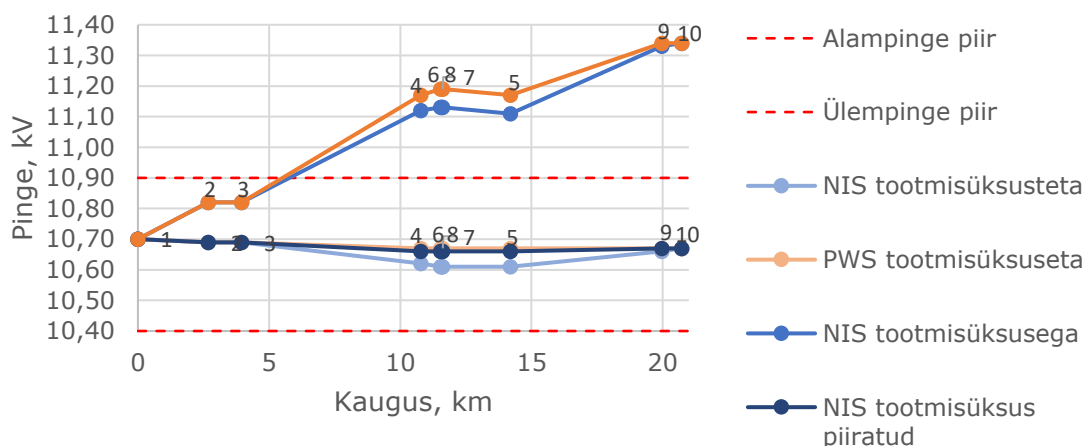
Joonistel 4.19 kuni 4.21 on graafiliselt esitatud kõikide vaadeldava piirkonnaalajama väljuvate toiteliinide ümbertoidete pinge tulemused tootmisüksustega. Maksimaalse tootmisvõimsusega modelleeritud fiidrite ümbertoited on näidatud nii NIS kui ka PWS tarkvaraga. Kahe ümbertoite tulemused PWS tarkvaras on eraldi välja toodud alampeatükis 4.5, kus on tootmisüksuste piiramisel rakendatud P(Q) juhtimisrežiimi. Lisades esimese ja kolmanda toiteliini ümbertoidetele tootmisüksused, jäävad pinged lubatud piiridesse. Teise ja neljanda fiidri puhul tuleb tootmisüksusi piirata, kus osadele tootmisüksuste tootmisvõimsused piiratakse 0 kW-ni.

Esimese ja kolmanda fiidri reservtoite PWS mudeli skeem on nähtaval lisa 2, joonisel L2.8. Joonisel 4.19 on näidatud esimese ja kolmanda tootmisüksustega fiidri ümbertoidete tulemused mõlema tarkvaraga. Sellel reservtoitel on kokku kaks tootmisüksust: sõlmes kolm on üksuse maksimaalseks tootmisvõimsuseks 100 kW ja sõlmes seitse on üksuse maksimaalne tootmisvõimsus suurushulgas 113 kW. Mõlemate tarkvarade puhul on näha, et kõige kõrgem pinge on tootmisüksuse ümbruses ja kõik pinged jäävad lubatud piiridesse ehk 10,40 kV ja 10,90 kV vahele. Samuti on näha, et pinged muutuvad kahes tarkvaras ühtemoodi.



Joonis 4.19 Esimese ja kolmanda fiidri ümbertoite tulemused mõlemas tarkvaras tootmisüksustega

Teise fiidri ümbertoite PWS mudel on näidatud lisa 2, joonisel L2.9, kus on näidatud olukorda, millal tootmisüksus töötab oma maksimaalse tootmisvõimsusega. Joonisel 4.20 on kujutatud teise fiidri ümbertoite tulemused ilma ja koos tootmisüksustega mõlema tarkvara puhul. Samuti on joonisele lisatud NIS tarkvaraga tootmisüksuse piiramise tulemused. Lisaks on joonisel näidatud lubatud pinged vahemikud ehk alampinge- ja ülempinge piir. Teise fiidri reservtoitel on üks tootmisüksus, mille maksimaalseks tootmisvõimsuseks on 837,80 kW. Olukorras, kus tootmisüksus töötab maksimaalse tootmisvõimsusega, jäävad pinged liiga kõrgeks – maksimaalne pinge on 11,34, mis on 0,44 kV võrra suurem kui lubatud ülempinge väärtus. NIS tarkvaras on tootmisüksus piiratud 100 kW-ni. Sellise piiranguga jääb NIS tarkvaras maksimaalseks pingeks 10,70 kV ja minimaalseks pingeks 10,67 kV. PWS mudelis on rakendatud P(Q) juhtimisrežiim, mis on kirjeldatud alampeatükis 4.5.

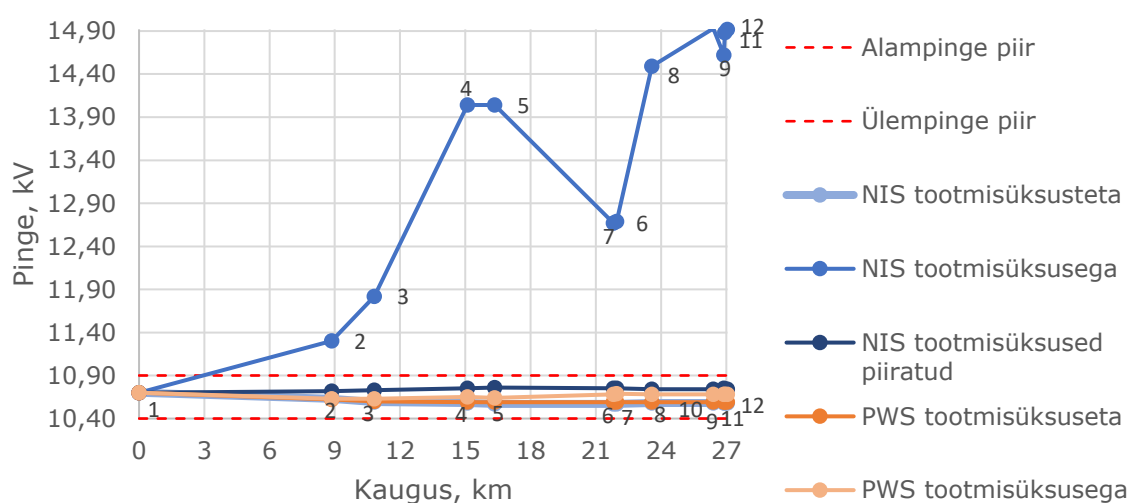


Joonis 4.20 Teise fiidri ümbertoite pingete tulemused mõlema tarkvaraga, sh NIS tarkvaraga piiratud tootmisüksuste pingete tulemused

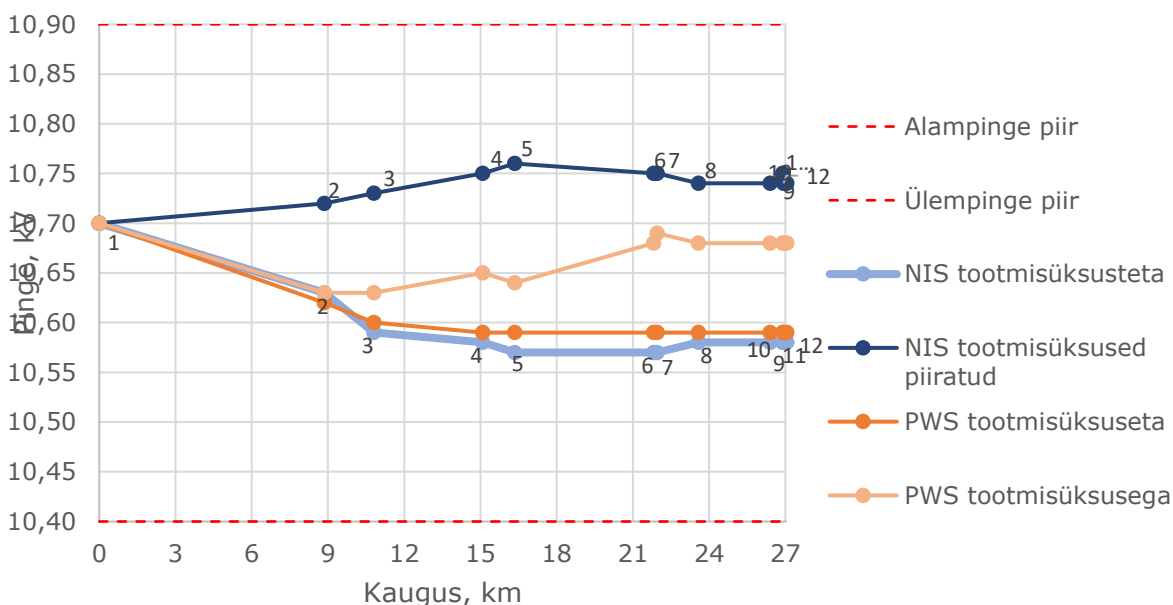
Neljanda fiidri ümbertoite PWS mudel on lisa 2, joonisel L2.10, kus on kajastatud olukord, millal tootmisüksused on piiratud. Joonisel 4.21 on graafiliselt esitatud neljanda

fiidri ümbertoite tulemused tootmisüksustega ja ilma. Samuti on joonisel näidatud ka tootmisüksuste piiramise tulemused. Neljanda fiidri ümbertoitel olevad tootmisüksused koos nende maksimaalsete tootmisvõimsustega on näidatud tabelis 3.4.

Jooniselt 4.21 on märgata, et neljanda fiidri ümbertoite ei ole teostatav juhul kui kõik tootmisüksused talitlevad oma maksimaalsete tootmisvõimsustega. Sellisel juhul jääb maksimaalseks pingeks 14,92 kV, mis on 4,02 kV võrra suurem kui lubatud maksimaalne pinge. Selle fiidri ümbertoitel jäävad pinged lubatud piiridesse, kui kõik tootmisüksused piirata 0 kW-ni, välja arvatud alajaam PEJ8 ja üksus võib talitleda oma maksimaalse tootmisvõimsusega (100 kW), mis on näidatud lähemalt joonisel 4.22.



Joonis 4.21 Neljanda fiidri ümbertoite pingete võrdlus NIS tarkvaras, sh piiratud tootmisüksuste pingete tulemused

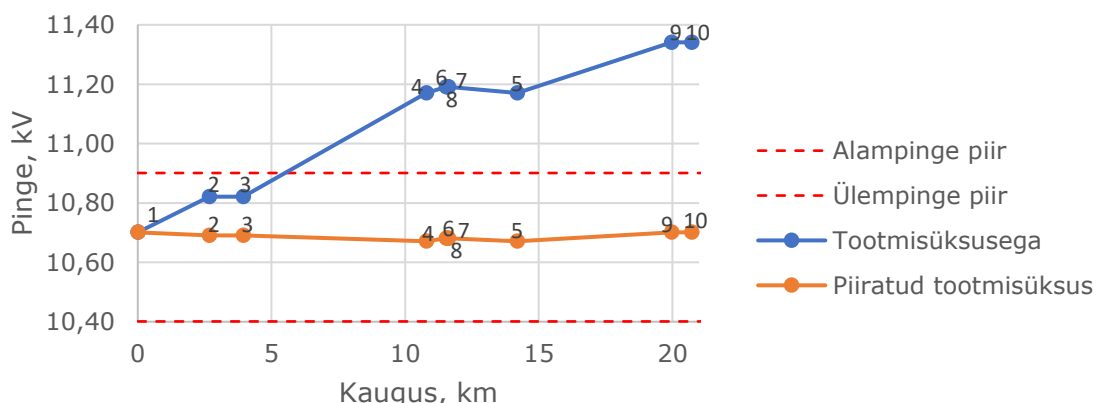


Joonis 4.22 Neljanda fiidri ümbertoite pingete tulemused, ilma maksimaalse tootmisvõimsuse tulemuseta

4.5 P(Q) juhtimisrežiimi rakendamine

P(Q) juhtimisrežiimi rakendamisel reaktiivvõimsuse ja maksimum aktiivvõimsuse suhteks 0,3, mis on saadud määrusest „Elingi AS poolt kehtestatud siseriiklikud sätted elektritootmisüksuste võrku ühendamise nõuete kohta”. See on oluline kui määratakse inverterile maksimaalne ja minimaalne reaktiivenergia kogus. Reaktiivvõimsuse ja maksimumaktiivvõimsuse suhe korrutatakse läbi tootmisüksuse maksimaalse tootmisvõimsusega, et saada reaktiivenergia piirid. [24]

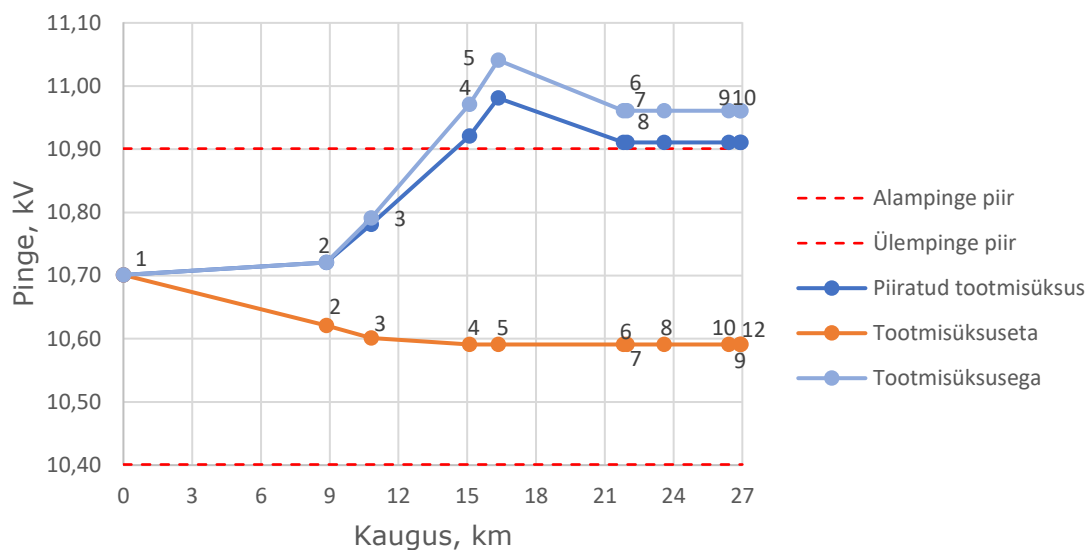
Joonisel 4.23 on näidatud PWS tarkvara ümbertoite mudeli tulemusi nii P(Q) juhtimisrežiimiga kui ka P(Q) juhtimisrežiimita. Samuti on joonisel näidatud ülem- ja alampinge piire. Lisas 2, joonisel L2.8 on nähtavalt esimese ja kolmanda toiteliinide ümbertoidete PWS mudel. P(Q) juhtimisrežiimi rakendati alajaamale nimega PEJ1, mille maksimaalseks tootmisvõimsuseks on 837,8 kW. Tootmisüksustel on olemas kõik juhtimisrežiimid ning P(Q) juhtimisrežiimiga määrati inverterile maksimaalne reaktiivenergia kogus (212 kvar) ja minimaalne reaktiivenergia kogus (-212 kvar). Inverter andis väljundina reaktiivvõimsust suurushulgas -212 kvar ja aktiivvõimsust suuruses 131 kW. Pinget reguleeriti 10,70 kV-ni sõlmes üheksa ehk sõlmes, kuhu tootmisüksus on lisatud. Tootmisüksust piirati 707 kW võrra ehk üksus piirati tootmisvõimsuseni 100 kW. Enne P(Q) juhtimisrežiimi rakendamist oli maksimaalseks pingeks 11,34 kV ja peale juhtimisrežiimi rakendamiseks jäi maksimaalseks pingeks 10,70 kV. Siin tasub meeles pidada, et P(Q) juhtimisrežiimil reguleeritakse pinget reaktiivvõimsuse kaudu ja kui see ei anna soovitud tulemust, hakatakse piirama tootmisüksuste aktiivvõimsust.



Joonis 4.23 Teise fiidri ümbertoite PWS tarkvaras, sh P(Q) juhtimisrežiimiga rakendatud tulemus

Joonisel 4.24 on näidatud neljanda fiidri ümbertoite mudeli tulemused P(Q) juhtimisrežiimi ja -juhtimisrežiimita. Neljanda fiidri ümbertoite PWS mudel on lisas 2,

joonisel L2.10. Neljandal fiidril on kokku tootmisüksusi umbes 5 MW. Kõikide tootmisüksustega kuvab PWS mudel elektrikatkestust, jättes tulemused kuvamata. Samuti näitab mudel elektrikatkestust juhul, kui fiidril talitlevad alajaamad PEJ3, PEJ4 ja PEJ5 maksimaalne tootmisvõimsusega. Lisades süsteemi alajaamad AJ4, PEJ6 või PEJ7 üksteisest eraldi, väljuvad pinged lubatud ülempiiridest. Joonisel 4.23 on näidatud olukorda, kus alajaam PEJ7 talitleb maksimaalse tootmisvõimsusega. Valides tootmisüksusele PEJ7 P(Q) juhtimisrežiim, määrati inverterile maksimaalne reaktiivenergia kogus (221 kvar) ja minimaalne reaktiivenergia kogus (-221 kvar). Inverter kuvas väljundina reaktiivvõimsust suurushulgas 221 kvar ja aktiivvõimsust suuruses 738 kW ehk tootmisüksuse aktiivvõimsust ei piiratud. Pinget reguleeriti 10,70 kV-ni seitsmendas sõlmes, kuhu tootmisüksus on ühendatud. Sellisel juhul jääb maksimum pinge liiga kõrgeks (10,92 kV), mis tähendab, et alajaam PEJ7 tuleb piirata 0 kW-ni. Nagu eelnevalt oli mainitud alampeatükis 4.4, siis selle fiidri ümbertoide tootmisüksustega on võimalik olukorras, kus süsteemis võib olla ainult alajaam PEJ8, mille maksimaalseks tootmisvõimsuseks on 100 kW.



Joonis 4.24 Neljanda fiidri ümbertoide tootmisüksustega PWS tarkvaras, sh tootmisüksuse piiramine

4.6 Vaadeldava piirkonnaalajaama avariitoiteskeem

Avariitoite tingmärgid on esitatud lisa 3, tabelis L3.1. Lisas 4, joonisel L4.1 on näidatud vaadeldava piirkonnaalajaama. Tabelis 4.2 on esitatud vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvate toiteliinide reservtoide tootmisüksusteta. Vaadeldava toitealajaama plaaniliseks tööks on vaja jätta piirkonnaalajaama 10 kV latid pingevabaks. Selle tõttu on toidetava piirkonnaalajaama esimene fiider toidetav ainult läbi kolmanda fiidri.

Kõikides piirkonnaalajaamades on avariitoiteskeemi toitepingeks valitud 10,70 kV. Toites ümber esimest ja kolmandat toiteliini läbi toitealajaama üks, langeb fiidri pinge 0,10 kV võrra. Toiteliini kaks ümbertoitel langeb pinge fiidril 0,03 kV võrra. Fiidri nelja ümbertoitel on pingelanguks 0,09 kV. Valitud koormused ei tekita murekohti, sest koormused ei ületa releekaitse poolt rakendavaid ega elektriliinidele lubatavaid maksimaalseid koormusvoolusid. Samuti ei ületa koormused piirkonnaalajaamade trafodele ja voolutrafodele lubatavaid maksimaalseid koormusvoolusid. Lisaks modelleeriti variant, kus teist ja kolmandat fiidrit toideti läbi toitealajaama üks, kuuenda fiidri kaudu. Sellel variandil jäi minimaalseks pingeks 10,54 kV alajaamas nimega AJ6 ehk pingelang on 0,16 kV.

Tabelis 4.1 „VT 200/5“ tähendab, et 200 A on voolutrafo primaarpoole nimivool ja 5 A on sekundaarpoole nimivool. Ümbertoidet saab säilitada ka pikemat aega, sest pinged on lubatud piirides kõikide ümbertoidete puhul ja need ei paikne ülempiiride ega alampiiride läheduses. Lisaks on lubatud ka koormuse kasv, ent tuleb pöörata tähelepanu, et pinged jääks endiselt lubatud piiridesse ja koormusvoolud ei ületaks lubatud suuruseid. Ühe fiidri ümbertoide on lihtsustatult teostatav kahe järgneva lülitamisega: esimesena lülitatakse sisse lahutuspunkt ja teisena lülitatakse välja vastav fiidri võimsuslülit. Avariitoiteskeemilt on näha, et kõik vajalikud lülitused on teostatavad kaugjuhtimisega.

Tabel 4.1 Vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvate toiteliinide reservtoide tootmisüksusteta

	10 kV fiidrid	Toitekoht		Lülituskohad		Toitefiidri koormusvool A	Võrguelement		Toitefiidri RK poolt lubatud vool
		AJ	Fiider	Välja	Sisse		U _{min} kV	Nimi	
1	Fiider 1 Fiider 3	PAJ1	Fiider 5	PAJ: VL101 PAJ : VL103	AJ1: VL1 AJ5: VL7	13	10,60	Fiider 3	I _{ub} = 112 A VT 200/5
2	Fiider 2	PAJ2	Fiider 7	PAJ : VL102	AJ4: VL3	14	10,67	LP2	I _{ub} = 110 A VT 100/5
3	Fiider 4	PAJ3	Fiider 8	PAJ: VL104	LP4: VL12	21	10,61	PEJ6	I _{ub} = 110 A VT 100/5

Lisas 5, joonisel L5.1 on näidatud vaadeldava piirkonnaalajaama avariitoiteskeem tootmisüksustega. Tabelis 4.3 on esitatud vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvate toiteliinide reservtoide tootmisüksustega. Kõikides piirkonnaalajaamades on avariitoiteskeemi toitepingeks valitud 10,70 kV. Esimese ja kolmanda toiteliini reservtoitel langeb pinge endiselt 0,10 kV võrra. Teise fiidri ümbertoitel langeb pinge fiidri ulatuses 0,04 kV. Neljanda toiteliini ümbertoitel puudub pingelang ja pingetõus on 0,06 kV. Avariitoiteskeemilt on näha, et analüüsitava piirkonnaalajaama reservtoidet on võimalik teostada, kui järgmiste KP/MP alajaamade tootmisüksused on piiratud 0 kW-

ni: AJ4, PEJ3, PEJ4, PEJ5, PEJ6 ja PEJ7. Lisaks on vaja piirata alajaama PEJ1 tootmisüksust 100 kW-ni.

Tabel 4.2 Vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvate toiteliinide reservtoide tootmisüksustega

	10 kV fiidrid	Toitekoht		Lülituskohad		Tootmisüksused
		AJ	Fiider	Välja	Sisse	
1	Fiider 1	PAJ1	Fiider 5	PAJ: VL101	AJ1: VL1	PEJ12: 113 kW PEJ9: 100 kW
	Fiider 3			PAJ : VL103	AJ5: VL7	
2	Fiider 2	PAJ2	Fiider 7	PAJ : VL102	AJ4: VL3	PEJ1: 100 kW
3	Fiider 4	PAJ3	Fiider 8	PAJ: VL104	LP4: VL12	PEJ8: 100 kW

Tabel 4.2 Vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvate toiteliinide reservtoide tootmisüksustega (jätk)

	10 kV fiidrid	Toitefiidri koormusvool A	Võrguelement				Toitefiidri RK poolt lubatud vool
			U _{min} kV	Nimi	U _{max} kV	Nimi	
1	Fiider 1	18	10,60	AJ6	10,70	Toite AJ1	I _{ub} = 112 A VT 200/5
	Fiider 2						
2	Fiider 3	7	10,66	LP2	10,70	Toite AJ2	I _{ub} = 110 A VT 100/5
3	Fiider 4	20	10,70	PAJ3	10,76	PEJ8	I _{ub} = 110 A VT 100/5

4.7 Modelleerimise järeldused

Modelleerides piirkonnaalajaama väljuvaid fiidreid *PowerWorld Simulator* (PWS) tarkvaras, ei ole tulemused nii täpsed, kui Trimble NIS tarkvaras. Esiteks on erinevus baasühikute vahel: PWS tarkvaras ei ole võimalik sisestada andmeid kW-des või kvar-des ehk andmed tuleb teisendada MW-sse või Mvar-sse. Seetõttu ümardatakse andmeid ja tulemused ei ole nii täpsed, kui NIS tarkvaras. Lisaks on erinevused arvutusmeetodites. NIS tarkvara kasutab radiaalvõrgu meetodit, mis on spetsiaalselt mõeldud jaotusvõrkude jaoks, mille tõttu võivad tulemused olla täpsemad. Modelleerides ilma tootmisüksusteta, jäävad pinged kõrgemaks NIS tarkvaras. PWS tarkvaraga modelleerides on valitud väiksema ristlõikega liin, mistõttu pinged jäävadki madalamaks. Lisades tootmisüksused on pinged kõrgemad PWS tarkvaras, sest PWS tarkvaras ei ole kujutatud toiteliin täies mahus sõlmede kitsenduste tõttu.

NIS tarkvaras on pidevalt uuenev võrgu topoloogia koos kõikide parameetritega, mis tähendab, et algandmeid ei tule sisestada, erinevalt PWS tarkvarast. PWS puhul on iga

sõlme juures võimalik kuvada vastav pinge väärtus. NIS tarkvaras peab algselt kuvama arvutustulemused ja leidma nende seast vastava pinge sõlmedele. Tootmisüksused tõstavad oluliselt pinget elektrivõrgus ja pinge muutus oleneb tootmisüksuse asukohast. Juhul, kui piirkonnaalajaamal on tootmisüksus, mis asub fiidri lõpus ja tootmisüksus, mis asub fiidri alguses, siis pinget tõstab enim fiidri lõpus olev tootmisüksus. Olukorras, kus seda toiteliini on vaja ümbertoita, tekib vastupidine olukord – pinge on kõrgeim fiidri alguses paiknevas tootmisüksuse piirkonnas.

NIS tarkvaras on võimalik tootmisüksuse aktiivvõimsust reguleerida läbi tootmisüksuste väljundvõimsuse, ent PWS tarkvaras reguleerib aktiivvõimsust $P(Q)$ juhtimisrežiim. Mõlema mudeli puhul saadud tulemused ühtisid üksteisega. Olukorras, kus võrguosasse on ühendatud palju tootmisüksusi, ei pruugi juhtimisrežiimid aidata, mille tõttu tuleb tootmisüksusi piirata. Analüüsitava piirkonnaalajaama väljuvad toiteliinid on võimalik ümber viia jaotusvõrgu toitele juhul, kui piiratakse tootmisüksusi. Olukorras, kus tootmisüksused ei tooda, jäävad pinged lubatud piiridesse. Kui tootmisüksused töötavad oma maksimaalse tootmisvõimsusega, jäävad pinged liiga kõrgeks teise ja neljanda fiidri ümbertoitel. Teise fiidri ümbertoitel piirati alajaama PEJ1 tootmisüksus 100 kW-ni. Sellise piiranguga jäi maksimaalseks pingeks 10,70 kV ja minimaalseks pingeks 10,66 kV. Neljanda toiteliini reservtoitel tuleb järgmiste alajaamade tootmisüksused piirata 0 kW-ni: AJ4, PEJ3 kuni PEJ7. Sellel reservtoitel võib talitleda vaid üks tootmisüksus (PEJ8), mis võib töötada oma maksimaalse tootmisvõimsusega. Selliste piirangutega jääb maksimaalseks pingeks 10,76 kV ja minimaalseks pingeks 10,70 kV.

KOKKUVÕTE

Lõputöö eesmärgiks oli leida optimaalseim avariitoiteskeem ühe Eesti jaotusvõrgu piirkonnaalajaama jaoks. Antud lõputöö teema pakkus huvi lõputöö tegijale, kes soovis teada tootmisüksuste mõju kohta pingele ja võrgu talitlusele. Lõputöö on kasulik Elektrilevi OÜ juhtimiskeskusele piirkonnaalajaama erinevate toiterežiimide juhtimisel.

Lõputöö käigus modelleeriti Trimble NIS tarkvaras vaadeldava piirkonnaalajaama väljuvad fiidrid nii tootmisüksusteta kui ka tootmisüksustega. Samuti modelleeriti kõik teoreetilised võimalikud ümbertoited, mille põhjal valiti kõige optimaalsemad. Sobivad ümbertoited modelleeriti hiljem tootmisüksustega, mille käigus analüüsiti, kas ja kui palju tuleb tootmisüksusi piirata, et pinge jääks lubatud vahemikku ning koormused ei ületaks lubatavaid suurusid. Vaadeldavas piirkonnaalajaamal viidi neli väljuvat fiidrit jaotusvõrgu ümbertoitele. Esimene ja kolmas toiteliin on viidud esimese piirkonnaalajaama viienda fiidri toitele. Teine fiider on üle viidud teise piirkonnaalajaama seitsmenda fiidri reservtoitele. Neljas toiteliin on kolmanda piirkonnaalajaama kaheksanda toiteliini toitel. Olukorras, kus tootmisüksused ei tooda, jäävad pinged lubatud piiridesse – tulemuseks saadud minimaalne pinge on 10,61 kV ja maksimaalne pinge 10,70 kV. Tootmisüksustega ümbertoitel ei teki murekohta esimese ja kolmanda fiidri ümbertoitel, kus minimaalseks pingeks on 10,60 kV ja maksimaalseks pingeks 10,70 kV. Teise fiidri reservtoitel tuleb piirata alajaama PEJ1 100 kW-ni, mille puhul jääb ümbertoite minimaalseks pingeks 10,66 kV ja maksimaalseks pingeks on 10,70 kV. Neljanda toiteliini ümbertoitel tuleb piirata järgmiste alajaamade tootmisüksuste tootmisvõimsused 0 kW-ni: AJ4, PEJ3, PEJ4, PEJ5, PEJ6 ja PEJ7. Neljanda fiidri ümbertoitel võib üks alajaama tootmisüksus, PEJ8, talitleda oma maksimaalse tootmisvõimsusega. Sellisel juhul jääb minimaalseks pingeks 10,70 kV ja maksimaalseks pingeks 10,76 kV.

Tootmisüksused avaldavad märkimisväärset mõju võrgu talitlusele. Kõige määravamad tegurid pingete juures on tootmisüksuse asukoht ja tootmisvõimsus. Mida kaugemal asub tootmisüksus toitealajaamast, seda piiravamad on võrguelemendid ehk seal ei ole võimaldatud suurt koormuse kasvu. See tekitab murekoha piirkonnaalajaama väljuvate fiidrite ümbertoitel, sest siis on pinge kõige kõrgem seal, kus toiteliini normaaltalitusel oli minimaalne pinge. Lisaks tõstavad tootmisüksused pinget nii selles sõlmes, kuhu see on lisatud, ja ka tootmisüksuse piirkonnas. Selle kiireks lahenduseks on tootmisüksuste piiramine.

PWS tarkvaras modelleeriti järgmised olukorrad tootmisüksustega ja tootmisüksusteta: piirkonnaalajaama väljuvad fiidrid ning sobivad ümbertoited. PWS tarkvaras kasutati pingete reguleerimiseks $P(Q)$ juhtimisrežiimi, mis reguleeris aktiivvõimsust sõltuvalt reaktiivenergiale. Juhtimisrežiim ei parandanud igas olukorras pingeid, mille tõttu tuli osade tootmisüksuste tootmisvõimsus piirata 0 kW-ni. Kui NIS tarkvaras, tuli ise valida väljundvõimsus tootmisüksustele, et saavutada soovitud pinge, siis PWS tarkvaras toimus see automaatselt. Mõlemate tarkvarade piiramiste tulemused ühtisid.

Eesti elektrivõrk on pidevalt muutumas ja nii võrgu kui ka võrguparameetrite muutused, mistõttu viiakse muudatused automaatselt NIS tarkvarasse. PWS tarkvaraga modelleerides tuli ise luua vastav mudel ja sisestada sisendparameetrid. Antud teisenduse tõttu olid tulemused täpsemad PWS tarkvaras. PWS eeliseks on see, et tarkvara kuvab iga võrguelemendi andmed skeemil, mis lihtsustab analüüsimise protsessi. Lisaks on PWS tarkvara tudengiversioonis võimalik modelleerida maksimaalselt kolmteist sõlme, mille tõttu modelleeriti vaid osa toiteliinist.

Lõputöös rakendati alates B-tüüpi tootmisüksustele $P(Q)$ juhtimisrežiimi. Analüüsi käigus selgus, et tootmisüksustel on märkimisväärne mõju toiteliini talitlusele, mille tõttu on oluline nendega arvestada pinge juhtimisel ja erinevate toiteskeemide rakendamisel. Selle väljakutse lahendamiseks tuleks tulevikus kaaluda samuti A-tüüpi tootmisüksustele juhtimisrežiimide rakendamist Eesti elektrivõrgus.

SUMMARY

The purpose of this thesis was to find the most optimal emergency power supply scheme for one of Estonia's regional substations in the distribution grid. The subject of this thesis was of interest to the author of the thesis who wanted to know more about the influence of generating plants on voltage and network performance. The thesis is useful for the control center of Elektrilevi OÜ in controlling the different power supply modes of the regional substation.

Trimble NIS software was used to model the outgoing feeders of the observed regional substations with and without generating plants. All theoretically possible refeeds were also modelled, and the optimal ones were selected. The optimal refeeds were also modelled with generating units to see if and how much the generating plants need to be limited. The limitation is needed so that the voltage remains within the permitted range and the loads do not exceed the permitted values.

At the chosen regional substation, four outgoing feeders were transferred to the distribution network. The first and third feeders are refeeded by the fifth feeder of the first regional substation. The second feeder is transferred to the seventh feeder of the second regional substation. The fourth feeder is powered by the eighth feeder of the third regional substation. In the situation where the generating plants are not generating, the voltages remain between the permitted limits – the minimum voltage is 10,61 kV and the maximum voltage is 10,70 kV. Adding generating plants to the refeeding of the first and third feeder, the generating plants do not cause any concern. For the refeeding of the second feeder, a substation with a generating plant (PEJ1), must be limited to 100 kW, in which case the minimum voltage remains 10,66 kV and the maximum voltage is 10,70 kV. When refeeding the fourth feeder, the following generating plants of the substations must be limited to 0 kW: AJ4, PEJ3, PEJ4, PEJ5, PEJ6, and PEJ7. One generating plant (PEJ8) can operate at its maximum generating capacity (100 kW). In this case, the minimum voltage remains 10,70 kV and the maximum voltage remains 10,76 kV.

Generating plants have a significant impact on the grid performance and the most influential factors for voltages are the location of the generating plant and the generating power. The further the generating plant is located from the regional substation, the more restrictive the network elements are, i.e. a large increase in load is not recommended. This creates a concern for the refeeding of the outgoing feeders of the regional substation because voltage is the highest, where under normal operating

conditions, it is the lowest. In addition, generating plants raise the voltage at the bus to which it was added, and in the region of the generating plant. A quick solution for this is to limit the output capacity of generating plants.

The following situations were modelled in the PWS software: outgoing feeders of the regional substations and suitable refeeds. In the PWS software, the P(Q) control mode was used to regulate the voltages, which adjusted the active power depending on the reactive power. The reactive power control modes used for voltage regulations do not always improve the voltages, meaning that some generating plants must be limited to 0 kW. The results of both NIS and PWS software were consistent.

The Estonian electrical grid is constantly changing and the changes in the grid are automatically transferred to the NIS software. In the PWS software, a corresponding model must be created. The advantage of PWS is that the software displays the data of each network element in the model, which simplifies the analysis process. In addition, in the student version of the PWS software, it is possible to model a maximum of 13 buses, due to which only part of the feeder was modelled.

In this thesis, the P(Q) control mode was applied starting from type B generating plants. During the analysis, it became clear that generating plants have a significant impact on the operation of the feeder, which is why it is important to take them into account when controlling voltage and implementing different emergency power supply schemes. To solve this challenge, the implementation of control modes for type A generating plants in the Estonian electricity grid should be considered in the future.

KASUTATUD KIRJANDUS

- [1] M. Meldorf, H. Tammoja, Ü. Treufeldt ja J. Kilter, *Jaotusvõrgud*. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 2007.
- [2] M. Ots, K. Kersa, „Renewable energy in Estonia now exceeds electricity produced from fossil fuels.“ ERR.ee. Kasutatud: 22. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://news.err.ee/1609234626/renewable-energy-in-estonia-now-exceeds-electricity-produced-from-fossil-fuels>
- [3] Elektrilevi OÜ, „Jaotusvõrgu arengukava aastani 2035,“ Elektrilevi.ee, 2023. [Võrgumaterjal] Kasutatud: 23. veebruar 2024. Saadaval: <https://www.elektrilevi.ee/documents/8644141/8650150/Elektrilevi-arengukava-2023>
- [4] *1384 Jaotusvõrgu juhtimise talitlusjuhend*, Elektrilevi OÜ, 1. jaanuar 2024, avaldamata.
- [5] Elering AS, „Euroopa ja Eesti elektrisüsteemi ülevaade,“ elektrituru käsiraamat, Elering.ee. Kasutatud: 22. veebruar 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://elering.ee/elektrituru-kasiraamat/3-eesti-elektrisusteeem/31-euroopa-ja-eesti-elektrisusteeemi-ulevaade/311>
- [6] J. Kilter. (2019). Reaktiivvõimsuse kompenseerimine ja pingereguleerimine Kasutatud: 25. veebruar 2024. [PowerPointi esitlus]. Saadaval: <https://moodle.taltech.ee/course/view.php?id=22217>
- [7] *Nõuded jaotusvõrkudega paralleelselt ühendatud tootmisüksustele. Osa 1: Ühendus madalpingejaotusvõrguga Tootmisüksused kuni tüübini B (kaasa arvatud)*, EVS-EN Standard 5049-1:2019, Eesti Standardikeskus, Tallinn, Eesti, veebruar 2019.
- [8] J. Jenkins, "A closer look at power factor correction," Chargedevs.com, 8. jaanuar 2018. Kasutatud: 14. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://chargedevs.com/features/a-closer-look-at-power-factor-correction/>
- [9] M. Zainuddin, F. E. P. Surusa, M. Asri, A. Mokoagow, "Reactive power control of solar photovoltaic inverters for grid code compliance support," *International*

Journal of Applied Power Engineering, köide 12, nr. 3, lk. 300–311, september 2023. Kasutatud: 16. märts 2024. [Võrgumaterjal]. doi: 10.11591/ijape.v12.i3.pp300-311

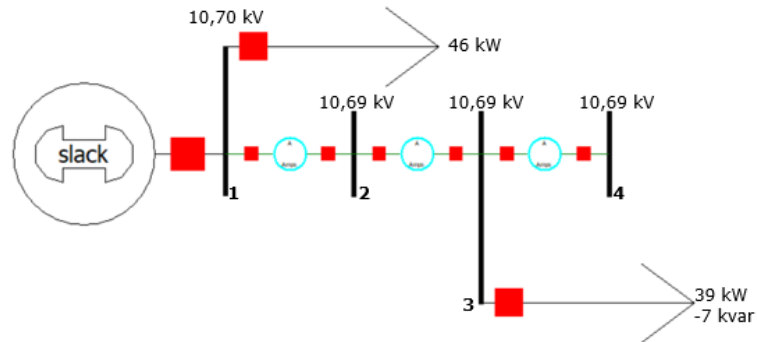
- [10] Vabariigi Valitsus. (2019, 27. aprill). *Elektrisüsteemi toimimise võrgueeskiri*. Kasutatud: 18. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.riigiteataja.ee/akt/121022019002>
- [11] Elektrilevi OÜ, „Tootmismooduli seadistamise protokoll vorm 2024,“ Elektrilevi.ee, 2024. Kasutatud: 15. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elektrilevi.ee/files/tootmismooduli_seadistamise_protokoll_vorm_2024.pdf
- [12] Trimble Utilities & Public Administration, „Trimble NIS for Electric Utilities,“ Upa.trimble.com. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://upa.trimble.com/en-eu/products/trimble-nis-electric>
- [13] PowerWorld Corporation, „Simulator,“ Powerworld.com. Kasutatud: 28. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://www.powerworld.com/products/simulator/overview>
- [14] Schneider Electric, „Products | EcoStruxure™ ADMS,“ Smartgrid.schneider-electric.com. Kasutatud: 29. märts 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: <https://smartgrid.schneider-electric.com/s/adms#:~:text=Schneider%20Electric's%20EcoStruxure%20ADMS,the%20entire%20electric%20distribution%20network>
- [15] Trimble Solutions Corporation. „Trimble NIS Power System Analysis“, 2023, avaldamata.
- [16] Power World Corporation. „User's Guide,“ Powerworld.com, 22. detsember 2011. Kasutatud: 24. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://www.powerworld.com/files/Simulator16_Help_Printed.pdf
- [17] A. Hill *et al*, “The power flow analysis for electric power network: A tutorial article,“ *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, lk 223-238, 20. detsember 2023. Kasutatud: 16. märts 2024. [Võrgumaterjal]. doi: <https://doi.org/10.30574/wjaets.2023.10.2.0305>

- [18] H. Manninen. (2024). Võrguvõrrandite lahendamine Gauss-Seideli ja Newtoni-Raphsoni meetodil. [PDF]. Kasutatud: 18. märts 2024. Saadaval: <https://moodle.taltech.ee/enrol/index.php?id=33299>
- [19] M. Meldorf, E. Tiigimägi, P. Raesaar, Ü. Treufeldt, J. Kivistu ja M. Karjus, *Jaotusvõrgu arvutuste alused*. Tallinn: OÜ Elpost, 2002, avaldamata.
- [20] E. Tiigimägi, *Elektrivõrgud*. Tallinn: TTÜ Kirjastus, 1997.
- [21] E. Kändler, H. Lind, E. Risthein, *Elektriku käsiraamat*. Tallinn: Kirjastus „Eesti raamat“, 1965.
- [22] NKT, „AXAL-TT PRO 3.0 Endurance 6/10 (12) kV,“ Nkt.widen.net. Kasutatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://nkt.widen.net/content/ruxvaxa0sc/pdf/AXAL-TT-PRO-3.0-Endurance-6_10-12-kVAPP_MV_DS_SV-EN.pdf?u=gj0n1y.
- [23] AS Draka Keila Cables, „AHXAMK-W 12/20 (24) kV,“ Petz.planet.ee. Kasutatud: 17. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://petz.planet.ee/elekter/varia/Draka_Catalogue_EST.pdf
- [24] Euroopa Komisjon. (27. aprill 2019) *Euroopa Komisjoni määruse nr 2016/631 artikkel 7 lõike 4 alusel Elering AS-i poolt kehtestatud siseriiklikud sätted elektritootmisüksuste võrku ühendamise nõuete kohta*. Kasutatud: 18. aprill 2024. [Võrgumaterjal]. Saadaval: https://elering.ee/sites/default/files/public/Teenused/Liitumine/Lisa_1_RfG%20siseriiklikult%20m%C3%A4%C3%A4ratavad%20s%C3%A4tted_Final.docx

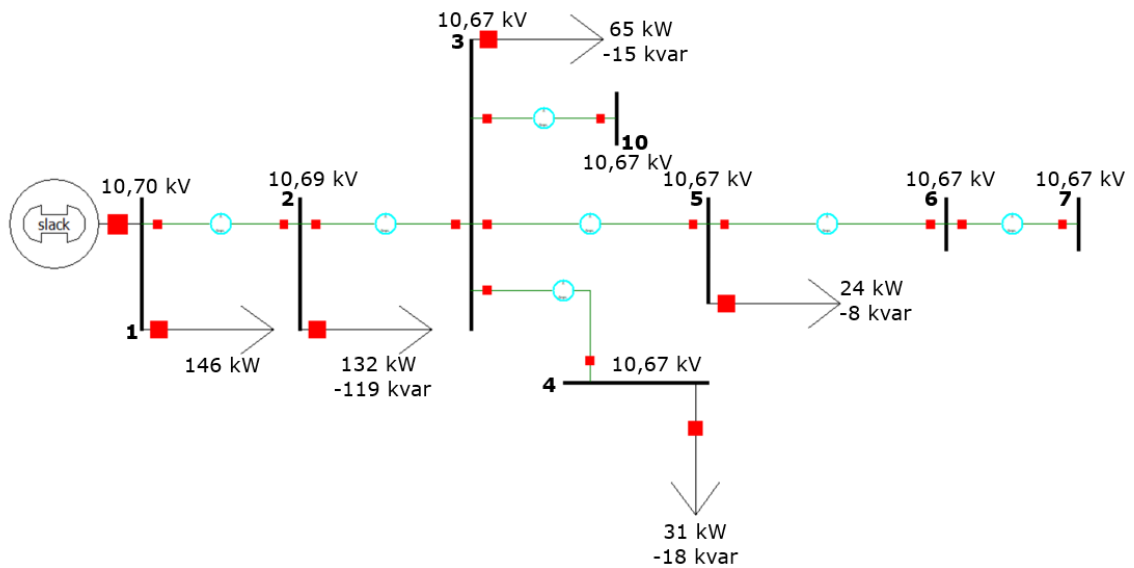
LISAD

Lisa 1 PWS Modelleerimise mudelid tootmisüksusteta

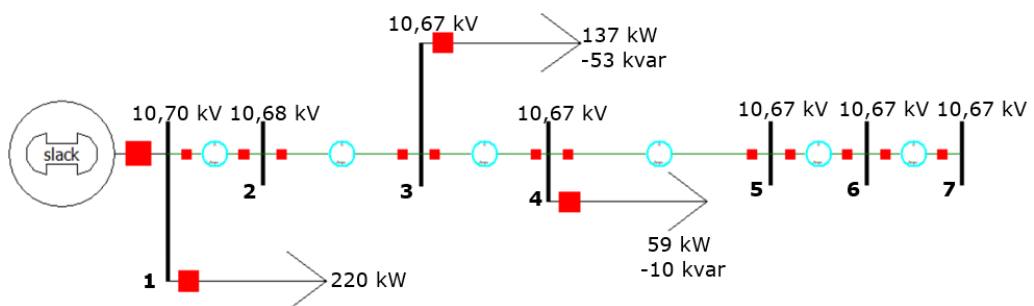
Lisas 1 on välja toodud PWS modelleerimise mudelid tootmisüksusteta.



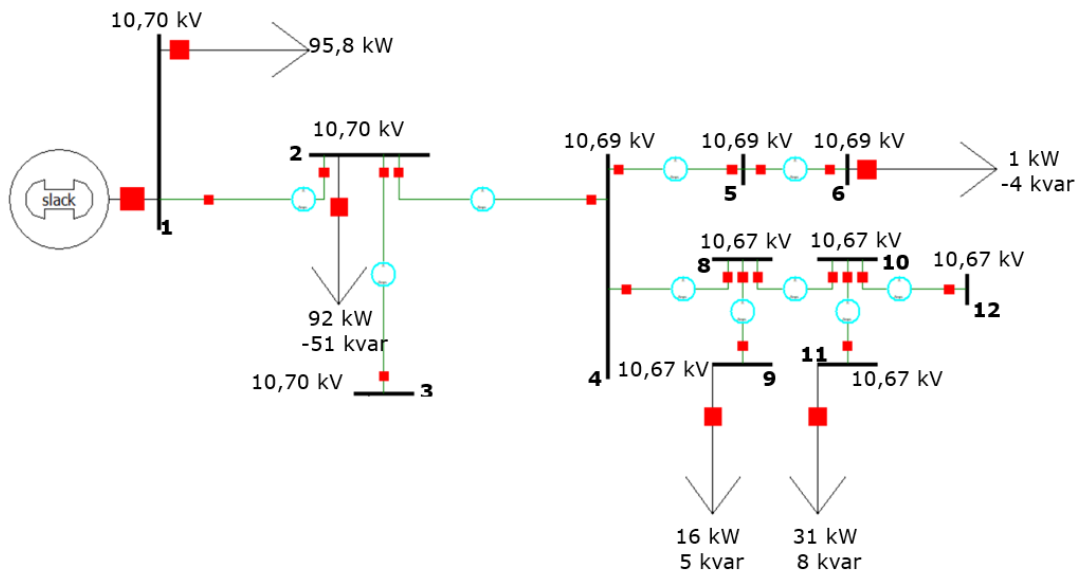
Joonis L1.1 PWS mudel fiider üks



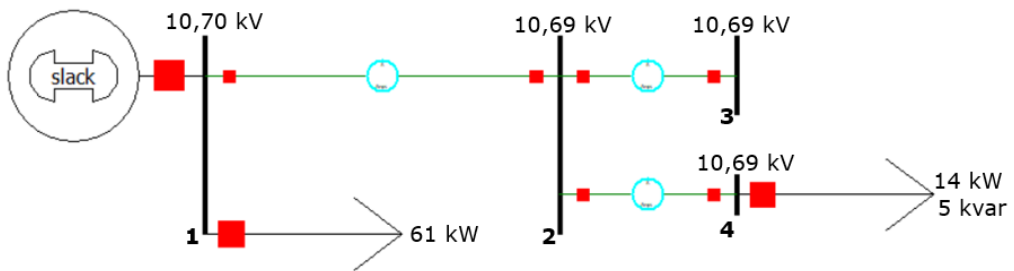
Joonis L1.2 PWS mudel fiider kaks



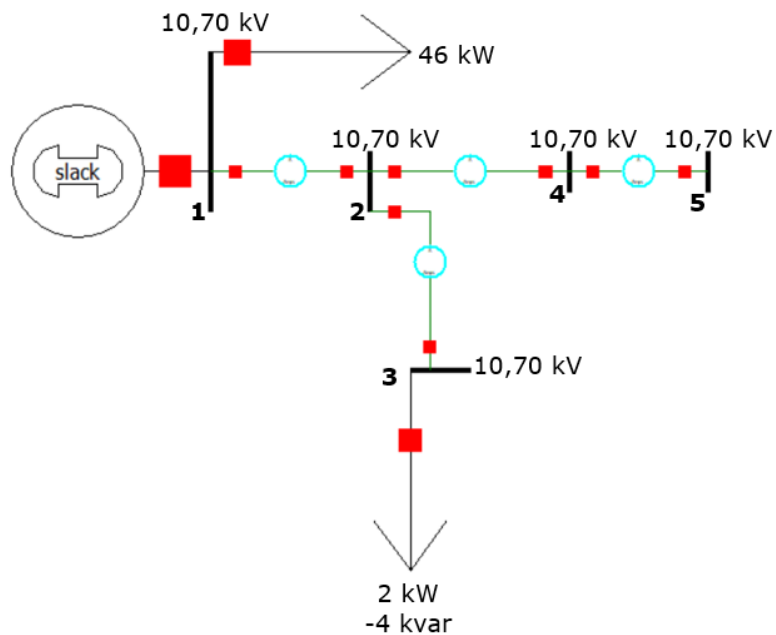
Joonis L1.3 PWS mudel fiider kolm



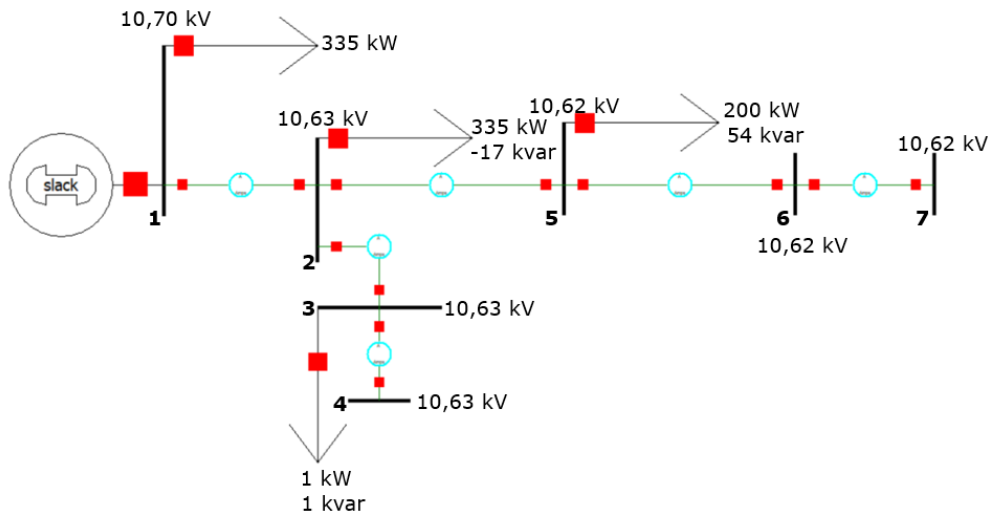
Joonis L1.4 PWS mudel fiider neli



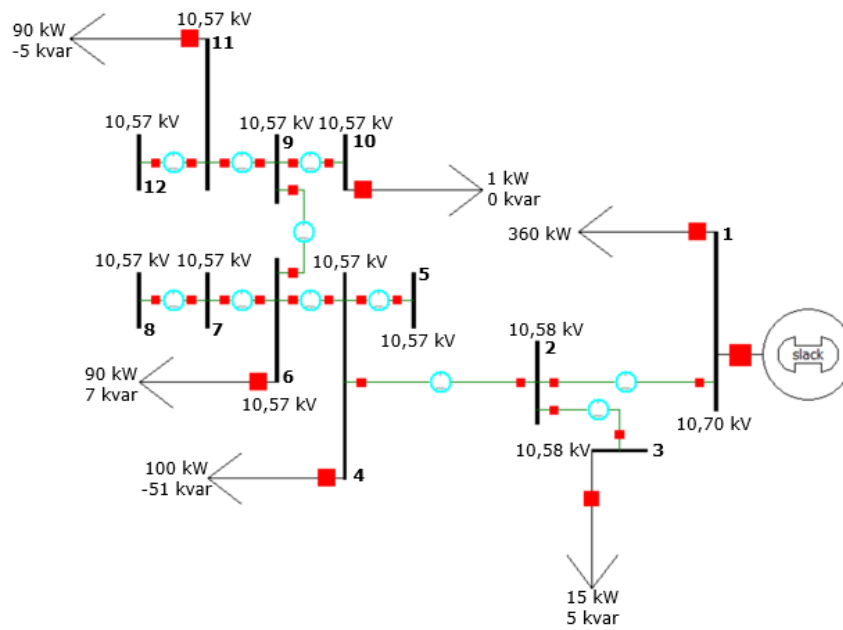
Joonis L1.5 PWS mudel fiider viis



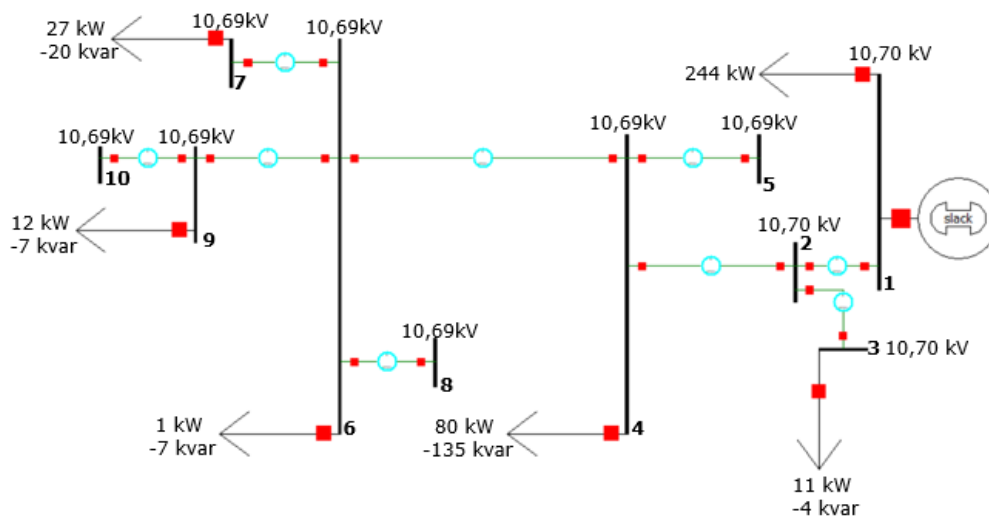
Joonis L1.6 PWS mudel fiider seitse



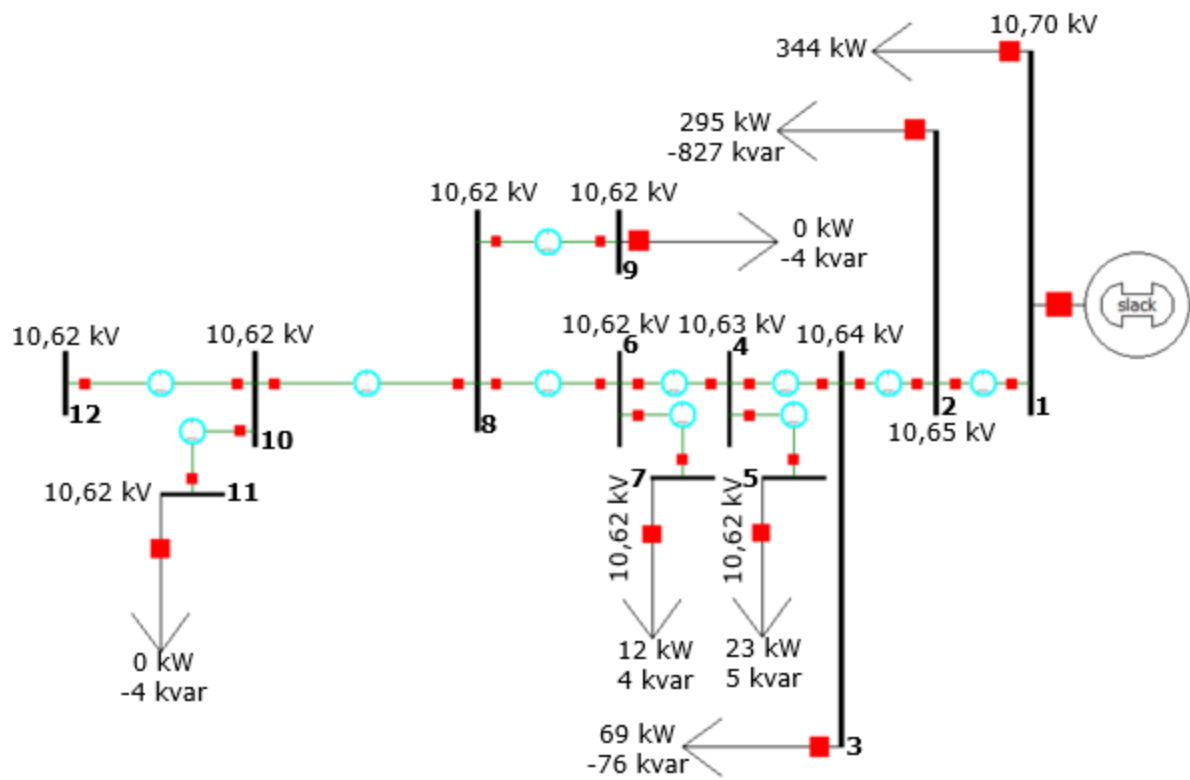
Joonis L1.7 PWS mudel fiider kaheksa



Joonis L1.8 PWS tarkvaraga modelleeritud ümbertoide läbi toitealajaama kolm



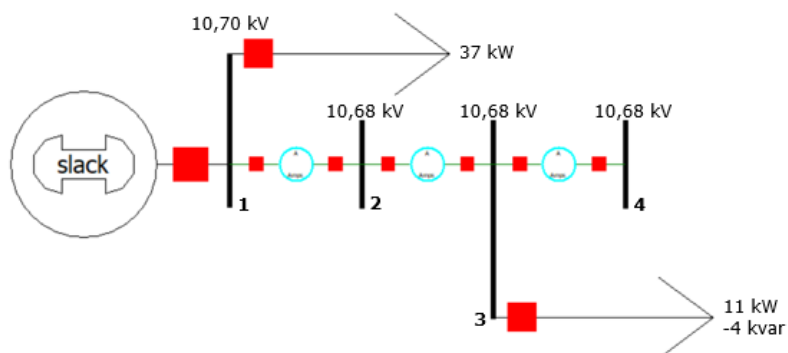
Joonis L1.9 PWS tarkvaraga modelleeritud ümbertoide läbi toitealajaama kaks



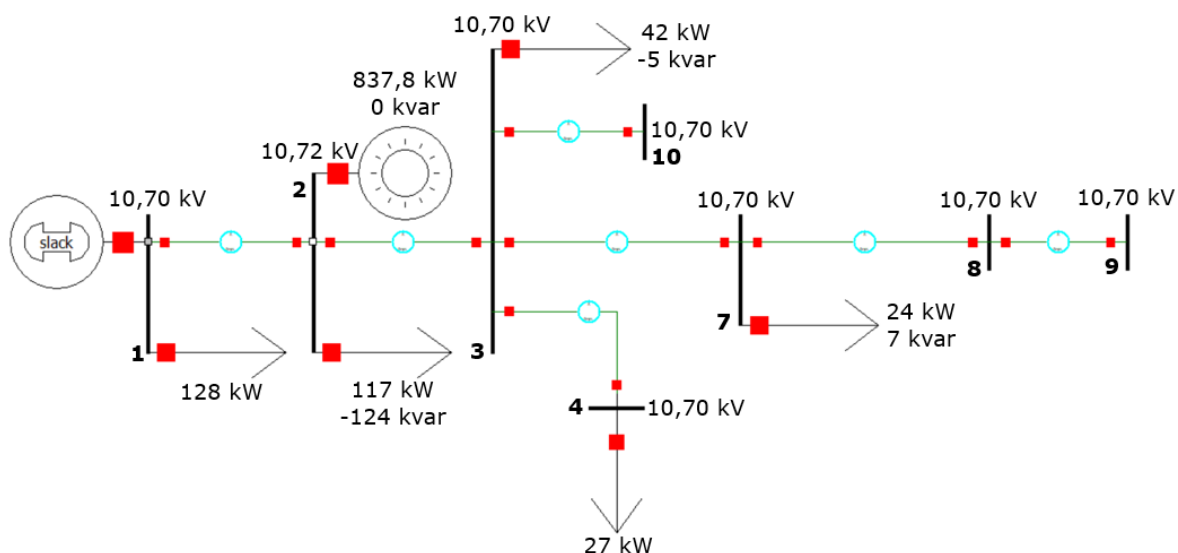
Joonis L1.10 PWS tarkvaraga modelleeritud ümbertoide läbi toitealajaama kolm

Lisa 2 PWS Modelleerimise mudelid tootmisüksustega

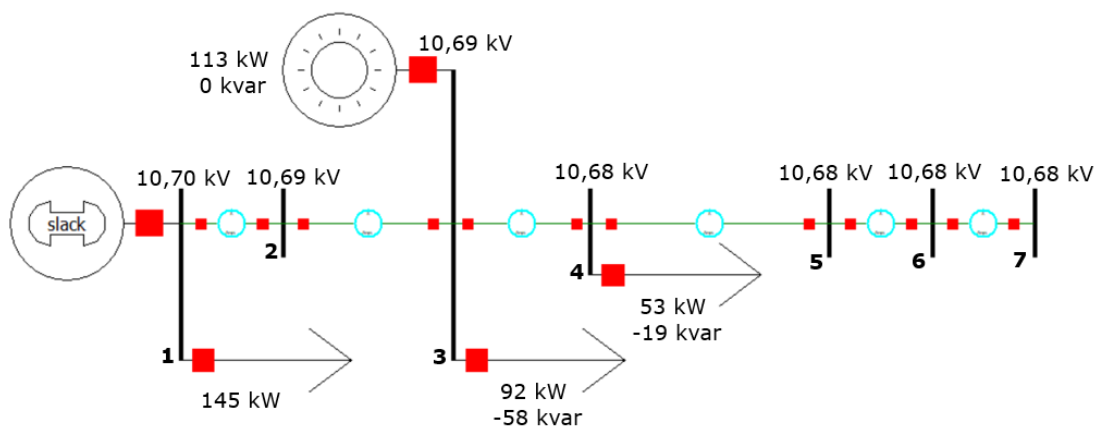
Lisas 2 on välja toodud PWS modelleerimise mudelid tootmisüksustega.



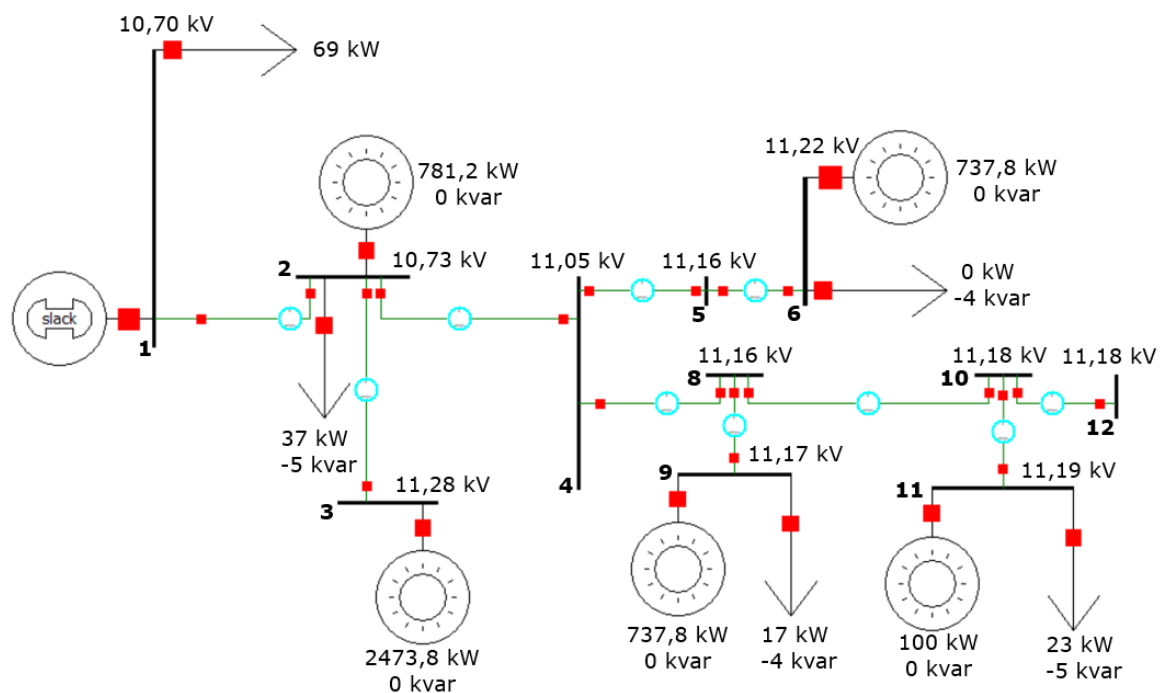
Joonis L2.1 PWS mudel fiider üks tootmisüksustega



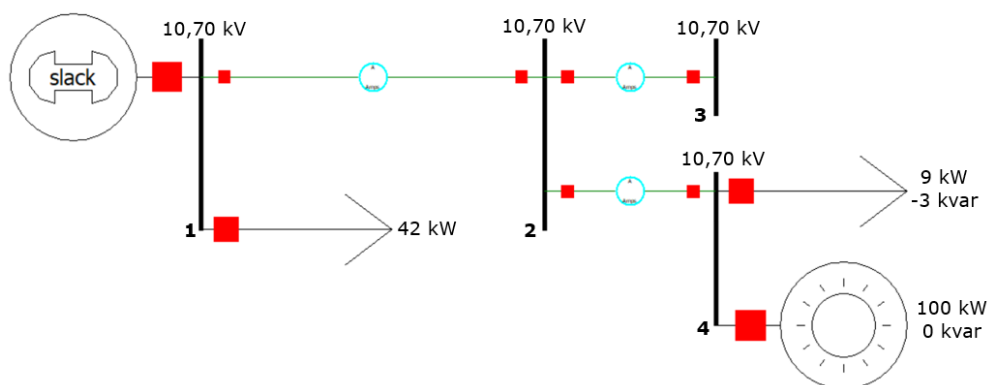
Joonis L2.2 PWS mudel fiider kaks tootmisüksustega



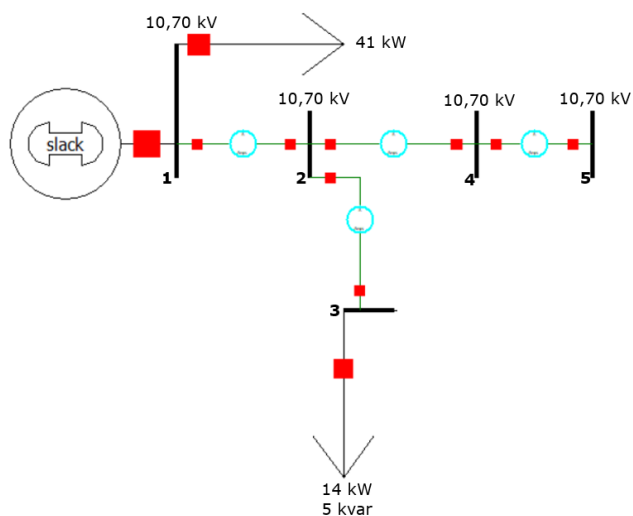
Joonis L2.3 PWS mudel fiider kolm tootmisüksustega



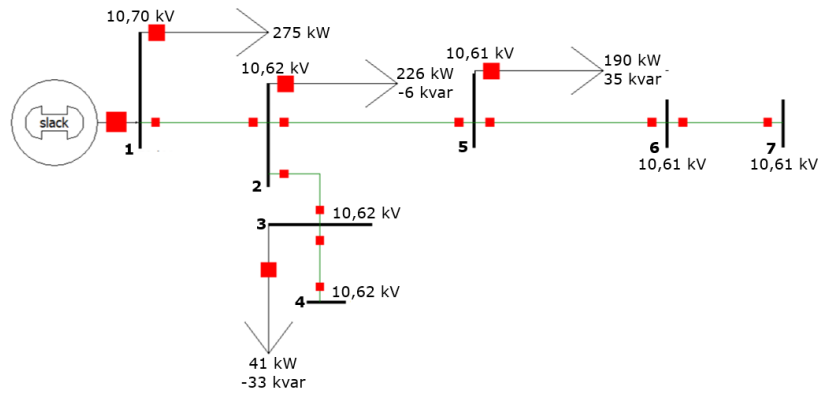
Joonis L2.4 PWS mudel fiider neli tootmisüksustega



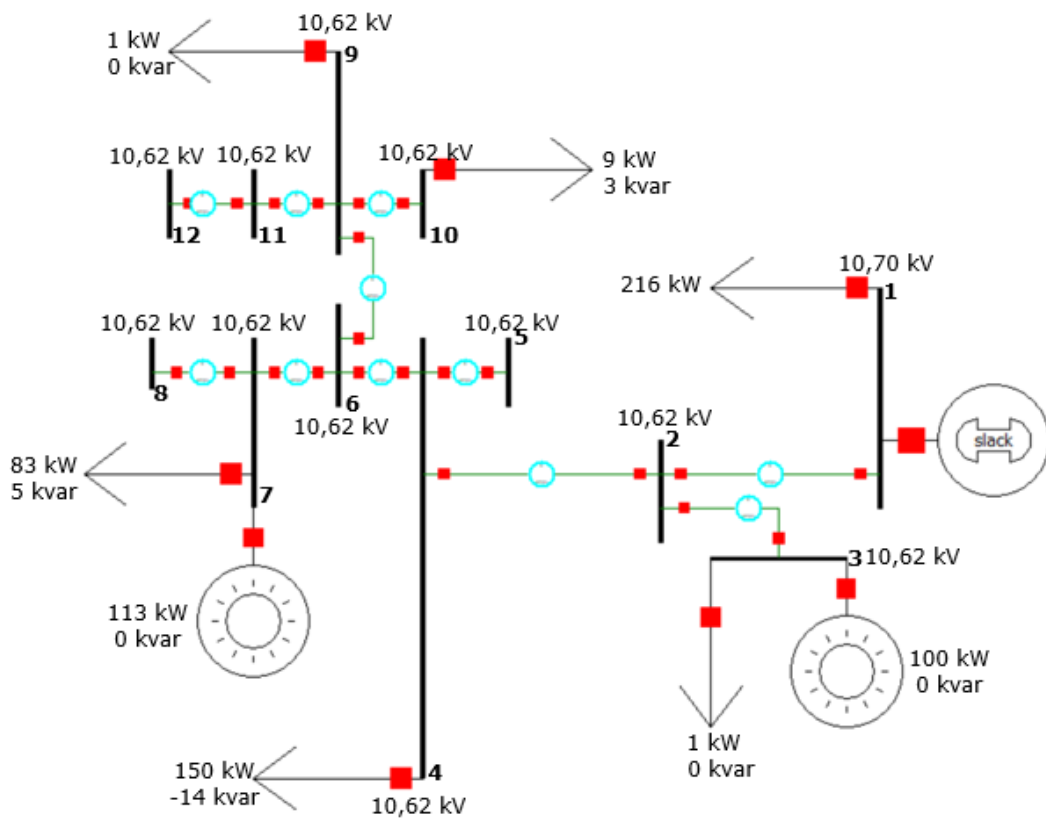
Joonis L2.5 PWS mudel fiider viis tootmisüksustega



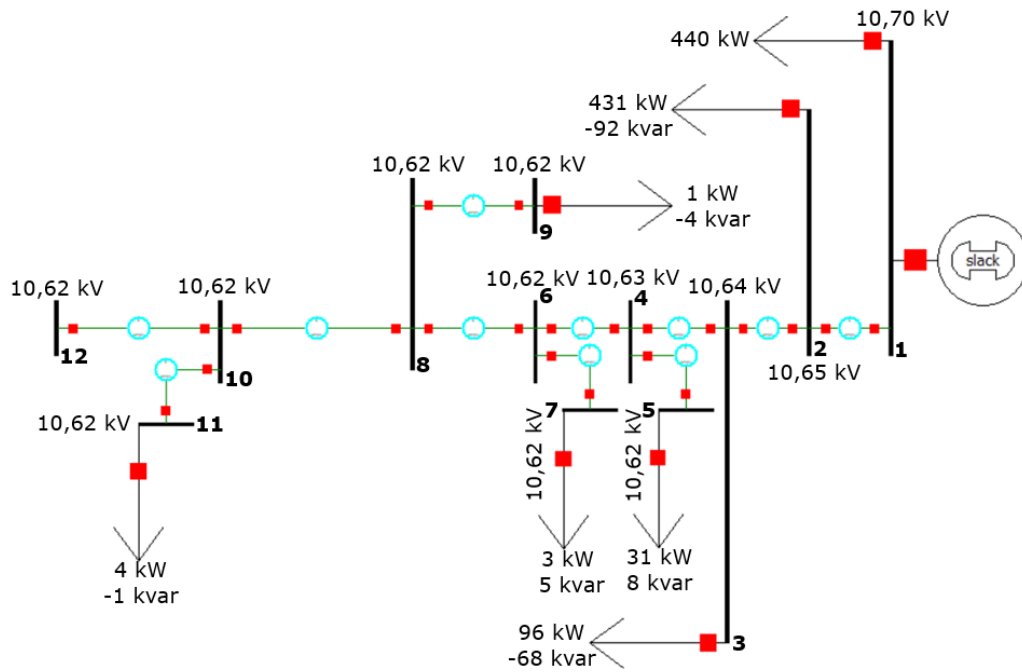
Joonis L2.6 PWS mudel fiider seitse tootmisüksustega



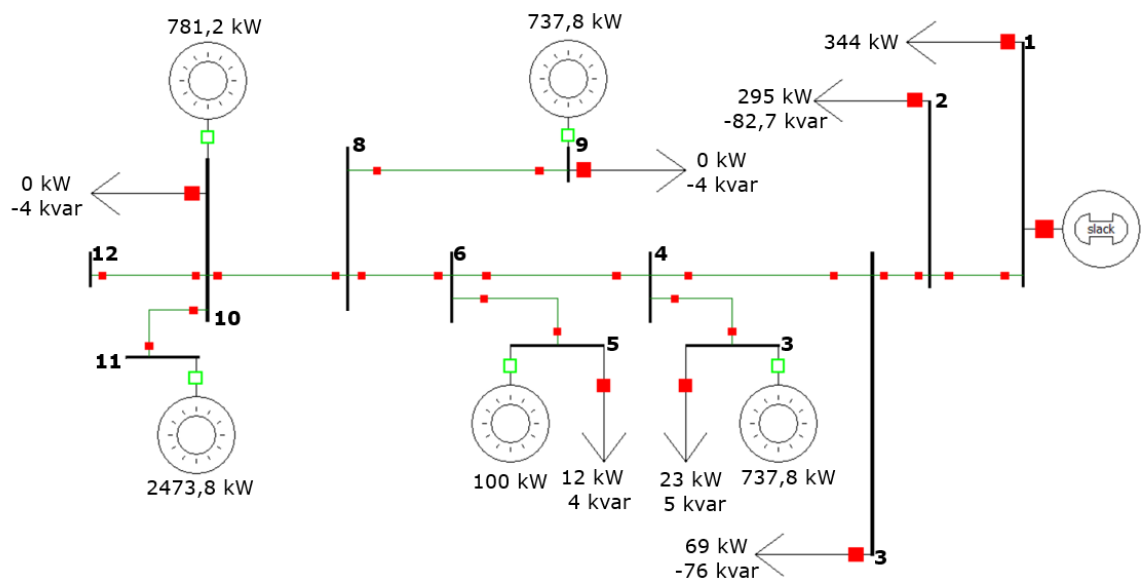
Joonis L2.7 PWS mudel fiider kaheksa tootmisüksustega



Joonis L2.8 Esimese ja teise fiidri ümbertoide PWS mudelis tootmisüksustega



Joonis L2.9 Teise fiidri ümbertoide PWS mudelis tootmisüksustega



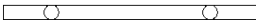










Joonis L2.10 Neljanda fiidri ümbertoide PWS mudelis tootmisüksustega

Lisa 3 Avariitoiteskeemi tingmärgid

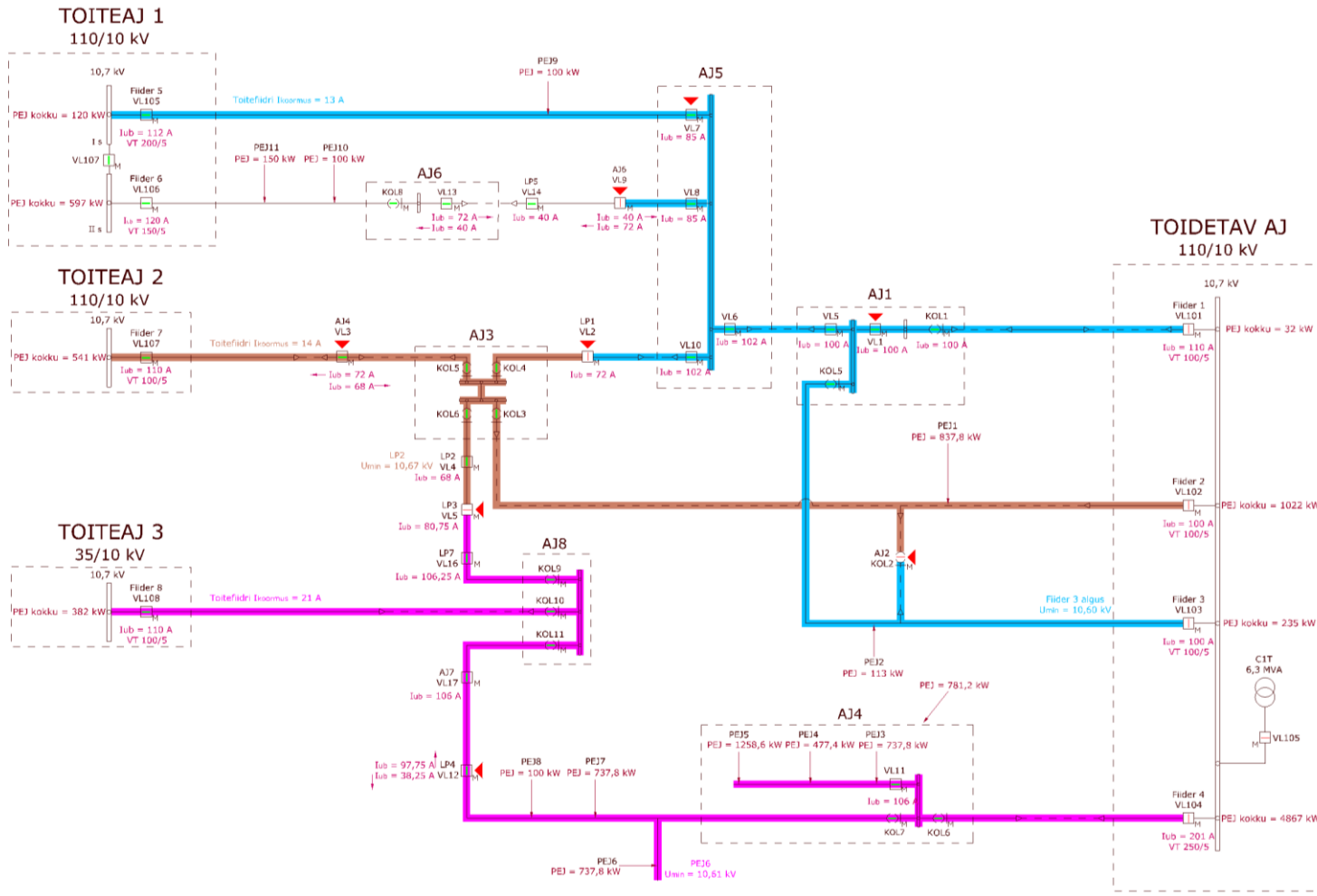
Lisas 3 on välja toodud avariitoiteskeemi tingmärgid koos vastavate selgitustega.

Tabel L3.1 Avariitoiteskeemi tingmärgid koos selgitustega

Tingmärk	Seletus
	Õhuliin
	Kaabelliin
	Alajaama latt
	Kahemähiseline trafo
	Alajaam
	Võimsuslüliti avatud ja suletud asendis
	Koormuslüliti (suletud asendis)
	Normaallahutuspunkt avatud ja suletud asendis
	Mootoriga ehk kaugjuhitav lüliti
Tootmisüksuseid kokku fiidril = X kW	Näitab, kui palju on tootmisüksuseid kokku fiidril
Tootmisüksuse nimetus Maksimaalne tootmisvõimsus = X kW 	Tootmisüksus koos alajaama nimetuse ja maksimaalse tootmisvõimsusega
	Ümbertoide

Lisa 4 Piirkonnaalajaama tootmisüksusteta avariitoiteskeem

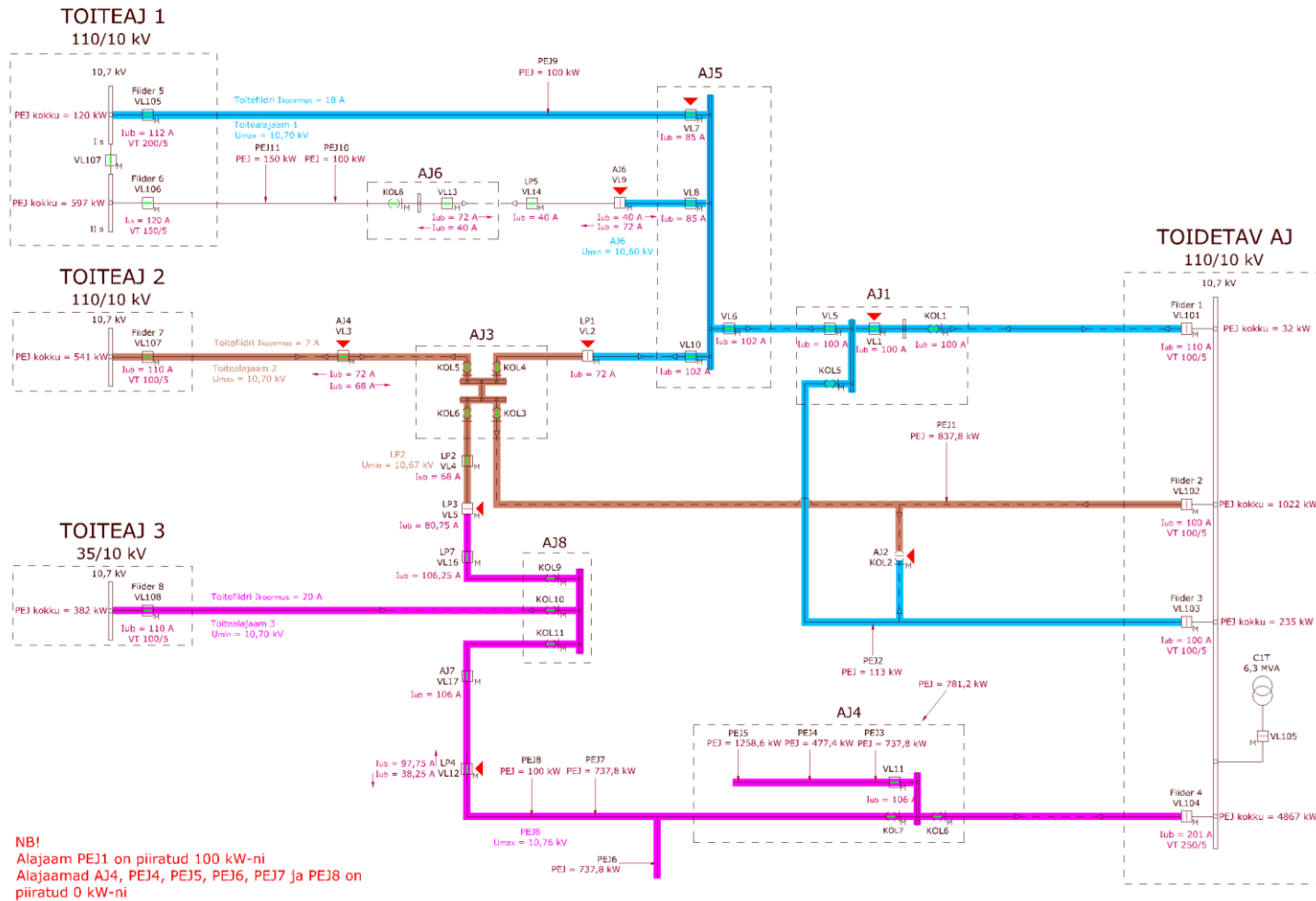
Lisas 4 on välja toodud piirkonnaalajaama tootmisüksusteta avariitoiteskeem.



Joonis L4.1 Avariitoiteskeem tootmisüksusteta

Lisa 5 Piirkonnaalajaama tootmisüksustega avariitoiteskeem

Lisas 5 on välja toodud piirkonnaalajaama tootmisüksustega avariitoiteskeem.



Joonis L5.1 Avariitoiteskeem tootmisüksustega